



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y TIPOS DE FIBRAS DE ASBESTO EN MUESTRAS TOMADAS EN DOS AMBIENTES LABORALES Y EN SUBSUELOS CONTAMINADOS DE SIBATÉ – COLOMBIA

Edwin Arias Angarita

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de medicina, Departamento de Toxicología
Bogotá D.C., Colombia
2020

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y TIPOS DE FIBRAS DE ASBESTO EN MUESTRAS TOMADAS EN DOS AMBIENTES LABORALES Y EN SUBSUELOS CONTAMINADOS DE SIBATÉ – COLOMBIA

Edwin Arias Angarita

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Toxicología

Director (a):

MD. MSC. Alba Isabel Rodríguez Pulido

Codirector (a):

PhD., Doctor, Físico, John William Sandino Del Busto

PhD., Doctor, Ing. Mecánico, Carlos Mario Garzón Ospina

Línea de Investigación:

Efectos adversos en la salud por exposición ocupacional y ambiental a sustancias químicas

Grupo de Investigación:

Toxicología Ambiental y Ocupacional “TOXICAO”

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Toxicología
Bogotá D.C, Colombia
2020

Dedicatoria:

A Dios por ser mi roca, fortaleza y apoyo en todo momento, gracias al padre celestial tengo la oportunidad de seguir aprovechando las oportunidades que Él me ofrece, como también el discernimiento a través del espíritu santo.

A mi padre Jorge Arias Ríos quién fue y ha sido el ejemplo de superación y disciplina; de quien adquiriré la mejor perspectiva de la vida.

A mi madre Luz Mireya Angarita Pallares, quién siempre me ha apoyado para alcanzar mis objetivos académicos y se ha esforzado en brindarme todo el amor incondicional.

A mi hermana Orfilia Arias Angarita por ser mi aliento, mi polo a tierra, mi apoyo y más fiel compañera en todos mis proyectos.

A mi sobrina Adriana E Arias Arias, quien me ha dado la oportunidad de ser padre y abuelo, la niña de mis ojos y por quién he luchado en cumplir mis metas y objetivos.

A mi amigo Carlos Alberto Castaño Valencia, por animarme y apoyarme en esta etapa de formación que empecé con mucho esfuerzo y convicción.

*“El sabio oirá y crecerá en conocimiento, y
el inteligente adquirirá habilidad”.*

Proverbios 1:5

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Edwin Arias Angarita

Autor

Fecha 02/12/2020

Agradecimientos

A la Médica Alba I. Rodríguez Pulido, profesora asociada de la Universidad Nacional, Coordinadora de la Maestría en Toxicología y Directora de tesis, quién con su experiencia y trayectoria profesional me orientó en todo el proceso de aprendizaje hacia la investigación, siendo un apoyo en cada etapa del proyecto, con el objetivo de obtener resultados significativos de aporte académico y científico.

Al Doctor John W. Sandino del Busto por introducirme a un área del conocimiento como lo es la microscopía a tal punto que se convirtió en un reto para la investigación, que permitiera afianzar de manera rigurosa el análisis procedimental de las muestras analizadas, su gestión, apoyo y experiencia en todas las etapas del proyecto.

Al Doctor Carlos M. Garzón Ospina, quién a través de su amplia experiencia me orientó en la toma de decisiones y direccionamiento de la investigación que permitiera el cumplimiento de los requisitos exigidos, obteniendo resultados de gran importancia para la academia.

Al laboratorio de Higiene y Toxicología Industrial de la Compañía de Seguros Positiva y en su nombre la Dra. Sonia Agudelo Rojas-directora y el Dr. Francisco Ortiz, jefe de gestión del riesgo, por permitirme realizar análisis en las instalaciones (laboratorio) y apoyarme en la búsqueda de empresas para la toma de muestras.

Al laboratorio interfacultades de microscopia óptica, por permitirme hacer uso de los equipos para proceder al desarrollo de la investigación.

Al laboratorio de toxicología de la maestría en toxicología, facultad de medicina, Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá.

Al Grupo de física de la facultad de ciencias y al laboratorio de Microscopia de Barrido Electrónico.

Al Instituto de Salud Pública de Chile (ISP), Departamento de salud ocupacional, laboratorio de toxicología y todo el equipo de trabajo por permitirme desarrollar mi pasantía en estas instalaciones y en especial al Dr. Carlos A. Yáñez y familia quién me brindó el calor de un hogar durante mi estancia en ese país.

A mi amigo Robert J. Aldana Salcedo, por estar presente en estos dos años compartiendo grandes momentos y brindando palabras de apoyo en los momentos más difícil de la investigación.

A todos mis compañeros de la maestría cohorte 2016, por ayudarme a crecer como persona, profesional y espiritualmente, en especial a Karen C. Martínez, Carolina Galeano Barbosa, Yenny C. Vargas y Blas A. Alarcón.

Resumen

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y TIPOS DE FIBRAS DE ASBESTO EN MUESTRAS TOMADAS EN DOS AMBIENTES LABORALES Y EN SUBSUELOS CONTAMINADOS DE SIBATÉ - COLOMBIA

El riesgo que representan las fibras de asbesto inhaladas a través del tracto respiratorio para la salud de los individuos está asociado a la tipología, morfología y la composición química de dichas fibras. En esta disertación de maestría se estudia la tipología, morfología y composición química de fibras de asbesto presentes ya sea en ambientes laborales, ya sea en el subsuelo de un área urbana. Se analizaron 13 muestras recolectadas en ambientes laborales y 6 muestras recolectadas en un subsuelo urbano. Para la caracterización de las fibras se utilizó microscopía de contraste de fase, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía por dispersión de energía y difracción de rayos X. Para el estudio en ambientes laborales se monitoreó una empresa de transporte del municipio de Marinilla, Antioquia, y una empresa de construcción en el municipio de Sibaté, Cundinamarca. Se determinó la concentración de asbesto en el ambiente laboral, al igual que la dosis estimada de inhalación. Para el estudio del subsuelo en área urbana se tomaron 3 muestras a diferentes profundidades. Para los trabajadores de la empresa de transporte (que realizaban actividades de remache de bandas) se estableció, por microanálisis químico por dispersión de energía (EDS), una exposición a asbesto de tipo crisotilo de hasta 0.11 fibras/cm³, la cual equivale a una dosis de exposición estimada (DEE) de 1.41x10⁻⁶ fibras contaminante/kg/peso corporal/día. Esta dosis registrada, se estima puede llevar al desarrollo de una asbestosis en un periodo de hasta 10 años, así como, también a desarrollar algún tipo de cáncer por exposición a asbesto en un periodo de hasta 40 años, siempre y cuando no se adopten medidas preventivas en el lugar de trabajo, como lo son controles en la fuente (sitio de trabajo), en el medio (dirección del viento) y en el individuo (el uso de elementos de protección personal para agentes tóxicos). Ya para las muestras del subsuelo (municipio de Sibaté) por medio de microanálisis químico y difracción de rayos X se determinó la presencia de asbesto anfibólico (actinolita y tremolita). Es de resaltar que las muestras fueron preparadas y analizadas en laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia. En esta tesis de maestría se presenta un procedimiento para el refinamiento de la composición química de las fibras de asbesto, por espectroscopía de dispersión de energía en el microscopio electrónico de barrido. Este procedimiento permite estimar la composición de la fibra sin influencia del sustrato por medio de deconvolución de las contribuciones de la fibra y del sustrato al espectro EDS general, a través de simulación física de Monte Carlo.

Palabras clave: Asbesto, Ambientes laborales, Microscopía electrónica de barrido, Microscopía de contraste de fase, Difracción de rayos X.

Abstract

DETERMINATION OF THE CONCENTRATION AND TYPES OF ASBESTOS FIBERS IN SAMPLES TAKEN IN TWO WORK ENVIRONMENTS AND IN CONTAMINATED SUBSOILS OF SIBATÉ – COLOMBIA

The risk that inhaled asbestos fibers through the respiratory tract pose to the health of individuals is associated with the typology, morphology and chemical composition of these fibers. This master's dissertation studies the typology, morphology and chemical composition of asbestos fibers present either in working environments or in the subsoil of an urban area. Thirteen samples collected in work environments and six samples collected in an urban subsoil were analyzed. For the characterization of the fibers, phase contrast microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersion spectroscopy and X-ray diffraction were used. For the study in work environments, a transport company in the municipality of Marinilla, Antioquia, and a construction company in the municipality of Sibaté, Cundinamarca, were monitored. The concentration of asbestos in the work environment was determined, as was the estimated inhalation dose. For the study of the subsoil in urban areas, three samples were taken at different depths. For the workers of the transport company (who performed band riveting activities), an exposure to chrysotile asbestos of up to 0.11 fibers per cm^3 was established by EDS chemical microanalysis, which is equivalent to an estimated exposure dose (EED) of 1.41×10^{-6} polluting fibers/kg/body weight/day. This registered dose is estimated to lead to the development of asbestosis in a period of up to 10 years, as well as to the development of some type of cancer due to exposure to asbestos in a period of up to 40 years, as long as preventive measures are not adopted in the workplace, such as controls at the source (work site), in the environment (wind direction) and on the individual (the use of personal protective elements for toxic agents). For the subsoil samples (municipality of Sibaté), the presence of amphibolytic asbestos (actinolite and tremolite) was determined by means of chemical microanalysis and X-ray diffraction. It is worth mentioning that the samples were prepared and analyzed in laboratories of the National University of Colombia. This master's thesis presents a procedure for the refinement of the chemical composition of asbestos fibers, by energy dispersion spectroscopy in the scanning electron microscope. This procedure allows to estimate the composition of the fiber without influence of the substrate by deconvolution of the contributions of the fiber and the substrate to the general EDS spectrum, through physical simulation of Monte Carlo.

Keywords: Asbestos, Working environments, Scanning electron microscopy, Phase contrast microscopy, X-ray diffraction.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract.....	X
Lista de figuras.....	XIV
Lista de tablas	XVII
Lista de abreviaturas.....	XIX
Introducción	1
1. Planteamiento de la investigación	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Planteamiento del problema	10
1.3 Justificación.....	12
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Objetivo General.....	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
2. Marco teórico.....	15
2.1 Generalidades del asbesto.....	15
2.1.1 Crisotilo	17
2.1.2 Anfíboles.....	18
2.2 Toxicología del Asbesto	20
2.2.1 Vía de ingreso, transporte, distribución, y eliminación de las fibras de asbesto	20
2.2.2 Mecanismo de daño de las fibras de asbesto	21
2.3 Niveles de exposición laboral al asbesto y su relación con la problemática de daño en la salud	23
2.4 Técnicas de caracterización para fibras de asbesto	24
2.4.1 Metodología NIOSH 7400, asbesto y otras fibras por Microscopía de contraste de fase	24
2.4.2 Microscopía de contraste de fase	25
2.4.3 Microscopía electrónica de barrido	28
2.4.4 Técnica de espectroscopía por energía dispersa (EDS)	31
2.4.5 Difracción de rayos X.....	32

3. Materiales y métodos.....	35
3.1 Tipo de estudio	35
3.2 Población y muestra de estudio	35
3.2.1 Población	35
3.2.2 Muestras	35
3.2.3 Área geográfica	35
3.3 Materiales, reactivos y equipos	35
3.3.1 Materiales.....	35
3.3.2 Reactivos	36
3.3.3 Equipos	36
3.4 Etapas de la investigación	37
3.4.1 Etapa 1. Selección de empresas y población a estudiar.....	37
3.4.2 Etapa 2. Desarrollo de pruebas preliminares experimentales	39
3.4.3 Etapa 3. Muestreo en campo.....	48
3.4.4 Etapa 4. Análisis por microscopía	54
3.4.5 Etapa 5. Resultados y conclusiones	55
3.5 Criterios de recuento de fibras y método estadístico para estudio de los resultados de microscopía por contraste de fase	55
3.6 Estimación de la dosis de exposición inhalada en trabajadores expuestos.....	60
3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido	62
3.8 Análisis por difracción de rayos X	63
4. Consideraciones éticas	65
5. Declaración de conflicto de intereses	66
6. Financiación.....	67
7. Resultados	68
7.1 Resultado del desarrollo de pruebas preliminares en el laboratorio	68
7.1.1 Caracterización de fibras.....	68
7.1.2 Recuento de fibras	69
7.1.3 Morfología de las fibras y análisis químico de la roca de asbesto y del material de referencia.....	70
7.2 Muestreo en campo	72
7.2.1 Ambientes laborales: monitoreo y/o toma de muestras en los individuos	72
7.2.2 Toma de muestras del subsuelo.....	73
7.3 Microscopía de contraste de fase	73
7.3.1 Análisis de datos del muestreo en campo en ambiente laborales.....	73
7.3.2 Determinación de la concentración de fibras a la que está expuesta la población estudiada	74
7.3.3 Estimación de la exposición: cálculo de la dosis inhalada en trabajadores expuestos	80
7.3.4 Microscopía electrónica de barrido.....	82
7.3.5 Espectroscopía por dispersión de energía: efecto del nivel de vacío de la columna del microscopio y del voltaje de aceleración en la composición química del asbesto	89
7.3.6 Difracción de rayos X: caracterización de las muestras del subsuelo	93
8. Discusión.....	96

9. Conclusiones.....	99
9.1 Conclusiones.....	99
9.1.1 Sobre los protocolos de obtención de las muestras	99
9.1.2 Sobre la caracterización de las fibras	99
9.1.3 Sobre la exposición a fibras de asbesto en ambientes laborales y la presencia de fibras de asbesto en subsuelo urbano	100
9.1.4 Sobre los aspectos toxicológicos ocupacionales.....	101
10. Recomendaciones.....	102
Anexo A: Metodología NIOSH 7400.....	105
Anexo B: Protocolo para la toma de muestras de fibras de asbesto y otro tipo de fibras en aire de tipo laboral.....	107
Anexo C: Instructivo para el uso del vaporizador de acetona	108
Anexo D. Protocolo para la caracterización de fibras de asbesto por microscopía de contraste de fase.....	109
Anexo E. Consentimiento informado	110
Anexo F. Protocolo para la toma de muestras en materiales con asbesto.....	111
Anexo G: Aval comité de ética	112
Anexo H. Registro del cálculo sobre el recuento de fibras en aire en ambientes laborales.....	113

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Estructuras básicas de polisilicatos de asbesto.....	15
Figura 2-2. Flexión de las láminas de crisotilo	17
Figura 2-3. Estructura concéntrica del crisotilo	18
Figura 2-4. Modelo de estructura de anfíboles que muestra la cadena de tetraedros, la tira de octaedros y los sitios M (4) y A.....	19
Figura 2-5. Cadenas dobles de los anfíboles en 2D	19
Figura 2-6. Mecanismo de daño de las fibras de asbesto.....	22
Figura 2-7. Diagrama de bloques para mostrar la translocación primaria (flechas negras) y secundaria (flechas blancas) de fibras de asbesto	23
Figura 2-8. Tren de muestreo y ubicación en el trabajador.....	25
Figura 2-9. Diagrama recortado de un microscopio de contraste de fase vertical moderno [76].....	26
Figura 2-10. Relaciones de fase de onda de microscopía de campo claro	27
Figura 2-11. Tren óptico del microscopio de contraste de fase.....	27
Figura 2-12. Sistemas de contraste de fase positivo y negativo	28
Figura 2-13. Esquema básico de funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido	29
Figura 2-14. Interacción de electrones de alta energía con muestras.....	29
Figura 2-15. Generación de electrones SE (izquierda) y BSE	30
Figura 2-16. Electrones secundarios y retrodispersados	31
Figura 2-17. Expulsión de electrones mediante la técnica EDS.....	32
Figura 2-18. Generación de rayos X.....	33
Figura 2-19. Representación gráfica de la Ley de Bragg.....	33
Figura 2-20. Difractograma muestra de asbesto.....	34
Figura 3-1. Etapas de la investigación.....	37
Figura 3-2. Tren de muestreo, roca de asbesto y cabina de extracción.....	41
Figura 3-3. Vaporizador de acetona del Laboratorio de Toxicología Ambiental y Ocupacional, Universidad Nacional de Colombia.....	42
Figura 3-4. Representación de inyección de acetona al filtro.....	42
Figura 3-5. Filtros transparentados con acetona	43
Figura 3-6. Corte del filtro y rotulado	45
Figura 3-7. Muestra de cinta de carbono protegida y rotulada.....	46
Figura 3-8. Microscopio invertido de fase Eclipse TE300, marca Nikon	46

Figura 3-9. Patrón de referencia ASB/FIB-201 y ASB/FIB/203-1Chrysotile.....	47
Figura 3-10. Porción del filtro MEC expuesto a fibras de asbesto	47
Figura 3-11. Imágenes del microscopio Tescan Vega3 SB del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.	47
Figura 3-12. Tren de muestreo instalado en los trabajadores	51
Figura 3-13. Muestras rotuladas y embaladas	52
Figura 3-14. Toma de muestras en el subsuelo	53
Figura 3-15. Muestras rotuladas y empacadas	53
Figura 3-16. Codificación de muestras para análisis por MCF	53
Figura 3-17. Codificación de muestras para análisis por MEB	54
Figura 3-18. Codificación de muestras para análisis por DRX	54
Figura 3-19. Secado de las muestras	55
Figura 3-20. Substrato en cinta de carbono	55
Figura 3-21. Criterio de conteo de una fibra.....	57
Figura 3-22. Ilustración de exposición, dosis y efecto en vía respiratorio.....	61
Figura 3-23. Esquema de análisis seguido en la simulación de Monte Carlo de los espectros EDS.	63
Figura 3-24. Difractómetro Xpert PRO del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.	64
Figura 7-1. Micrografía de las fibras de asbesto identificadas en la roca de asbesto y patrón de referencia y que fueron observadas por microscopía de contraste de fase.	68
Figura 7-2. Resultado de conteo de fibras por microscopía de contraste de fase en el material de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile.....	69
Figura 7-3. Micrografías obtenidas en el MEB y espectros EDS para las fibras de la roca.	70
Figura 7-4. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS y longitud de las fibras de la roca.	70
Figura 7-5. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de patrón de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile.....	71
Figura 7-6. Muestras descartadas	75
Figura 7-7. Volumen de las muestras obtenido del monitoreo realizado e trabajadores de la empresa de transporte de carga.	76
Figura 7-8. Fibras contadas en las muestras de la empresa de transporte de carga	76
Figura 7-9. Resultados de la concentración de fibras por cm ³ obtenidos para las muestras de la empresa de transporte y comparados con el LOD.	79
Figura 7-10. Micrografías en el MEB y espectros EDS para las fibras de la muestra 38-3-22.	82
Figura 7-11. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra UN-12-25.....	83
Figura 7-12. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra 40-2-22.....	83
Figura 7-13. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra 38-13-25.....	84

Figura 7-14. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra P-1.	87
Figura 7-15. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra P-2.	87
Figura 7-16. Concentración de Mg, Si, y Fe relativa a la concentración del O, comparando el modo de operación de alto vacío con el modo de bajo vacío, patrón de referencia ASB/FIB-203-3.....	91
Figura 7-17. Concentración de Si, Mg y Fe relativa a la concentración del O, comparando el modo de operación de alto vacío con el modo de bajo vacío, muestra UN-12-25.	91
Figura 7-18. Difractogramas muestras P-1 y P-2.....	93
Figura 7-19. Fases identificadas en la muestra analizada del P2-3.....	94
Figura 7-20. Resultado refinado de la muestra P2-3	94

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Propiedades fisicoquímicas del asbesto.....	16
Tabla 2-2. Límites de exposición al asbesto definidos por organismos internacionales..	24
Tabla 3-1. Número de empresas y trabajadores por ciudad con actividad económica 5269502	38
Tabla 3-2. Desarrollo de pruebas preliminares por laboratorio	40
Tabla 3-3. Datos reportados por la bomba de muestreo durante el desarrollo de la prueba preliminar	41
Tabla 3-4. Resultados de la prueba de acetona efectuadas sobre los filtros MEC	43
Tabla 3-5. Resultados de transparentado con acetona HPLC sobre los filtros MEC	44
Tabla 3-6. Perfiles de cargo de los trabajadores empresa de transporte de carga	48
Tabla 3-7. Descripción de las actividades asociadas al perfil de cargo y funciones de los trabajadores del estudio en la empresa de transporte de carga.	48
Tabla 3-8. Perfiles de cargo trabajadores de la empresa de construcción.....	50
Tabla 3-9. Coeficientes variación para distintas cantidades de fibras contadas según una distribución de Poisson.....	59
Tabla 3-10. Valores del límite de detección para la concentración de fibras en aire en función del volumen de muestreo.....	60
Tabla 3-11. Parámetros de lectura por DRX	64
Tabla 7-1. Composición química para la roca de asbesto (muestra 1 y 2) y para el material de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile	71
Tabla 7-2. Composiciones químicas típicas de la serpentina y los anfíboles [93].....	72
Tabla 7-3. Identificación de las muestras recolectadas en ambientes laborales.....	72
Tabla 7-4. Datos de muestreo de tipo laboral en la empresa de transporte de carga, durante los días del 22 al 25 de mayo de 2018.	73
Tabla 7-5. Datos de muestreo empresa de construcción durante el mes de noviembre de 2018 (único día).	74
Tabla 7-6. Número de muestra vs trabajador vs tarea ejecutada	78
Tabla 7-7. Resultados de la DEE calculada día, año y acumulada.....	81
Tabla 7-8. Composición química de las muestras obtenidas para la empresa de transporte de las UN-1-22, 38-3-22 y UN-12-25	85
Tabla 7-9. Composición química de las muestras obtenidas para la empresa de transporte y que fueron impregnadas sobre la cinta de carbono.	85

Tabla 7-10. Composición química de las muestras obtenidas para el sitio de excavación del P-1.	88
Tabla 7-11. Composición química de las muestras obtenidas para el sitio de excavación del P-2.	88
Tabla 7-12. Composición química de la muestra en los modos de bajo y alto vacío para el material de referencia ASB-FIB-203-3.	89
Tabla 7-13. Composición química de la muestra en los modos de bajo y alto vacío para la muestra UN-12-25.	90
Tabla 7-14. Resultados de la nueva composición química obtenida de la simulación para el patrón de referencia ASB/FIB-203-3.	92
Tabla 7-15. Resultados de la nueva composición química obtenida de la simulación de la roca de asbesto.	92
Tabla 7-16. Resultados de la nueva composición química obtenida de la para las muestras UN-1-22, 38-3-22, 38-10-24, UN-12-25, P2-2.	92

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ASB	Asbesto
BSE	Backscattered Electrons
DEE	Dosis de exposición estimada
DRX	Difracción de Rayos X
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
EPA	Environmental Protection Agency
FIB	Fibra
F/cm ³	Fibras/centímetro cúbico
IARC	International Agency for Research on Cancer
keV	Kilo-electrón voltio
LOD	Level of Development
L/min	Litros/minuto
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
MEC	Membrana éster de celulosa
MET	Microscopía electrónica de transmisión
MCF	Microscopía de contraste de fase
MLP	Microscopía de luz polarizada
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OIT	Organización Internacional del Trabajo
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
SE	Secondary Electrons
TLV	Threshold Limit Value
TWA	Time weighed average
µg	Microgramos
µL	Microlitro

Introducción

La exposición a las fibras de asbesto ha sido un tema de preocupación ante diferentes organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, el Centro Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH, por sus siglas en inglés) al ser considerado un agente tóxico. Es el causante de enfermedades como la asbestosis, cáncer de pleura, estómago, y ovario [1].

El asbesto es un mineral perteneciente al grupo de silicatos fibrosos, que se divide en dos grupos, las serpentinas (crisotilo, lizardita, antigorita) y los anfíboles (antofilita, crocidolita, amosita, tremolita, y actinolita). Una de las características de estas fibras de asbesto es ser asbestiformes por su forma fina, delgada, alargada, curva y flexible que presentan [2].

Las fibras de asbesto presentan elevada resistencia a la tracción, muestran una gran longitud (relaciones de aspecto), incombustibilidad, estabilidad térmica, resistencia a la biodegradación, baja conductividad eléctrica [2], no se disuelven en agua, no se evaporan, son fuertes, y pobres conductores de calor [3].

A pesar de su carácter tóxico, el asbesto se usa intensivamente en la industria. Además, hay presencia de asbesto en infraestructuras antiguas y en sus desechos. Por sus atributos, el asbesto ha sido utilizado en sectores como la construcción, en el aislamiento de edificios, como componente de tejas y tuberías, entre otros. No obstante, esas cualidades contrastan con sus efectos en la salud. Se estima que hay 125 millones de personas expuestas al asbesto en su lugar de trabajo [4].

En Colombia el asbesto se ha usado por más de setenta años, por tanto, ha estado presente en el sector de la construcción, como el automotriz. La situación para el país con el transcurrir de los años no ha cambiado, teniendo en cuenta que hoy día el asbesto se ha convertido en la materia prima para la producción de diferentes productos como fibrocemento, pastillas para frenos, asbesto-cemento que son necesarios en diferentes actividades.

El reporte de consumo, importación y exportación de asbesto para el país, es poco conocido y en algunos casos llegan a tenerse reportes de periodos con más de 5 años,

situación que imposibilita conocer de forma certera como se ha comportado el uso de este mineral en la actualidad, es así que el riesgo medible por exposición sigue siendo incierto. Cuando se habla de “riesgo medible” este se relaciona con los valores límites permisibles TLV¹ definidos por organismos internacionales a los cuales un trabajador puede exponerse en su ambiente de trabajo. Para la aplicación de los límites de exposición es necesario aclarar que son valores de referencia para la evaluación y control de los riesgos inherentes a la exposición por inhalación de agentes químicos; pero que no constituyen una barrera definida de separación entre situaciones seguras y peligrosas. El valor límite de exposición laboral para el asbesto no debe considerarse como un valor que garantice la protección de la salud, ya que no se ha podido determinar el nivel por debajo del cual la exposición al asbesto no entraña ningún riesgo de cáncer y/o desarrollo de alguna enfermedad asociada a este agente tóxico.

El análisis, caracterización y cuantificación de exposición al asbesto, sigue siendo responsabilidad de las empresas en Colombia, no obstante, en cierto modo, el sector formal puede adoptar medidas que conlleven a garantizar la protección y salud de los trabajadores, caso contrario en el sector informal. A todo esto, y conforme avanza la legislación de prohibición del uso del asbesto en Colombia, se abre otra problemática como es la remoción, desmantelamiento y disposición final de aquellos materiales que fueron elaborados a base de este mineral, como son edificaciones, tejas, materiales de recubrimiento, entre otros. Además, la posible contaminación de suelos al ser usados como zonas de relleno de desechos; suelos que hoy día pueden ser parte del área rural o urbana de algún municipio.

Conforme a lo expuesto, esta tesis de maestría planteó el estudio en dos ambientes laborales y en subsuelo contaminado, determinando la concentración de la dosis por exposición laboral y la caracterización por técnicas de microscopía de fibras de asbesto. La recolección de las muestras se hizo en una empresa de transporte en el municipio de Marinilla, Antioquia, en trabajadores que realizaban actividades mecánicas de una empresa de transporte; también, en trabajadores del sector de la construcción que apoyaban actividades de excavación en el municipio de Sibaté, Cundinamarca. Se realizó; también, estudio de la eventual contaminación con asbesto, en el subsuelo del municipio de Sibaté, Cundinamarca.

Para la toma de muestras en ambientes laborales, se utilizó un tren de muestreo (bomba, manguera y una capucha con filtro de membrana de éster de celulosa (MEC)) sujeta al trabajador y ubicado a la altura de la zona respiratoria para que capturará las fibras en el aire. Toda vez que se desarrolló la toma de muestras en los dos ambientes laborales, cada uno de los filtros fue sometido a un proceso de preparación conforme lo establece la metodología NIOSH 7400 “filtro de membrana/microscopía óptica de contraste de fase” [5].

¹ Threshold Limit Value

Con los datos obtenidos, se hizo el cálculo de la dosis fibras/cm³ con el fin de compararlos con el límite de exposición de una jornada laboral, así mismo, se hizo una proyección de la dosis de exposición estimada (DEE), siguiendo los parámetros establecidos en la guía metodológica para la evaluación de riesgo en salud de la sociedad española de sanidad ambiental [6] y el dato establecido en el manual del factor de exposición [7] por grupo de edades en hombres, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), con el propósito de fijar la dosis de inhalación de un agente tóxico.

Las fibras de asbesto presentes en las muestras recolectadas (ambientes laborales y el subsuelo) fueron sometidas a análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), con el propósito de establecer su morfología y definir su composición química. Con miras de tener un mayor número de muestras se utilizó una cinta de carbono que impregnaba los residuos presentes en la capucha (cabezal de muestreo) y así someterlas a estudio. Todas las muestras fueron analizadas en un microscopio de marca Tescan, Vega 3, que opera en niveles de vacío entre 0,009 Pa a 2000 Pa (pascal), es decir, que puede operar tanto en alto como en bajo vacío a un voltaje de aceleración entre 10 y 30 keV. Las muestras del subsuelo, fueron estudiadas por Difracción de Rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido, con el fin de identificar la presencia de asbesto, empleando los patrones de referencia de la base de datos JCPDF y COD empleando el programa HighScore Plus. El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, por sus siglas en inglés), la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH, por sus siglas en inglés), la EPA, y la OMS sugieren el uso de técnicas de microscopía en la actualidad para caracterizar fibras de asbesto.

Con la identificación de las fibras en las muestras, y su composición química inicial, fue necesario utilizar un modelo de microanálisis elemental EDS que permitiera definir el tipo de asbesto al que pertenecían las fibras estudiadas [2]. Con las lecturas de elementos químicos en las fibras y con el propósito de definir el tipo de asbesto, se desarrolló un método de análisis inédito para estimar la composición química de las fibras de asbesto; para esto se realizó simulación física de Monte Carlo, por medio del programa Casino, el cual permite la identificación de la composición química ideal de las fibras estudiadas y de esta manera establecer si pertenecen algún tipo de asbesto.

Una de las limitaciones en el desarrollo de la tesis indiscutiblemente estuvo enmarcada por la falta de colaboración de las empresas donde se consideraba que presuntamente utilizaban el mineral (asbesto) como materia prima o en algunos subproductos. Esta situación redujo sobre manera el número de muestras, que permitiera tener un mayor número de participantes en la investigación, considerando diferentes escenarios de exposición, por tanto, la selección del número total de muestras en ambientes laborales y el subsuelo, se hizo por conveniencia y de esta manera desarrollar la investigación.

Finalmente, los resultados permitieron identificar el tipo de asbesto presente en las muestras analizadas, la concentración y la dosis estimada de exposición en ambientes laborales para la empresa del sector transporte y la contaminación del subsuelo en el

municipio de Sibaté. No obstante, se tuvo que descartar las muestras tomadas en los trabajadores de la empresa de construcción, dado que estas fueron manipuladas y no garantizaban resultados confiables.

1. Planteamiento de la investigación

1.1 Estado del arte

Un estudio realizado en escuelas que pertenecen al sistema de investigaciones astronómicas de los Estados Unidos, que fueron construidas con un sistema de paneles de aislamiento de asbesto encerrados en las columnas con una carcasa protectora de acero, en donde se evaluó el potencial de liberación de fibras en aire, mientras se realizaban pruebas de impacto en la estructura que posiblemente produjeran perturbaciones, realizando perforaciones en las columnas y áreas distintas de la edificación, tomando muestras en aire en trabajadores que realizaban actividades de limpieza y resane de las columnas con el propósito de identificar la concentración de exposición y las fibras presentes en el aire por microscopía de contraste de fase (MCF) y confirmadas (unas muestras limitadas) a través de microscopía electrónica de transmisión (MET), para verificar si las fibras visibles eran o no de asbesto, realizando estas pruebas en siete de las escuelas que pertenecen a este sistema. Los resultados demostraron que no había una exposición a fibras de asbesto en las habitaciones que habían sido rehabilitadas y las que se encontraban en estudio. Además, no hubo diferencia significativa en el análisis hecho por MCF y MET [8].

La agencia francesa para la protección del medio ambiente y salud ocupacional (AFSSE), recomienda el uso de la microscopía electrónica de transmisión analítica (META) con el objetivo de identificar las fibras que tienen un diámetro menor de $0.2 \mu\text{m}$, que no pueden ser leídas por microscopía de contraste de fase, que se usa de forma habitual en la identificación de fibras de asbesto [9]. Aquí vale la pena decir que en muchos casos el conteo de fibras por MCF no permite al analista tener en cuenta aquellas fibras de menor tamaño (< 3 micras) y que por esta técnica no pueden ser contadas, aun cuando se utiliza un equipo con buena resolución por el diámetro que presentan, por tanto, el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB) y electrónica de transmisión (MET) permiten tener un recuento riguroso y así mismo permite caracterizar del tipo de fibras estudiadas.

La dirección general del trabajo de Francia, llevó a cabo un estudio de campo entre los meses de noviembre de 2009 a octubre de 2010, caracterizando la exposición ocupacional a fibras de asbesto mientras se realizaban actividades en materiales que contenían este mineral, utilizando META. El objetivo principal fue establecer un método y validar la viabilidad del uso de META para el análisis de asbesto en aire, utilizando filtros individuales

muestreados en varios entornos ocupacionales. Los datos obtenidos fueron comparados con los resultados arrojados por MCF. El estudio concluye sobre la importancia de la toxicidad de las fibras cortas y finas, permitiendo así, establecer el carácter cancerígeno que poseen. Además, emite recomendaciones sobre la modificación del método de análisis para medir el nivel de fibras de asbesto en el aire en el lugar de trabajo, utilizando microscopía electrónica de transmisión analítica (META), para incluir las fibras más delgadas (menos de 0.2 μm de diámetro) no visible por microscopía de contraste de fase (MCF). También sugiere las formas para controlar el nivel de exposición ocupacional y algunas medidas de prevención [10].

En una fábrica de producción de láminas y fibrocemento en Irán se llevaron a cabo mediciones en aire, utilizando MCF y microscopía de luz polarizada (MLP). El tipo de fibra y su composición química fueron evaluados por microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis de rayos X de energía dispersiva (EDX). Los resultados establecieron que las concentraciones de fibra observadas en muchos procesos fueron más altas que el valor límite umbral propuesto por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales, mayor a 0.1 fibras/mililitro (f/mL), además, presentaron diferencias significativas entre las lecturas por MCF y MLP. Las lecturas de las fibras por MEB arrojaron que pertenecían al asbesto crisotilo. El estudio sugiere “el uso de métodos microscópicos distintos a MCF para mejorar las técnicas utilizadas actualmente” [11] y de esta forma garantizar resultados más robustos frente a las fibras estudiadas.

El tamaño de las fibras y su distribución se evaluó en una empresa textil utilizando microscopía electrónica de transmisión, en los procesos de cardado, hilado y tejido. En el estudio se determinaron la longitud y diámetro de las fibras detectadas, comparando las lecturas obtenidas por MEB, MCF y MET. Los resultados sugieren que, si bien se pueden detectar alrededor del 60% de las fibras por MEB, no sucedería lo mismo con las lecturas hechas por MCF, y sugiere que solo las fibras con un diámetro > 5 micras (μm) podrían ser leídas en un 70% por MEB [12], confirmando de esta manera que la técnica de microscopía de transmisión electrónica, es la que garantiza mejores resultados de lecturas de fibras de asbesto.

En el estado de San Pedro Barrientos de México, se realizó un estudio en zonas contaminadas con asbesto, utilizando dos técnicas de microscopía, una por MEB y otra por DRX, eligiendo 15 muestras de materiales comerciales y de uso cotidiano (tejas, tinacos, asbesto comprimido, tela, cuerda de asbesto, y aislante térmico) y 20 muestras de los suelos cercanos a la antigua fábrica. Los resultados se compararon entre sí, buscando identificar semejanzas y diferencias mineralógicas, además, definir cuál de las áreas estudiadas cercanas a la fábrica resultaba ser más peligrosa para la población por la presencia de asbesto, la clasificación y caracterización de las fibras fueron cotejadas con los datos de la literatura médica y de esta forma definir cuál tipo de asbesto era más peligroso. Las lecturas en los materiales que contenían asbesto, como las muestras del suelo, arrojaron la presencia de fibras de asbesto como el crisotilo (asbesto blanco) y

anfíbol (crocidolita, antofilita de forma predominante) como también sugiere la presencia de otro tipo de asbesto [13].

Se realizó una caracterización de polvo sedimentable, polvo superficial y polvo atrapado en vertederos de minas de asbesto en la provincia de Limpopo, Sudáfrica. “Las muestras se prepararon para análisis con difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, espectrometría de dispersión de energía y técnicas de fluorescencia de rayos X”. Los resultados por MEB arrojan la presencia de asbesto anfíbol, mientras que por DRX confirman la presencia del 11% de anfíboles y específicamente el 7% de serpentina dentro de la provincia de Limpopo [14].

En Colombia se han desarrollado investigaciones sobre el asbesto en ciertos escenarios laborales, donde se involucra el sector automotriz principalmente:

En talleres mecánicos de la ciudad de Bogotá en el año 2012, se llevó a cabo un estudio que evaluaba la exposición al asbesto y las afecciones respiratorias de los trabajadores. Las muestras se recolectaron durante seis días con la participación de 10 trabajadores que hacían actividades de remache de bandas, mecánicos de frenos y personal administrativo. Las muestras fueron analizadas por MCF. Los resultados evidenciaron una exposición a fibras de asbesto entre 0,003 y 0,157 f/cm³ en relación a los límites de exposición laboral, además, tres trabajadores presentaban engrosamiento pleural circunscrito (placas pleurales), con calcificaciones en dos de ellos, asociados a la exposición al asbesto [15].

Así mismo, en el 2012 Cely-García (autora del estudio anterior), realizó una investigación similar en talleres mecánicos, en donde, además, del método NIOSH 7400 MCF, incluye el estudio de las fibras por el método 7402 MET de la NIOSH. Monitoreó los talleres durante tres y cuatro días. Los resultados obtenidos por MET oscilaron entre 0.006 y 3.493 f/cm³ para la jornada completa de trabajo y 0.015 y 8.835 f/cm³ para las muestras tomadas durante 30 minutos, además, de confirmar que todas las fibras estudiadas eran de tipo asbesto crisotilo. Concluyendo que hay una elevada exposición a asbesto conforme a las lecturas hechas por microscopía electrónica de transmisión [16].

Otro estudio similar, se llevó a cabo durante los meses de noviembre de 2012 y julio de 2013 en talleres de la ciudad de Bogotá. Las muestras se recolectaron en dos talleres que realizaban actividades de reparación de transmisión con la participación de cuatro trabajadores durante tres y cinco días. Las muestras personales, se analizaron por MCF y MET. Los resultados establecieron que en uno de los días monitoreados excedió las concentraciones de f/cm³ por exposición laboral, y que solo el 4.3% de las muestras a corto plazo arrojaron el mismo resultado [17].

En el año 2013, se desarrolló un análisis teórico de la exposición a asbesto como resultado de la manipulación de frenos en talleres mecánicos ubicados en la localidad de Suba de la ciudad de Bogotá. El estudio se llevó a cabo con la participación de cuatro talleres, entrevistando a 107 trabajadores donde realizaban manipulación de frenos en flota liviana

y pesada, con el objetivo de determinar la concentración teórica de exposición al asbesto en los trabajadores. Los resultados del estudio establecieron que solo uno de los trabajadores que hacia remache de bandas presenta una exposición por encima del límite de exposición laboral [18].

En un estudio desarrollado en una fábrica de productos de fricción que utilizaban el asbesto crisotilo, con la participación de trabajadores activos, ex trabajadores y jubilados a quienes se les practicaron pruebas de función pulmonar y radiografía de tórax, con el objetivo de identificar algún tipo de enfermedad asociada a la exposición al asbesto. De las 148 radiografías evaluadas, 19 evidenciaron cambios consistentes con la exposición al asbesto de naturaleza parenquimatosa, mientras, que los resultados de la función pulmonar se consideraron normales [19].

Otra investigación realizó un enfoque multi-instrumental en relación a la textura de los asbestiformes en rocas masivas, analizando un conjunto de muestras morfológicamente distintas (serpentininas, metabasalto y piroxenos). Para la lectura de las muestras se utilizó microscopía óptica de luz polarizada, microscopía electrónica de barrido y transmisión combinada con espectrometría de dispersión de energía, espectroscopía micro-Raman y microtomografía de rayos X. Los resultados sugieren la identificación de minerales de asbesto por microscopía óptica de luz polarizada bajo ciertas condiciones y características, sin embargo, por MEB se recomienda caracterizar las proporciones atómicas y las texturas en diversas fases, dado que la caracterización de polimorfos cuando están incrustado en la roca anfitriona, es imposible. En cuanto a las lecturas por MET se diferencian todos los tipos de asbesto. Todas las muestras están compuestas por asbesto crisotilo y anfíboles. Las demás técnicas permitieron la identificación de otros tipos de compuestos asociados al tipo de roca, no obstante, el uso de microtomografía de rayos X ofrece la posibilidad de observar la morfología de los compuestos en 3D [20].

En una empresa de fibrocemento de la ciudad de Manizales, Colombia se realizó un estudio de corte transversal. La investigación pretendía asociar la prevalencia de patologías relacionadas con el asbesto, evaluando el nivel y tiempo de exposición como también el consumo de tabaco en los trabajadores, a quienes se les realizó radiografía de tórax. Los resultados mostraron una exposición acumulada a fibras de asbesto de todos los trabajadores en ambientes controlados de protección, sin embargo, en los trabajadores que se evidenció una exposición acumulada >10 fibras/ml/año y con una antigüedad laboral de más de 20 años, no presentaron daño pulmonar, resultados que fueron comparados con lo descrito en la literatura relacionada con la latencia de las enfermedades asociadas al asbesto [21].

Según cifras reportadas para el año 2010 en el documento del Plan Nacional para la prevención de la silicosis, neumoconiosis y asbestosis, estimaba que el 21% de los trabajadores que pertenecían a los imperios azucareros, industria textil, culturales y artesanales, industria automotriz, fabricación de papel cartón, fabricación de azulejos

mosaicos y ladrillos, demolición, excavación y construcción de casas, se encontraban expuestos a las fibras de asbesto [22,23]. Greenpeace, en su informe del año 2017, cita “256 empresas desarrollan 25 actividades con asbesto donde 7% de los trabajadores (688 de 15.170) están expuestos” [24], además, en la actualidad se desconoce el número de trabajadores que posiblemente se encuentran expuestos al asbesto en Colombia.

Algunos países han trabajado fuertemente en estudios sobre los daños colaterales que puede provocar la inhalación de fibras de asbesto, la cual se manifiesta con una asbestosis, fibrosis intersticial del tejido pulmonar, patología progresiva e incapacitante que se produce por las exposiciones superiores a 25 fibras/ml/año [25]. Desde el punto de vista de la medicina ocupacional y la salud pública, se debe tener presente la población no expuesta (NE), como son los familiares y población en general, quienes se ven expuestos a este agente tóxico, y que no siempre se incluye en estudios minuciosos que estimen el grado de exposición [26].

Así mismo, el plan nacional de salud ocupacional 2008 – 2012 [27] y posteriormente el plan nacional de seguridad y salud en el trabajo del periodo 2013 – 2021, plantea la preocupación sobre el cumplimiento de los objetivos del periodo terminado versus el iniciado, y la manera en que debe ser abordada la investigación de agentes tóxicos entre ellos el asbesto, “De los múltiples objetivos planteados solo uno apunta a impulsar el desarrollo técnico, tecnológico y científico del sistema general de riesgos laborales” [28], lo que obligará a las empresas y las administradoras de riesgos laborales dotarse de equipos para realizar el análisis (basados en técnicas específicas) de agentes tóxicos, como es el caso del asbesto crisotilo, muestras que una vez tomadas deben ser enviadas a laboratorios acreditados y certificados en el extranjero, puesto, que en Colombia no se dispone de metodologías de análisis acreditadas.

En resumen, el asbesto es utilizado en diferentes actividades, aumentando la proporción de uso en Colombia conforme a las actividades desarrolladas, figurando como uno de los agentes cancerígenos de preocupación para el gobierno nacional [29].

Las investigaciones sobre el asbesto en el contexto internacional y nacional, evidencian el potencial de daño que presentan las fibras de este mineral en la población expuesta; motivo por el cual es necesario evaluar aquella población, que puede convertirse a futuro en población epidemiológica de seguimiento por los efectos en la salud que se puedan presentar. De esta manera el uso de la microscopía permite establecer el potencial de concentración estimado y los tipos de fibras presentes en las muestras, constituyendo de esta manera en el avance de la toxicología ocupacional en Colombia.

1.2 Planteamiento del problema

El asbesto es clasificado por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer en el grupo 1², por este motivo es considerado como un agente tóxico que está íntimamente relacionado con enfermedades como la asbestosis, cáncer de pulmón y mesotelioma [30].

Según la OMS muchos países han adoptado medidas de prohibir el uso del asbesto en todas sus formas, al causar la muerte de 107.000 personas cada año en el mundo [31]. Así mismo, la Organización Internacional del Trabajo (OIT), ha presentado su postura frente al uso del asbesto, su prohibición y repercusiones en la salud, por tanto, ha diseñado varios esquemas, programas y “regulaciones normativas que proporcionan una base jurídica en medidas de prevención que protegen a los trabajadores” [32] y de esta forma prevenir las enfermedades relacionadas con este mineral.

El uso del asbesto solo está permitido en su forma de crisotilo, mas no, en el de tipo anfíbol. Dentro de los usos que ha tenido el asbesto se encuentran “el aislamiento de los edificios como componente de diversos productos (tejas, tuberías de agua, mantas ignífugas y envases médicos), como aditivo de los plásticos y en la industria automovilística (revestimiento de embragues y frenos, juntas y amortiguadores)”[4].

Ahora bien, en Colombia el uso del asbesto ha sido reportado en empresas como Eternit de Colombia, Pacífico S.A, Eternit Atlántico, Tecnología en Cubrimiento S.A, Incolbestos y Repuestos Colombianos S.A [33], además, empresas como Toptec SA, Holcim Colombia SA, entre otras. En un estudio desarrollado en los suelos del municipio de Sibaté, Cundinamarca, se ha identificado la presencia de crisotilo en la corteza terrestre a una profundidad de 10 y 105 cm aproximadamente [34] e incluso se ha dicho que algunos sitios, como el mercado municipal, la cancha de fútbol, antigua zona de ciudadelas construidas por Eternit, fueron rellenadas con materiales que contenían asbesto [35]. También, los reportes de la única mina de asbesto que existe en el municipio de Campamento en el departamento de Antioquia y que estará en operación hasta finales del año 2020, antes de entrar en vigencia la prohibición del uso del asbesto para Colombia [36].

En Colombia se calcula que unas 320 personas mueren al año a causada de una enfermedad asociada al asbesto [37]. Según el boletín legislativo y político del Instituto Nacional de Cancerología para el año 2019, establece que la exposición a las fibras de asbesto se presenta cuando se da la manipulación de contenedores de asbesto, durante la mezcla con otras materias primas, y al cortar productos que contienen asbesto en seco con herramientas rústicas, durante la instalación y uso de productos que contienen asbesto, así como también, durante trabajos de mantenimiento de vehículos. Según esta

² "**carcinógeno para el ser humano**" hay pruebas suficientes que confirman que causa cáncer a los humanos.

entidad se estima que 92000 personas se encuentran expuestas al asbesto. Además, calcula que se producen de forma anual 60 muertes por mesotelioma y 350 muertes por cáncer de pulmón asociadas [38].

El consumo del asbesto en Colombia para el año 2010 estuvo en 12,3 millones de toneladas métricas [37], sin embargo, se cree que para el 2012 el consumo de asbesto aumentó en un 26%, por lo que pasó de 20.048 toneladas en 2011 a 25.164 toneladas al año siguiente [39]. Según los datos que Colombia reporta ante la Organización de Naciones Unidas, en 2018, el país importó poco más de 168 toneladas de asbesto o mezclas con ese material en la base, por un valor de US\$1,8 millones. En cuanto a exportaciones, están registradas 19,5 toneladas, equivalentes a US\$169.000. En ambos casos, el comercio en volumen fue menor que el año anterior (2017), cuando se importaron 206 toneladas y se vendieron 20 en el exterior. Según reportes de la Secretaría de Minas de Antioquia, la mina las brisas, en el tercer trimestre de 2018 (la última cifra disponible), allí se produjeron 358,7 toneladas de asbesto [37].

La exposición al asbesto en Colombia se encuentra categorizada en riesgo V, conforme lo establece el artículo 24 del Decreto 1295 de 1994, y se incluye: areneras, manejo de asbestos, bomberos, manejo de explosivos, construcción, explotación petrolera y minera, entre otros. Además, en la tabla de clasificación de enfermedades, conforme lo establece el Decreto 676 de 2020, se incluyen las siguientes enfermedades asociadas al asbesto: Neoplasia maligna de estómago, Neoplasia maligna de laringe, Neoplasia maligna de bronquios y de pulmón, Mesotelioma de pleura, Mesotelioma de peritoneo, Mesotelioma de pericardio, Placas epicárdicas, Asbestosis, Derrame pleural, Placas pleurales [40]. Aunque se tienen identificadas las enfermedades asociadas al asbesto y las empresas que pertenecen al grupo V, es preocupante la escasa capacidad por parte de las Administradoras de Riesgos Laborales (ARL), en la toma y análisis de muestras [41]. Esta situación conlleva, que las muestras recolectadas en campo, sean remitidas a laboratorios acreditados en el extranjero, para su análisis y posterior reporte de resultados.

Colombia no ha fijado límites de exposición al asbesto, no obstante, ha adoptado acuerdos internacionales, entre ellos el convenio 162 de la OIT [42], aprobado por la Ley 436 del 11 de febrero de 1998 en el cual se prescriben las medidas que habría de adoptarse para prevenir y controlar los riesgos para la salud debido a la exposición profesional al asbesto, posteriormente regulado por la Resolución 007 de 2011 “Reglamento de higiene y seguridad industrial y otras fibras de uso similar” [41].

Durante muchos años se generó el debate sobre la prohibición del uso del asbesto en Colombia, donde organizaciones no gubernamentales, agremiaciones y asociaciones en pro de la defensa del derecho a la vida, han liderado esta tarea y presionando al gobierno nacional para que se emita una ley que regule el uso del asbesto. Con lo anterior, en el año 2019 el Congreso de la República de Colombia aprobó la Ley 1968 “por la cual se prohíbe el uso del asbesto en el territorio nacional y se establecen garantías de protección a la salud de los colombianos” [43]. Con la prohibición del uso del asbesto se abre un

panorama en lo relacionado con el retiro y eliminación del asbesto dado el amplio margen de uso que ha tenido, además, de la presencia de este mineral en edificaciones, dado que se deben fijar protocolos para la toma de muestras, análisis y posterior caracterización de estas fibras, que permitan reducir el nivel de exposición de la población laboral y general.

Con toda la problemática descrita por el uso del asbesto, la investigación abordó la exposición en dos ambientes laborales, cuantificando y caracterizando las fibras de asbesto y determinando la contaminación de subsuelos, mediante el análisis microelemental de la composición química de las fibras detectadas, diseñando la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuál es la concentración y tipo de fibras presentes en muestras personales de trabajadores expuestos a asbesto y en muestras obtenidas de subsuelo presuntamente contaminados con este mineral?

1.3 Justificación

El estudio de las condiciones de exposición al asbesto permite identificar aquella población que se encuentra potencialmente expuesta de forma directa o indirecta, y de esta manera desarrollar programas de monitoreo a la salud, a corto, mediano y largo plazo. Según datos recolectados entre los años 1994 a 2014, entre 230 países y agrupados a su vez en 59 países con datos de mortalidad por mesotelioma, información tomada de la base de datos de la OMS y reportados en el año 2017, determinó un total de 38.400 muertes a causa de esta enfermedad por exposición al asbesto [44,45].

Los controles sobre la exposición al asbesto en la industria colombiana, se ha dado con la implementación de programas de salud ocupacional y/o por el sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo (SGSST), regulado por el Decreto 1072 de 2015 “Decreto Único Reglamentario Sector Trabajo” [46], sin embargo, la categorización del nivel del riesgo requiere de un mayor cuidado y seguimiento por parte de las empresas, dado que este agente tóxico presenta su daño a largo plazo. Para el año 2014, el Ministerio de Trabajo emitió el Decreto 1477 [47] y a su vez modificado por el Decreto 676 de 2020; donde se incluye el asbesto como un agente tóxico de ciertas enfermedades de tipo laboral (EL), entiéndase como EL, conforme lo definido por la Ley 1562 de 2012, la contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral o del medio en el que el trabajador se ha visto obligado a trabajar. Con la Ley 1968 de 2019 se prohíbe el uso del asbesto en Colombia [43], en donde se establece la eliminación de los materiales que contengan asbesto.

La evaluación de la exposición al asbesto sigue siendo una gran limitante para el país, dado que está íntimamente relacionada con la latencia de la enfermedad, por tanto, pueden transcurrir varios años antes que un trabajador o en su defecto aquella población no expuesta presente algún tipo de daño en el organismo, el cual puede ir desde una asbestosis hasta algún tipo de cáncer. Por otro lado, otra gran limitante es el uso de las

técnicas de análisis de microscopía por diferentes métodos, no disponibles en Colombia, que permiten identificar si algún grupo poblacional de trabajadores pueda estar expuesto o no a fibras de asbesto, permitiendo así, que las empresas adopten diligentemente medidas correctivas en los lugares de trabajo, el área circundante, como también en el trabajador. Al ocurrir una exposición indirecta, dado que la persona no trabaja o manipula el asbesto propiamente, sino, que usa materias primas que fueron fabricadas a base de este, al poder caracterizar fibras de asbesto en un grupo poblacional potencialmente expuesto, permitirá realizar un seguimiento epidemiológico por parte de las empresas, como de la autoridad en salud encargada.

La administradora de riesgos laborales (ARL), son las encargadas de agrupar a todas las empresas en Colombia, indistintamente del tipo de actividad que desarrollan, categorizándolas por grupo de riesgo, es así, que aquellas empresas que se encuentran vinculadas, pueden realizar un seguimiento por exposición a asbesto. Ahora bien, el sector informal donde se usa el asbesto, está conformado en su gran mayoría por talleres mecánicos, donde se realizan cambio de repuestos, mantenimiento y remache de bandas [48]. En estos lugares las medidas de prevención y protección son escasas, por lo que se convierten en una fuente de potencial de riesgo para sus trabajadores y tal vez, para visitantes.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, esta tesis de maestría, intentó involucrar a un grupo de empresas diferentes al sector automotriz, con el propósito de proporcionar nuevos datos de exposición en trabajadores del sector fibrocemento y similares, pero infortunadamente no fue posible la participación de estas empresas. La toma de muestras de tipo ocupacional se hizo en una empresa del sector transporte en el municipio de Marinilla, Antioquia, en trabajadores que realizaban actividades de remache de bandas de frenos. Además, se tomaron muestras del subsuelo en una calle del municipio de Sibaté, Cundinamarca, en donde se desarrollaban obras de ingeniería para la remodelación del sistema de captación de aguas lluvias. Estas obras generaron la inquietud en la comunidad del municipio, lo que llevó a interponer quejas y reclamos en la alcaldía municipal. Dada la coyuntura que ha presentado esta zona del país a lo largo de los años, por ser una de los primeros lugares donde la empresa Eternit de Colombia construyera la primera planta procesadora de asbesto. También se realizó la toma de muestras en trabajadores de las empresas que realizaba actividades como auxiliar de excavación.

La cuantificación y caracterización de las fibras de asbesto, son determinantes al momento de evaluar el riesgo por exposición de los trabajadores en diferentes sectores de la industria donde se usa el asbesto como materia prima, además, el estudio de materiales con este tipo de fibras minerales y zonas que puedan estar contaminadas. Con el fin de identificar y caracterizar fibras de asbesto, esta investigación utilizó la microscopía electrónica de barrido (MEB), y el análisis microelemental EDS en las muestras tomadas en dos ambientes laborales y el uso de difracción de rayos X (DRX) en las muestras del subsuelo de la carrera 7 B con calle 7 del municipio de Sibaté. Con los resultados obtenidos se caracterizó el o los tipos de fibras de asbesto presentes en las muestras y se determinó el grado de exposición.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Determinar la concentración y tipos de fibras de asbesto en muestras tomadas en ambientes laborales y suelos contaminados.

1.4.2 Objetivos específicos

- Implementar la metodología NIOSH 7400 para la toma y cuantificación de fibras de asbesto, utilizando el método del filtro de membrana/microscopía óptica de contraste de fase y análisis por microscopía electrónica de barrido.
- Estimar la exposición calculando la dosis inhalada en los trabajadores expuestos.
- Caracterizar las fibras estudiadas mediante el uso de técnicas de microscopía, EDS y análisis microelemental.
- Caracterizar las muestras del subsuelo utilizando difracción de rayos X (DRX), mediante el uso del software HighScore plus.

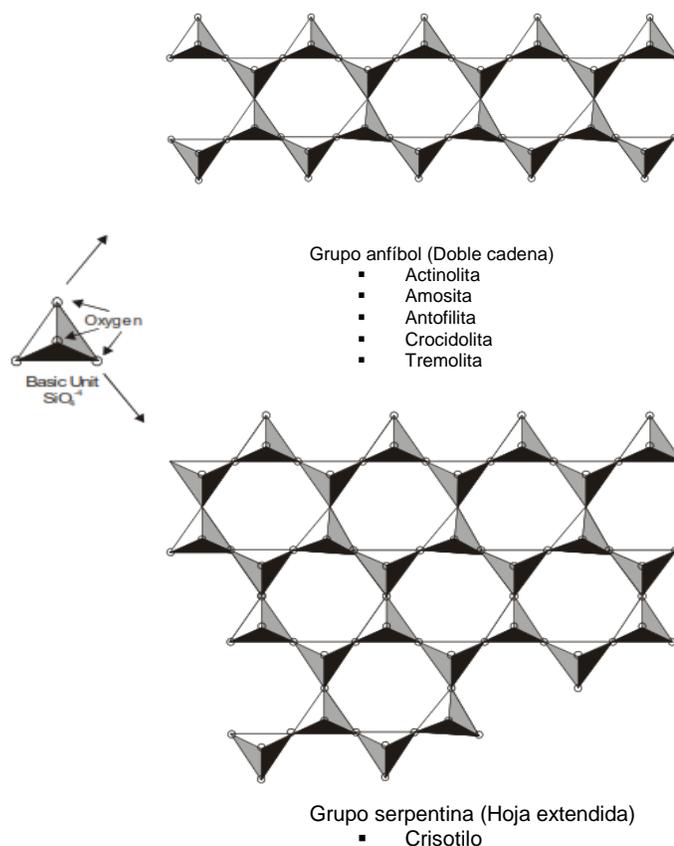
2. Marco teórico

2.1 Generalidades del asbesto

El asbesto integra un grupo de seis minerales de silicatos fibrosos, que presentan una variedad de estructuras poliméricas a través de la formación de enlaces Si-O-Si, algunos de los minerales de asbesto presentan una gama de fórmulas químicas como resultado de las sustituciones de iones o grupos iónicos. En la Figura 2-1 se muestran las estructuras básicas de los polisilicatos de asbesto [1,49].

El asbesto se divide en dos grupos, las serpentinas que está integrado por el crisotilo, la lizardita y antigorita y los anfíboles, con cinco subgrupos, la amosita, actinolita, antofilita, tremolita y crocidolita [50]. Los anfíboles presentan cadenas dobles ($(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{-6}$) y los de tipo crisotilo forma de láminas ($(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{-4}$) [1,51]. En la Tabla 2-1, se presentan las propiedades físico químicas del asbesto.

Figura 2-1. Estructuras básicas de polisilicatos de asbesto [49]



Fuente. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2001. Adapted by Hurlbut & Klein 1977

Tabla 2-1. Propiedades fisicoquímicas del asbesto [52]

Característica	Crisotilo	Crocidolita	Amosita	Antofilita	Tremolita	Actinolita
Fórmula teórica	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)$	$Na_2(Fe^{2+}, Mg)_3Fe^{3+}_2Si_8O_{22}(OH)_2$	$(Fe^{2+})_2(Fe, Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	$Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$
Análisis químico (rango de componentes principales (%))						
SiO ₂	38 – 42	49 – 56	49 – 52	53 – 60	55 – 60	51 - 56
Al ₂ O ₃	(Ø – 2) ^e	(Ø – 1)	(Ø – 1)	(Ø – 3)	(Ø – 3)	(Ø – 3)
Fe ₂ O ₃	(Ø – 5)	13 – 18	(Ø – 5)	(Ø – 5)	(Ø – 5)	(Ø – 5)
FeO	(Ø – 3)	3 – 21	35 – 40	3 – 20	(Ø – 5)	5 – 15
MgO	38 – 42	(Ø – 13)	5 – 7	17 – 31	20 – 25	12 – 20
CaO	(Ø – 2)	(Ø – 2)	(Ø – 2)	(Ø – 3)	10 – 15	10 – 13
Na ₂ O	(Ø – 1)	4 – 8	(Ø – 1)	(Ø – 1)	(Ø – 2)	(Ø – 2)
N ₂ O ⁺	11.5 – 13	1.7 – 2.8	1.8 – 2.4	1.5 – 3.0	1.5 – 2.5	1.8 – 2.3
Color	Usualmente blanco a verde pálido, amarillo, rosado	Azul	Gris claro a marrón	Blanco a gris pálido, o café	Blanco a gris pálido	Pálido a verde oscuro
Temperatura de descomposición (°C)	450 – 700	400 – 600	600 – 800	600 – 850	950 – 1040	620 – 960
Temperatura de fusión del material residual (° C)	1500	1200	1400	1450	1315	1400
Densidad (g/cm ³)	2.55	3.3 – 3.4	3.4 – 3.5	2.85 – 3.1	2.9 – 3.1	3.0 – 3.2
Resistencia a los ácidos	sufre un ataque bastante rápido	Bueno	Atacado lentamente	Muy bueno	Muy bueno	Atacado lentamente
Resistencia a los álcalis	Muy bueno	Bueno	Bueno	Muy bueno	Bueno	Bueno
Propiedades mecánicas de la fibra extraídas de muestras de rocas						
Fuerza de tensión (10 ³ kg/cm ²)	31	35	17	(<1)	5	5
(Promedio) (10 ³ psi)	(440)	(495)	(250)	(<100)	(<70)	(<70)
El módulo de Young (10 ³ kg/cm ²)	1620	1860	1620	-	-	-
(Promedio) (10 ⁴ psi)	(23)	(27)	(23)	-	-	-
Textura	Usualmente flexible, sedosa y resistente	Flexible a quebradizo y duro	Usualmente frágil	Usualmente frágil	Usualmente frágil	Usualmente frágil

Fuente. Programa Internacional de Seguridad Química (IPSC INCHEM), asbesto y otras fibras de minerales naturales.

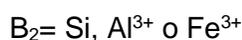
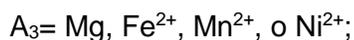
2.1.1 Crisotilo

Las fibras de crisotilo presentan un silicato de magnesio hidratado y su composición química estequiométrica está definida como $Mg_3Si_2O_5(OH)$. La estructura cristalina del crisotilo, es en forma fibrosa, por tanto es distinta a la de los anfíboles [49,51]. El crisotilo obtiene sus propiedades de la roca precursora durante su formación [30].

La fórmula teórica de la serpentina (crisotilo) es:



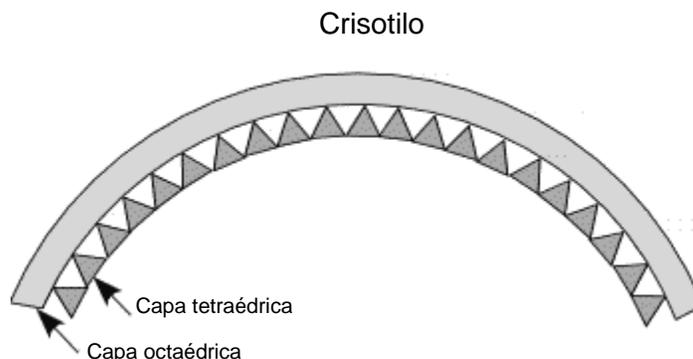
Donde.



En el crisotilo, la flexión de las láminas es más continua, lo que resulta en tubos que le dan al mineral el tipo fibroso [52]. En la Figura 2-2 se presenta la flexión de las láminas de crisotilo.

Las fibrillas de crisotilo son largas, flexibles y curvadas con extremos extendidos. Las fibras de crisotilo pueden llegar a tener una longitud que varían de 1 a 20 mm, con algunas excepciones que pueden tener hasta 100 mm de largo.

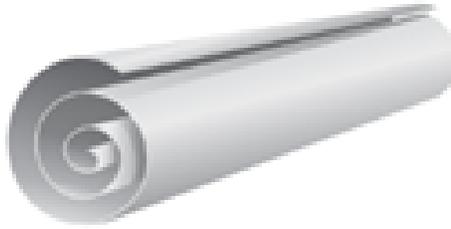
Figura 2-2. Flexión de las láminas de crisotilo [53]



Fuente. Tulane University, mineralogy, phyllosilicates (Micas, Chlorite, Talc, & Serpentine). 18 August of 2015.

Las láminas concéntricas que forman las fibras tienen un radio de curvatura de 2.5 a 3.0 nm para las capas internas y hasta aproximadamente 25 nm para las capas externas. Los estudios de microscopía electrónica indican que la sección transversal de la unidad de fibra aparece en una disposición concéntrica o espiral, como se muestra en la Figura 2-3.

Figura 2-3. Estructura concéntrica del crisotilo [54]



Fuente. Instituto del crisotilo, reseña respecto a la diferencia entre el crisotilo y el asbesto anfíbol. Agosto de 2009.

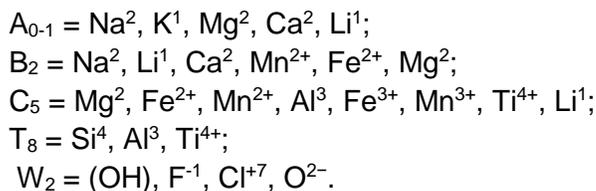
2.1.2 Anfíboles

La familia de los anfíboles se subdivide en cinco minerales, “la bisolita (actinolita fibrosa), amosita (grunerita fibrosa), antofilita, crocidolita (riebeckita fibrosa) y tremolita [51]. Las fibras de anfíboles son más frágiles y exhiben un hábito de cristal rígido, parecido a una aguja”[49]. El grupo de anfíboles puede variar ampliamente y refleja la complejidad del entorno en el que se formaron, siendo característicos de rocas ígneas³ y metamórficas⁴. Los minerales muestran morfologías con forma de aguja. Los anfíboles se distinguen entre sí por el número de cationes Ca²⁺, Fe²⁺, Mg²⁺ y Na que contienen [51]. La fórmula general estequiométrica (Si₄O₁₁)⁶⁻

La fórmula química general de los anfíboles se puede escribir como:



donde.



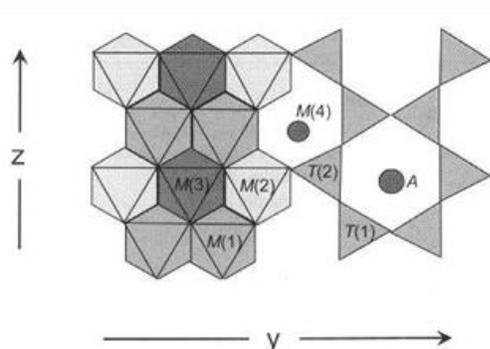
Los elementos menores como Zn²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, V³⁺, Sc³⁺, Cr³⁺ + y Zr^{2,3,4} también se observan como cationes en la posición C₅.

³ **Rocas ígneas:** también llamadas magmáticas son aquellas que se forman cuando el magma (roca fundida) se enfría y se solidifica.

⁴ **Rocas metamórficas:** resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, o una combinación de ambas, como son la *temperatura*, la *presión* y/o la *actividad química de los fluidos*

La estructura de los anfíboles consta de dos elementos principales, una doble cadena de tetraedros que comparten esquinas y una franja de octaedros que comparten los bordes, ambos en *dirección-c*. En la Figura 2-4 se representa el modelo de estructura de la cadena de los anfíboles [55].

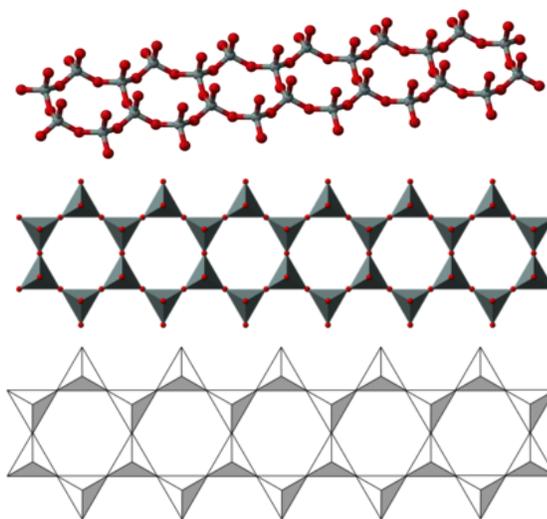
Figura 2-4. Modelo de estructura de anfíboles que muestra la cadena de tetraedros, la tira de octaedros y los sitios M (4) y A (55).



Fuente. Crystal-chemistry and reactivity of fibrous amphiboles of environmental and health interest - Alessandro Pacella. 2013.

En la Figura 2-5, se representa un ejemplo de la estructura de la cadena doble de los anfíboles. Tienen dos cadenas de tetraedros unidas entre sí por vértices, con fórmula química $(\text{Si}_4\text{O}_{11}^{6-})_n$, dando siempre proporciones Si:O de 4:11 [56].

Figura 2-5. Cadenas dobles de los anfíboles en 2D [56]



Fuente. Minerals Arranged por Nickel-Strunz (Version 10) Classification. 2020.

Los tetraedros unidos por el vértice de Si_2O_7 permanecen unidos entre sí con enlaces iónicos por medio de cationes intersticiales cuyos tamaños relativos y cargas determinan las estructuras de los compuestos [56].

La fórmula estequiométrica definida para el asbesto es importante para la caracterización de las fibras, y conforme a su composición química, permiten establecer el tipo de asbesto presente en un sólido o en su defecto en una muestra permitiendo diferenciar la tipología del asbesto con algunas limitaciones.

2.2 Toxicología del asbesto

Cinética y mecanismo de daño por la exposición al asbesto

La importancia toxicológica del asbesto está relacionada con los peligros que implica la exposición a estas fibras. Los principales riesgos de este agente tóxico son el desarrollo de una fibrosis intersticial, denominada asbestosis, de cáncer bronquial, de engrosamiento y fibrosis pleural, derrame pleural y de mesotelioma pleural y peritoneal [57].

2.2.1 Vía de ingreso, transporte, distribución, y eliminación de las fibras de asbesto

El aparato respiratorio se extiende desde la zona de respiración, situada justo por fuera de la nariz y la boca, a través de las vías aéreas conductoras situadas dentro de la cabeza y el tórax, hasta los alvéolos, donde ocurre el intercambio de gases entre los alvéolos y la sangre capilar que fluye a su alrededor. El aparato respiratorio puede verse alterado por las concentraciones de humo de tabaco, polvo industrial y/o patógenos específicos que atacan su mecanismo de defensa [58].

La toxicidad de la fibra de asbesto está asociada a tres factores fundamentales, la dosis, tamaño y el tiempo de exposición. El nivel de exposición determina donde se acumulará la fibra en el sistema respiratorio, influenciado por la relación longitud/diámetro, y está determina el tipo de daño que pueda causar [59,60].

Algunas investigaciones afirman que una vez las fibras de asbesto son inhaladas, y en especial las de gran longitud, se eliminan en el aire espirado del tracto respiratorio superior o mediante el sistema de escalera mecánica mucociliar del árbol traqueo-bronquial. Otros autores, definen que las fibras son complejas, puesto que la profundidad de penetración en el parénquima pulmonar está intrínsecamente relacionada con el diámetro transversal; se piensa que después de la inhalación se produce algún tipo de fragmentación de las fibras. Además, citan que las fibras de tamaño pequeño no pueden reconocerse en el tejido pulmonar con las técnicas morfológicas tradicionales, por lo que su importancia biológica no está completamente definida [60,61], además, que se depositan en lo profundo de los pulmones, incluso llegando a los alveolos pulmonares (sistema respiratorio bajo) [62]. En ese orden, las fibras de asbesto de tamaño de 3 micras alcanzan las vías aéreas inferiores del sistema respiratorio, afectando las células de los macrófagos, mesoteliales, neumocitos

y los fibroblastos [3], mientras, las fibras de mayor diámetro y longitud, pueden alojarse en las bifurcaciones bronquiales y bronquiolares. Algunos estudios indican que las fibras pasan del pulmón a la pleura [49].

El asbesto tiende a exhibir depósitos superficiales complejos de proteínas que contienen hierro, mientras, que en otros artículos se cita, que el magnesio, elemento del crisotilo se disocia, siendo atacada la estructura de esta lamina de silicato por el ácido, al entrar en contacto con el macrófago o al fagocitarlo [60,61].

Aparentemente, las fibras relativamente cortas están completamente incrustadas en los fagosomas, y se ha demostrado que las fibras <5 μm de longitud no se retienen en los pulmones y no causan inflamación crónica, en el caso de las fibras largas que no son absorbidas permanecen dentro del pulmón, como resultado de un proceso de fagocitosis frustrada. Las fibras de asbesto largas fagocitadas activan el inflamasoma NLRP3⁵, lo que conduce a la maduración de la interleucina (IL) -1 β ⁶, que desencadena la inflamación. Las fibras más largas que no se eliminan conducen a una inflamación crónica, que ejerce efectos pleiotrópicos en el desarrollo del cáncer [63].

La vía principal por la cual se eliminan las fibras del tracto respiratorio es el transporte mucociliar. Este es mediado por células epiteliales ciliadas que producen y mueven la capa de moco que recubre el tejido epitelial hacia la garganta, moco que puede ser tragado para finalmente ser excretado en las heces [49].

2.2.2 Mecanismo de daño de las fibras de asbesto

Varios aspectos relacionados con la supervivencia y la división de los macrófagos que han fagocitado las fibras de asbesto siguen sin estar claros. Se ha sugerido que la fagocitosis frustrada da como resultado un fallo en el cierre de la membrana, lo que resulta en la fuga del contenido celular, que puede conducir a la muerte celular inmediata, sin embargo, queda por dilucidar si la fagocitosis frustrada conduce a esta muerte celular inmediata [63].

Dos mecanismos por el cual las fibras de asbesto pasan desde los alvéolos al resto del organismo pueden ser, la vía paracelular y el de translocación. El pasaje de asbesto al intersticio por vía paracelular se produce por acción de la bomba Na⁺/K⁺ ATPasa que incrementa la presión intersticial que invierte los gradientes de presiones transendoteliales y transepiteliales. La translocación es primaria, cuando las fibras de asbesto son drenadas a los linfáticos pulmonares cercanos y es secundaria cuando aumenta la presión intersticial pulmonar debido a la inflamación en esa zona, cambiando el gradiente de presión a través

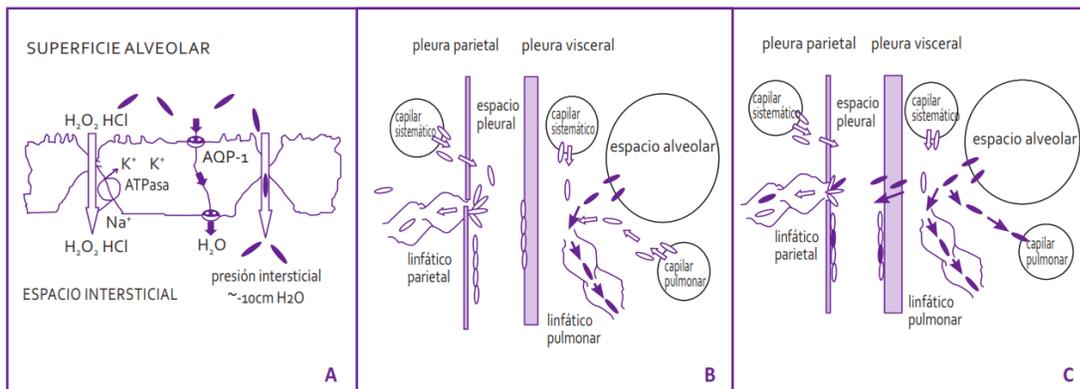
⁵ Los inflamomas son complejos proteicos localizados en el citoplasma de las células, que actúan como sensores y son mediadores del desarrollo de la inflamación, NOD-like receptor (NLR).

⁶ Interleucinas, son un grupo de proteínas relacionadas que elaboran los leucocitos (glóbulos blancos) y otras células del cuerpo. La interleucina regula las respuestas inmunitarias.

de los capilares pulmonares y de la pleura visceral, haciendo que las fibras de asbesto lleguen a los capilares pulmonares y a la pleura visceral [64].

El mecanismo de daño de las fibras de asbesto se explica en la Figura 2-6, donde se relacionan las rutas de transición del agente tóxico, desde su ingreso al sistema respiratorio y el recorrido que hace al interior de este [65]. El tiempo en presentarse los daños se estima entre 20 a 40 años, dependiendo del tiempo de exposición, cuanto más duren en los tejidos mayor es el daño y el tipo de enfermedad que pueda causar [66,67].

Figura 2-6. Mecanismo de daño de las fibras de asbesto [64]

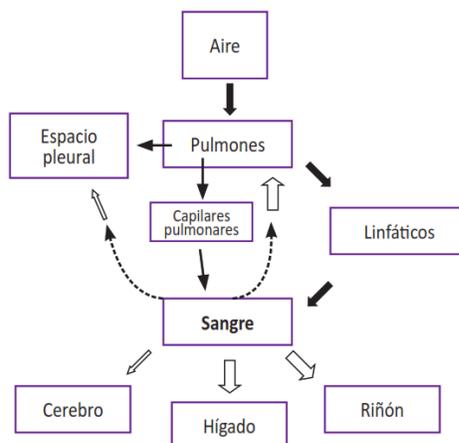


A) Mecanismo paracelular: por acción de la bomba Na^+/K^+ $ATPasa$ hay incremento de la presión intersticial y se produce una inversión de los gradientes de presiones que permite el paso de asbesto al intersticio. B) Translocación primaria: las fibras de asbesto son drenadas a los linfáticos pulmonares cercanos. C) Translocación secundaria: las fibras de asbesto son arrastradas por flujos de agua bajo gradientes de presión y llegan a la sangre a través del sistema linfático de donde serán transportadas a todos los órganos.

Fuente. Acta medica peruana, artículo especial, asbesto la epidemia silenciosa. 2016. Mecanismos de acción del asbesto. Adaptación de los autores al español a partir de Miserocchi, Sancini, Mantegazza, Chiappino; 2008 con permiso de los editores.

La translocación primaria se define cuando las fibras de asbesto son drenadas a los linfáticos pulmonares cercanos y es secundaria cuando aumenta la presión intersticial pulmonar debido a la inflamación en esa zona, cambiando el gradiente de presión a través de los capilares pulmonares y de la pleura visceral haciendo que las fibras de asbesto lleguen a los capilares pulmonares y a la pleura visceral [64], como se explica en la Figura 2-7.

Figura 2-7. Diagrama de bloques para mostrar la translocación primaria (flechas negras) y secundaria (flechas blancas) de fibras de asbesto [64]



Fuente. Acta medica peruana, artículo especial, asbesto la epidemia silenciosa. 2016. Mecanismos de acción del asbesto. Adaptación de los autores al español a partir de Miserocchi, Sancini, Mantegazza, Chiappino; 2008 con permiso de los editores.

2.3 Niveles de exposición laboral al asbesto y su relación con la problemática de daño en la salud

La manipulación de materiales que contengan asbesto tienden a liberar fibras que pueden ser inhaladas, acumulándose en los pulmones por un largo periodo, provocando inflamación y cicatrización del tejido donde se han hospedado, dado que el asbesto en todas sus formas es considerado como cancerígeno para los humanos [68,69].

A pesar de las estrategias desarrolladas a nivel mundial, los trabajadores sufren serios problemas por la exposición laboral, doméstica o ambiental al asbesto. Algunos organismos internacionales han definido límites de exposición laboral, los que sirven como referencia para la evaluación, control y diseño de medidas de prevención, definiendo un límite umbral de 0.1 f/cm³ para una jornada laboral de 8 horas [70,48].

El cáncer es considerado un problema importante de salud pública en Colombia. El número de enfermos y personas muertas por esta causa ha ido aumentando en los últimos años; las cifras estiman que cerca de 96 personas mueren cada día en Colombia por causa del cáncer. En la actualidad se considera que la mayoría de cánceres se originan por la exposición a factores de riesgo, relacionados con el estilo de vida y el ambiente que pueden influir en que algunos genes normales se alteren permitiendo la aparición de algún tipo de cáncer [71].

Según el Sistema de Vigilancia Epidemiológica del Cáncer Ocupacional en Colombia – SIVECAO, para el año 2014, establecía que no se disponía de un sistema de información sobre cáncer ocupacional, ni sobre características de exposición a agentes carcinógenos presentes en los ambientes laborales, motivo por el cual se diseñó SIVECAO, en donde se reconocen a un grupo de agentes químicos presentes en ambientes laborales, entre

estos el asbesto. Dichos agentes fueron seleccionados como causantes de algún tipo de cáncer referenciado en la literatura como de tipo ocupacional [72].

Niveles de exposición laboral al asbesto

Algunos organismos internacionales han definido límites de exposición laboral al asbesto. En la Tabla 2-2 se presentan los valores de referencia para la evaluación y control de los riesgos inherentes a la exposición por inhalación, sin embargo, estos valores no constituyen una barrera definida de separación entre situaciones seguras y peligrosas.

Tabla 2-2. Límites de exposición al asbesto definidos por organismos internacionales [48]

Organismo	TLV (f/cm ³)	PEL	REL
American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	0.1		
Occupational Safety and Health Administration (OSHA)		0.1	
National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)			0.1

TLV: threshold limit value; PEL: permissible exposure limit; REL: reference exposure level

Fuente. Adaptada por el autor. Pantoja Peña PM. Análisis de la exposición a asbesto por parte de mecánicos automotrices del sector de Prado Veraniego en la ciudad de Bogotá. 2013.

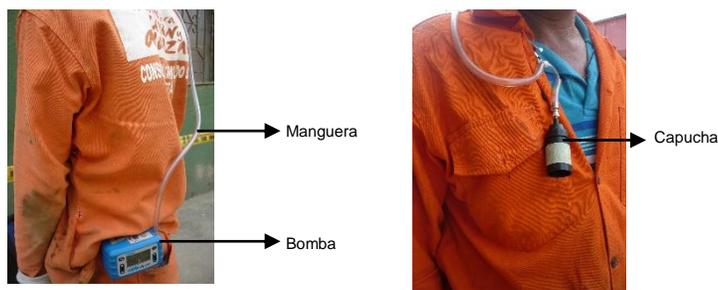
2.4 Técnicas de caracterización para fibras de asbesto

En este numeral se describen algunas de las técnicas que se utilizaron para caracterizar fibras de asbesto y que fueron implementadas en esta investigación. Teniendo en cuenta el comportamiento del asbesto y la importancia toxicológica por la presencia de estas fibras en los individuos que se exponen en los ambientes laborales y otros, es indispensable la cuantificación y caracterización de estos compuestos.

2.4.1 Metodología NIOSH 7400, asbesto y otras fibras por Microscopía de contraste de fase

Metodología que describe los aspectos que deben tenerse en cuenta para el muestreo, así como los reactivos y equipos necesarios para la medición, cálculo y reporte de resultados. El muestreo se realiza ubicando un tren de muestreo (ya sea de tipo personal o en ambientes generales), cuando se monitorean ambientes laborales, se sujeta el equipo al trabajador, con una manguera que llega a la zona respiratoria, y cuando se realiza en áreas o zonas abiertas, el equipo se ubica en un trípode o cualquier otro objeto que lo mantenga fijo [5,73,74]. En la Figura 2-8 se presenta el tren de muestreo y su ubicación en el trabajador.

Figura 2-8. Tren de muestreo y ubicación en el trabajador



Fuente. Autor. 2018

Este método se puede utilizar en las actividades de muestreo o vigilancia que se realicen con el objetivo de establecer la comparación con los límites de exposición laboral, seguimientos de casos epidemiológicos y evaluación de la eficacia de las medidas de control en los sitios de trabajo.

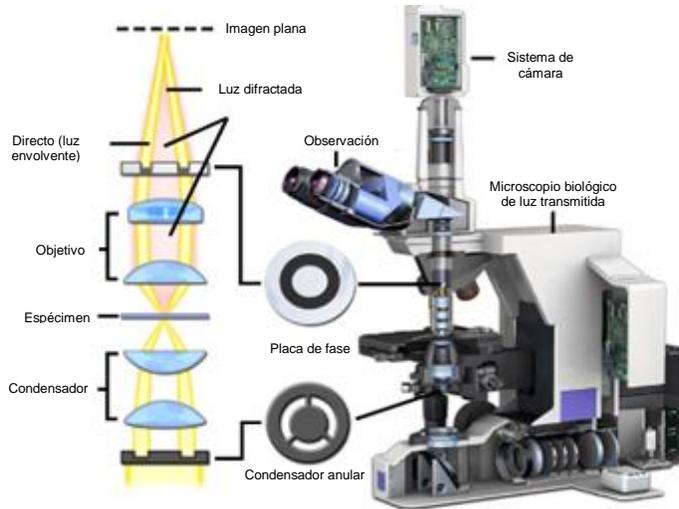
2.4.2 Microscopía de contraste de fase

Es la técnica más utilizada para determinar la concentración en el aire de asbesto respirable o fibras minerales sintéticas, por su bajo costo en relación con otras técnicas. Tiene el inconveniente que es un método visual, manual y estadístico para el que se requiere una gran habilidad y un buen adiestramiento del operador [75].

Es una técnica óptica que se puede utilizar para producir imágenes de alto contraste de muestras transparentes, como células vivas (generalmente en cultivo), microorganismos, cortes de tejido fino, patrones litográficos, fibras, dispersiones de látex, fragmentos de vidrio y partículas subcelulares (incluidos núcleos y otros orgánulos). En efecto, la técnica de contraste de fase emplea un mecanismo óptico para traducir pequeñas variaciones de fase en los correspondientes cambios de amplitud, que pueden visualizarse como diferencias en el contraste de la imagen [76].

“En la Figura 2-9 se presenta un diagrama recortado de un microscopio de contraste de fase vertical moderno, que incluye una ilustración esquemática del tren óptico de contraste de fase. La iluminación parcialmente coherente producida por la lámpara de tungsteno-halógeno se dirige a través de una lente colectora y se enfoca en un anillo especializado (anillo del condensador etiquetado) colocado en el plano focal frontal del condensador de la subplaca. Los frentes de onda que atraviesan el anillo iluminan la muestra y pasan sin desviarse o son difractados y retardados en fase por las estructuras y gradientes de fase presentes en la muestra. La luz no desviada y difractada recogida por el objetivo es segregada en el plano focal trasero por una placa de fase y enfocado en el plano de imagen intermedio para formar la imagen de contraste de fase final observada en los oculares” [76].

Figura 2-9. Diagrama recortado de un microscopio de contraste de fase vertical moderno [76]



Fuente. MicroscopyU. The source for Microscopy education. <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>. 2021

Interacción de ondas de luz con muestras de fase

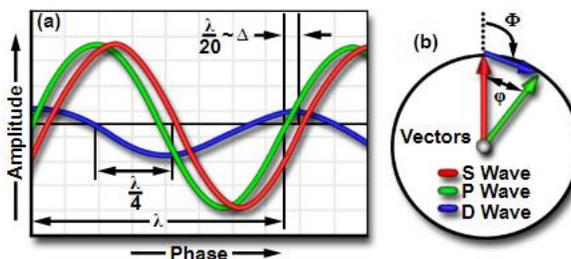
“Un frente de onda incidente presente en un haz de luz iluminante se divide en dos componentes al pasar a través de una muestra de fase. El componente principal es un frente de onda plano no desviado (o no difractado; orden cero), comúnmente conocido como onda envolvente (S), que atraviesa y rodea la muestra, pero no interactúa con ella. Además, un frente de onda esférico desviado o difractado (D-onda), que se dispersa en un amplio arco (en muchas direcciones) que atraviesa la apertura total del objetivo. Después de dejar el plano de la muestra, las ondas de luz envolventes y difractadas entran en el elemento de la lente frontal del objetivo y posteriormente se enfocan en el plano de imagen intermedio donde se combinan a través de la interferencia para producir una onda de partículas resultante (a menudo denominada onda P)”[76].

Interacciones de ondas en microscopía de contraste de fase

“Las relaciones de fase entre las ondas envolvente, difractadas y de partículas (S, D y P) en la región de la muestra en el plano de la imagen para microscopía de campo claro (en ausencia de accesorios ópticos de contraste de fase) se presentan en la Figura 2-10. Las ondas envolventes y de partículas, cuyas amplitudes relativas determinan la cantidad de contraste de la muestra, se ilustran como líneas rojas y verdes (respectivamente). La onda producida por difracción de la muestra, que nunca se observa directamente, se representa como una onda azul de menor amplitud. Las ondas envolventes y difractadas se recombinan a través de la interferencia para generar la onda de partículas resultante en el plano de la imagen del microscopio. La amplitud de cada onda ilustrada en la Figura 2-

10 representa la suma de los vectores eléctricos de las ondas componentes individuales”[76].

Figura 2-10. Relaciones de fase de onda de microscopía de campo claro [76]

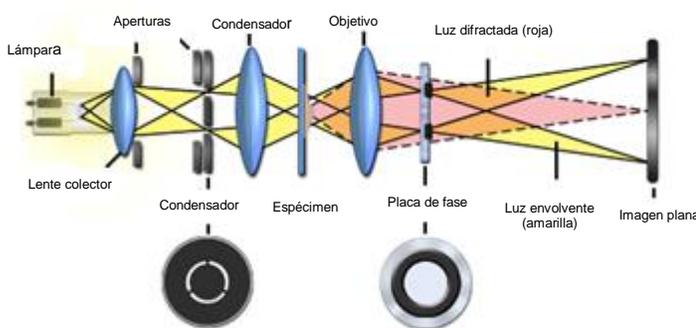


Fuente. MicroscopyU. The source for Microscopy education. <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>. 2021.

El microscopio de contraste de fase

El concepto más importante que subyace en el diseño de un microscopio de contraste de fase es la segregación de los frentes de onda envolventes y difractados que emergen de la muestra, que se proyectan en diferentes ubicaciones en el plano focal posterior del objetivo (la difracción plana en la apertura trasera del objetivo). Además, la amplitud de la luz envolvente (no desviada) debe reducirse y la fase debe adelantarse o retardarse (en un cuarto de longitud de onda) para maximizar las diferencias de intensidad entre la muestra y el fondo en el plano de la imagen. El mecanismo para generar un retardo de fase relativo es un proceso de dos pasos, en el que las ondas difractadas se retardan en fase un cuarto de longitud de onda en la muestra, mientras que las ondas envolventes avanzan (o retardan) en fase mediante una placa de fase colocada en o muy cerca del plano focal posterior del objetivo. Solo se requieren dos accesorios especializados para convertir un microscopio de campo claro para la observación de contraste de fase” [76]. En la Figura 2-11 se presenta el Tren óptico del microscopio de contraste de fase.

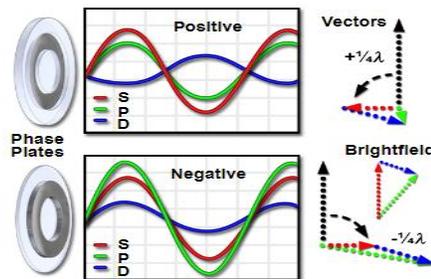
Figura 2-11. Tren óptico del microscopio de contraste de fase [76]



Fuente. MicroscopyU. The source for Microscopy education. <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>. 2021.

“Las configuraciones de la placa de fase, las relaciones de onda y los diagramas vectoriales asociados con la generación de imágenes de contraste de fase positivo y negativo se presentan en la Figura 2-12. Además, también se ilustran ejemplos de muestras obtenidas mediante estas técnicas. El frente de onda esférico de la luz difractada que emerge del plano de la muestra se retarda en un cuarto de longitud de onda con respecto a la fase del frente de onda envolvente plano (o no difractado). En la configuración óptica de contraste de fase positivo (fila superior de imágenes en la Figura 2-12), el borde (S) el frente de onda avanza en fase un cuarto de longitud de onda al atravesar la placa de fase para producir un cambio de fase neto de 180 grados (la mitad de la longitud de onda). El frente de onda envolvente avanzado ahora puede participar en una interferencia destructiva con las ondas difractadas (D) en el plano de imagen intermedio”[76].

Figura 2-12. Sistemas de contraste de fase positivo y negativo [76]



Fuente. MicroscopyU. The source for Microscopy education. <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>. 2021.

El análisis de fibras de asbesto, con microscopía de contraste de fase, es una técnica cuantitativa, dado que permite solo el conteo de fibras con una longitud $>5 \mu\text{m}$, un ancho 3:1, pero no permite diferenciar los tipos de fibras, por lo que, si se requiere esta identificación, es necesario utilizar otros procedimientos y técnicas analíticas como son la microscopía de luz polarizada y dispersión, la microscopía electrónica de transmisión y de barrido, la difracción de rayos X, el análisis químico, la espectrofotometría infrarroja, etc [77].

2.4.3 Microscopía electrónica de barrido

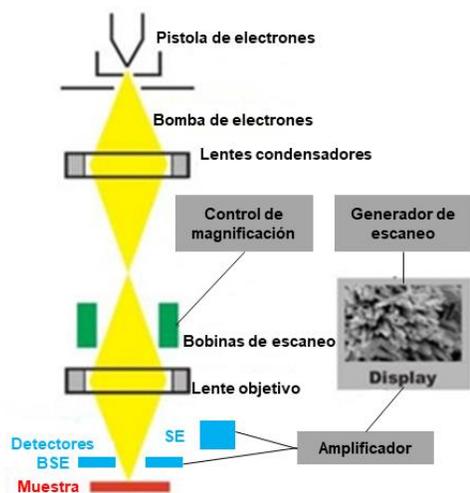
La microscopía electrónica de barrido “es una técnica que permite caracterizar una gran variedad de materiales, como nano-estructurados, aleaciones metálicas, polímeros, minerales, fibras, películas delgadas, biomateriales y en algunos casos muestras con alto contenido en humedad” [78].

El microscopio electrónico es un potente instrumento, que mediante un cañón de electrones procedentes de un filamento de tungsteno (es el material más usado, sin embargo, hay otros tipos de materiales que son usados), incandescente y de un conjunto de lentes electromagnéticas bombardea la muestra con un haz fino de electrones. Es necesario mantener el sistema con un vacío entre 10^{-6} y 10^{-7} torr para prevenir que los

electrones choquen con las moléculas del gas y no se desvíen de la trayectoria [75,79]. Cuando este haz incide sobre la muestra se genera una gran cantidad de señales, entre las que se pueden enumerar, los electrones secundarios, electrones retrodispersados, rayos X característicos, entre otros. En la Figura 2-13 se presenta el esquema de un microscopio electrónico de barrido.

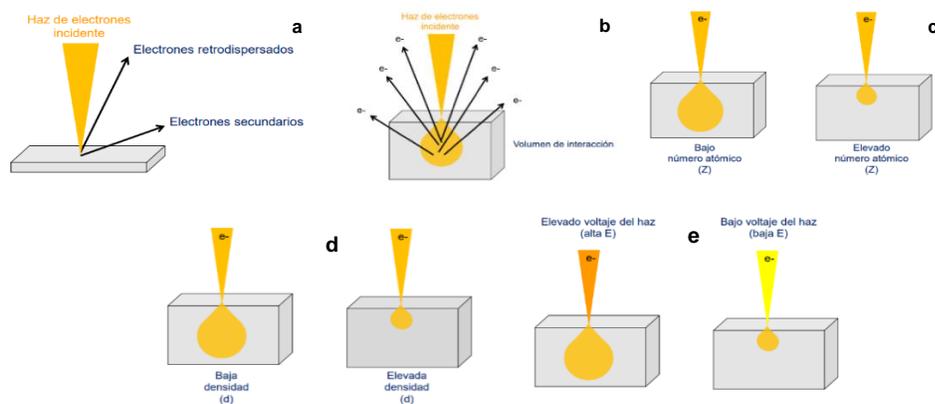
Esta técnica tiene mayor poder de resolución que la microscopía óptica, del orden de las decenas de nanómetros, permitiendo detectar y observar fibras de poco diámetro, así como identificar los distintos tipos de ellas [75], por lo que aporta gran información visual del estado de la muestra que se analiza [80]. En la Figura 2-14 se presenta la forma en que interactúan los electrones con la muestra analizada.

Figura 2-13. Esquema básico de funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido [81]



Fuente. Apuntes de electromedicina. El microscopio electrónico de barrido SEM. Xavier Pardell. Enero de 2021.

Figura 2-14. Interacción de electrones de alta energía con muestras [82]



Fuente. Universidad de Alicante, Servicio Técnico de Investigación. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) 2012.

- a. Tipo de electrones que se detectan en el microscopio electrónico, b. la región amarilla dentro del material indica el volumen de interacción de los electrones de la muestra, c. volumen de interacción según el número atómico de la muestra (Z), d. variación del volumen de interacción en dependencia de la densidad, e. volumen de interacción de los electrones en dependencia del haz de electrones.

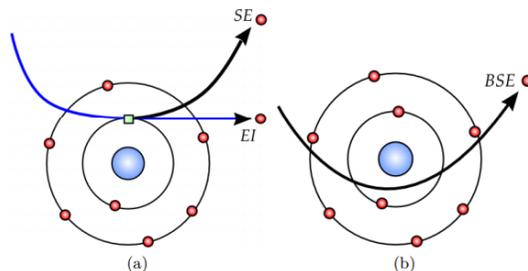
En esta técnica la resolución está determinada por la región de interacción la cual tiene forma de pera (Figura 2-14), se muestra como varía este volumen de interacción en función del número atómico Z de la muestra, su densidad y la energía del haz de electrones, respectivamente [82]. Los electrones y fotones que salen de la muestra dependen en gran parte del número atómico y la composición química de la muestra, por lo tanto, si estas señales se miden adecuadamente, un microscopio electrónico de barrido permite hallar información morfológica, topográfica y composicional de las superficies de las muestras analizadas.

→ *Interacción electrones-materia*

Cuando el haz de electrones es dispersado por la muestra, se generan electrones que se pueden separar en dos grupos, los electrones secundarios (SE, por sus siglas en inglés) y los electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés).

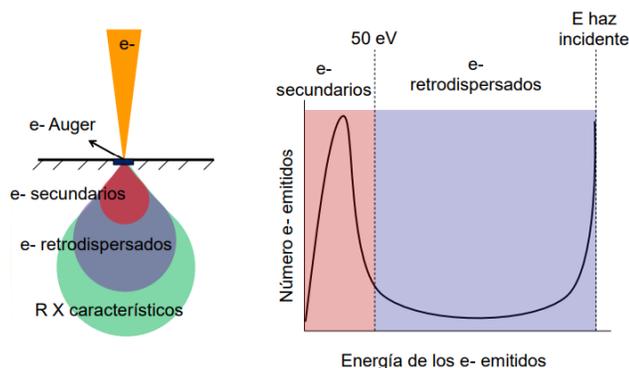
Los Electrones secundarios se producen cuando un electrón del haz pasa muy cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando la suficiente energía a uno o varios de los electrones interiores para saltar fuera de la muestra. Son de muy baja energía (por debajo de 5 eV), precisamente por ello proporcionan una valiosa información topográfica de la muestra. Los BSE se producen cuando un electrón del haz choca frontalmente con el núcleo de un átomo de la muestra, siendo repelido en sentido contrario fuera de la muestra. La intensidad de dicho efecto varía proporcionalmente con el número atómico de la muestra [83,84]. En la Figura 2-15 y 2-16 se representa la forma en que se generan lo SE y BSE.

Figura 2-15. Generación de electrones SE (izquierda) y BSE [79]



Fuente- Universidad de América, caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (MEB), tomado de la imagen bajo licencia CC-BY de Wikipedia commons. 2013.

Figura 2-16. Electrones secundarios y retrodispersados [82]



Fuente. Universidad de Alicante, Servicio Técnico de Investigación. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) 2012.

Los microscopios electrónicos proporcionan una mayor magnificación y resolución de la superficie de la muestra, permitiendo ver fibras mucho más finas que en un microscopio óptico y permiten diferenciar las fibras de asbesto de otras fibras [85,86].

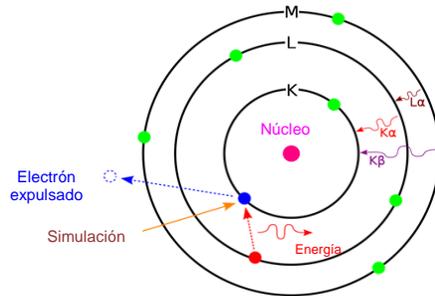
La microscopía electrónica de barrido permite determinar algunas trazas cuantitativas de asbesto en materiales a granel⁷ y otro tipo de muestras (muestras de tipo personal en ambientes laborales) (87).

2.4.4 Técnica de espectroscopía por energía dispersa (EDS)

La espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (también conocida como EDS, EDX o EDXA), permite el analizar la composición química de la muestra estudiada. Dado que tiene una capacidad de radiación electromagnética de alta energía (rayos X). Se libera cierta cantidad de energía para cada elemento identificado, el cual es bombardeado con rayos X para identificar la proporción de los elementos presentes. En la Figura 2-17 se presenta el esquema en que funciona el EDS. Las letras K, L y M se refieren al valor n que tienen los electrones en esa capa (los electrones K, más cercanos al núcleo, son $n=1$ electrones), mientras que α y β indican el tamaño de la transición. Por tanto, la relajación de M a L o de L a K se describe como $L \alpha$ o $K \alpha$, mientras que pasar de M a K sería una transición de $K \beta$ [88].

⁷ Materiales a granel: hace referencia a una mezcla granular o gruesa, que está presente de forma suelta y fluida, como yeso, arena. Utiliza para la producción de materiales de la construcción u afines.

Figura 2-17. Expulsión de electrones mediante la técnica EDS [88]



Fuente. Licensee Creative Commons Attribution Share Alike 3.0. Disponible en: [https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization_CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_\(EDS\)](https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization_CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_(EDS)). 2018.

Dado que el análisis micro elemental MEB-EDS requiere de un haz de electrones para generar los rayos X característicos del detector EDS, el que encuentra se integrado al microscopio electrónico de barrido. Algunos softwares de licencia libre que se utilizan son Casino Monte Carlo y DTSA-II. Para el desarrollo de la investigación solo se utilizará el Casino Monte Carlo.

Software Casino Monte Carlo

El software de “Simulación de Monte Carlo” es una herramienta utilizada para simular suficientes trayectorias de electrones que representan la condición utilizada y así obtener imágenes de estructuras en un microscopio electrónico de barrido [89,90].

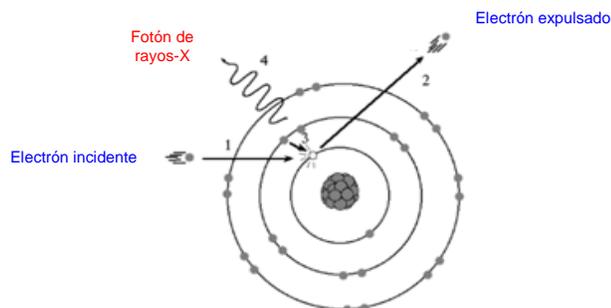
Este programa simula la trayectoria de los electrones en un sólido especialmente diseñado para la interacción del haz de luz bajo una lámina delgada y voluminosa. Este complejo programa de dispersión Monte Carlo está diseñado específicamente para la interacción del haz de baja energía y se puede utilizar para generar muchas de las señales grabadas (rayos X y electrones retrodispersados) en un microscopio electrónico de barrido [89,90].



2.4.5 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X, es una de las técnicas más eficaces para el análisis de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético (91). Los rayos X son producidos por electrones que son dispersados por átomos de un metal utilizado como blanco removiendo electrones de niveles internos. Lo que hace que electrones de niveles superiores cubran estos lugares, emitiendo así, fotones con energías del orden de los rayos X. Los rayos X que se generan de esta forma, se utilizan para bombardear muestras cristalinas y así obtener su patrón de difracción de rayos-X [92]. En la Figura 2-18 se representa la forma de generación del rayo X.

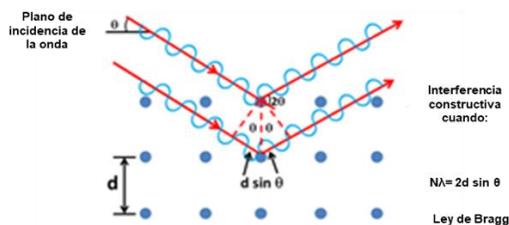
Figura 2-18. Generación de rayos X [89]



Fuente. Laboratorio de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología, división de materiales avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. 2017.

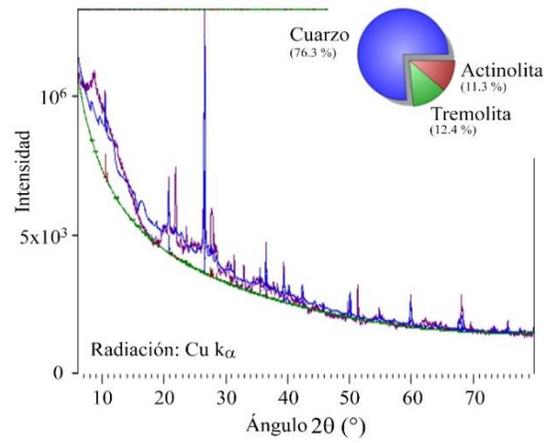
Los rayos X incidentes son dispersados en diferentes direcciones, generando interferencia, tanto, constructiva como destructiva. Las interferencias destructivas se cancelan entre sí. En algunas ocasiones, debido al orden periódico de los átomos, pueden ocasionar que las ondas dispersadas se encuentren en fases y se refuercen entre sí, generando el fenómeno de difracción. Para que esta condición se cumpla, los rayos X difractados en los planos paralelos deben tener una distancia “d”, lo que se conoce matemáticamente como ley de Bragg [93]. En la Figura 2-19, se representa la ley de Bragg.

Figura 2-19. Representación gráfica de la Ley de Bragg [93]



Fuente. Laboratorio de investigaciones en nanociencias y nanotecnología, División de materiales avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

Cuando se emiten estas señales, es donde el haz primario se difracta desde la muestra hacia el detector, y de esta forma se traduce en difractogramas [93]. En la Figura 2-20 se presentan resultados de muestras de asbesto leídas por DRX.

Figura 2-20. Difractograma muestra de asbesto

Fuente. Autor. Resultados del análisis de muestras del subsuelo, municipio de Sibaté. 2018.

3. Materiales y métodos

3.1 Tipo de estudio

- El estudio en esta tesis de maestría es de tipo exploratorio, que cuantifica y caracteriza fibras de asbesto mediante el uso de técnicas de análisis por microscopía y análisis microelemental en muestras de ambientes laborales y el subsuelo.

3.2 Población y muestra de estudio

3.2.1 Población

- Trabajadores en ambientes laborales que realizaban actividades asociadas con asbesto del sector transporte y construcción.

3.2.2 Muestras

- Ambientes laborales
- Subsuelo

3.2.3 Área geográfica

- Empresa del sector transporte en el municipio de Marinilla, Antioquia.
- Empresa de la construcción que realizaban actividades de excavación en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca.

3.3 Materiales, reactivos y equipos

3.3.1 Materiales

- Pala de jardín para recolección de muestra del subsuelo
- Bolsas ziploc
- Marcadores
- Cubre objeto de 25 x 25mm
- Filtro de esterres de celulosa de 0.8 μm tamaño de poro y 25 mm de diámetro
- Porta objeto de 25 x 75 mm
- Levantador de filtro

- Papel limpia lentes o papel de arroz
- Esmalte de uñas transparente corriente
- Pinza no dentada
- Gotero
- Guantes de seguridad antiestáticos
- Jeringa que pueda entregar 200 µL

3.3.2 Reactivos

- Acetona grado p.a. 99% de pureza,
- Acetona para cromatografía líquida de alta eficacia (High-performance liquid chromatography (HPLC), por sus siglas en inglés),
- Triacetina (glicerol triacetato) reactivo 99% de pureza,

3.3.3 Equipos

- Bomba de muestreo marca GilAir Plus (STP modelo), con un registro de datos de hasta 16 muestras. La bomba entrega 5 L/min o 5000 ml/min
- Manguera, por donde circula el volumen de aire para capturar las fibras presentes en el ambiente laboral, con una longitud aproximada de 80 cm, desde la cintura en donde se adapta la bomba al cinturón del trabajador, hasta la altura de la zona respiratoria, sujeta a la camisa del individuo.
- Calibrador de burbuja Gilibrator II, es un calibrador primario que proporciona una forma automatizada de comprobar el flujo y/o caudal de cualquier bomba comercialmente. El sistema consta de una base electrónica Gilibrator-2, que se utiliza con los modelos de células generadoras de burbuja (de 1 a 250 centímetros cúbicos, 20 a 6 centímetros cúbicos, 2 a 30 litros por minuto. Este calibrador se usó previamente a la puesta en marcha de las bombas, el cual es recomendable para la toma de muestras en ambientes de poca presencia de fibras, conectando la bomba a través de la manguera y haciendo 10 repeticiones de lectura, hasta obtener un volumen de 2000 ml/min o 2 L/min.
- Capucha antiestática (marca SKC, referencia Filtro BestChek MCE, 0,8 µm, 25 mm, para muestreo de asbesto, precargado en casete conductor de polipropileno negro relleno de carbono, ensamblado con una cubierta espaciadora de 2 pulgadas, con tapón en el extremo de salida, para análisis por microscopía de contraste de fase, calidad aprobada para bajo asbesto, pre-bandeado, pk/50), en donde se depositaron las fibras presentes en el ambiente laboral muestreado.

- Filtro BestChek® MCE Filter, 0,45 μm , 25 mm, para muestreo de asbesto, con soporte y almohadillas difusoras de 5,0 μm , precargadas en un casete conductor de polipropileno negro relleno de carbono, ensamblado con carenado espaciador de 2 pulgadas, para análisis MET, calidad comprobada a bajo Fondo de asbesto, pre-bandeado, pk/50.
- Campana de extracción aire, marca Biobase
- Vaporizador de acetona, marca wonder makers environmental, modelo Small Wonder,
- Microscopio invertido de fase Eclipse TE300, marca Nikon,
- Microscopio Tescan, Vega3, SB
- Difractómetro X'pert Pro, Panalytical

3.4 Etapas de la investigación

El desarrollo de la investigación se ejecutó en cinco etapas. En la Figura 3.1 se presenta el esquema, iniciando desde la selección de empresas y finalizando con los resultados obtenidos posterior al desarrollo del trabajo de campo y de laboratorio.

Figura 3-1. Etapas de la investigación



Fuente. Autor. 2019

3.4.1 Etapa 1. Selección de empresas y población a estudiar

La búsqueda de las empresas se hizo de dos formas. Una fue a través del Convenio Interinstitucional de Cooperación firmado entre la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia y la Compañía de Seguros Positiva, utilizando la base de datos suministradas por la administradora de riesgos laborales (ARL) Positiva. La segunda búsqueda se hizo de forma externa, a través de google académico, ingresando el nombre de las empresas que podrían cumplir con el perfil para invitarlas a participar, accediendo a su página web principal, y que estuvieran localizadas en la ciudad de Bogotá.

El convenio mencionado, permitió hacer la revisión de la base de datos empresarial con código de actividad 5269502 para el año 2018, cuyas empresas se dedicaban a

“fabricación de artículo de hormigón, cemento y yeso, que solamente se dedican a la fabricación de productos con asbesto, trabajos de aislamiento térmico en asbesto, entre otros”, a partir de esta lista, se hizo una clasificación por departamento, número de empresas y trabajadores. En la Tabla 3-1 se presenta la clasificación por departamento.

Tabla 3-1. Número de empresas y trabajadores por ciudad con actividad económica 5269502

Ciudad	Número de empresas	Número de trabajadores
Armenia	1	14
Barranquilla	1	1
Bucaramanga	2	12
Cali	3	3
Cúcuta	4	58
Bogotá	14	117
Ibagué	1	9
Ipiales	1	8
Manizales	4	10
Medellín	7	23
Montería	1	22
Neiva	1	2
Pasto	3	14
Pereira	4	46
Santa marta	2	12
Tunja	2	13
Yopal	1	30
Total	61	379

Fuente. Autor.

La búsqueda externa a través de google académico, permitió encontrar 15 nuevas empresas en la ciudad de Bogotá, las cuales producían tejas de fibrocemento, cemento, galvanizados, placas de fibrocemento, artículos de hormigón, cemento y yeso.

En total en la ciudad de Bogotá se encontraron 29 empresas (14 de la base de datos de la ARL Positiva y las 15 encontradas por google académico), se les remitió carta invitándolas a ser partícipes de la investigación.

Se intentó, inicialmente, incluir en el estudio un amplio número de empresas, para determinar el grado de exposición de la población trabajadora ocupacionalmente expuesta a asbesto. No obstante, las empresas contactadas (29 en total, registradas en la base de datos de la ARL Positiva y las buscadas por google académico) no permitieron realizar estos estudios en sus instalaciones. Algunas manifestaron haber sustituido el asbesto dentro de su cadena de producción, otras informaron que ya habían desarrollado estudios

propios, y las demás no emitieron respuesta formal. Se intentó, realizar la toma de muestras en zonas cercanas a las instalaciones de estas, para lo cual, se solicitó el permiso a las alcaldías locales, el cual no fue otorgado.

Se contactó, también, la empresa minera Las Brisas, en el municipio de Campamento, Antioquia. Inicialmente los directivos mostraron interés en participar del estudio, pero, infortunadamente después de ocho meses de conversaciones la gerencia argumentó no tener frentes de obras activos que posibilitarán la toma de muestras requerida.

Selección de empresas y población de estudio: empresas y municipio que aceptaron participar del estudio

El área de gestión del riesgo del Laboratorio de Higiene y Toxicología Industrial de la ARL Positiva, informó que una empresa del sector transporte en el departamento de Antioquia, presentó solicitud de mediciones higiénicas de tipo ocupacional en trabajadores que realizaban actividades de remache de bandas de frenos en su flota de camiones. Siguiendo los procedimientos internos de la ARL, se contactó esta empresa, la cual aceptó hacer parte del estudio.

En lo concerniente a los estudios en suelos, se contactó la alcaldía del municipio de Sibaté, Cundinamarca, que ha enfrentado una problemática de salud pública comunitaria, reseñada en diferentes investigaciones [34,35,93]. Inicialmente se planteó tomar muestras en las zonas aledañas a la planta de producción de la empresa Eternit S.A, sugeridas por la alcaldía. Pero esta propuesta fue descartada, al no contar con bombas de muestreo de alto caudal, mayor que 10 l/min, que son necesarias para monitorear este tipo de ambientes.

Posteriormente, la Secretaria de Salud de Sibaté, recomendó realizar el estudio en trabajadores de una empresa constructora, que realizaban actividades en el municipio. Esto surgió como respuesta del municipio a las múltiples quejas y peticiones, por parte de los habitantes del lugar. Los habitantes argumentaban un potencial peligro, inducido por las excavaciones realizadas y por la nube de polvo que se levantaba en las excavaciones. Se coordinó, entonces, tomar las muestras, tanto en la población trabajadora, así como en los sitios excavados.

En resumen, fueron seleccionados para monitoreo dos ambientes laborales, con la participación de 10 trabajadores. Se planteó monitorearse el 70% de la jornada laboral. Adicionalmente, se planteó la toma de muestras en dos sitios donde se realizaban excavaciones para obras civiles.

3.4.2 Etapa 2. Desarrollo de pruebas preliminares experimentales

El objetivo de las pruebas de laboratorio fue obtener muestras para el análisis por microscopía de contraste de fase y microscopía electrónica de barrido, que permitieran al

tesista adquirir destreza para la identificación de todo tipo de fibras y en especial aquellas que pudieran ser de asbesto, además, llevar a cabo el conteo de las fibras presentes, aplicando cada uno de los parámetros definidos en la metodología NIOSH 7400 “Análisis de fibras de asbesto y otro tipo de fibras” (Anexo A) [5] y el protocolo para la toma de muestras de fibras de asbesto y otro tipo de fibras en aire de tipo laboral (Anexo B). En la Tabla 3-2 se relacionan los laboratorios donde se llevó a cabo esta etapa.

Tabla 3-2. Desarrollo de pruebas preliminares por laboratorio

Laboratorio	Técnica de análisis			
	Muestreo controlado	Transparentado de filtros	MCF	MEB
Laboratorio de higiene y seguridad industrial ARL Positiva	X			
Laboratorio de toxicología – Maestría en Toxicología, UN		X		
Laboratorio de microscopía óptica, UN			X	
Laboratorio SEM, Facultad de Ciencias, UN				X

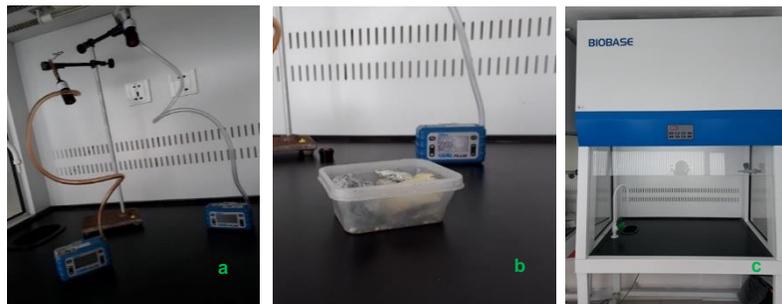
Fuente. Autor

Muestreo controlado

El procedimiento se desarrolló en el mes de diciembre de 2017, febrero y marzo de 2018 en el laboratorio de higiene y toxicología industrial de la ARL Positiva, utilizando la cabina de extracción marca Biobase, modelo FH1000 (X), con una velocidad de aire de 0.3 a 0.8 m/s.

Se ubicó dentro de la cabina un trípode que hiciera de soporte (para simular burdamente el cuerpo de un trabajador), se instalaron las bombas como se muestran en la Figura 3-2, a un caudal de 2000 ml/min o 2 L/min, se bajó el vidrio de la cabina permitiendo solo el acceso de las manos del operario, con los elementos de protección personal (guantes, bata, protección de los ojos, y protección respiratoria N95), se programó la cabina de extracción a una velocidad de circulación 0.4 m/s, se encendieron las bombas, se tomó la roca de asbesto, realizando un raspado firme con la espátula durante 4 a 10 minutos, que generará dispersión de las fibras al interior de la cabina para que fuesen depositadas en el filtro de membrana de éster de celulosa (MEC) al interior de la capucha.

Figura 3-2. Tren de muestreo, roca de asbesto y cabina de extracción



a. Tren de muestreo, b. roca de asbesto, c. Cabina de extracción

Fuente. Autor

En la Tabla 3-3 se encuentran consignados los datos provenientes del muestreo controlado, es de aclarar que las bombas cuentan con un sistema de almacenamiento de información, lo que permitió extraer dicha información conforme al día en que se desarrolló el muestreo, para luego ser consignada en la tabla que presenta a continuación.

Tabla 3-3. Datos reportados por la bomba de muestreo durante el desarrollo de la prueba preliminar

Bomba	Ci (L/min)	Cf (L/min)	Pm (min)	Vm (L)	Ti (min)	Tf (min)	Va (L)	Ta (°C)	Pa (mmHg)	Vn (L)	Filtro
38841	2	2	10	21,075	12:05 p. m.	12:15 p. m.	21,075	27	562	15,48	MEC (MCF)
36605	2	2	10	21,076	12:05 p. m.	12:15 p. m.	21,076	23	558	15,590L	MEC (MET)
36605	2	2	4	9	12:16 p. m.	12:20 p. m.	8,938	27.1	562	6.562L	MEC (MET)

Ci: Caudal inicial, Cf: Caudal final; Pm: Periodo de muestreo; Vm: Volumen muestreado, Ti: Tiempo inicial; Tf: Tiempo final; Va: Volumen absoluto; Tª: Temperatura absoluta, Pa: Presión absoluta; Vn: Volumen nominal.

Fuente. Autor

Los datos como caudal, periodo de muestreo y volumen absoluto se utilizaron para realizar el cálculo de la concentración en f/cm^3 . Una vez finalizado el muestreo, se apagaron las bombas, se retiró la capucha, se extrajo el filtro y se guardó en un portafiltro. Estas muestras se utilizaron para lecturas por MCF y MEB.

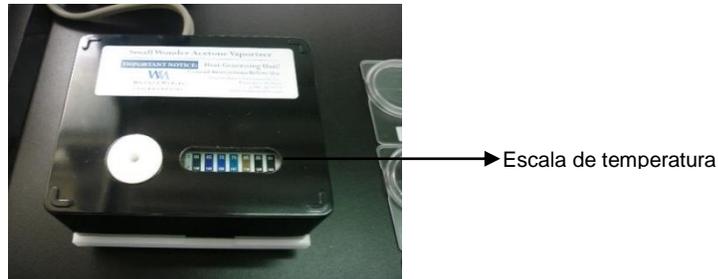
Transparentado de filtros

Prueba de acetona:

Se siguieron las recomendaciones de la metodología NIOSH 7400 y el instructivo para el uso del vaporizador de acetona (Anexo C). Estas pruebas se desarrollaron durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo de 2018.

Las pruebas se realizaron para determinar la cantidad de acetona a usarse, iniciando con la sugerida por la metodología NIOSH 7400. Se utilizaron dos grados de acetona, un grado p.a al 99% y otro grado HPLC, por su alta efectividad y pureza, filtros MEC sin usar (blancos), micropipeta, vaporizador y jeringa de inyección. En la Figura 3-3 se presenta el vaporizador de acetona previa fase de calentamiento.

Figura 3-3. Vaporizador de acetona del Laboratorio de Toxicología Ambiental y Ocupacional, Universidad Nacional de Colombia.



Fuente. Autor

El vaporizador se estabilizó entre 3 y 5 minutos después de encendido, normalizando la temperatura con el control de termostato en un rango de 70°C - 75°C respectivamente. Se introdujo el portaobjetos con el filtro por la ranura del vaporizador y se inyectó la acetona. En la Figura 3-4 se representa la forma en que se introdujo el portaobjetos en la ranura del vaporizador y la jeringa de inyección.

Figura 3-4. Representación de inyección de acetona al filtro



a. Porta objeto y filtro, b. Porta objeto en la ranura, c. Jeringa extrayendo acetona, d y e. Jeringa en el agujero de inyección.

Fuente. Autor

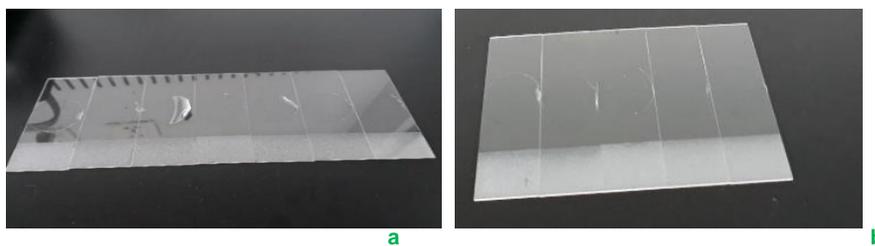
Se realizaron pruebas previas, en el laboratorio, bajo ambiente controlado, para determinar los parámetros adecuados para realizar el transparentado de los filtros, y para realizar el entrenamiento en lo relacionado a la (i) concentración de fibras en los filtros (microscopía de contraste de fase), (ii) la morfología de dichas fibras (microscopía electrónica de barrido) y (iii) su composición química (microanálisis químico en el microscopio electrónico de barrido). En la Tabla 3-4 se presentan los datos obtenidos en las cuatro primeras pruebas.

Tabla 3-4. Resultados de la prueba de acetona efectuadas sobre los filtros MEC

Prueba 1			
Acetona	Cantidad (ml)	Temperatura °C	Resultado
Grado p.a	0.15	70	Filtro transparentado poco uniforme, presentaba rugosidad y dureza.
Grado HPLC	0.15		Filtro transparentado uniforme, superficie lisa y traslucida.
Prueba 2			
Grado p.a	0.2	75	Filtro transparentado poco uniforme, presentaba rugosidad y dureza.
Grado HPLC	0.2		Filtro transparentado uniforme, superficie lisa y traslucida.
Prueba 3			
Grado p.a	0.25	75	Filtro transparentado uniforme, pero con cierta rugosidad.
Grado HPLC	0.25		Filtro transparentado uniforme, superficie lisa y traslucida.
Prueba 4			
Grado p.a	0.35	75	Filtro transparentado uniforme, pero con cierta rugosidad.
Grado HPLC	0.35		Filtro transparentado uniforme, superficie lisa y traslucida.

En la Figura 3-5 se presentan el transparentado y los resultados obtenidos para cada una de las pruebas desarrolladas.

Figura 3-5. Filtros transparentados con acetona



a. Transparentado con acetona al 99%, b. Transparentado con acetona HPLC

Fuente. Autor

En la muestra **a** se observa que el filtro es rugoso, por tanto, no ofrece un transparentado homogéneo, mientras que en la muestra **b**, la superficie es totalmente lisa y traslucida en su totalidad.

La acetona grado HPLC es la que mejor resultados de transparentado ofrece, por tanto, las pruebas pilotos se hicieron con este tipo de acetona. La metodología recomienda utilizar 250 microlitros (µL), pero considerando los resultados de la Tabla 3-3, las pruebas

se iniciaron con 300 µL. Es de aclarar, que la forma en que se evaluó el transparentado obtenido fue de tipo cualitativo, dado que no se llevaron a cabo pruebas de transmitancia⁸. En la Tabla 3-5 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3-5. Resultados de transparentado con acetona HPLC sobre los filtros MEC

Prueba	Cantidad (µL)	Temperatura (°C)	Resultado
Piloto 1	300	75	Transparentado del filtro a la mitad, la temperatura cambia.
Piloto 2	400	80	Transparentado del filtro en gran parte del área.
Piloto 3	450	85	Transparentado del filtro en gran parte del área.
Piloto 4	400	85	Transparentado del filtro en gran parte del área.
Piloto 5	500	85	Transparentado total del filtro.
Piloto 6	500	75	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 7	550	75	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 8	550	75	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 9	550	75	Transparentado total del filtro
Piloto 10	550	75	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 11	550	75	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 12	250	75	Transparentado total del filtro
Piloto 13	300	70	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 14	300	70	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.
Piloto 15	300	70	Transparentado total del filtro, se estabiliza la temperatura.

Fuente. Autor

⁸ **Transmitancia:** se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo.

Una vez el vaporizador estabiliza la temperatura, la cantidad de acetona que se utilizó osciló entre 250 y 500 μL aproximadamente.

Los resultados obtenidos con relación al transparentado se examinaron visualmente, juzgando cualitativamente, la homogeneidad, la apariencia general y su traslucidez. Después de terminar el proceso de transparentado, variando la temperatura del proceso de inmersión en la acetona a temperatura entre 60 y 90 $^{\circ}\text{C}$, a incrementos de 5 $^{\circ}\text{C}$ y la cantidad de acetona adicionada (adición de acetona HPLC entre 250 a 500 μL , a intervalos de 50 μL).

Se obtuvieron filtros homogéneos y traslucidos en las pruebas piloto realizadas. Determinando que la acetona HPLC a 300 μL aproximadamente y una temperatura regulada de 75 $^{\circ}\text{C}$ aproximadamente eran las ideales para desarrollar el proceso. Con estos parámetros obtenidos se realizó el transparentado de los filtros resultantes del muestreo controlado y del patrón de referencia.

Finalizadas las pruebas de acetona, se tomaron los filtros del muestreo controlado y se les hizo un corte, utilizando un bisturí en línea recta en una única dirección, depositando las dos nuevas muestras en un porta muestras con tapa de seguridad. En la Figura 3-6 se representa el corte y rotulado de las muestras.

La porción de filtro más chica, se utilizó para análisis por MEB y el restante del filtro fue transparentado para análisis por MCF. Este procedimiento se realizó con las muestras recolectadas en los ambientes laborales estudiados.

Figura 3-6. Corte del filtro y rotulado



Fuente. Autor

A las diferentes muestras provenientes de ambientes laborales (capuchas), se les hizo un procedimiento particular, el cual fue utilizar una cinta de carbono, con el propósito de recolectar los residuos presentes en la capucha, haciendo un barrido de forma cuidadosa y sin tanta presión. Estas cintas se convirtieron en nuevas muestras. En la Figura 3-7 se representa la forma en que fueron guardadas las cintas de carbono.

Figura 3-7. Muestra de cinta de carbono protegida y rotulada

Fuente. Autor

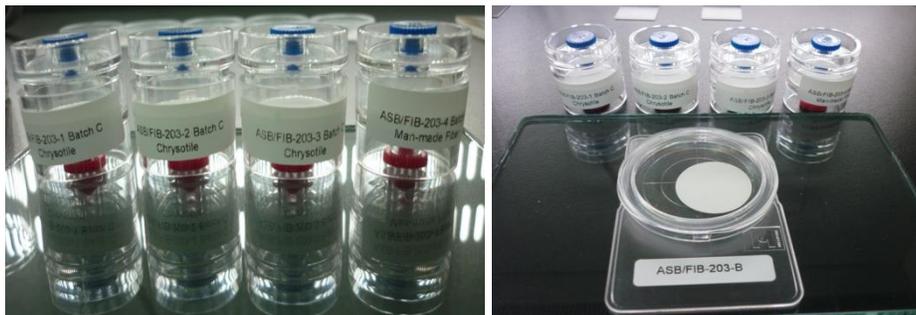
→ Cuantificación de fibras

Una vez los filtros se transparentaron, fueron leídos, utilizando el microscopio invertido de fase, marca Nikon eclipse TE300 del laboratorio interfacultades de microscopía óptica de la Universidad Nacional, sede Bogotá, en el mes de marzo y abril de 2018 siguiendo las recomendaciones del protocolo para la caracterización de fibras de asbesto por microscopía de contraste de fase (Anexo D). En la Figura 3-8 se muestran las imágenes del microscopio.

Además, también se leyeron material de referencia ASB/FIB-201 y ASB/FIB/203-1 Chrysotile, suministrados por el Instituto de Salud Pública de Chile (ISP) y acreditado por la American Industrial Hygiene Association (AIHA), quién define los diferentes tipos de asbesto presente en dicho material. En la Figura 3-9 se muestra el patrón de referencia. Estas muestras fueron utilizadas con el propósito de garantizar un proceso adecuado para la identificación de fibras de asbesto, que permitieran al analista un entrenamiento riguroso.

Figura 3-8. Microscopio invertido de fase Eclipse TE300, marca Nikon

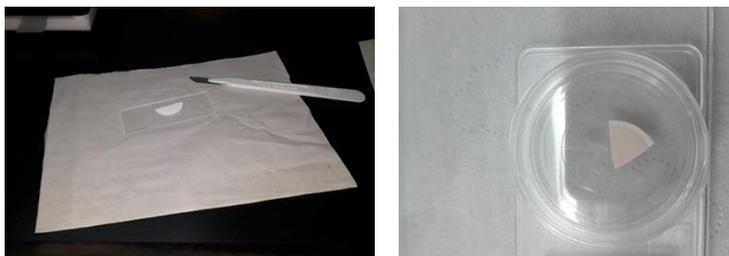
Fuente. Microscopio de laboratorio de interfacultades de microscopía óptica.

Figura 3-9. Patrón de referencia ASB/FIB-201 y ASB/FIB/203-1Chrysotile

Fuente. Autor

→ Caracterización de fibras

Para este procedimiento se utilizó $\frac{1}{4}$ del filtro, como se muestra en la Figura 3-10, el cual se sujetó a una cinta de carbono adherido a la placa (porta objetos), y se ubicó al interior del microscopio de referencia Tescan Vega3 SB, equipo que se muestra en la Figura 3-11.

Figura 3-10. Porción del filtro MEC expuesto a fibras de asbesto

Fuente. Autor

Figura 3-11. Imágenes del microscopio Tescan Vega3 SB del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.

Fuente. Microscopio Tescan Vega3 SEM del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.

Los resultados obtenidos para las pruebas experimentales se presentan en el Capítulo 4, donde se especifica tanto la cuantificación de las muestras leídas, así como también, la composición química de las fibras presentes en las muestras preliminares.

3.4.3 Etapa 3. Muestreo en campo

→ Ambientes laborales:

El objetivo de la toma de muestras, era determinar la exposición de los trabajadores a fibras de asbesto en su ambiente laboral. La toma de muestras en primera instancia pretendía evaluar grupos de exposición similar (GES), pero dados los inconvenientes con la participación de las empresas, como se describe en la Etapa 1, y teniendo en cuenta que solo se tenían dos empresas con un número limitado de trabajadores, los cuales realizaban actividades específicas, se tuvo que realizar un muestro por conveniencia. Al no poder definir el GES, se estableció el “*muestreo del peor caso*” [96], evaluando el tipo de tarea, mantenimiento de los vehículos, y la proximidad a la fuente. Se realizaron muestreos durante el 70% de la jornada laboral.

Descripción de los perfiles de cargo

Para la toma de muestras, se revisaron previamente los perfiles de cargo, actividades y las áreas en las cuales los individuos realizaban sus labores. En las Tablas 3-6, 3-7 y 3-8 se describen los perfiles de los trabajadores de la empresa de transporte y construcción.

Tabla 3-6. Perfiles de cargo de los trabajadores empresa de transporte de carga

Cargo	Descripción de la tarea
Mantenimiento	Realizar lubricación, cambio de aceite, mecánica, cambio de llantas, remache de bandas, entre otras.
Auxiliar de mantenimiento	Detectar y reportar fallas mecánicas, realizar reparaciones menores, realizar mantenimiento de sistemas neumáticos, engrases generales, soldadura, mantenimiento de llantas y rines.
Actividades de patio	Labores de aseo, lubricación, remache y cambio de bandas.
Almacén	Recepción de materiales nuevos y usados para mantenimiento y/o cambio, supervisión de inventarios, entrega de repuestos.
Actividades varias	Arreglo y reparación de piezas, taller eléctrico, soldadura.

Fuente. Autor

Tabla 3-7. Descripción de las actividades asociadas al perfil de cargo y funciones de los trabajadores del estudio en la empresa de transporte de carga.

	Edad	Antigüedad en el cargo	Tarea	Examen médico ocupacional	Elemento de protección personal (EPP)	Observaciones
Trabajador 1	19 años	2 días	Remache de bandas. Descripción de la tarea: ○ Mantenimiento ○ Remache de 1 a 2 bandas en época de baja demanda. En	Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría Osteomuscular Audiometría	Traje tyvek, mascarilla facial media cara, con filtro P100, guantes con revestimiento de poliuretano, marca kimberly-clark,	El traje tyvek es utilizado en reiteradas ocasiones para realizar el trabajo de remache, cambio y ajuste de bandas, las cuales en su mayoría son de
Trabajador 2	22 años	18 meses				
Trabajador 3	24 años	30 meses				
Trabajador 4	24 años	36 meses				

	Edad	Antigüedad en el cargo	Tarea	Examen médico ocupacional	Elemento de protección personal (EPP)	Observaciones
			alta demanda, se pueden manipular de 3-4 bandas/día durante la semana. o Desmonte de llantas.	Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría	referencia 39560, EN388:2003, CE EN420, overol y camisa en jean, botas de seguridad con punta de hierro, y suela antideslizante.	cerámica y asbesto.
Trabajador 5	22 años	18 meses	Auxiliar de mantenimiento Descripción del perfil: o Manejo de herramientas o Sopte o Remache de 1 a 2 bandas en época de baja demanda. En alta demanda, se pueden manipular de 3-4 bandas/día durante la semana.	Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría	Traje tyvek, mascarilla facial media cara, con filtro P100, guantes con revestimiento de poliuretano, marca kimberly-clark, referencia 39560, EN388:2003, CE EN420, overol y camisa en jean, botas de seguridad con punta de hierro, y suela antideslizante.	El traje tyvek es utilizado en reiteradas ocasiones para realizar el trabajo de remache, cambio y ajuste de bandas, las cuales en su mayoría son de cerámica y asbesto.
Trabajador 6	24 años	18 meses	Actividades de patio. Descripción de la tarea: o Aseso general o Lubricación de los vehículos o Remache de 1 a 2 bandas en época de baja demanda. En alta demanda, se pueden manipular de 3-4 bandas/día durante la semana	Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría	Traje tyvek, mascarilla facial media cara, con filtro P100, guantes con revestimiento de poliuretano, marca kimberly-clark, referencia 39560, EN388:2003, CE EN420, overol y camisa en jean, botas de seguridad con punta de hierro, y suela antideslizante.	El traje tyvek es utilizado en reiteradas ocasiones para realizar el trabajo de remache, cambio y ajuste de bandas, las cuales en su mayoría son de cerámica y asbesto.
Trabajador 7	24 años	16 meses en la empresa, y 15 días en el almacén.	Almacén. Descripción de la tarea: o Manejo de inventario o Entrega de insumos o Supervisión de repuestos y control de los mismos	Osteomuscular Audiometría Espirometría Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría	Guantes con revestimiento de poliuretano, marca kimberly-clark, referencia 39560, EN388:2003, CE EN420	Entrega de repuestos para cambio de bandas. El trabajador hacia recorridos por el área de patio de taller mecánico (área de remache de bandas)
Trabajador 8	37 años	36 meses	Actividades varias. Descripción de la tarea:	Osteomuscular Audiometría Espirometría	Guantes con revestimiento de poliuretano, marca	

Edad	Antigüedad en el cargo	Tarea	Examen médico ocupacional	Elemento de protección personal (EPP)	Observaciones
		<ul style="list-style-type: none"> ○ Soldadura ○ Pintura ○ Organización de herramientas ○ Actividades de taller eléctrico 	Alcohol y drogas Triglicéridos Colesterol Visiometría	kimberly-clark, referencia 39560, EN388:2003, CE EN420	

Fuente. Autor

El análisis de los perfiles de cargo anteriores permitió establecer que las actividades relacionadas con mantenimiento, actividades de patio, y almacén fueron las de mayor riesgo de exposición laboral, para los objetivos del estudio, sin embargo, el primer día de monitoreo se incluyó el trabajador número 8, por estar cerca de la zona de remache de bandas.

Tabla 3-8. Perfiles de cargo trabajadores de la empresa de construcción

Cargo	Descripción de la tarea
Ingeniero residente	Supervisión y desarrollo de obra.
Ingeniero HSE (profesional S&SO)	Vigilancia y control de las condiciones en Seguridad y Salud en el Trabajo.
Ingeniero civil	Topografía, nivelación, y actividades de agrimensura.
Conductor retroexcavadora	Conductor de maquinaria pesada.
Auxiliar de excavación	Persona encargada de colaborar con la retroexcavadora, palear y actividades en el subsuelo.
Auxiliares de obra	Actividades varias

Fuente. Autor

De los perfiles de cargo descritos, se seleccionó trabajadores que son auxiliares de excavación, para desarrollar el monitoreo, por considerarse el de peor escenario.

Una vez se definieron los perfiles de cargo y actividades a involucrar en el monitoreo durante la jornada laboral para las dos empresas, se informó a cada uno de los trabajadores participantes, la importancia del muestreo, siguiendo las directrices a continuación:

- Se socializó con cada uno de los participantes el desarrollo del proyecto y se solicitó el consentimiento informado para la toma de muestras (Anexo E).
- Instalación del tren de muestreo al trabajador, sujetando la bomba al cinturón y extendiendo la manguera a lo largo del torso hasta llegar a la zona respiratoria, sujetando el adaptador de la capucha a la camisa.
- Registro de la hora de inicio del muestreo.

- Tiempo de monitoreo, durante el 70% de la jornada laboral.

El trabajo de campo para la toma de muestras en ambientes laborales, se llevó a cabo en la empresa de transporte en el mes de mayo de 2018, durante 4 días seguidos. En el caso de la empresa de construcción el muestreo se realizó durante una única jornada laboral en el mes de noviembre de 2018.

Las bombas trabajaron con un caudal entre 2 L/min o 2000 ml/min. Se instalaron las bombas en los trabajadores, confirmando que entendían en qué consistía el monitoreo, y las recomendaciones para la no manipulación de las bombas e informar si estas fallaban. En la Figura 3-12 se representa la forma en que se instalaron las bombas en el personal de la empresa de transporte y del sector construcción.

Población laboral del estudio

- Siete trabajadores del sector transporte que realizaban actividades mecánicas de remache de bandas de frenos y tres trabajadores del sector construcción (en total 10 trabajadores) que apoyaban actividades de excavación, a quienes se les instaló la bomba de muestreo a la altura de la zona respiratoria.

Figura 3-12. Tren de muestreo instalado en los trabajadores



Fuente. Autor

Una vez finalizado el tiempo de muestreo, se retiró la bomba del trabajador, garantizando que las capuchas tuviesen el mínimo de movimiento, para lo cual se sujetó con una cinta de enmascarar en la caja diseñada para el transporte. Las muestras fueron rotuladas y transportadas por carretera y avión, dado que el muestreo se llevó a cabo en meses diferentes (mayo y noviembre de 2018) y en ciudades distantes. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de TOXICAO, en donde permanecieron por tiempo no mayor a 15 días, hasta ser llevadas al laboratorio de toxicología de la Maestría en Toxicología de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional, para realizar el proceso de extraer el filtro MEC, al que se le hizo la inspección visual, con el objetivo de garantizar que no se encentraran colmatados y posterior a ello, someterlo al proceso de transparentado. En la Figura 3-13 se representa la forma en que se embalaron y rotularon las muestras al finalizar la jornada de trabajo.

Figura 3-13. Muestras rotuladas y embaladas



Fuente. Autor

→ **Muestras del subsuelo**

Las muestras del subsuelo, fueron tomadas por conveniencia, dado que se estaban desarrollando excavaciones en dos puntos de la Cra 7b con calle 7 en el municipio de Sibaté, en el mes de noviembre de 2018; estas muestras fueron recolectadas por el investigador, durante la jornada en que se llevó a cabo la toma de muestras en ambientes laborales en los trabajadores de la empresa constructora. Solo se pudo monitorear estos dos puntos, dado que el resto de las obras en las diferentes calles del municipio ya habían finalizado. Para la toma de las muestras se siguieron las recomendaciones del protocolo para la toma de muestras en materiales con asbesto (Anexo F). El muestreo ejecutado conforme al protocolo fue de tipo B. Por cada punto muestreado, se recolectaron 3 muestras, a una profundidad de 1, 1.5 y 2.5 metros aproximadamente. En la Figura 3-14 se presenta la toma de muestras.

Figura 3-14. Toma de muestras en el subsuelo



Fuente. Autor

Las muestras fueron guardadas en bolsas ziploc de cierre hermético, rotuladas conforme al punto de muestreo y transportadas al laboratorio de toxicología de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, las cuales fueron sometidas a preparación 15 días después de haber sido recolectadas. En la Figura 3-15 se presentan las muestras rotuladas tomadas en el subsuelo.

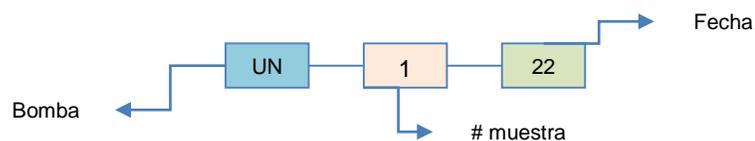
Figura 3-15. Muestras rotuladas y empacadas



Fuente. Autor

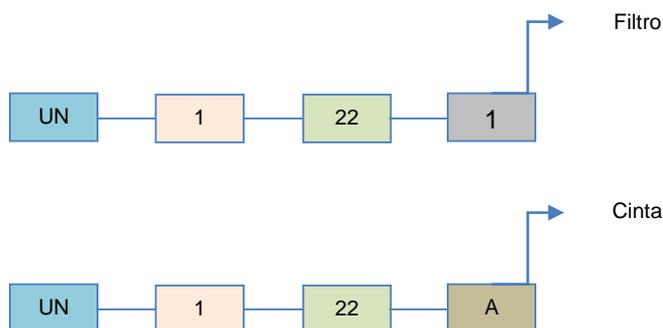
Para la identificación de las muestras se diseñó una codificación, conforme a la lectura a realizarse, asignando el número de la bomba, muestra y fecha de recolección. En la Figura 3-16, 3-17 y 3-18 se representa el tipo de codificación utilizado.

Figura 3-16. Codificación de muestras para análisis por MCF



Fuente. Autor

Figura 3-17. Codificación de muestras para análisis por MEB



Fuente. Autor

Figura 3-18. Codificación de muestras para análisis por DRX



Fuente. Autor

3.4.4 Etapa 4. Análisis por microscopía

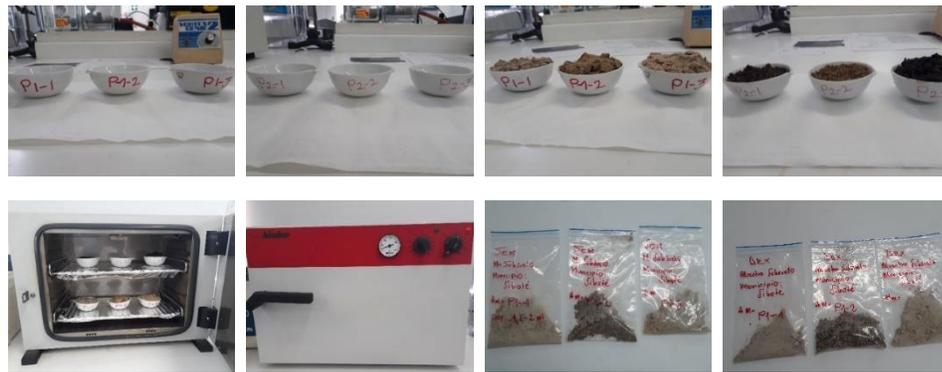
Ambientes laborales:

Tras la recolección, embalaje y transporte de las 13 muestras recolectadas (10 de la empresa de transporte y 3 pertenecientes a la empresa constructora). Estas muestras fueron preparadas conforme a lo descrito en la etapa 2 y analizadas por microscopía de acuerdo a la lectura a realizar, como se explica en la Tabla 3-2.

Muestras del subsuelo:

Las muestras recolectadas fueron estudiadas en el laboratorio de toxicología de la facultad de medicina de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Para eliminar la presencia de humedad, las muestras fueron secadas en estufa a 250°C, durante 4 horas aproximadamente (este tiempo fue sugerido por conveniencia hasta obtener la muestra seca). Luego fueron trituradas hasta que quedaran con textura fina, para ser empaçadas y llevadas a los laboratorios SEM y DRX este último también de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. En la Figura 3-19 se presentan el proceso de secado de las muestras.

Figura 3-19. Secado de las muestras

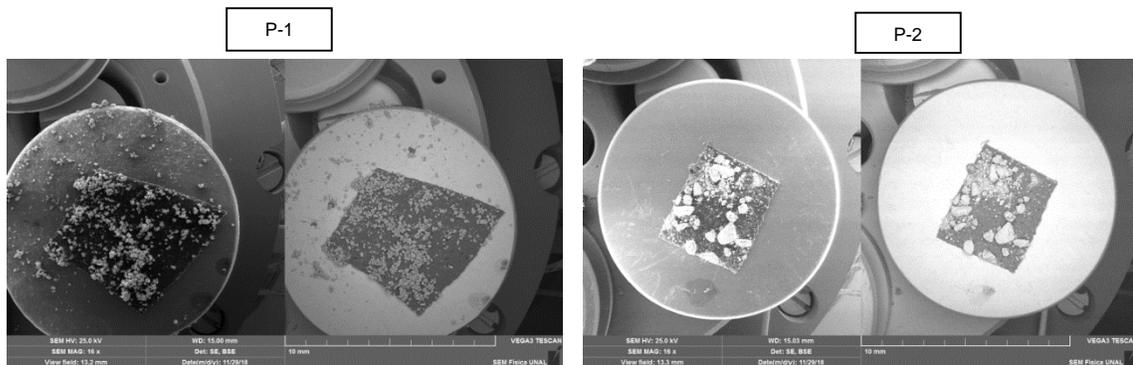


Fuente. Autor

Las muestras al momento de su análisis, fueron impregnadas en una cinta de carbono (subsuelo) para luego ser puesta en un porta-muestras. En la Figura 3-20 se evidencia la forma en que se impregnó el sustrato.

Los estudios cristalográficos DRX fueron realizados utilizando Difractómetro Xpert Pro, de Panalytical.

Figura 3-20. Substrato en cinta de carbono



Fuente. Autor

3.4.5 Etapa 5. Resultados y conclusiones

Todos los resultados se presentan en el capítulo 4 y 5 de este documento.

3.5 Criterios de recuento de fibras y método estadístico para estudio de los resultados de microscopía por contraste de fase

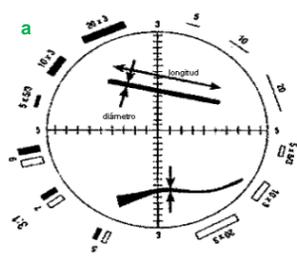
La metodología NIOSH 7400 y la técnica de análisis definida por la OMS, establece algunos parámetros que se deben tener en cuenta al momento del conteo de las fibras.

→ Criterios de recuento [5,74]

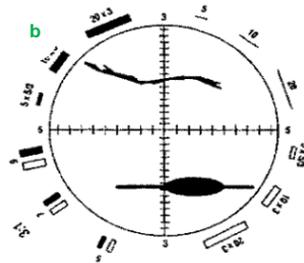
- Se considera una fibra aquella estructura que presenta una longitud $>5 \mu\text{m}$, un diámetro menor de $3 \mu\text{m}$ y una relación longitud/diámetro 3:1,
- La uniformidad de la fibra, definida por su longitud y grosor.
- Las protuberancias de las fibras, relacionadas con abultamientos que puedan presentar.
- Los extremos de las fibras (que estén dentro o fuera del campo de lectura),
- Fibras divididas o unidas, siempre y cuando estén dentro del campo de conteo.
- Agrupación de las fibras, las cuales pueden generar ramificaciones y deben ser contadas por separado.

En la Figura 3-21 se presentan los criterios de recuento que deben cumplirse para determinar si una fibra debe incluirse o no en el conteo.

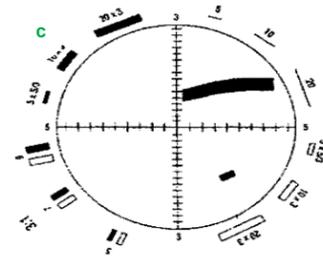
Figura 3-21. Criterio de conteo de una fibra [5,74]



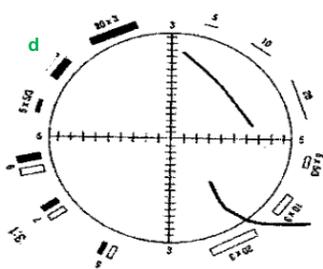
a. Cumple con los criterios de longitud, diámetro y aspecto, el diámetro se mide en el punto considerado como promedio.



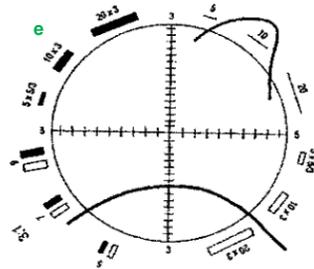
b. al estimar el diámetro se ignora la partícula o "bulbo" de resina y no se cuenta a la fibra si el diámetro es demasiado ancho.



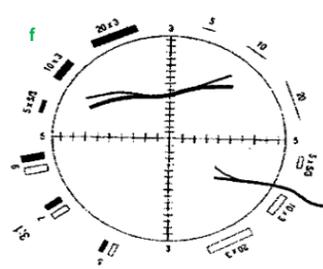
c. la fibra no se cuenta, si su aspecto es menor de 3:1.



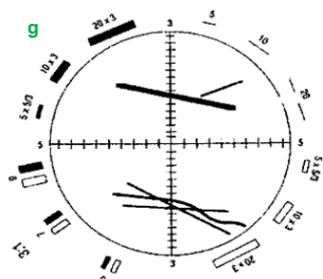
d. 1 fibra si está dentro del campo, y se considera como 1/2 fibra, si está



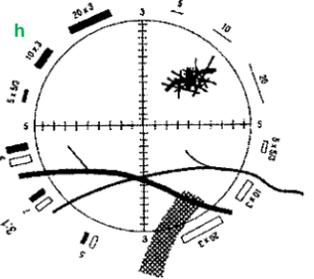
e. 1 fibra ambos extremos en el campo, y 0 fibra en caso contrario.



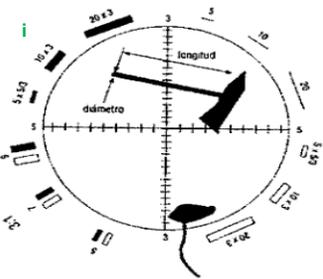
f. 1 fibra con extremos divididos, 1/2 fibra con 2 extremos, dividida, cuenta con un extremo.



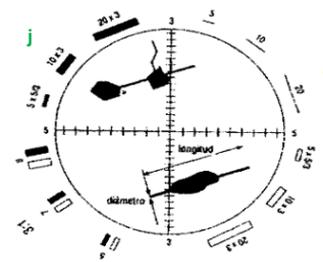
g. Se cuentan las fibras por separados.



h. No se cuentan las fibras



i. Se cuenta 1 fibra y 1/2 fibra.



j. Se cuentan 2 fibras y 1 fibra.

Fuente. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España (INSST) MTA/MA-051/A04 – Organización Mundial de la salud. 1997.

→ Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico, inicialmente se determina el número total de fibras de la muestra y posteriormente el reporte de la concentración. A continuación, se describe cada uno de estos [5,74].

- Determinación del número total de fibras en la muestra. La cantidad de fibras en la muestra se obtiene a partir de la siguiente expresión: ecuación 3-1 [5,74].

(Ecuación 3-1)

$$E = \frac{\left(\frac{F}{nf} - \frac{B}{nb}\right)}{A_f}, \text{ fiber/mm}^2$$

donde $E = \text{Fibras/mm}^2$, $F/nf =$ promedio de fibras por campo de retícula, $B/n_b =$ Campo blanco, $A_f =$ Área de campo de la retícula.

- Reporte de la concentración, se utiliza la siguiente expresión: ecuación 3-2 [4,70]

(Ecuación 3-2)

$$C = \frac{EAc}{V \times 10^3}$$

donde $C =$ Concentración, $EAc =$ Recolección efectiva del filtro, $V =$ Volumen muestreado.

Con estos datos y fórmulas descritas, se diseñó un formato en Excel® para obtener el dato de la concentración de fibras en las muestras estudiadas y expresadas como f/cm^3 .

→ Precisión, exactitud y límite de detección

Precisión

La precisión depende del número total de fibras contadas. La desviación estándar relativa se documenta en las referencias (NIOSH 7400 y Técnicas de análisis fibras de asbesto) para los conteos de fibras. Hay que contar como mínimo 100 fibras (o inspeccionar 100 campos reticulares). Sin embargo, se contarán las fibras de 20 campos reticulares como mínimo, aunque haya en ellos más de 100 fibras [5,74].

La precisión de este método depende principalmente del número total de fibras contadas en la muestra y de la uniformidad de su distribución en la superficie del filtro. La distribución aleatoria de las fibras en el filtro se ajusta a una distribución de Poisson, por tanto, su desviación estándar se calcula mediante la expresión $N^{1/2}$, siendo N el número de fibras contadas. Esto supone una desviación estándar relativa (srP) o coeficiente de variación del 10% para un recuento de 100 fibras y del 32% para un recuento de 10 fibras. En la Tabla 3-9 se presentan los coeficientes de variación [5,74].

Tabla 3-9. Coeficientes variación para distintas cantidades de fibras contadas según una distribución de Poisson.

N n° de fibras	srP (%) Poisson (teórica)	SrP (%) Real (experimental)	Límites de confianza del 90% para la medida de determinaciones repetidas (Número de fibras)	
			Inferior	Superior
5	45	49	2,0	11,0
7	38	43	3,2	14,0
10	32	37	5,1	18,5
20	22	30	11,7	33,2
50	14	25	33	76
80	11	23	53	118
100	10	22	68	149
200	7	21	139	291

Exactitud

La exactitud de este método no se puede evaluar al no ser posible conocer el valor verdadero de la concentración de fibras en una determinada nube de polvo. Por otra parte, no tiene sentido considerar el sesgo del método por tratarse de un método de referencia. Sin embargo, si hay que tener en cuenta la desviación o sesgo de los resultados de los recuentos respecto de los valores de referencia o de consenso asignados a las muestras, a través de los controles de calidad internos y externos [5,74].

Límite de detección

El límite de detección de este método se puede estimar en 0,01 fibras/cm³, siempre que el volumen de aire muestreado sea como mínimo 480 litros. Este valor se deduce a partir del límite inferior de recuento de fibras en el filtro y se puede modificar dependiendo del volumen de muestreo [5,74], como se especifica en la Tabla 3-10.

El límite inferior de recuento de fibras en un filtro está estimado en 10 fibras en 100 campos. Este es un valor acordado que se ha deducido teniendo en cuenta un límite inferior de confianza del 90%, coincide con el número máximo aceptable de fibras en un filtro blanco. Dado que los intervalos de confianza para los resultados de los recuentos están calculados sobre la precisión intralaboratorio, no puede descartarse que, en la práctica, tanto el límite inferior de recuento como el límite de detección, puedan tener valores más altos [5,74].

Los resultados por debajo del límite inferior de recuento no son cuantificables, por lo que en estos casos la concentración en aire se expresará como inferior al límite de detección que corresponda, de acuerdo con el volumen de aire muestreado [5,74].

Tabla 3-10. Valores del límite de detección para la concentración de fibras en aire en función del volumen de muestreo [5,74].

Límite inferior de recuento			Volumen de aire muestreado litros.	Límite de detección en aire fibras/cm ³ .
10 fibras/100 campos	12.7 fibras/mm ² (*)	4900 fibras en filtro (**)	10	0,50
			25	0,20
			50	0,10
			90	0,05
			120	0,04
			240	0,02
			480	0,01
			960	0,005

3.6 Estimación de la dosis de exposición inhalada en trabajadores expuestos

El propósito de la evaluación de la exposición es caracterizar la magnitud y frecuencia con la que un individuo o población pueda estar expuesta a un peligro [6].

“La exposición se expresa como la dosis de un agente o xenobiótico⁹ (cantidad diaria de dicha sustancia por unidad de peso corporal) que puede llegar a entrar en contacto con las barreras de absorción de un organismo (pulmones, piel o tracto gastrointestinal). Dicha magnitud se denomina dosis de exposición estimada, la cual está determinada como una función de la concentración del agente, del tiempo de exposición, y del comportamiento que conduce a dicha exposición” [6], como se expresa en la ecuación 3-3.

(Ecuación 3-3)

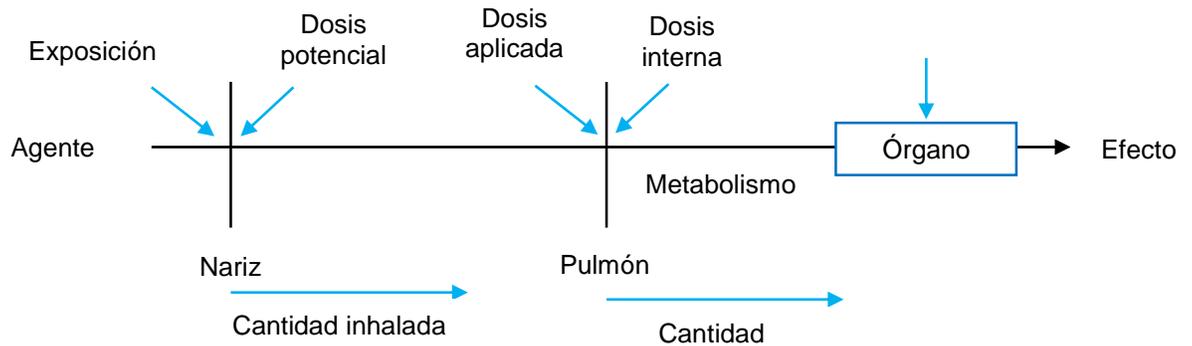
$$\text{Exposición} = f(\text{Concentración}, \text{Tiempo}, \text{Patrones de actividad})$$

donde, la *Concentración* se refiere a la cantidad de la sustancia tóxica en el medio afectado (aire, agua, suelo o alimento), *Tiempo*, la duración del contacto del individuo u organismo con el agente tóxico, y los *Patrones de actividad*, se refiere a las practicas, costumbre y hábitos del individuo [6].

La Figura 3-22 ilustra las diversas etapas que pueden darse entre el momento de la exposición para la vía respiratoria, diferenciando entre dosis de exposición estimada, la dosis interna, y dosis biológicamente efectiva.

⁹ **Xenobiótico:** es una sustancia química que se encuentra dentro de un organismo que no se produce naturalmente o se espera que no esté presente dentro del organismo.

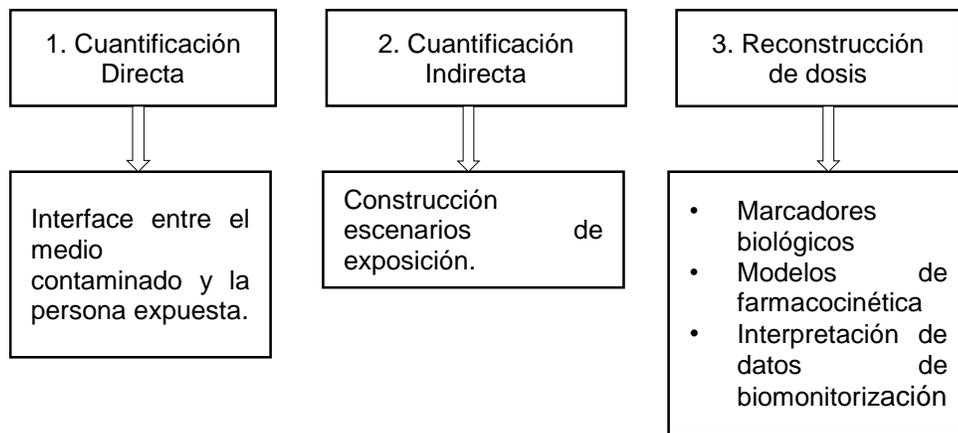
Figura 3-22. Ilustración de exposición, dosis y efecto en vía respiratorio [6]



Fuente. Evaluación de riesgo en salud, guía metodológica, aplicaciones prácticas de la metodología de la evaluación de riesgo en salud por exposición a químicos. Sociedad Española de Sanidad Ambiental. 2016

Métodos para la cuantificación de la exposición

Existen tres métodos para el cálculo de la dosis de exposición [6]:



Fuente. Evaluación de riesgo en salud, guía metodológica, aplicaciones prácticas de la metodología de la evaluación de riesgo en salud por exposición a químicos. Sociedad Española de Sanidad Ambiental. 2016

Para el cálculo de la dosis, se utilizará el método de cuantificación directa, al disponer de datos de monitoreo de la concentración de exposición para los trabajadores estudiados, aplicando la fórmula descrita en la ecuación 3-4.

(Ecuación 3-4)

$$DEE = \frac{C \times TC \times FE}{PC}$$

dónde, *DEE*= Dosis Exposición Estimada (mg contaminante/kg PC-día), *C*=Concentración del contaminante en el medio contaminado, *TC*= Tasa promedio de contacto (inhalación promedio de aire (m³/día), *FE*= Factor de exposición (sin unidad), *PC*= peso corporal (kg).

Otros de los parámetros que se tendrá en cuenta para el cálculo de la DEE, es la tasa de contacto. Para la vía inhalatoria se usará la tabla de exposición definida por la EPA (Estadísticas descriptivas para la tasa de ventilación promedio, no ajustada al peso corporal, para hombres por categoría de edad) [6] la cual recoge valores de tasas por actividad ligera, moderada y alta, para diferentes edades.

El factor de exposición (FE) (Ecuación 3-4), se calcula multiplicando la frecuencia de exposición (F) por la duración de la misma (DR), y se divide por el periodo en el cual la dosis es promediada (AT). Este último término hace referencia a la relación entre tiempo de exposición y probabilidad de aparición de los efectos (asimilable a tiempo de latencia). En el caso de consecuencias en salud de tipo no cáncer, se considera que ese tiempo de manifestación del efecto es similar a la duración máxima de la exposición. Sin embargo, en el caso del efecto cáncer, se considera que, aunque la duración máxima de la exposición sea de 20 a 30 años (tiempo de residencia máxima de una persona en el mismo sitio), la probabilidad de que se presente el efecto puede darse a lo largo de toda la vida (asimilable según la U.S. EPA a 70 años), en la ecuación 3-5 se ejemplifica la fórmula a desarrollar [6].

(Ecuación 3-5)

$$FE = \frac{F \times DR}{AT} = \frac{\frac{\text{días}}{\text{año}} \times \text{años expuestos}}{\text{años de promediación del efecto} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

donde, F es la frecuencia de exposición (días/año), DR = duración de la exposición (años), AT = Tiempo promedio de aparición del efecto.

3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido, Tescan, Vega 3 SB, que opera con un filamento de tungsteno, con voltajes de aceleración de electrones desde 200V hasta 30keV. El microscopio cuenta con la posibilidad de realizar análisis por electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE) para observación de imágenes y espectroscopía de rayos X por energía dispersa (EDS) para análisis elemental.

Si se usa el detector de electrones secundarios, es posible obtener una resolución de la imagen tan fina como 3 nm.

La composición química de las fibras fue estudiada por espectroscopía por dispersión de energía. El microscopio cuenta con el programa Sprit 1.9 para la adquisición y procesamiento de los espectros EDS. El Sprit 1.9 es un programa convencional, el cual no tiene ninguna subrutina particular para el análisis de fibras de espesor submicrométrico.

Para muestras seleccionadas se realizó simulación física de Monte Carlo con miras a estimar la composición química de las fibras libres de influencia del sustrato. Para esto, usando el programa integrado al microscopio (sprit 1.9) se determinó la intensidad de los principales picos presentes en el espectro EDS en bruto. Luego, usando el software Casino (para simulaciones físicas de Monte Carlo), se estimaron teóricamente la composición química de la fibra y del sustrato, así como el espesor de la fibra, que llevan a las intensidades experimentales determinadas. En la Figura 3-23 se presenta el esquema usado para la simulación de Monte Carlo.

Figura 3-23. Esquema de análisis seguido en la simulación de Monte Carlo de los espectros EDS.



Fuente. Esquema diseñado por el Dr. Carlos M Garzón, profesor asociado Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Sede Bogotá. 2019.

3.8 Análisis por difracción de rayos X

Preparación de muestras para DRX

Las muestras del subsuelo fueron guardadas y rotuladas en una bolsa ziploc. Las muestras fueron nuevamente maceradas y trituradas, una vez más, para obtener una muestra aún más fina para facilitar su análisis. En la Figura 3-24 se presenta el equipo utilizado para el análisis de las muestras.

Las muestras fueron entregadas al laboratorista del laboratorio de DRX para que hiciera todo el proceso de análisis, dado que era la persona competente para manejar el equipo, en este caso el Difractómetro Xpert PRO. Se analizó 1 gramo aproximadamente de muestra (P1, P2 y P3). Los parámetros se describen en la Tabla 3-11.

Posterior al análisis de las muestras, se utilizó la base de datos JCPDF y COD empleando el programa HighScore Plus, el cual permitía identificar fibras de asbestos.

Figura 3-24. Difractómetro Xpert PRO del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.



Fuente. Difractómetro Xpert PRO del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia. 2019

Tabla 3-11. Parámetros de lectura por DRX

Parámetro	Descripción
Comentario	Configuración = transmisión Spiner
Goniómetro	PW3050 / 60 (Theta / Theta); Tamaño mínimo del paso 2Theta: 0,001; Omega tamaño de paso mínimo: 0,001
Etapa de muestra	Reflector-Transmisión Spiner PW3064 / 60;
Tamaño de paso mínimo	Phi: 0.1
Sistema difractómetro	Xpert-Pro
Programa de medición	Brag-Transspinner-D
Tipo de medida	Escaneo sencillo
Longitud de onda usada	Tipo de longitud de onda previsto: K α K α 1 (Å): 1,540598 K α 2 (Å): 1,544426
Relación de intensidad	0,50 K α (Å): 1,541874 K β (Å): 1,392250
Trayectoria del haz incidente Radio (mm):	240,0 Tubo de rayos-x
Material del ánodo:	Cu
Voltaje (kV):	45
Corriente (mA):	40
Tipo de enfoque	Línea
Longitud (mm)	12,0
Ancho (mm)	0,4
Ángulo de despegue (°):	0,4 0,6

Fuente. Difractómetro Xpert PRO del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.

4.Consideraciones éticas

Esta investigación se desarrolló conforme a las consideraciones éticas de la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud de la República de Colombia y de acuerdo al riesgo inherente del estudio, se clasifica como investigación con riesgo mínimo según el artículo 11 de la resolución mencionada, porque consiste en un estudio experimental que incluye el análisis de muestras no biológicas, las cuales fueron preparadas en el laboratorio de toxicología y analizadas en el laboratorio de microscopia óptica del laboratorio de interfacultades, de igual forma se analizaron en el laboratorio SEM y DRX de la Facultad de ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se anexa el aval del comité de ética. Anexo G

5. Declaración de conflicto de intereses

Se declara NO tener ningún conflicto de Interés que afecte el normal desarrollo del estudio.

6. Financiación

Esta investigación fue financiada por la Maestría en toxicología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

El análisis por microscopía de contraste de fase, se llevó a cabo, gracias a los equipos del laboratorio de microscopía óptica del laboratorio interfacultades.

El análisis por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, fue bajo la colaboración de la facultad de ciencias, y al grupo de investigación de microscopía.

7. Resultados

7.1 Resultado del desarrollo de pruebas preliminares en el laboratorio

7.1.1 Caracterización de fibras

A las muestras de la roca de asbesto y patrón de referencia, cuyos filtros fueron transparentados, se les aplicó una gota de triacetina y se cubrió con el portaobjetos, para que se expandiera por todo el filtro y se selló con esmalte transparente. La triacetina, permite la identificación de las fibras presentes en la muestra. Las muestras se dejaron secar por 24 horas aproximadamente antes de su análisis por microscopía de contraste de fase. En la Figura 7-1 se presentan micrografías típicas obtenidas.

Figura 7-1. Micrografía de las fibras de asbesto identificadas en la roca de asbesto y patrón de referencia y que fueron observadas por microscopía de contraste de fase.



Fuente. Autor. Imágenes obtenidas por microscopía de contraste de fase a través de la cámara integrada al microscopio TE300.



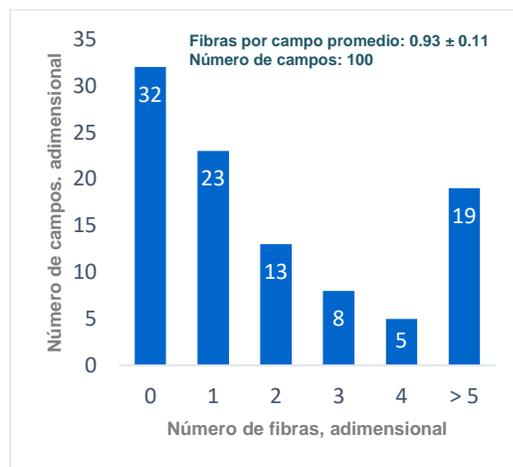
Fuente. Autor. Imágenes obtenidas por microscopía de contraste de fase a través de la cámara integrada al microscopio TE300.

Las fibras de la roca de asbesto tienden a ser más pequeñas y delgadas, mientras, que las fibras del material de referencia ASB/FIB-201/203-Chrysotile, son alargadas, además, de presentar ramificaciones, de donde se desprenden nuevas fibras (esta condición se conoce como haces de fibras). La diferencia entre estos dos conjuntos de fibras puede deberse a la forma como se hizo el raspado de la roca, el cual probablemente induce intensa fractura en las fibras.

7.1.2 Recuento de fibras

Para el conteo de las fibras se utilizó el material de referencia. Utilizando la gráticula Walton Beckett, previo ajuste con la lámina de verificación, aceptando un límite de visibilidad de seis bloques al ojo del analista (en el Anexo A, se explica esta condición). En la Figura 7-2 se presentan los resultados del conteo hecho en el patrón de referencia.

Figura 7-2. Resultado de conteo de fibras por microscopía de contraste de fase en el material de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile

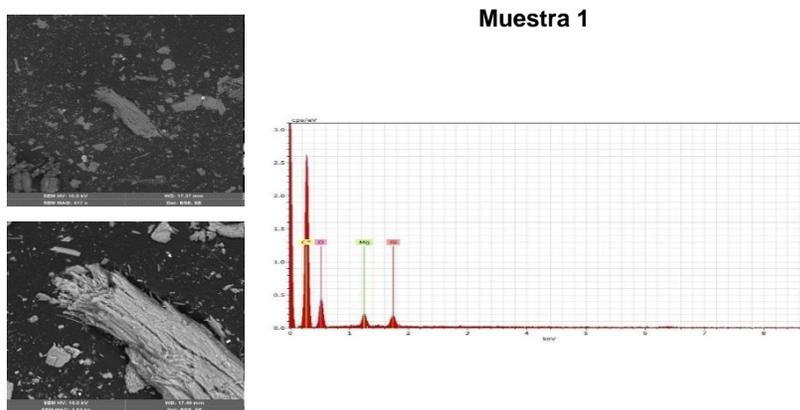


El total de fibras contadas en la muestra material de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile, fue de 313.5 fibras en 100 campos.

7.1.3 Morfología de las fibras y análisis químico de la roca de asbesto y del material de referencia.

Las Figuras 7-3, 7-4 y 7-5 muestran las micrografías MEB y los espectros EDS tanto para la roca de asbesto como para el patrón de referencia. En estas micrografías se observa la morfología típica de las fibras en estudio: fibras alargadas, con longitudes milimétricas (algunas llegando a centímetros de longitud) y espesores submicrométricos.

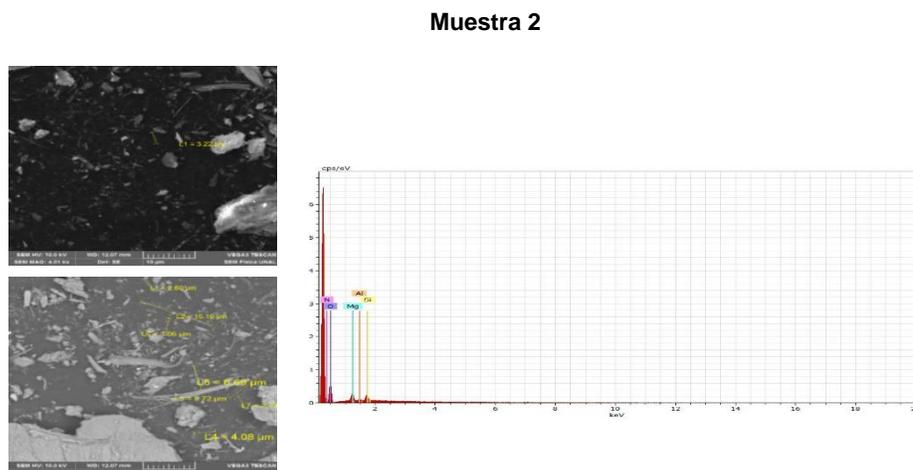
Figura 7-3. Micrografías obtenidas en el MEB y espectros EDS para las fibras de la roca.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato filtro MEC

Fuente. Micrografía obtenida por el software EDS integrado al microscopio

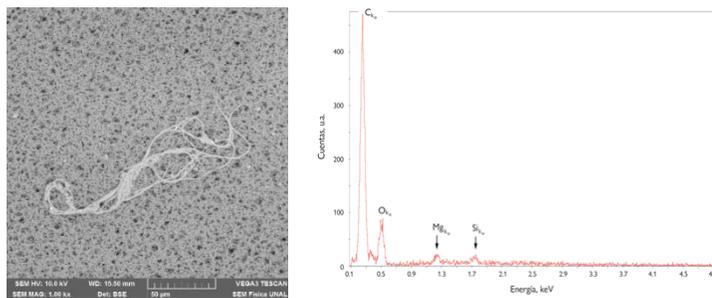
Figura 7-4. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS y longitud de las fibras de la roca.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato del filtro MEC.

Fuente: Autor. Micrografía obtenida por el software EDS integrado al microscopio

Figura 7-5. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de patrón de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato filtro MEC

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB.

Para la muestra obtenida de la roca de asbesto, se aprecia la micrografía de la fibra en forma de rollo, con una longitud alrededor de 100 μm . El espectro EDS muestra la presencia de carbono, oxígeno, magnesio y silicio. En el caso de las micrografías del patrón de referencia, se observa la presencia de oxígeno, carbón, magnesio, silicio, nitrógeno y aluminio

En la Tabla 7-1 se resume la composición química obtenida por espectroscopía EDS para la roca de asbesto y el patrón de referencia. La composición química reportada en la Tabla 7-1 fue estimada usando el software Sprit 1.9, asumiendo una muestra con composición homogénea, lo cual es aproximadamente valioso para la roca de asbesto, y no es válido para las fibras en el patrón de referencia. En dicho patrón, las fibras son submicrométricas, y el volumen de interacción para el espectro EDS debe cubrir tanto, la fibra como parte del substrato. Se observa que la composición química del asbesto en la roca se aproxima mucho a la composición química ideal del crisotilo (Tabla 7-2), mientras que la fibra del patrón de referencia, aunque evidencia una composición química similar al crisotilo, aparece empobrecida en Si y Mg, con relación al crisotilo ideal (Tabla 7-2). Esto se puede atribuir directamente a la contribución del substrato (rico en O, N y C) al espectro EDS total (fibra + substrato). Más adelante en esta disertación se retomará este concepto de la contribución substrato + fibra al patrón EDS obtenido, el cual es un concepto central en el microanálisis químico de las fibras en este trabajo.

Tabla 7-1. Composición química para la roca de asbesto (muestra 1 y 2) y para el material de referencia ASB/FIB/203-1Chrysotile

Elemento	Composición química, %-atómico		
	Muestra 1	Muestra 2	ASB/FIB/203-1Chrysotile
O	80.6 \pm 3	76.2 \pm 1	19.2 \pm 5
Mg	12.6 \pm 0.3	8.5 \pm 0.1	0.7 \pm 0.1
N	--	9.6 \pm 0.3	15.4 \pm 5
Si	6.8 \pm 0.16	4.3 \pm 0.07	0.4 \pm 0.1
Al	--	1.3 \pm 0.05	0.1 \pm 0.06
C	--	--	69.1 \pm 8

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB.

Tabla 7-2. Composiciones químicas típicas de la serpentina y los anfíboles [93]

<i>Serpentina</i>	<i>Anfíboles</i>				
<i>Crisotilo</i>	<i>Amosita</i>	<i>Crocidolita</i>	<i>Tremolita</i>	<i>Actinolita</i>	<i>Antofilita</i>
O= 64,3% Si= 14,28% Mg= 21,42 %	O= 61,53% Si= 20,52% Fe= 17,95%	O= 61,53% Si= 20,52% Fe= 12,82% Na= 5,13%	O= 61,53% Si= 20,52% Mg= 12,82% Ca= 5,13%	O= 61,53% Si= 20,52% Ca= 5,13% (mg, Fe)= 12,82%	O= 61,53% Si= 20,52% (Mg, Fe)= 17,95%

Fuente. EPA 1985b; HSDB 2001a, 2001b, 2001c, 2001d; IARC 1977

7.2 Muestreo en campo

7.2.1 Ambientes laborales: monitoreo y/o toma de muestras en los individuos

Del total de los 10 trabajadores participantes, 7 pertenecían a la empresa de transportes ubicada en el municipio de Marinilla, Antioquia, quienes fueron monitoreados durante 4 días. Los otros 3 pertenecían a la empresa constructora que desarrollaban trabajos en las vías del municipio de Sibaté, quienes fueron monitoreados en una única jornada de trabajo. Adicionalmente se recolectaron blancos de campo por cada día de monitoreo (4 en la empresa de transporte y 1 en la empresa de construcción).

En la empresa de transporte solo pudieron tomarse 13 muestras, dado que algunas de las bombas fallaron o fueron manipuladas por un trabajador y algunos filtros se saturaron o colmataron. En la Tabla 7-3 se presentan el total de muestras recolectadas en las empresas de transporte y construcción.

Tabla 7-3. Identificación de las muestras recolectadas en ambientes laborales

Sector transporte	Sector construcción
BL-1-22	BL-1-P1
UN-1-22	38-1-P1
40-2-22	36-2-P1
38-3-22	BL-2-P2
47-4-22	40-3-P2
36-5-22	
BL-2-23	
38-6-23	
UN-7-23	
36-8-23	
40-9-23	
BL-3-24	
38-10-24	
UN-11-24	
BL-4-25	
UN-12-25	
38-13-25	

Fuente. Autor

7.2.2 Toma de muestras del subsuelo

Se recolectó un total de seis muestras en dos sitios de excavación (P-1 y P-2), que se encontraban en desarrollo de obra, en la Carrera 7B calle 7 del municipio de Sibató.

7.3 Microscopía de contraste de fase

7.3.1 Análisis de datos del muestreo en campo en ambiente laborales

Resultados concernientes al primer objetivo específico

En las Tablas 7-4 y 7-5 se resumen los datos obtenidos del monitoreo realizado en ambientes laborales para las dos empresas en estudio. Con estas medidas se estimó la concentración de fibras usando la ecuación 3-1 y 3-2.

Tabla 7-4. Datos de muestreo de tipo laboral en la empresa de transporte de carga, durante los días del 22 al 25 de mayo de 2018.

REPORTE DE DATOS MUESTREO LABORAL												
Lugar: Marinilla			Departamento: Antioquia				Fecha muestreo: 22 al 25 de mayo de 2018					
Muestreo	Bomba	Ci (l/min)	Cf (l/min)	# muestra	Pm (min)	Vt (L)	Ti	Tf	Va	Ta	Pa (mmHg)	Vn
1	UN	2,2	1,487	1	327	720,198	9:05 a. m.	3:55 p. m.	720,198	34	590	544,5
	40347	2	1,51	2	229	503,725	9:07 a. m.	1:08 p. m.	503,725	28,2	596	391,242
	38847	2,2	1,292	3	208	457,631	9:08 a. m.	12:51	457,631	25,9	580	348,331
	38841	2,2	1,498	4	370	813,268	9:09 a. m.	15:50	813,268	28,6	592	629,49
	36604	2,2	1,735	5	33	73,426	9:10 a. m.	9:43 a. m.	73,426	25,7	590	56,943
	36605	2,2	1,789	5	158	347,691	9:55 a. m.	1:00 p. m.	347,691	24,4	589	270,275
2	38841	2	2000	6	273,15	544,938	8:24 a. m.	1:11 p. m.	545,038	28	594	421,746
	UN	1,951	1,9	7	-	-	8:25 a. m.	-	-	-	-	-
	36605	2,025	2000	8	214,47	428,56	9:37 a. m.	1:15 p. m.	428,56	23	591	335,512
	40347	2,034	2	9	-	-	9:10 a. m.	-	-	-	-	-
3	38841	2,065	2000	10	377	752,718	8:56 a. m.	4:30 p. m.	752,718	31,8	593	574,607
	UN	2,036	2000	11	447,44	893,827	9:03 a. m.	4:34 p. m.	893,827	27,3	591,6	673,513
4	UN	2000	2000	12	252	503,159	9:39 a. m.	13:53 pm	503,159	27,3	591,2	379,553
	38841	2000	2000	13	246	491,067	9:50 a. m.	2:00 p. m.	491,067	30	593	377,022

Ci: Caudal inicial, Cf: Caudal final; Pm: Periodo de muestreo; Vt: Volumen total, Ti: Tiempo inicial; Tf: Tiempo final; Va: Volumen absoluto; Ta: Temperatura absoluta, Pa: Presión absoluta; Vn: Volumen nominal.

Fuente. Autor

Las muestras identificadas en la Tabla 7-4, evidencian los resultados obtenidos, sin embargo, en el caso de la muestra 5, la bomba 36604 falló minutos después de iniciado el monitoreo, por tanto, se sustituyó y los datos se integraron al finalizar el monitoreo.

Tabla 7-5. Datos de muestreo empresa de construcción durante el mes de noviembre de 2018 (único día).

REPORTE DE DATOS MUESTREO LABORAL												
Lugar: Sibaté			Departamento: Cundinamarca				Fecha muestreo: noviembre de 2018					
Muestreo	Bomba	Ci (l/min)	Cf (l/min)	# muestra	Pm (min)	Vt (L)	Ti	Tf	Va	Ta	Pa (mmHg)	Vn
P1	38841	2000	2000	P1	209:08:00	417,387	13:05	5:00 p. m.	417,387	26,5	558	305,425
P1	36605	2000	2000	P1	210:03:00	471,023	11:13	5:00 p. m.	471,023	21	556	350,574
P2	40340	2000	2000	P2	215:39:00	430,606	11:41	5:00 p. m.	430,606	26	568	318,497

Ci: Caudal inicial, Cf: Caudal final; Pm: Periodo de muestreo; Vt: Volumen total, Ti: Tiempo inicial; Tf: Tiempo final; Vn: Volumen nominal; Ta: Temperatura absoluta, Pa: Presión absoluta; Vn: Volumen nominal.

Fuente. Autor

Los datos de las Tablas 7-4 y 7-5 evidencian que el volumen muestreado estuvo entre 421.1 L y 813.8 L para la empresa de transporte, mientras que en la empresa de construcción el volumen muestreado estuvo entre de 417.3 y 471 L.

El volumen de muestreo en el estudio estuvo por encima del umbral de 400L, para todos los análisis realizados. Este umbral de 400 L es especificado por la NIOSH para ambientes con presencia de pocas fibras de asbesto. A posteriori las muestras (tres en total) recolectadas en la empresa de construcción fueron descartadas del análisis. Dos de ellas por causa de manipulación de la bomba por parte de los trabajadores y la tercera debido a un defecto de calidad en el filtro MEC que estaba al interior de la capucha. Así, solo se determinó la concentración de fibras en las muestras recolectadas en la empresa del sector transporte. Este error en el protocolo de recolección de las muestras se debió porque la supervisión no fue continua, sino, intermitente, dejando un lapso de tiempo en el cual el trabajador podía manipular el tren de muestreo. El protocolo de análisis ha sido modificado, para estudios futuros, especificando la supervisión continua que minimice el riesgo que las bombas sean manipuladas o que sean detenidas, mientras se hacen las demás tareas programadas durante el muestreo.

7.3.2 Determinación de la concentración de fibras a la que está expuesta la población estudiada

Criterios de selección

Los criterios de selección para el cálculo de la concentración de las fibras fueron:

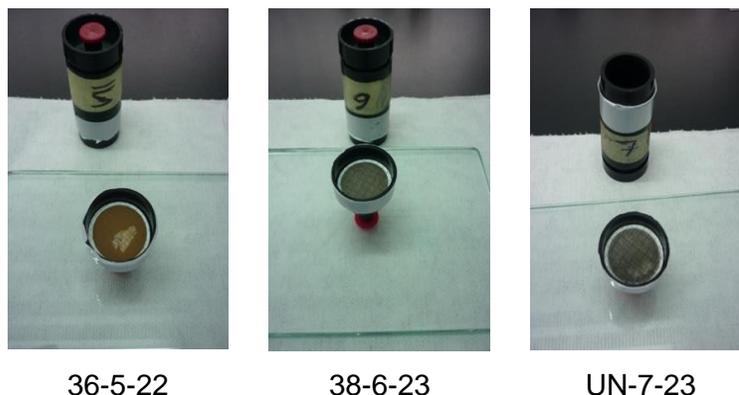
- la saturación del filtro (si estaba colmatado),
- un volumen de muestreo \geq 400 L (mínimo),
- el periodo de muestreo (Pm)

- transparentado del filtro

En la Figura 7-6 se presentan los filtros y el número de muestra descartados. Estos fueron descartados por que los filtros estaban colmatados, esta situación se presenta por el tipo de actividad ejecutada por los trabajadores, como fue soldadura, lubricación, remache de bandas y mantenimiento mecánico de los vehículos, lo cual impedía que se realizara un buen proceso de transparentado. En el caso de la muestra 9, esta no se sometió análisis por MCF, dado que el trabajador estuvo fuera de las instalaciones, incumpliendo con las recomendaciones hechas por el investigador, sin embargo, el filtro MEC se usó para el conteo de las fibras presente, mas no para la cuantificación de exposición. En lo concerniente a las demás muestras, todas cumplieron con el criterio de selección.

Las muestras fueron identificadas conforme a la codificación establecida en materiales y métodos, Figuras 3-16, 3-17 y 3-18 conforme al análisis a realizar.

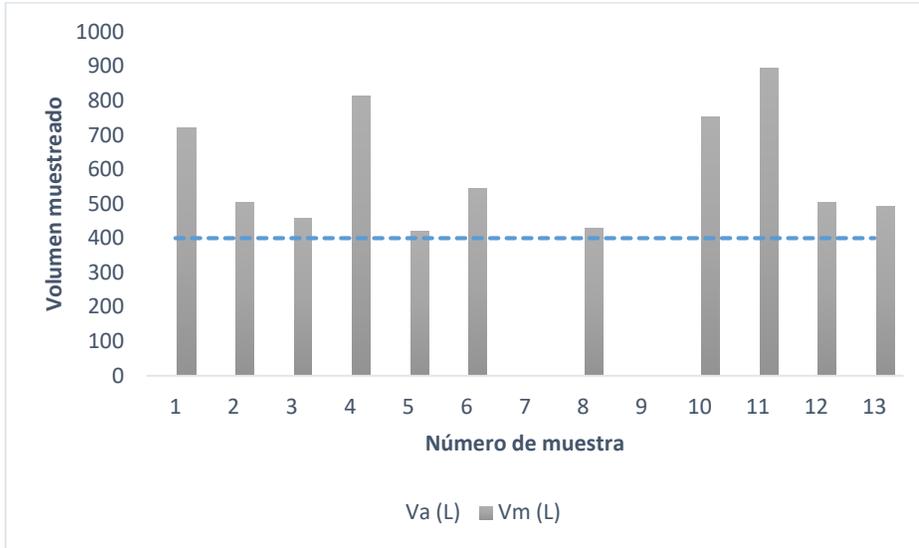
Figura 7-6. Muestras descartadas



Fuente. Autor

En la Figura 7-7 se presenta la variación del volumen muestreado (durante la jornada laboral, durante los 4 días para la empresa de transporte y comparado con el volumen aceptado (400 L). Los otros datos que se utilizaron para el cálculo de la concentración se relacionan en la Tabla 7-4.

Figura 7-7. Volumen de las muestras obtenido del monitoreo realizado e trabajadores de la empresa de transporte de carga.



Fuente. Autor

En la Figura 7-8 se presentan los resultados obtenidos del procedimiento del conteo de las fibras presentes en las muestras de la empresa de transporte, el cual se desarrolló con base en el formato Excel® diseñado para el conteo de fibras y cálculo de la concentración en fibras/cm³ (Anexo H).

Figura 7-8. Fibras contadas en las muestras de la empresa de transporte de carga

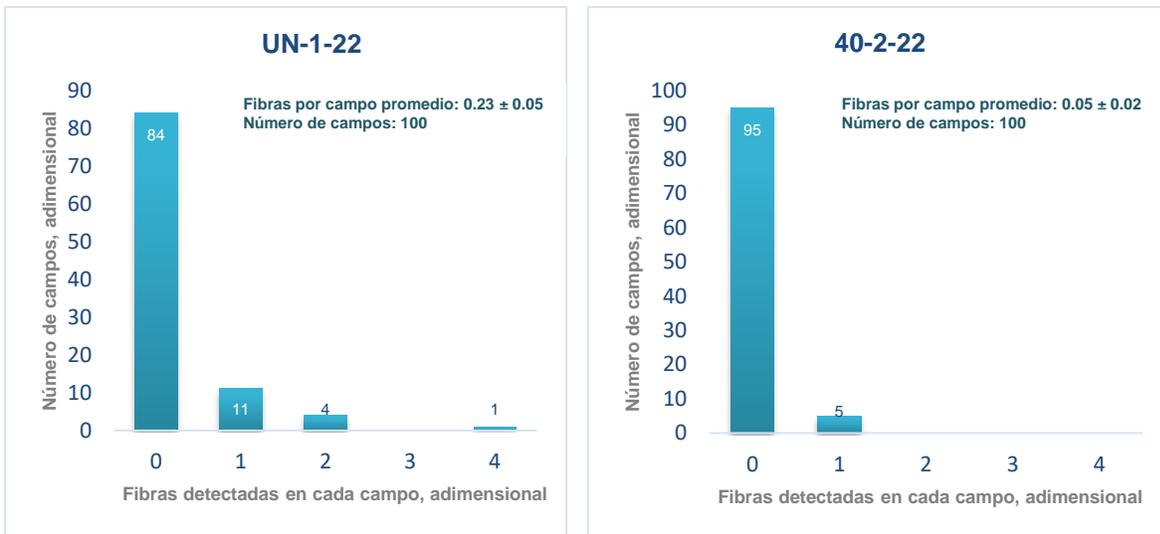
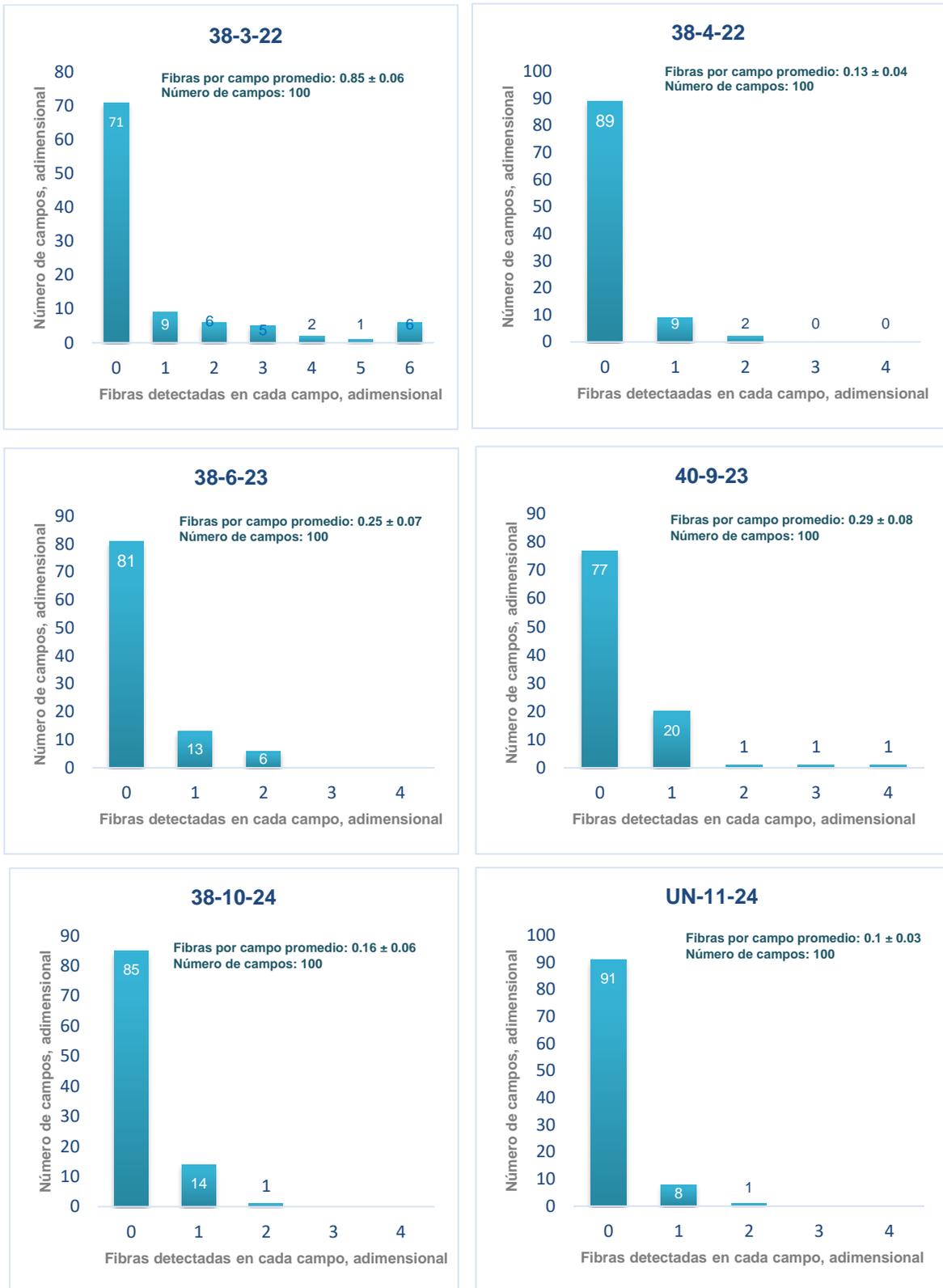
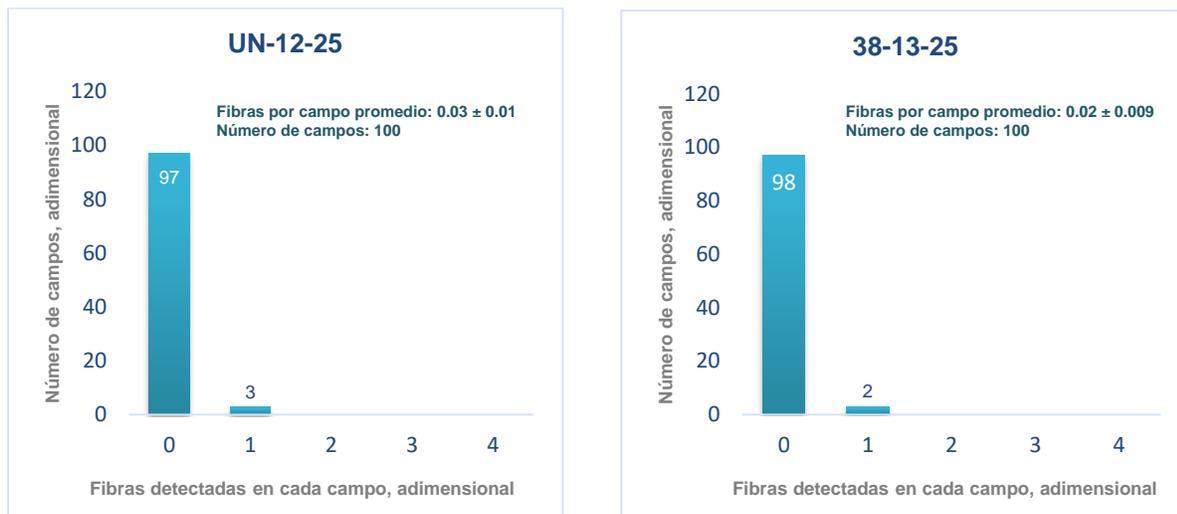


Figura 4-8- 1. Continuación





Fuente. Autor

En la Tabla 7-6 se presenta un consolidado del número total de fibras presentes en cada una de las muestras obtenidas del personal involucrado en el monitoreo, en donde se especifica la tarea que se desarrollaba para el día del muestreo y así poder correlacionar que tanto influye una tarea de la otra, en relación a la presencia de fibras.

Tabla 7-6. Número de muestra vs trabajador vs tarea ejecutada

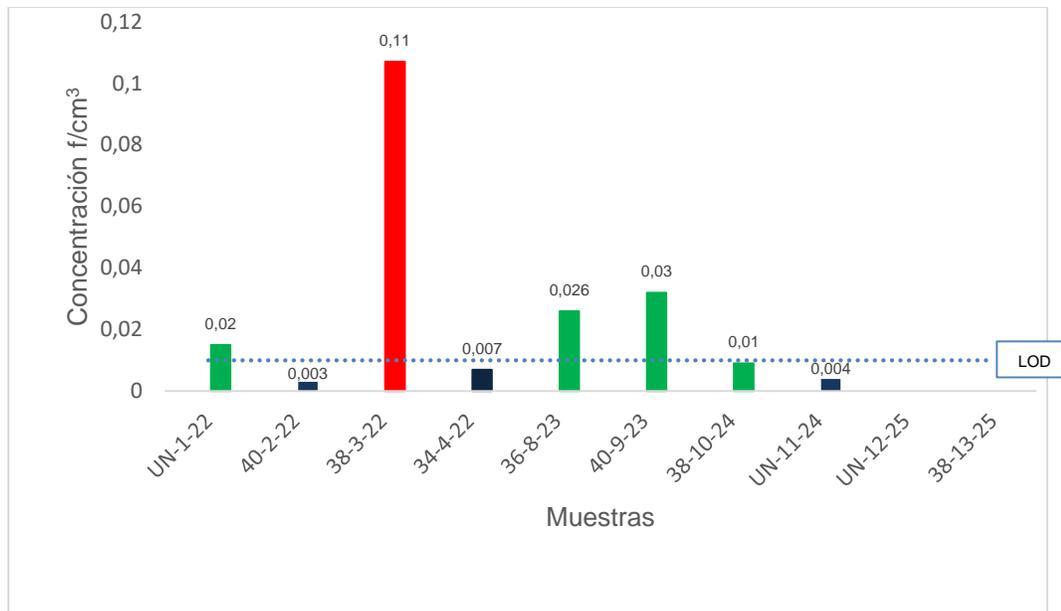
Número de muestra	Trabajador	Tarea ejecutada	Resultado (No. Total de fibras)
UN-1-22	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento ○ Remache de 1 a 2 bandas 	23
40-2-22	6	<ul style="list-style-type: none"> ○ Actividades de patio 	4.5
38-3-22	2	<ul style="list-style-type: none"> ○ Montallantas, cambiando bandas, remontadora (Exposición directa asbesto) 	100.5
38-4-22	7	Almacén: <ul style="list-style-type: none"> ○ Manejo de inventario ○ Entrega de insumos ○ Supervisión de repuestos y control de los mismos 	13
36-8-23	5	<ul style="list-style-type: none"> ○ Asistente para remachar bandas, desmonte de llantas con equipo de pistola neumático. 	25
40-9-23	7	Almacén: <ul style="list-style-type: none"> ○ Manejo de inventario ○ Entrega de insumos ○ Supervisión de repuestos y control de los mismos 	28.5
38-10-24	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento 	15.5

Número de muestra	Trabajador	Tarea ejecutada	Resultado (No. Total de fibras)
		<ul style="list-style-type: none"> ○ Remache de 1 a 2 bandas ○ Actividades varias 	
UN-11-24	3	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento ○ Remache de 1 a 2 bandas 	9
UN-12-25	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento ○ Remache de 1 a 2 bandas 	3
38-13-25	1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mantenimiento ○ Remache de 1 a 2 bandas ○ Montallantas 	2

Fuente. Autor

Con el total de fibras establecidas en cada una de las muestras, se procedió a determinar la concentración de fibras por centímetro cúbico para cada periodo de muestreo de forma individual (Anexo H). El límite de detección (LOD) establecido por organismos internacionales como la ACGIH, OSHA, OMS y la EPA entre otros, es 0.01 fibras/cm³. Para Colombia, este LOD es ratificado en la Resolución 007 de 2011. Los resultados de la concentración obtenida para cada una de las muestras, se presentan en la Figura 7-9.

Figura 7-9. Resultados de la concentración de fibras por cm³ obtenidos para las muestras de la empresa de transporte y comparados con el LOD.



Fuente. Autor

Los resultados para las muestras UN-1-22 (0.015 f/cm³), 38-3-22 (0.11 f/cm³), 36-8-23 (0.026 f/cm³) y 40-9-23 (0.032 f/cm³), estuvieron por encima de límite de detección (LOD) para ambientes poco saturados, el cual está definido en 0,01 f/cm³ por la NIOSH, la ACGIH, la EPA y la OMS.

La concentración para la muestra 38-3-22 fue 0.11 f/cm³. Este resultado es superior al límite umbral (TLV) propuesto por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) de los Estados Unidos, el cual es de 0.1 f/cm³ y avalada por la OMS y la NIOSH. Con este resultado, se puede evidenciar una posible exposición laboral.

En resumen, con estos hallazgos se puede evidenciar que los trabajadores que realizan actividades de remache de bandas de frenos, se encuentran potencialmente expuestos a algún tipo de fibras.

Es de aclarar que, con el método de microscopía óptica de contraste de fase, no se detectan fibras de menor tamaño a 3 micras, ni se puede identificar el tipo de fibras presentes en la muestra, así como también el tipo de composición química.

Estas muestras fueron estudiadas por microscopía electrónica de barrido (parte del filtro restante que no fue transparentado), con el objetivo de identificar la morfología y composición química de las fibras presentes en las muestras, resultados que se presentarán a en el numeral 7.3.4.

7.3.3 Estimación de la exposición: cálculo de la dosis inhalada en trabajadores expuestos

Resultados referentes al segundo objetivo específico

Para el cálculo de la Dosis de Exposición Estimada (DEE), se usaron las ecuaciones 3-4 (FE, en donde se utilizaron los días de jornada de trabajo a la semana, el número de semanas al año, el tiempo de trabajo, el periodo de latencia de la enfermedad y el número de días al año) y la 3-5 (DEE, en donde se utilizó el mayor valor de la concentración obtenido en el muestreo (resultado para la muestra 38-3-22), y el valor reportado de inhalación de la EPA y el FE obtenido (ecuación 3-4)). Se asumió que las actividades de remache de bandas se realizaban 4 veces por semana, y que el mantenimiento de los vehículos es continuo. Se tomó el dato de mayor reporte de la cuantificación de la concentración de fibras (0.11 f/cm³), como el peor escenario y la antigüedad en el cargo (36 meses, que equivalen a 3 años).

Se calculó inicialmente el factor de exposición (FE), para un trabajador que podría desarrollar una asbestosis. Según la literatura médica internacional, el periodo de latencia para el desarrollo de la asbestosis está entre 10 y 20 años aproximadamente [57].

$$FE = \frac{\left(4 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \times 52 \frac{\text{semanas}}{\text{año}}\right) \times 3 \text{ años}}{10 \text{ años} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}$$

FE= 0.171

Al calcular la DEE, se utilizaron los datos de la tabla de la EPA, sobre estadísticas descriptivas para la tasa de ventilación promedio, sin ajustar por peso corporal, mientras se realizan actividades dentro de la categoría de actividad especificada, para hombres por categoría de edad, para el grupo de edad entre 21 y 31 años y un promedio 5.39×10^{-2} m³/minuto y un peso corporal de 72 kg.

$$DEE = \frac{0,11 \frac{f}{cm^3} \times 0.0539 \frac{m^3}{minuto} \times 0.171}{72}$$

DEE= 1.41×10^{-5} fibras contaminantes/kg PC-día

Para los demás ejemplos, se estimó la DEE para un trabajador que podría desarrollar asbestosis o algún tipo de cáncer asociado a la exposición al asbesto. Según la literatura y la latencia de la enfermedad es de 10 y 40 años aproximadamente. En la Tabla 4-9 se presentan los resultados obtenidos de la DEE día, año y acumulada.

Tabla 7-7. Resultados de la DEE calculada día, año y acumulada

Enfermedad	Años	DEE (fibras contaminante/kg PC-día)	Dosis anual fibras/kg PC-año	Dosis acumulada fibras/PC
Asbestosis	10	1.41×10^{-5}	0.005	0.05
	15	9.39×10^{-6}	0.003	
	20	7.04×10^{-6}	0.003	
Cáncer	25	5.63×10^{-6}	0.002	0.05
	30	4.7×10^{-6}	0.002	
	35	4.02×10^{-6}	0.001	
	40	3.5×10^{-6}	0.001	

Fuente. Autor

Los resultados presumen una dosis de 1.41×10^{-5} fibras contaminante/kg peso corporal-día (PC-día) para un trabajador (Tabla 4-9) que ha tenido una exposición durante 3 años, realizando remache de bandas. Se estima la DEE anual con un valor de **0.005** fibras contaminante/kg PC-año y una dosis acumulada, para 10, 15 y 20 años de **0.05** fibras contaminante/peso corporal.

Este mismo trabajador presenta una DEE de 3.5×10^{-6} fibras contaminante/kg PC-día y una dosis anual de **0.001** fibras contaminante/kg PC-año (en un escenario de 40 años de latencia de la enfermedad) y una dosis acumulada para 25, 30, 35 y 40 años de **0.05** fibras contaminante/peso corporal.

Para los dos ejemplos en el cual se desarrolló el cálculo de la DEE, conforme a los resultados obtenidos, se evalúa el peor escenario, no obstante, dentro de las medidas

preventivas y correctivas adoptadas por la empresa de transporte, se encuentran: elementos de protección personal (traje tyvek, mascarilla facial media cara, con filtro P100, guantes con revestimiento de poliuretano, marca kimberly-clark, referencia 39560, EN388:2003, CE EN420). Con el uso de estos elementos se evita que haya una exposición directa de inhalación de las fibras resultantes del proceso de remache de bandas.

Al ser la dosis acumulativa, no hay certeza en que umbral el trabajador pueda inhalar fibras de asbesto. El escenario evaluado es poco saturado, dado que la demanda para el mantenimiento de los vehículos (remache de bandas), en la época que se llevó a cabo la toma de muestras, eran de 4 veces por semana (considerada como alta demanda).

7.3.4 Microscopía electrónica de barrido

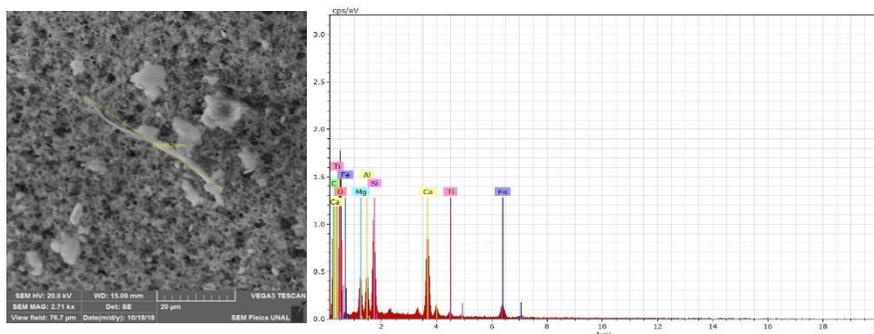
Resultados relativos al tercer objetivo específico

Ambientes laborales

En las Figuras 7-10 y 7-11 se presentan tanto los espectros como también las micrográficas obtenidas en el MEB para las muestras 38-3-22 (Figura 7-10), UN12-25 (Figura 7-11). Estas fibras fueron analizadas sobre el filtro MEC. Vale recordar que la MCF para la muestra 38-3-22 fue de 0.11 f/cm^3 (que sobrepasa el TLV de 0.1 fibras/cm^3).

Utilizando el restante del filtro que no fue sometido al proceso de transparentado, se sometieron a lecturas todas las muestras, indistintamente de aquellos resultados obtenidos al calcular la concentración f/cm^3 , pero si, priorizando sobre las muestras que estuvieron por encima del LOD y TLV calculado. Además, se utilizó una cinta de carbono haciendo un barrido por la capucha (impregnar), aprovechando las partículas que estuviesen presentes.

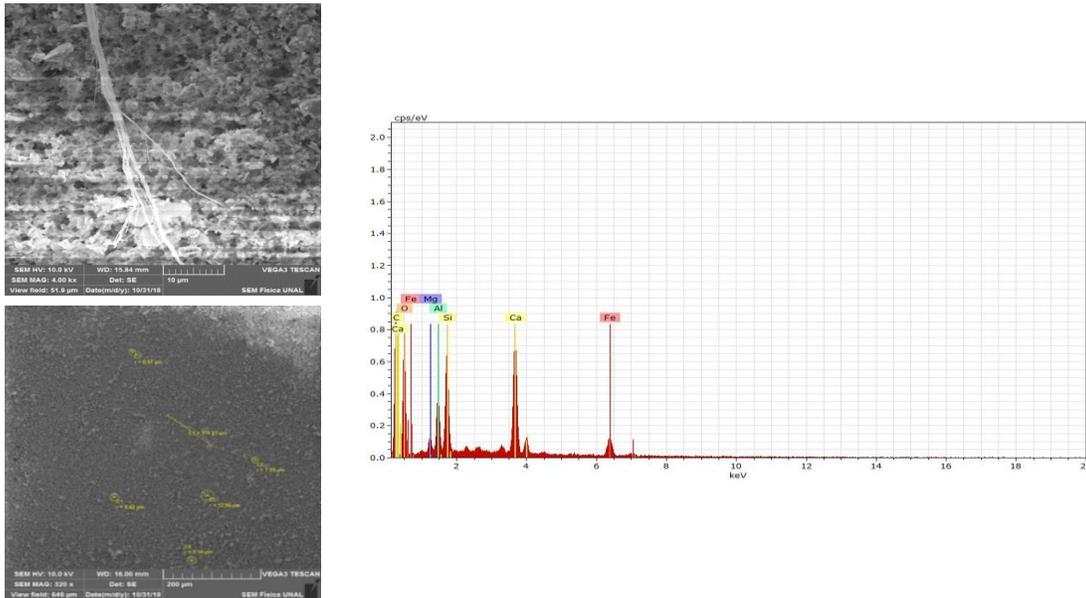
Figura 7-10. Micrográficas en el MEB y espectros EDS para las fibras de la muestra 38-3-22.



Nota. Voltaje de aceleración: 20 keV. Electrones secundarios. Substrato filtro MEC

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB

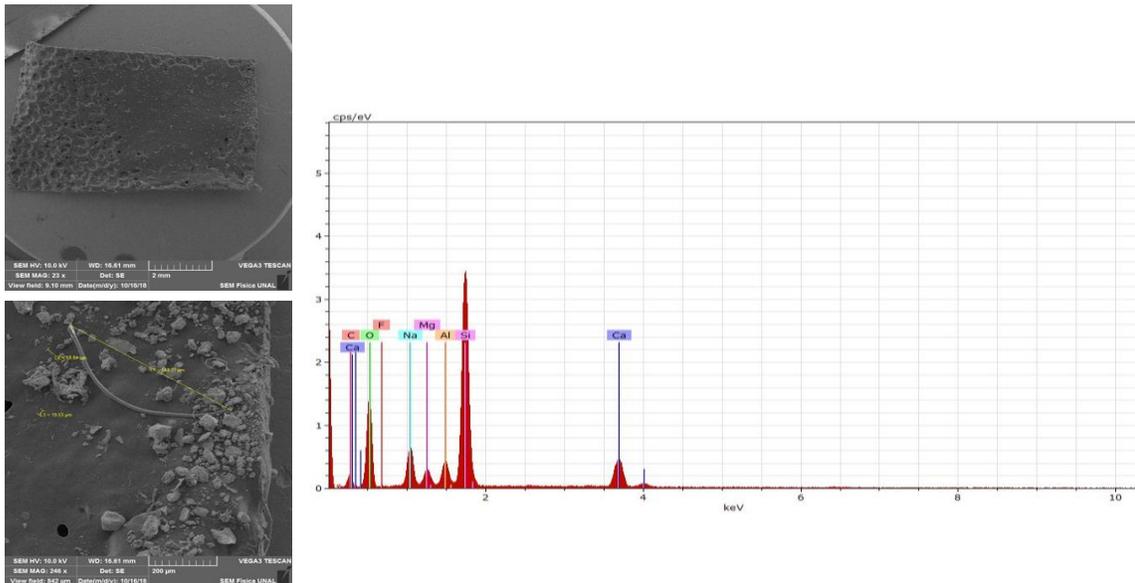
Figura 7-11. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra UN-12-25.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato filtro MEC

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB.

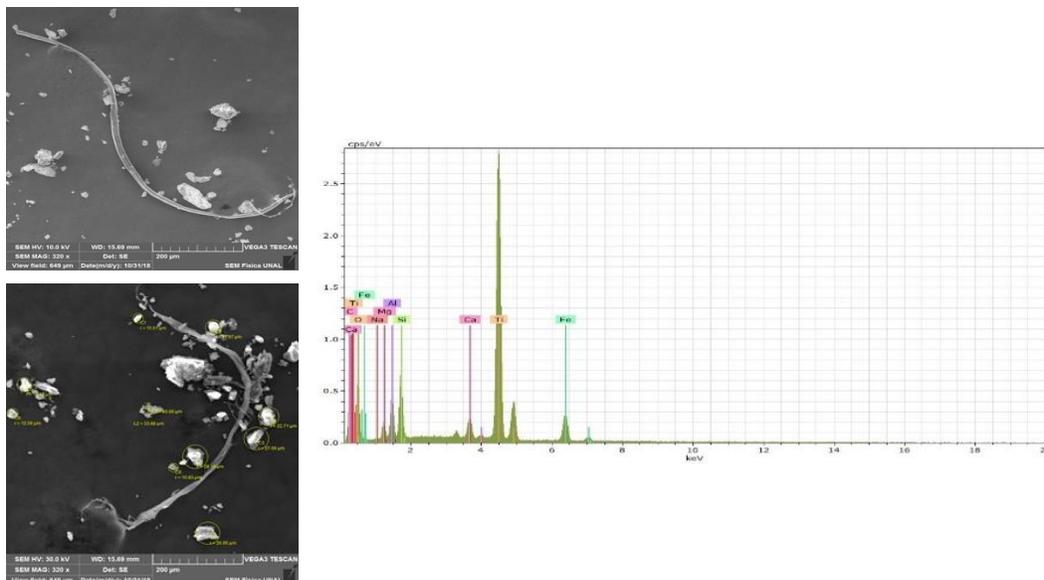
Figura 7-12. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra 40-2-22.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato cinta de carbono

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB.

Figura 7-13. Micrográficas obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra 38-13-25.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 y 30 keV. Electrones secundarios. Substrato cinta de carbono

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan Veg3 SB.

En las Figuras 7-10 y 7-11, se observan fibras submicrométricas, con una longitud alrededor de 40 μm. Una de las fibras (Figura 7-11), tiende a cargarse, porque las fibras de asbesto son dieléctricas. Esto hace que las fotomicrografías presenten líneas discontinuas de brillo, y en algunos casos esto induce que las fibras se muevan. Los espectros EDS presentan una composición química con la presencia de Mg, Si, Fe, Al, Ca y Ti. En el caso de las fibras presentes en las Figuras 7-12 y 7-13 (substrato de cinta de carbono), los espectros EDS determinaron una composición química Mg, Si, Al, Ca, Na, Ti y Fe. Al igual que en lecturas anteriores (Figuras 7-3 y 7-4) el volumen de interacción para el espectro EDS debe cubrir tanto, la fibra como parte del substrato.

En las Tablas 7-8 y 7-9 se presentan los resultados de composición química para las muestras obtenidas en la empresa de transporte. En la Tabla 7-8 se reportan los resultados de muestras analizadas directamente sobre el filtro MEC, y en la Tabla 7-9 se reportan resultados para las muestras impregnadas sobre cinta de carbono. Se dividen estos conjuntos de muestras en dos tablas diferentes, pues, como se mostrará en breve, el tipo de substrato tiene influencia muy significativa en la composición estimada a partir del espectro EDS.

Tabla 7-8. Composición química de las muestras obtenidas para la empresa de transporte de las UN-1-22, 38-3-22 y UN-12-25

	Composición química, %-atómico				
	UN-1-22	38-3-22-1	38-3-22-2	UN-12-25-1	UN-12-25-2
O	44.9 ± 8	49.6 ± 14	52.3 ± 15	39.9 ± 10	34.04 ± 6
C	53.5 ± 7	44.6 ± 10	40.8 ± 11	54.7 ± 10	61.5 ± 7
Mg	0.9 ± 0.1	1.4 ± 0.3	3.1 ± 0.6	0.5 - 0.1	3.1 ± 0.3
Si	0.5 ± 0.1	1.7 ± 0.3	1.8 ± 0.3	1.6 ± 0.2	1.3 ± 0.1
Al	0.2 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2	--
Fe	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.1	1.1 ± 0.3	0.4 ± 0.1	0.05 ± 0.04
Ca	--	1.3 ± 0.2	0.5 ± 0.2	1.7 ± 0.2	--
Ti	--	0.05 ± 0.5	--	--	--
Zn	--	--	0.1 ± 0.2	--	--

Nota. Fibras sobre filtro de membrana éster de celulosa

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

Tabla 7-9. Composición química de las muestras obtenidas para la empresa de transporte y que fueron impregnadas sobre la cinta de carbono.

	Composición química, %-atómico					
	UN-1-22-1-A	40-2-22-1-A	40-2-22-2-A	38-6-23-A	UN-7-23-1-A	UN-7-23-2-A
O		51.4 ± 9	34.0 ± 7	34.3 ± 8	50.6 ± 8	32.1 ± 7
C		23.8 ± 5	64.2 ± 8	65.0 ± 9	46.9 ± 6	59.8 ± 9
Si		10.9 ± 1	0.6 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.1	4.7 ± 0.6
Na		6.4 ± 0.8	0.2 ± 0.1	--	--	0.4 ± 0.1
Ca		2.1 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.1
Al		1.9 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1	1.5 ± 0.2
Mg		1.9 ± 0.3	0.1 ± 0.1	--	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
F		1.6 ± 0.9	--	--	--	--
Fe		--	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1
Cl		--	0.1 ± 0.1	--	--	--
Ba		--	--	--	0.04 ± 0.1	0.04 ± 0.1
K		--	--	--	--	0.3 ± 0.1

	Composición química, %-atómico					
	38-8-23-A	40-9-23	38-10-24-1-A	38-10-24-2-A	38-10-24-3-A	UN-11-24-A
O	50.1 ± 4	25.2 ± 5	36.0 ± 9	55.1 ± 15	53.6 ± 12	43.9 ± 9
C	16.1 ± 2	74.7 ± 8	56.5 ± 10	36.1 ± 9	4.0 ± 8	52.9 ± 8
Si	12.0 ± 0.6	0.03 ± 0.03	2.6 ± 0.4	3.8 ± 0.6	2.8 ± 0.4	0.4 ± 0.1
Na	6.3 ± 0.4	--	--	--	--	1.1 ± 0.2
Al	6.9 ± 0.4	0.05 ± 0.03	1.1 ± 0.2	3.9 ± 0.7	3.1 ± 0.4	0.4 ± 0.1
Mg	3.8 ± 0.2	0.1 ± 0.04	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	--	0.3 ± 0.1
K	3.6 ± 0.2	--	--	--	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1
Ti	1.1 ± 0.1	--	--	--	--	--
Ca	--	--	2.4 ± 0.3	0.1 ± 0.07	--	0.3 ± 0.1
Fe	--	--	0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.15	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1
Cl	--	--	--	--	--	0.3 ± 0.1
S	--	--	--	--	--	0.2 ± 0.1

	Composición química, %-atómico			
	UN-12-25-A-1	UN-12-25-A-2	38-13-25-A-1	38-13-25-A-2
O	45.6 ± 11	50.5 ± 8	49.9 ± 8	57.2 ± 8
C	45.5 ± 9	44.8 ± 6	34.8 ± 5	15.9 ± 3
Si	2.3 ± 0.3	1.5 ± 0.2	2.0 ± 0.2	11.3 ± 0.9
Na	--	1.2 ± 0.2	0.2 ± 0.1	1.1 ± 0.2
Al	1.6 ± 0.3	0.9 ± 0.1	1.7 ± 0.2	3.1 ± 0.3
Mg	0.7 ± 0.2	0.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2	4.9 ± 0.5
Ti	0.08 ± 0.05	--	8.5 ± 0.8	0.1 ± 0.1
Ca	2.9 ± 0.4	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	3.0 ± 0.3

	Composición química, %-atómico			
	UN-12-25-A-1	UN-12-25-A-2	38-13-25-A-1	38-13-25-A-2
Fe	1.0 ± 0.2	0.2 ± 0.1	1.7 ± 0.2	3.3 ± 0.3
Mn	0.1 ± 0.1	--	--	--

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

Los espectros EDS obtenidos (Figuras 7-10 a 7-13) presentan intensos picos relacionados al O ($k-\alpha$) y al C ($k-\alpha$), lo que indica que en el volumen de interacción analizado por EDS la concentración atómica de estos elementos (que son de bajo número atómico) es muy elevada. Así, su elevada concentración (C y O) en los análisis EDS debe ser atribuida a que, en el volumen de interacción, la mayor parte del análisis corresponde al substrato (ya sea filtro de éster de celulosa, ya sea cinta de carbono) y una parte menor del espectro EDS deviene de la fibra propiamente dicha. La fracción fibra-substrato en el EDS depende acentuadamente del tamaño de la fibra (a mayor espesor de la fibra, menor contribución relativa del substrato en el espectro EDS), pero también de la presencia-ausencia de movimiento relativo entre el haz de electrones y la fibra durante el intervalo de tiempo (típicamente que estuvo entre 30 y 60 s) en el cual se realizó la medida (a mayor movimiento relativo mayor contribución del substrato al espectro resultante).

Por un lado, la presencia de carbono en los espectros EDS obtenidos (Figuras 7-10 a 7-13) puede atribuirse esencialmente a la contribución del substrato. Por otro lado, la presencia de oxígeno deviene de ambos, la fibra y el substrato.

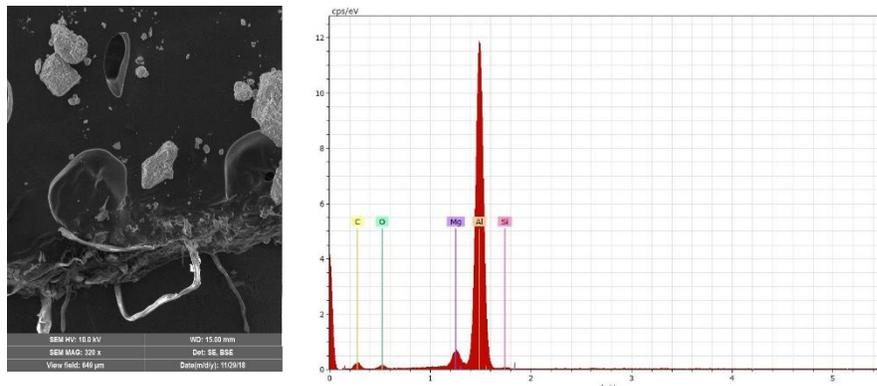
Para la estimación de las concentraciones atómicas reportadas (Tabla 7-9 y 7-10) tácitamente se asume que se analiza un material homogéneo (se usó el programa de microanálisis química Sprit 1.9), lo cual está lejos de ser representativo de la situación experimental estudiada en esta disertación, pero que es una simplificación obligatoria en el sistema EDS usado (y que es la situación más común en los laboratorios de microscopía electrónica con disponibilidad de microanálisis por EDS). Por tanto, los reportes de concentración química (Tablas 7-9 y 7-10) en esta disertación deben ser leídos de forma cualitativa. Estos permiten concluir que hay presencia significativa de Si, Al, Ca, Fe, Ti, Na, y Mg en las fibras analizadas. Estos elementos son comúnmente reportados en las composiciones químicas de las fibras de asbesto.

Los análisis morfológicos realizados por MEB (Figuras 7-10 a 7-13) y la caracterización química por EDS (Tablas 7-9 y 7-10) son consistentes con presencia de fibras de asbesto, tanto en los estudios de actividad laboral, como también en los estudios de subsuelos urbanos. No obstante, los espectros obtenidos están ampliamente afectados por los substratos, lo cual no permite un análisis químico cuantitativo de las fibras, sino que solo se puede analizar cualitativamente los elementos presentes en estas. Este impase fue solucionado, de forma inédita, en esta disertación por medio de la deconvolución de las contribuciones de la fibra y del substrato al espectro general EDS obtenido. Dicho proceso de deconvolución del espectro EDS entre las contribuciones fibra-substrato y la composición química (cuantitativa) de las fibras será presentado en el numeral 4.4.5.

Muestras del subsuelo

En las Figuras 7-14 y 7-15 se presentan tanto los espectros EDS, como también las microfotografías obtenidas en el MEB para las muestras P-1 y P-2. Para la lectura de estas muestras se utilizó una porción de la cinta de carbono y se impregnó directamente sobre el material a analizar (en este caso la muestra del subsuelo en condición original).

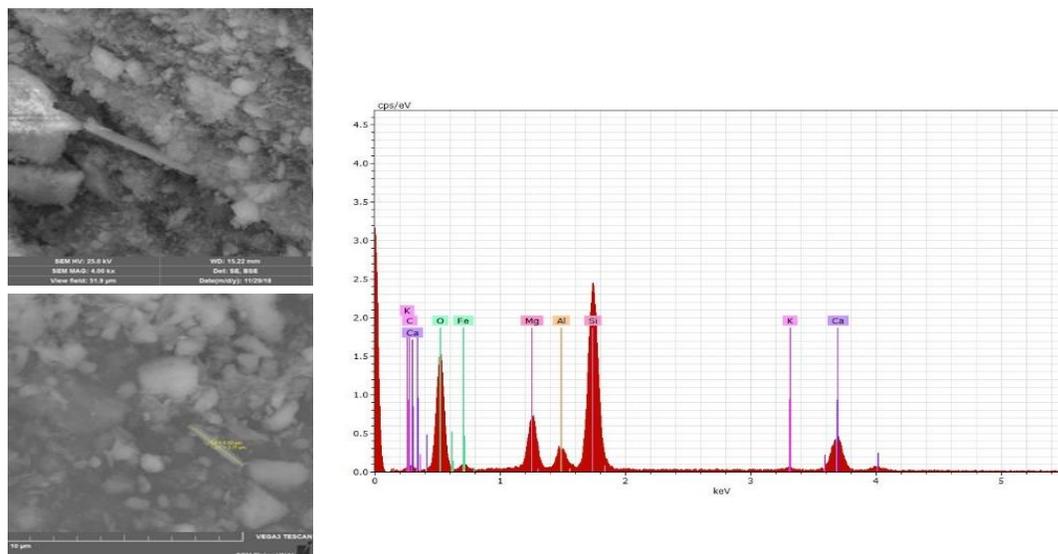
Figura 7-14. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra P-1.



Nota. Voltaje de aceleración: 10 keV. Electrones secundarios. Substrato cinta de carbono

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

Figura 7-15. Micrografías obtenidas en el MEB, espectros EDS para las fibras de la muestra P-2.



Nota. Voltaje de aceleración: 25 keV. Electrones secundarios. Substrato cinta de carbono

Fuente. Autor. Micrografía obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

En las Figuras 7-14 se observan algunas fibras submicrométricas, con presencia de partículas. El espectro EDS presentan un pico intenso relacionado con el Al ($k-\alpha$) y picos menos intensos de Mg y Si. En la Figura 4-15, se observa una fibra submicrométrica, con una longitud de hasta 3 μm , los espectros EDS determinaron una composición química Ca, Mg, Si, Al, Fe.

En las Tablas 7-10 y 7-11 se presentan los resultados de composición química obtenidos para las muestras obtenidas del subsuelo del municipio de Sibaté. Se dividen estos conjuntos de muestras en dos tablas diferentes, para la muestra P-1 y P-2.

Tabla 7-10. Composición química de las muestras obtenidas para el sitio de excavación del P-1.

	Composición química, %-atómico		
	P-1-1	P-1-2	P-1-3
C	48.8 \pm 6	62.9 \pm 8	--
O	9.3 \pm 2	33.9 \pm 6	66.9 \pm 3
Si	0.3 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	30.9 \pm 0.7
Mg	2.1 \pm 0.2	--	0.1 \pm 0.04
Al	39.5 \pm 3	2.5 \pm 0.3	1.9 \pm 0.1
Ca		0.4 \pm 0.1	0.02 \pm 0.03
Cl	--	0.04 \pm 0.04	
Fe	--	--	0.1 \pm 0.05

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

Tabla 7-11. Composición química de las muestras obtenidas para el sitio de excavación del P-2.

	Composición química, %-atómico		
	P-2-1	P-2-2	P-2-3
O	69.28 \pm 8	66.25 \pm 9	41.24 \pm 7
Si	18.57 \pm 1	11.37 \pm 0.9	1.51 \pm 2
Al	6.15 \pm 0.5	2.22 \pm 0.2	2.54 \pm 0.3
C	4.83 \pm 1	9.05 \pm 2	53.60 \pm 7
Fe	0.57 \pm 0.1	1.89 \pm 0.2	0.90 \pm 0.2
Mg	0.39 \pm 0.1	6.50 \pm 0.6	0.09 \pm 0.05
K	0.21 \pm 0.1	0.13 \pm 0.05	--
Ca	--	2.6 \pm 0.2	--
Ti	--	--	0.12 \pm 0.06

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software Sprit 1.9 integrado al microscopio Tescan, Veg3 SB.

Para la estimación de las concentraciones atómicas reportadas (Tabla 7-10 y 7-11) tácitamente se asume que se analiza un material homogéneo (usando el programa de microanálisis química Sprit 1.9), lo cual está lejos de ser representativo de la situación experimental estudiada en esta disertación. Por tanto, los reportes de concentración química (Tablas 7-10 y 7-11) en esta disertación deben ser leídos de forma cualitativa.

Estos permiten concluir que hay presencia significativa de Si, Al, Fe, Mg y Ca en la fibra analizada del P-2. Estos elementos son comúnmente reportados en las composiciones químicas de las fibras de asbesto de tipo anfíbol.

7.3.5 Espectroscopía por dispersión de energía: efecto del nivel de vacío de la columna del microscopio y del voltaje de aceleración en la composición química del asbesto

Las fibras de asbesto son dieléctricas, generando problemas de concentración de carga eléctrica en diversas regiones, afectando así el análisis en el MEB. Una eventual solución es disminuir la intensidad del vacío en la cámara del microscopio. No obstante, no hay reportes en la literatura sobre el efecto del nivel de vacío en la composición química estimada para las fibras de asbesto.

El volumen de interacción determina que tanta información proviene de la fibra propiamente y cuanta información proviene del substrato. Este volumen de interacción, por su vez, es afectado notablemente por el voltaje de aceleración: a mayor voltaje de aceleración, mayor será el volumen de interacción. En la Tabla 7-12 y 7-13 se presentan los resultados tanto de las lecturas hechas en bajo y alto vacío para el material de referencia, como el de la muestra UN-12-25.

Tabla 7-12. Composición química de la muestra en los modos de bajo y alto vacío para el material de referencia ASB-FIB-203-3.

	Composición química, %-atómico – Bajo vacío				
	10 kV	15 kV	20 kV	25 kV	30 kV
O	54.9 ± 7	50.1 ± 8	48.9 ± 8	48.2 ± 9	50.1 ± 9
C	25.8 ± 3	36.7 ± 5	41.6 ± 6	44.3 ± 7	42.4 ± 7
Mg	10.7 ± 1	8.3 ± 1	6.5 ± 1	5.5 ± 1	5.0 ± 0.6
Si	7.9 ± 0.7	4.7 ± 1	2.9 ± 0.3	1.9 ± 0.2	2.1 ± 0.2
F	0.7 ± 0.3	--	--	--	--
Fe	--	0.9 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.1

	Composición química, %-atómico – Alto vacío	
	10 kV	30 kV
O	55.7 ± 7	48.2 ± 8
Mg	13.8 ± 1	5.6 ± 0.7
Si	10.3 ± 0.9	2.4 ± 0.29
C	19.6 ± 3	43.7 ± 6
Fe	0.4 ± 0.2	0.07 ± 0.0

Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software EDS integrado al microscopio.

Tabla 7-13. Composición química de la muestra en los modos de bajo y alto vacío para la muestra UN-12-25.

	Composición química, %-atómico – Alto vacío	
	10 kV	30 kV
O	47.6 ± 5	45.9 ± 5
C	44.8 ± 4	33.6 ± 3
Mg	5.1 ± 0.3	11.3 ± 0.7
Si	2.1 ± 0.13	8.8 ± 0.5
Fe	0.2 ± 0.1	--
F	--	0.3 ± 0.2

	Composición química, %-atómico – Bajo vacío				
	10 kV	15 kV	20 kV	25 kV	30 kV
O	53.9 ± 6	44.3 ± 6	45.1 ± 6	47.2 ± 7	47.0 ± 5
Mg	12.5 ± 0.9	7.2 ± 0.6	5.7 ± 0.5	5.4 ± 0.5	4.3 ± 0.3
Si	9.8 ± 0.7	4.5 ± 0.4	2.6 ± 0.2	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.1
C	22.6 ± 3	42.9 ± 5	45.7 ± 5	44.9 ± 6	46.5 ± 4
Fe	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1
Al	0.6 ± 0.08	--	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.03 ± 0.03
Br	--	0.2 ± 0.1	--	--	--
Ca	--	0.3 ± 0.07	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	--

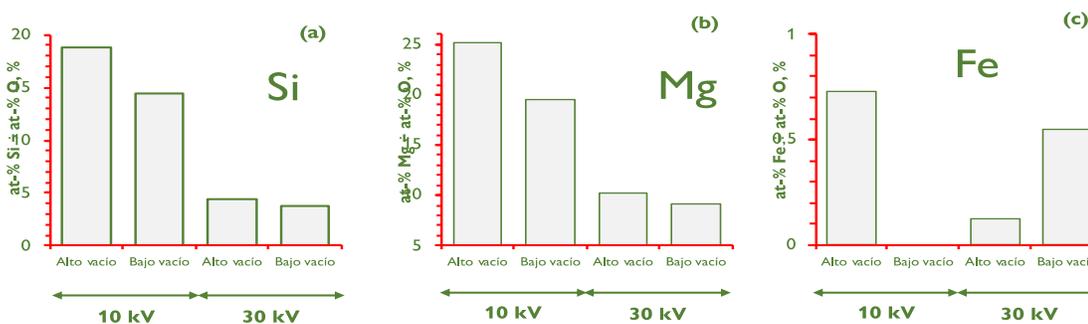
Fuente. Autor. Composición química obtenida por el software EDS integrado al microscopio

Se observa (Tablas 7-12 y 7-13) que, a mayor voltaje de aceleración, mayor es la concentración de carbono en la composición química estimada. Esto se puede atribuir directamente a la mayor contribución del sustrato en la medida global, así mismo aumenta el voltaje de aceleración. En las Tablas 7-12 y 7-13, se presenta la concentración de Mg, Si y Fe relativa a la concentración de O para las fibras de asbesto en 10 y 30keV. Se observa que a medida que aumenta la tensión de aceleración, menor es la concentración relativa de Mg, Si y Fe. Esto se puede atribuir a que, a mayor tensión de aceleración, mayor cantidad de fotones de oxígeno que son generados en el sustrato, llevando a subestimación notoria de Mg, Si y Fe.

Los resultados arriba descritos, confirman el efecto dañino que el sustrato tiene sobre la determinación de la composición química de las fibras estudiadas, siendo este efecto dañino más intenso a la medida que sea mayor la tensión de aceleración. Lo que conlleva a concluir que cuando se asume tácitamente un volumen de interacción de composición química homogénea, las medidas obtenidas pueden interpretarse solo como cualitativas. Además, en dicho escenario de asumir homogénea la composición en todo el volumen de interacción, es más adecuado usar los menores voltajes de aceleración (que llevan a menor contribución del sustrato), como por ejemplo 10keV. No obstante, una gran desventaja de los ensayos a 10keV sobre los ensayos a 30keV es la mala detectabilidad de trazas (Fe, Al, K, etc) en estos ensayos a 10keV.

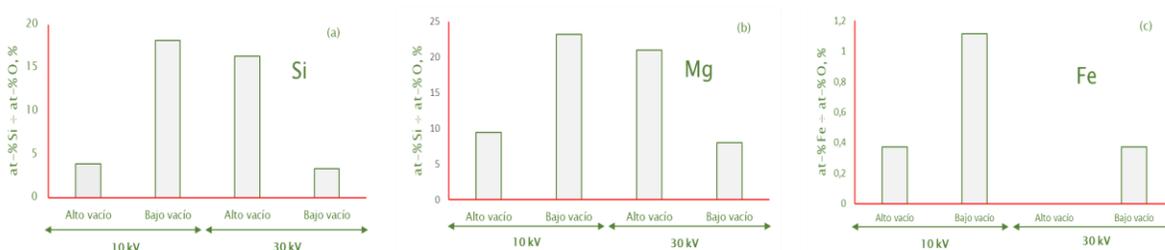
En las Figuras 7-16 y 7-17 se presenta la concentración de Mg, Si, y Fe relativa a la concentración del O, comparando el modo de operación de alto vacío con el modo de bajo vacío en 10 y 30 keV. Se observa que las medidas realizadas en alto vacío (o también llamado vacío convencional) predicen fibras más ricas en Mg y Si que las realizadas en bajo vacío. Así, el efecto de mayor carga en las medidas realizadas en alto vacío debe ser minimizados por medio de otras estrategias diferentes a disminuir el nivel de vacío en la columna del microscopio. En particular, para las muestras estudiadas sobre filtro MEC, en esta disertación se usó papel de aluminio para hacer las veces de porta-muestra maleable que puede cubrir la parte exterior de la periferia del filtro. Usando esta estrategia fue posible disminuir los efectos de carga eléctrica en regiones localizadas de la muestra.

Figura 7-16. Concentración de Mg, Si, y Fe relativa a la concentración del O, comparando el modo de operación de alto vacío con el modo de bajo vacío, patrón de referencia ASB/FIB-203-3.



Fuente. Autor

Figura 7-17. Concentración de Si, Mg y Fe relativa a la concentración del O, comparando el modo de operación de alto vacío con el modo de bajo vacío, muestra UN-12-25.



Fuente. Autor

Simulación física de Monte Carlo para deconvoluir los efectos de la fibra y del sustrato en el espectro EDS general

Inicialmente se estudió la roca de asbesto (en cuyo análisis EDS hay influencia despreciable del sustrato), con la finalidad de evaluar la pertinencia del uso del programa Casino para estimar la composición química a partir de las intensidades en el espectro

EDS. En la Tabla 7-14 se presentan los resultados de dicho análisis y se comparan con un crisotilo ideal (patrón de referencia). Se observa una elevada concordancia entre la composición química estimada con el procedimiento convencional usando el software Sprit 1.9 y la simulación física de Monte Carlo usando el software Casino.

Posteriormente, se realizaron pruebas de simulación física de Monte Carlo a las muestras que estuvieron por encima del LOD y TLV, conforme a los resultados obtenidos por MCF. Se realizaron simulaciones teniendo en cuenta, el sustrato (filtro MEC y cinta de carbono), el voltaje de aceleración (20, 25 y 30 keV), la densidad de la fibra y del sustrato (asbesto= 2.7 g/cm³, filtro MEC y cinta de carbono= 0.5 g/cm³), la composición del sustrato (cinta de carbono, 83.5 C, 9.8 O y 6.7 N, %-at, y el filtro MEC, 60.7 C, 22.6 O y 16.7 N, %-at). Los resultados de la composición química de las fibras sin influencia del sustrato, para las muestras: material de referencia, roca de asbesto, y UN-1-22, 38-10-24, UN-12-25, P2-2, y material de referencia ASB/203-3, se presentan en la Tabla 7-14, 7-15, y 7-16.

Tabla 7-14. Resultados de la nueva composición química obtenida de la simulación para el patrón de referencia ASB/FIB-203-3.

			Composición química, %-atómico				
			O	Mg	Si	Fe	Al
30 Kv, Hv	Intensidad Sprit 1.9	Casino 213 nm	33,5	34	27	2,5	3
10 Kv, Hv	Intensidad Sprit 1.9	Casino 195 nm	38,5	36	25,5	ND	ND

Fuente. Autor

Tabla 7-15. Resultados de la nueva composición química obtenida de la simulación de la roca de asbesto.

		Composición química, %-atómico			
		O	Mg	Si	Fe
30 Kv, HV	Casino	62,44	21,9	15,4	0,26
30 Kv, Hv	Sprit 1.9	65,56	19,34	14,66	0,44
30 Kv, Hv	Crisotilo ideal	64,28	21,1	14,3	0,3

Fuente. Autor

Tabla 7-16. Resultados de la nueva composición química obtenida de la para las muestras UN-1-22, 38-3-22, 38-10-24, UN-12-25, P2-2.

Muestra	Intensidad	Sustrato	Nueva composición química, %-atómico							
			O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
UN-1-22	30keV*	122 nm	53.2	1	13	4.5	17	1.1	4.3	5.9
38-10-24A-2	30keV**	140 nm	56.2	1.5	4	6	17	0.8	9.5	5
38-10-24A-3	30keV **	180 nm	53.7	2.5	4	8	12.5	0.8	14	4.5
UN-12-25-A-1	30Kev**	295 nm	42.7	0.4	3	8	20	1.2	20	4.7
UN-12-25-A-2	30keV**	155 nm	38.5	0.3	32	1.3	25.5	Trazas	0.7	1.7
P2-2	25keV**	520 nm	47.6	Trazas	8.5	3.5	31.5	0.4	5	3.5

Nota. *sustrato sobre el filtro MEC y ** sustrato cinta de carbono.

Los resultados obtenidos de la simulación confirman que, tanto el material de referencia, como también la roca de asbesto, son asbesto de tipo crisotilo.

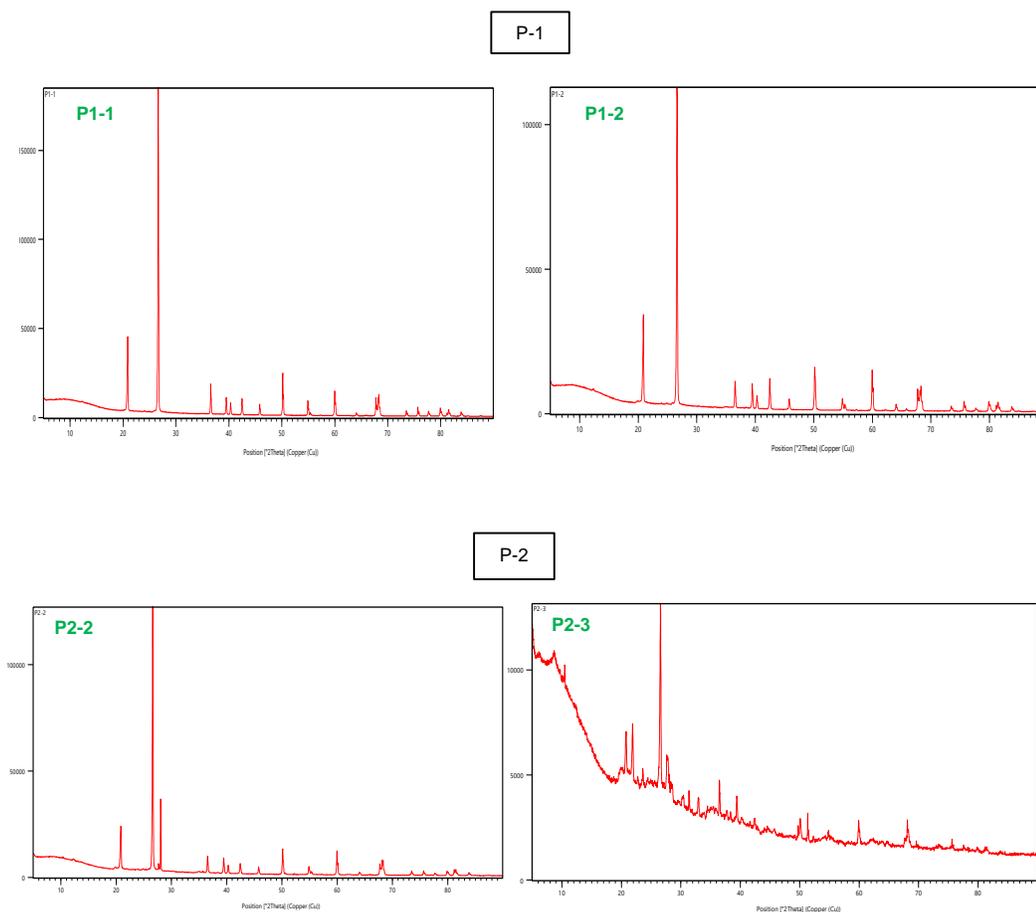
En relación con la composición química obtenida para las muestras UN-1-22 y 38-10-24, reflejan una condición ideal del asbesto de tipo crisotilo, con presencia de Al, Fe y Ca. En relación a la muestra UN-12-25 presenta una condición ideal para el asbesto anfíbol (ya sea del tipo tremolita o actinolita). Las fibras en la muestra P2-2, pueden considerarse de tipo crisotilo.

7.3.6 Difracción de rayos X: caracterización de las muestras del subsuelo

Resultados relativos al cuarto objetivo específico

En la Figura 7-18 se presentan los difractogramas obtenidos para cada uno los puntos en donde se tomaron las seis muestras.

Figura 7-18. Difractogramas muestras P-1 y P-2.

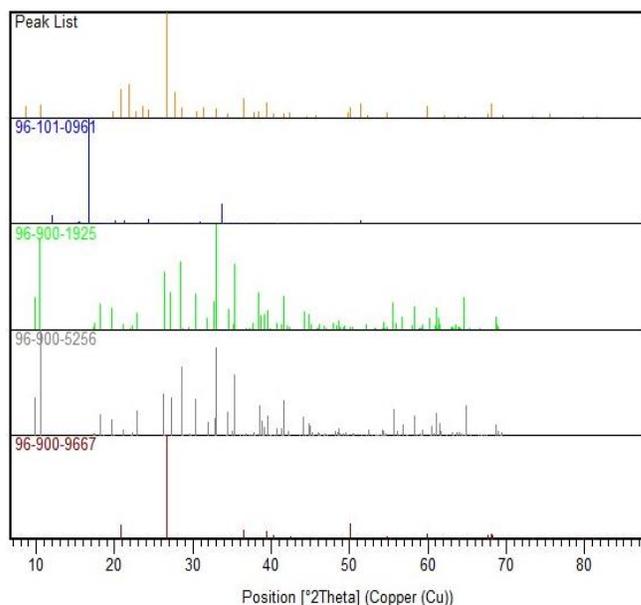


Fuente. Difractogramas obtenido por el programa instalado al equipo PAN ANALYTICAL.

De un lado, los difractogramas de las muestras P1-1, P1-2 y P2-2, presentan las mismas características en relación a las fases presentes. Por otro lado, la muestra P2-3 presenta fases diferentes a las otras tres muestras.

Para caracterizar las fases presentes se usaron como referencia los patrones JCPDF 96-101-0961 (Crisotilo), 96-900-1925 (Actinolita), 96-900-5256 (Tremolita) y 969006767 (Cuarzo). En la Figura 7-19 se presentan las fases identificadas.

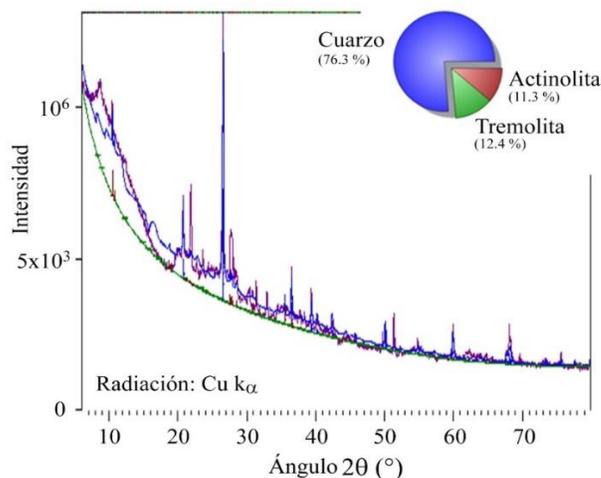
Figura 7-19. Fases identificadas en la muestra analizada del P2-3



Fuente. Fases obtenidas por el software HighScore Plus 3.0, base de datos

En la Figura 7-20 se muestran, nuevamente, los espectros de difracción de las muestras P2-3, pero ahora con la superposición de las fases respectivas estimadas a partir de la indexación con los patrones de referencia ya mencionados.

Figura 7-20. Resultado refinado de la muestra P2-3



Fuente. Autor. Resultados obtenidos a través del software HighScore Plus 3.0.

Con la muestra refinada y con los picos seleccionados se hizo un barrido exhaustivo de la muestra con el propósito de identificar los picos de las fases detectados. En la Figura 7-20 se presentan los resultados obtenidos de la composición química para la muestra P2-3.

El resultado arroja una composición química para las muestras P2-3, la cual está compuesta por: actinolita en un 11.3%, tremolita 12.4% y cuarzo en un 76.3%.

8. Discusión

1. En esta tesis determinó la cuantificación de fibras por centímetro cúbico (f/cm^3) presentes en dos ambientes laborales, uno del sector transporte y otro de la construcción, utilizando la metodología NIOSH 7400. En la empresa de transporte se obtuvo una concentración de 0.02, 0.026, 0.03, 0.01 y 0.11 f/cm^3 , mientras, que en la empresa del sector de la construcción los resultados no pudieron ser calculados por fallas en la bomba del tren de muestreo y por la manipulación por parte de los trabajadores participantes.

Estos resultados determinaron que el TLV-TWA definido por organismos internacionales (EPA, NIOSH, OSHA, ACGIH, OMS) para las jornadas de trabajo cuando se presume la exposición a un agente tóxico, que se estima 0.1 f/cm^3 y el obtenido para el peor escenario de 0.11 f/cm^3 se encuentra por encima del establecido para la empresa de transporte. Los trabajadores participantes y en especial quienes realizan actividades de remache de bandas están directamente expuestos a fibras de asbesto, por tanto, se da respuesta a la pregunta de investigación planteada dentro de la tesis y desarrollada conforme a los criterios metodológicos para la toma, preparación y análisis de muestras. Estos resultados son similares a estudios desarrollados por Marioryad & Kakooei, et al, en su estudio “evaluación de la exposición al asbesto en el aire en una fábrica de láminas y tuberías de fibrocemento en Irán” en el año 2011 [11], donde concluyen, que es posible que sea necesario controlar la exposición para cumplir con el TLV de la ACGIH y otros niveles de orientación, que permitan generar estrategias de intervención en el área de trabajo.

Así también, Cely García & Torres Duque CA, et al, en su estudio sobre la salud y afecciones respiratorias en trabajadores del sector mecánico en Bogotá, concluyen sobre la presencia de elevadas concentraciones de fibras de asbesto en el ambiente de trabajo estudiadas por microscopía de contraste de fase [15]. En este sentido se confirma que los trabajadores que realizan actividades de remache de bandas durante 4 días a la semana en la época de mayor demanda para la empresa, están generando un ambiente propicio de exposición a fibras de asbesto presente en las bandas de frenos de los vehículos que son reparados en el taller de la empresa. Por tanto, y conforme a lo establecido por la normatividad nacional, estos trabajadores deben tener un programa de vigilancia epidemiológica antes, durante y después de haberse retirado del oficio, indistintamente, si continúan o no laborando para la compañía, dada las repercusiones de daño que podría generar el asbesto en su organismo a mediano y largo plazo, como lo define la Ley 1968 de 2019.

2. Con los resultados obtenidos en las muestras sometidas a lecturas por microscopía de contraste de fase, se estimó la exposición de la dosis inhalada en los trabajadores del sector transporte. El cálculo de la DEE (dosis de exposición estimada) arrojó un valor de 1.41×10^{-5} fibras contaminante/kg PC-día. Se estimó la DEE anual con un valor de 0.005 fibras contaminante/kg PC-año y se realizó el cálculo de la dosis acumulada 10, 15 y 20

años de 0.05 fibras contaminante/peso corporal. En el segundo caso se estima una dosis al mismo trabajador con una DEE de 5.63×10^{-6} fibras contaminante/kg PC-día y una dosis anual de 0.02 fibras contaminante/kg PC-año y se proyectó una dosis acumulada para 25, 30, 35 y 40 años de 0.05 fibras contaminante/peso corporal a una concentración en el aire de $0,11 \text{ f/cm}^3$.

Aunque, la dosis estimada se encuentra por debajo del TLV-TWA, no significa que no hay riesgo por exposición y efectos, dado que se debe tener en cuenta aquellos datos por debajo del límite permisible y en especial cuando son de tipo crisotilo y para patologías como el cáncer. Al revisar dos investigaciones realizadas por Cely Garcia en el año 2012 y 2013 en talleres mecánicos en la ciudad de Bogotá, se estimaron resultados que estaban por debajo del TLV-TWA, no obstante, sobresalían aquellos valores mayores a 0.1 f/cm^3 [17], así mismo, en un estudio conducido por Arthur L. Frank, Guillermo Villamizar y Jose Gabriel Bustillo Pereira en el 2020, sobre trabajadores de una fábrica de fricción, en donde se practicaron pruebas de función pulmonar, evidenciaron que diecinueve trabajadores presentaban cambios radiográficos consistentes con exposición previa al asbesto. Los trabajadores que desarrollaron alguna enfermedad estuvieron dentro del margen de los 20 años posterior a la exposición [19]. Las agencias internacionales han propuesto para algunos agentes tóxicos causantes de cáncer un límite de exposición, sin embargo, muchas veces queda un vacío en relación aquellos valores que están por debajo de ese límite definido, que puede a largo plazo convertirse en un problema para las personas que presentan algún tipo de exposición regular o gradual y que al momento de las mediciones se estiman dentro del rango “permisible”, pero que realmente pueden estar generando un deterioro a la salud de los trabajadores.

3. Las fibras identificadas en las muestras de ambientes laborales y subsuelo contaminados fueron caracterizadas por microscopía electrónica de barrido (MEB), realizando un microanálisis químico (EDS) e identificación de la morfología de las fibras, además, se simuló condiciones mediante el uso del software Casino Monte Carlo.

Los resultados obtenidos en las lecturas por MEB para las muestras presentan diferencias significativas en los elementos detectados por el equipo, no obstante, las muestras 38-3-22 y UN-12-25 presentan en su composición química los elementos Ca, Si, Mg, Fe y Al mayor al 1% y en algunos casos hasta el 3%, mientras, que las muestras UN-1-22, 38-3-23 y UN-12-25 están asociados a una posible fibra de asbesto de tipo crisotilo, indistintamente si los resultados fueron del filtro MEC o de la cinta de carbono. Para los resultados del sitio de excavación P2-2 se detectó una fibra alargada y rígida con características físicas y químicas similares a un anfíbol, es así, que el subsuelo del municipio de Sibaté, sigue presentando residuos de materiales elaborados a base de asbesto y que fueron depositados en diferentes lugares del área urbana y rural de esta región.

La presente tesis aporta información sobre el uso de las técnicas de análisis por microscopía electrónica de barrido y el software de simulación Casino Monte Carlo dado facilitan la caracterización de las fibras de asbesto, diferentes a las técnicas avaladas por

organismos internacionales. Estos resultados se asemejan con los obtenidos por la agencia de trabajo en Francia en el año 2010, que realizó un estudio en donde se analizaron fibras MCF y caracterizadas por Microscopía Electrónica de Transmisión Analítica (META). Aunque la técnica de análisis es diferente a la MEB, concluyen que no se encontró una relación simple entre los resultados de los métodos de recuento MCF y META, pero si la presencia de asbesto [9]. Por otro lado, Cruz K, en su tesis de 2015, estudia la caracterización de asbesto por DRX y MEB, en materiales comerciales, en muestras de suelos cercanos a una planta antigua, en donde se identificaron las características mineralógicas y morfológicas de las fibras de asbesto por DRX y MEB [13]. La lectura de fibras de asbesto en la actualidad implica una inversión económica elevada para las empresas, no obstante, la validación de una nueva técnica por microscopía y el uso de métodos analíticos permiten una caracterización morfológica y química confiable para el desarrollo de investigaciones sobre el asbesto.

4. Las muestras del subsuelo fueron analizadas por DRX, cuantificando los elementos presentes en los picos de cada una de las fases identificadas. Las muestras P-1 y P-2 identifican la presencia de cuarzo como mineral mayoritario en los resultados obtenidos, sin embargo, en la muestra P2-3 se detectó que la fibra era de tipo actinolita y tremolita, confirmando la presencia del asbesto anfíbol. El subsuelo de la Cra 7B con calle 7 del municipio de Sibaté tiene presencia de asbesto. Las muestras leídas por MEB, y el uso de DRX pueden resultar una alternativa muy importante e interesante para la identificación de fibras en suelos urbanos. En un estudio reciente desarrollado por el Dr. Juan P. Ramos Bonilla de la Universidad de los Andes en el 2019, se evidenció la presencia de asbesto friable (varios tipos de asbesto anfíboles) en 3 de las 4 perforaciones de los suelos estudiados en el municipio de Sibaté, quien postula que “el asbesto no solo puede estar presente en el subsuelo, sino, posiblemente en la capa superior de la corteza terrestre”, esto es considerado dado que se tomaron muestras entre 10 a 110 cm de profundidad en diferentes lugares de este municipio (estadio, escuela pública y cancha de fútbol). Los resultados mostraron la presencia de asbesto de tipo crisotilo a 10 cm en el estadio y en la cancha de fútbol a profundidades de 40 a 105 cm profundidad, por tanto, el asbesto no solo puede estar presente en el subsuelo, sino, posiblemente en la capa superior de la corteza terrestre [34]. La presencia de asbesto en algunas áreas del subsuelo de Sibaté confirma el peligro existente para la población de este municipio, representando un riesgo por exposición ambiental y comunitaria, por tanto, es conveniente replicar este tipo de estudios en regiones apartadas de Colombia que han utilizado este mineral para la construcción de edificaciones, en sitios cercanos a las minas y empresas que utilizan asbesto como materia prima o en sus componentes y a su vez realizar el direccionamiento de programas epidemiológicos de seguimiento en población no expuesta laboralmente.

9. Conclusiones

9.1 Conclusiones

9.1.1 Sobre los protocolos de obtención de las muestras

- ✚ El laboratorio de toxicología de la Universidad Nacional, está en capacidad técnica de obtener muestras adecuadas para la posterior caracterización de fibras de asbesto, tanto en ambientes laborales locales como en subsuelo urbano. El protocolo de recolección inicialmente implementado era susceptible a errores en la toma de muestras a causa de la manipulación de las bombas de muestreo y defectos del material de la capucha (filtro MEC). El protocolo de recolección de muestras actualizado tiene indicaciones específicas para minimizar la toma de muestras inapropiadas por causa de dichos problemas.
- ✚ Las muestras obtenidas en filtro MEC pueden adecuadamente ser procesadas por inmersión de acetona (transparentado de filtros) en el laboratorio de toxicología de la Universidad Nacional y el Laboratorio de Higiene y Toxicología Industrial de la ARL Positiva, para posterior análisis por microscopía de contraste de fase.
- ✚ Tanto las muestras en el filtro MEC, como aquellas en cinta de carbono, pueden ser colocadas directamente en el microscopio electrónico de barrido.
- ✚ El tiempo de monitoreo, la capacidad y el análisis de las muestras, son fundamentales para establecer la cuantificación de fibras presentes en un ambiente de estudio de tipo laboral, indistintamente si son ambientes saturados o poco saturados.

9.1.2 Sobre la caracterización de las fibras

- ✚ La microscopia de contraste de fase permite determinar la concentración de fibras presentes en un ambiente laboral estudiado, no obstante, no permite identificar el tipo de fibra estudiada, ni su composición química. Así mismo, el conteo de las fibras, depende única y exclusivamente del analista, por tanto, puede conducir a un sesgo de error elevado, siempre y cuando no se tenga la experticia suficiente.

- ✚ La microscopía electrónica de barrido permite caracterizar cualitativamente fibras de asbesto, a través del microanálisis químico por dispersión de energía (EDS).
- ✚ La simulación física de Monte Carlo permite estimar la composición química de las fibras de asbesto por medio de deconvolución de las contribuciones de la fibra y del sustrato al espectro EDS general.
- ✚ El modo de operación a “alto vacío” en comparación a “bajo vacío”, en el microanálisis químico EDS por microscopía electrónica de barrido, afecta la estimativa de la composición química de la fibra. Este efecto es despreciable en un microanálisis químico cualitativo, pero estas consideraciones son muy significativas cuando un análisis cuantitativo es llevado a cabo.
- ✚ El voltaje de aceleración en los estudios de microanálisis químico por EDS en el microscopio electrónico de barrido afecta acentuadamente el análisis de la composición química de las fibras. Cuando no es posible realizar post-procesamiento de los espectros EDS, para la estimación de la composición de la fibra sin influencia del sustrato, se recomienda realizar análisis a voltaje de aceleración de 10keV, que es el que induce menor influencia del sustrato en el espectro total.
- ✚ Se sugiere un protocolo de caracterización cuantitativa de la composición química de fibras de asbesto, en el cual se deben realizar medidas a 10keV como a 30keV, tanto, en la fibra como en una región limpia del filtro, medidas experimentales que serán usadas para post-procesamiento de los espectros EDS (por simulación física de Monte Carlo) para la estimación de la composición química de la fibra sin influencia del sustrato.
- ✚ Se sugiere un protocolo para la caracterización cuantitativa de la composición de fibras de asbesto, en el cual se debe permitir una incertidumbre en torno al 3 %-at para elementos mayoritarios (O, Si, Mg, etc.) y 1 %-at para elementos minoritarios (Fe, Al, etc).

9.1.3 Sobre la exposición a fibras de asbesto en ambientes laborales y la presencia de fibras de asbesto en subsuelo urbano

- ✚ Los protocolos de análisis de las muestras de ambientes laborales y del subsuelo fueron implementados con éxito en el laboratorio de toxicología, tanto para determinar la exposición a fibras de asbesto en ambientes laborales como también para detectar la presencia de fibras de asbesto en subsuelo urbano.
- ✚ Las mediciones de exposición en población ocupacionalmente expuesta del sector transporte evidenciaron la presencia de fibras de asbesto crisotilo. Esta cuantificación

detectó una concentración de hasta 0.11 fibras por cm^3 , lo que indica un nivel de exposición por encima del TLV-TWA para una jornada laboral de 8 horas de trabajo.

- ✚ Las muestras recolectadas del subsuelo (Sibaté), caracterizadas por microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, indicaron la presencia de asbesto anfibólico (tremolita y actinolita).

9.1.4 Sobre los aspectos toxicológicos ocupacionales

- ✚ Los trabajadores de la empresa del sector transporte de carga, se encuentran expuestos a fibras de asbestos, en especial aquellos que realizan actividades de remacha de bandas, actividades de patio, y mantenimiento.
- ✚ La concentración de exposición obtenida en ambientes laborales para la empresa de transporte de carga, se encuentra en 0.02, 0.026, 0.03, 0.01 y 0.11 f/cm^3 , lo cual genera una elevada exposición en el peor de los casos, siendo este valor un indicador a mediano y largo plazo, para que estos trabajadores puedan presentar algún tipo de daño a la salud, asociado al asbesto.
- ✚ No es posible definir un nivel de exposición en términos de bajo, medio, alto, dado que el objetivo del estudio no fue el de establecer un nivel de riesgo. El objetivo fue determinar la concentración de fibras, mediante la metodología NIOSH 7400, para el posterior estudio por las diferentes técnicas de microscopía, pero no en el contexto de un estudio de higiene ambiental ocupacional.
- ✚ La dosis de exposición estimada calculada para los trabajadores se encuentra por debajo de los niveles permisibles, no obstante, la exposición es acumulativa y está sujeta directamente a la actividad, en este caso el remache de bandas. A mayor demanda de vehículos, mayor actividad a la semana debe desarrollarse para la ejecución de la tarea.

10. Recomendaciones

- ✦ Para la toma de muestras en ambientes laborales se sugiere el uso de una cinta de carbono, la cual puede impregnar residuos (partículas) presentes en la capucha al momento del monitoreo. Esto aumenta la probabilidad del número de muestras, así como también el análisis de fibras que pueden ser estudiadas en las etapas de caracterización química, morfológica y estructural.
- ✦ Los protocolos definidos por organismos internacionales (OMS, NIOSH, etc.), sugieren monitorear 8 horas de la jornada laboral. Un aumento de dicho tiempo de monitoreo podría mejorar la sensibilidad de la detección en aquellos casos de ambientes poco saturados, particularmente si la concentración de fibras se encuentra cercana al límite de detección de la técnica.
- ✦ Para la preparación de muestras y en especial el transparentado de los filtros se recomienda utilizar acetona HPLC en lugar de la acetona p.a al 99%.
- ✦ Se recomienda colocar sobre porta muestras de papel de aluminio los filtros que se estudian en el microscopio electrónico de barrido, donde el porta muestras recubre el borde del filtro. Esto disminuye la intensidad de la formación de regiones con carga eléctrica, lo que redundaría en la obtención de imágenes de adecuada calidad y,

adicionalmente, disminuye la posibilidad que las fibras se muevan durante el periodo en el cual el haz de electrones se enfoca sobre la fibra.

- ✦ Se recomienda utilizar la microscopía electrónica de transmisión en algunas muestras seleccionadas después de exhaustiva caracterización por MCF y MEB, para aumentar la confiabilidad de los reportes, a partir de la obtención, por técnicas diversas, de información redundante.
- ✦ Se recomienda automatizar, en programa de computador amigable con el usuario, el algoritmo de cálculo propuesto en esta disertación para la estimativa de la composición química de la fibra libre del substrato por MEB-EDS asistida por simulación de Monte Carlo, buscando acortar el tiempo de análisis por fibra en el post-procesamiento de los espectros EDS. Esto puede abaratar el costo por análisis, permitiendo la implementación de la técnica para ofrecer servicios a un costo accesible en el territorio nacional.
- ✦ Se recomienda realizar un monitoreo del municipio de Campamento, Antioquía por estar próximo a la mina de asbesto. Todo esto de dar cumplimiento a lo establecido en la Ley 1968 de 2019 “Por el cual se prohíbe el uso del asbesto en Colombia”
- ✦ Realizar la toma de muestras en edificaciones, viviendas, escuelas, sistemas acueductos, tanques de almacenamiento de agua, entre otros, que hayan sido construidas hace más de 40 años, con el objetivo de identificar la presencia de asbesto en la infraestructura que pueden inducir a enfermedades relacionadas a la exposición a asbesto, así mismo, se permite dar cumplimiento a lo establecido en la Ley 1968 de 2019 “Por el cual se prohíbe el uso del asbesto en Colombia”.
- ✦ Es necesario que se acondicione el are de trabajo donde se realiza la actividad de remache de bandas. Se puede sugerir un sistema de extracción de aire localizado en el área de la remachadora, así como también, un cuarto cerrado y ventilado.
- ✦ Los trabajadores deberían tener mayor precaución con el uso del traje Tyveck, dado que una vez terminada la actividad de remache de bandas, las fibras pueden quedar impregnadas en el traje y con el movimiento al quitárselo, pueden inhalar dichas fibras.

Anexo A: Metodología NIOSH 7400

Anexo B: Protocolo para la toma de muestras de fibras de asbesto y otro tipo de fibras en aire de tipo laboral.

Anexo C: Instructivo para el uso del vaporizador de acetona

Anexo D. Protocolo para la caracterización de fibras de asbesto por microscopía de contraste de fase

Anexo E. Consentimiento informado

Anexo F. Protocolo para la toma de muestras en materiales con asbesto

Anexo G: Aval comité de ética

Anexo H. Registro del cálculo sobre el recuento de fibras en aire en ambientes laborales

Bibliografía

1. Virta RL. Asbestos : Geology , Mineralogy , Mining , and Uses by Open-File Report 02-149. U S Dep Inter - U S Geol Surv [Internet]. 2002;1–28. Available from: <http://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-149/of02-149.pdf>
2. Abú-Shams K, Pascal I. Características, propiedades, patogenia y fuentes de exposición del asbesto. Vol. 28, Anales del Sistema Sanitario de Navarra. 2005. p. 7–11.
3. Luis G, Hernández C, Rubio C, Frías I. Toxicología del asbesto. Cuad Med Forense [Internet]. 2009;15(57):207–13. Available from: <http://ldep.es/ficheros/documentos/Toxicologia del asbesto. G. Luis1 AO 2009.pdf>
4. OMS. Eliminación de las enfermedades relacionadas con el asbesto [Internet]. 15 de febrero. 2018 [cited 2020 Apr 27]. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/asbestos-elimination-of-asbestos-related-diseases>
5. CDC-NIOSH. Asbestos and other fibers by PCM : Method 7400 , Issue 2 , dated 15 August 1994(NMAM), Fourth Edition Página 2 de 18 NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition. 1994. p. 1–18.
6. Martín-Olmedo P, Carroquino Saltó M, Ordóñez Iriarte J, Moya J. La evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos. Sociedad E. Madrid: Sociedad Española de Sanidad Ambiental; 2016. 250 p.
7. US Environmental Protection Agency. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. US Environ Prot Agency [Internet]. 2011;EPA/600/R-(September):1–1466. Available from: c:%5CDocuments and Settings%5Cturner_j%5CDesktop%5CJT_Biblioscape_8_111003%5CJT_Bib8_111003%5Cattachments%5Cefh-complete.pdf
8. Burdett G, Cottrell S, Taylor C. Airborne fibre and asbestos concentrations in system built schools. J Phys Conf Ser. 2009;151.
9. Clerc F, Blaison CE-, Guimon M. Asbestos exposure measurement investigation using analytical transmission electron microscopy (ATEM) Summary of results and recommendations. Paris; 2011.
10. Eypert-Blaison C, Romero-Hariot A, Clerc F, Vincent R. Assessment of occupational exposure to asbestos fibers: Contribution of analytical transmission electron microscopy analysis and comparison with phase-contrast microscopy. J Occup Environ Hyg [Internet]. 2018 [cited 2020 Oct 18];15(3):263–74. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15459624.2017.1412583>
11. Marioryad H, Kakooei H, Shahtaheri SJ, Yunesian M, Azam K. Assessment of airborne asbestos exposure at an asbestos cement sheet and pipe factory in Iran. Regul Toxicol Pharmacol [Internet]. 2011;60(2):200–5. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.yrtph.2011.03.005>
12. Rood AP, Streeter RR. Size distributions of occupational airborne asbestos textile fibres as determined by transmission electron microscopy. Ann Occup Hyg [Internet]. 1984 Jan 1 [cited 2020 Oct 18];28(3):333–9. Available from:

- <https://academic.oup.com/annweh/article/28/3/333/138983>
13. Gómez Cruz K. Caracterización mineralógica de asbestos (DRX; SEM) en materiales industriales y en la zona contaminada de San Pedro Barrientos (Estado de México) [Internet]. Universidad Nacional Autónoma de México; 2015. Available from: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/8926>
 14. Moja MK and S. A geochemical study of settleable dust samples collected near some old and abandoned asbestos mine dumps in Limpopo province, South Africa. *Earth Sci Clim Chang*. 2016;2016(6):89074.
 15. Cely-García MF, Torres-Duque CA, Durán M, Parada P, Sarmiento OL, Breyse PN, et al. Personal exposure to asbestos and respiratory health of heavy vehicle brake mechanics. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2015;25(1):26–36.
 16. Cely-García MF, Sánchez M, Breyse PN, Ramos-Bonilla JP. Personal exposures to asbestos fibers during brake maintenance of passenger vehicles. *Ann Occup Hyg*. 2012;56(9):985–99.
 17. Salazar N, Cely-García MF, Breyse PN, Ramos-Bonilla JP. Asbestos exposure among transmission mechanics in automotive repair shops. *Ann Occup Hyg*. 2015;59(3):292–306.
 18. Marín MCS. Análisis teórico de la exposición a asbestos como resultado de la manipulación de frenos en talleres de mecánica de la localidad de Suba. 2013;1–19. Available from: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16221/u686279.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 19. Frank AL, Villamizar G, Pereira JGB. Radiographic changes in colombian asbestos factory workers. *Ann Glob Heal*. 2020;86(1):1–3.
 20. Militello GM, Bloise A, Gaggero L, Lanzafame G, Punturo R. Multi-analytical approach for asbestos minerals and their non-asbestiform analogues: Inferences from host rock textural constraints. *Fibers*. 2019;7(5):1–16.
 21. Mejía MM, Rendón I. Prevalencia de patologías relacionadas con el asbesto crisotilo en trabajadores de una empresa de productos de crisotilo-cemento. *Rev Colomb Neumol*. 2016;28(2):10.
 22. Agudelo SPE, Herrera S de la C, Correa NG, Ramírez MCG, Montoya JM, Zapata SR, et al. Asbestosis: epidemiología, prevención y tratamiento. *Rev CES Salud Pública* [Internet]. 2012;3(2):251–8. Available from: http://revistas.ces.edu.co/index.php/ces_salud_publica/article/view/2152
 23. Ossa Giraldo AC, Gómez Gallego DM, Espinal Correa CE. Asbesto en Colombia: Un enemigo silencioso. *Iatreia*. 2014.
 24. Greenpeace. El asbesto sigue enfermando a Colombia: Datos y cifras [Internet]. Bogotá; 2017 [cited 2020 Nov 6]. Available from: http://greenpeace.co/pdf/asbesto/informe_datos Asbesto nov 2017.pdf
 25. Marinaccio A, Mirabelli D, Papa L. La prevención de las patologías del asbesto: perspectivas operativas de la cooperación italiana con los países de América Latina. 2010;12(4):682–92.

26. Bustillo J. Comunicado de Asoneumocito sobre el asbesto en Colombia. *Rev Colomb Neumol*. 2015;27(4):315–6.
27. Ministerio de la Protección Social. Plan Nacional de Salud Ocupacional 2008 -2012 [Internet]. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D.C; 2013. 76 p. Available from: [https://www.minsalud.gov.co/Documentos y Publicaciones/Plan nacional de salud ocupacional.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Documentos_y_Publicaciones/Plan_nacional_de_salud_ocupacional.pdf)
28. Ministerio del Trabajo. Plan Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo 2013 - 2021 [Internet]. Organización Iberoamericana de Seguridad Social – OISS-, editor. Bogotá D.C; 2014. 1–64 p. Available from: <http://www.oiss.org/wp-content/uploads/2000/01/PlanNacionalDeSeguridadySaludEnElTrabajo.pdf>
29. Ministerio del Trabajo. Sistema de información sobre la exposición ocupacional a agentes carcinógenos para Colombia. S.A.S ES, editor. ISBN Obra Independiente: 978-958-8963-05-1; 2016. 1–96 p.
30. Dogan M, Dogan AU. Asbestos mineralogy and health effects. In: *Malignant Mesothelioma: Advances in Pathogenesis, Diagnosis, and Translational Therapies* [Internet]. Springer. New York: Springer, New York, NY; 2005. p. 209–24. Available from: https://doi.org/10.1007/0-387-28274-2_13
31. Organización Mundial de la Salud (OMS). Asbesto Crisotilo. *Organ Mund la Salud*. 2015;(1):43.
32. OIT. Posición de la OIT respecto a la seguridad en la utilización del asbesto [Internet]. *Salud en el trabajo*. 2016 [cited 2020 Nov 7]. p. 1. Available from: https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/areasofwork/occupational-health/WCMS_360578/lang--es/index.htm
33. Kazan L. Asbestos en Colombia [Internet]. International Ban Asbestos Secretariat. 2016 [cited 2020 Apr 27]. Available from: <http://www.ibasecretariat.org/lka-asbestos-en-colombia-esp.php>
34. Ramos-Bonilla JP, Cely-García MF, Giraldo M, Comba P, Terracini B, Pasetto R, et al. An asbestos contaminated town in the vicinity of an asbestos-cement facility: The case study of Sibaté, Colombia. *Environ Res*. 2019 Sep 1;176:108464.
35. Noticias Caracol. Sibaté: el drama de una comunidad que ha vivido bajo el peligro del asbesto | Noticias Caracol [Internet]. 31-01-2017. 2017 [cited 2020 May 13]. p. 1. Available from: <https://noticias.caracol.com/colombia/sibate-el-drama-de-una-comunidad-que-ha-vivido-bajo-el-peligro-del-asbesto-0>
36. Ortiz HT. Campamento, el pueblo que se niega a renunciar al asbesto. *Prohibición del asbesto* [Internet]. 2019 [cited 2020 Nov 7];1. Available from: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/campamento-el-pueblo-que-se-niega-a-renunciar-al-asbesto-341080>
37. El espectador. ¿En dónde está el asbesto en Colombia? *El Espectador* [Internet]. 2019 [cited 2021 Jan 28];(hasta 2021):4–7. Available from: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/en-donde-esta-el-asbesto-en-colombia/>
38. Instituto Nacional de Cancerología. Boletín especial de Asbesto [Internet]. INC. Cortes MIC, Mendoza GMH, editors. Bogota; 2019. Available from: [https://www.cancer.gov.co/files/libros/archivos/Boletín Asbesto 2019.pdf](https://www.cancer.gov.co/files/libros/archivos/Boletín%20Asbesto%202019.pdf)

39. International Ban Asbest Secretariat. Asbesto Issues in Colombia [Internet]. 2013 [cited 2021 Jan 28]. p. 1. Available from: <http://www.ibasecretariat.org/anon-asbestos-issues-in-colombia.php>
40. Ministerio del Trabajo de Colombia, Ministro de Salud y Protección Social El Decreto 676, Enfermedad Laboral. Minist del Trab Colomb. 2020;8.
41. Ministerio de la Protección Social. Reglamento de Higiene y Seguridad del Crisotilo y otras Fibras de uso similar [Internet]. 2011. Available from: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-007-2011.pdf>
42. OIT. Convenio C162 - Convenio sobre el asbesto, 1986 (núm. 162) [Internet]. Vol. 1986. 1989 [cited 2018 Jun 14]. p. 1–7. Available from: http://www.ilo.org/dyn/normlex/es/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P1210_0_INSTRUMENT_ID:312307
43. Congreso de la República. Ley No. 1968 “Por el cual se prohíbe el uso del asbesto en el territorio nacional y se establecen garantías de protección a la salud de los colombianos.” 2019 p. 1–19.
44. Odgerel CO, Takahashi K, Sorahan T, Driscoll T, Fitzmaurice C, Yoko-O M, et al. Estimation of the global burden of mesothelioma deaths from incomplete national mortality data. *Occup Environ Med*. 2017;74(12):851–8.
45. Furuya S, Chimed-Ochir O, Takahashi K, David A, Takala J. Global asbestos disaster. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 May 16;15(5).
46. Ministerio del Trabajo. Decreto 1072 de 2015 “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo” [Internet]. 2016 Bogotá D.C; 2015 p. 1–351. Available from: <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/0/DUR+Sector+Trabajo+Actualizado+a+15+de+abril++de+2016.pdf/a32b1dcf-7a4e-8a37-ac16-c121928719c8>
47. Ministerio de Trabajo. Decreto 1477 de 2014 “Por la cual se expide la Tabla de enfermedades laborales” [Internet]. Ministerio de Trabajo. 2014 [cited 2020 Oct 19]. p. 1–109. Available from: http://www.fondoriesgoslaborales.gov.co/documents/Normatividad/Decretos/Dcto_1477_2014.pdf
48. Pantoja Peña PM. Análisis de la exposición a asbestos por parte de mecánicos automotrices del sector de Prado Veraniego en la ciudad de Bogotá. 2013; Available from: https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/201013615_fecha_2013_11_27_hora_18_57_03_parte_1.pdf
49. US Department of Health and Human Services. Toxicological profile for asbestos [Internet]. Division o. ATSDR, editor. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, Georgia; 2001. 327pp p. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp61.pdf>
50. Churg AM, Warnock ML. Asbestos and other ferruginous bodies. Their formation and clinical significance. *Am J Pathol*. 1981;102(3):447–56.
51. Pollastri S. Crystal chemistry and physical-chemical characterization of

- mineral fibres aimed at understanding their toxicity potential. 2015;69–76.
52. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Asbestos and other natural mineral fibers [Internet]. Environmental Health Criteria 53. 1986 [cited 2020 Oct 19]. p. 1–176. Available from: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc53.htm#SubSectionNumber:2.1.1>
 53. Stephen A. Nelson. Phyllosilicates [Internet]. Tulane University. 2015 [cited 2020 Oct 19]. p. 1–7. Available from: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/phyllosilicates.htm>
 54. Instituto del crisotilo. Reseña respecto a la diferencia entre el crisotilo y los asbestos anfíboles [Internet]. 2009 [cited 2020 Apr 28]. Available from: https://chrysotileassociation.com/data/encart_es.pdf
 55. Pacella A. Crystal-chemistry and reactivity of fibrous amphiboles of environmental and health interest Tesi di Dottorato in Cotutela Thèse de Doctorat en Cotutelle Crystal-chemistry and reactivity of fibrous amphiboles of environmental and health interest Cristallocc. 2013;
 56. Nickel-Strunz Silicates Classification. Inosilicato - Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. [cited 2020 Nov 8]. p. 1. Available from: <https://es.wikipedia.org/wiki/Inosilicato>
 57. Lauwerys R. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles: Arsenic. [Internet]. Masson EM, editor. Paris; 2005 [cited 2021 Feb 23]. 902–922 p. Available from: http://www.inrs.fr/hm/arsenic_urinaire.html
 58. Guyton & Hall. Ventilación pulmonar. In: Tratado de Fisiología Médica [Internet]. [cited 2018 Nov 19]. p. 471, 472, 478. Available from: <http://ual.dyndns.org/biblioteca/fisiologia/Pdf/Unidad07.pdf>
 59. Kurunthachalam SK. Asbestos and Its Toxicological Concern. J Waste Water Treat Anal. 2013;04(03):4–6.
 60. Bernstein D, Hesterberg T, Donaldson K, Oberdörster G. A Review of fiber Biopersistence as a potential mechanism of asbestos tumorigenicity. 2011.
 61. Craighead JE, Mossman BT, Bradley BJ. Comparative studies on the cytotoxicity of amphibole and serpentine asbestos. Environ Health Perspect. 1980;VOL.34(February):37–46.
 62. U.S. Department of Health and Human Services. Report on carcinogens, twelfth edition. Natl Toxicol Progr. 2011;53.
 63. Ishida T, Fujihara N, Nishimura T, Funabashi H, Hirota R, Ikeda T, et al. Live-cell imaging of macrophage phagocytosis of asbestos fibers under fluorescence microscopy. Genes Environ. 2019;41(1):1–3.
 64. Accinelli RA, López LM. Asbesto: la epidemia silenciosa Asbestos: a silent epidemics. 2016;33(2):138–41.
 65. Oberdorster G, Ferin J, Lehnert BE. Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. Environ Health Perspect. 1994;102(SUPPL. 5):173–9.
 66. Roggli V, Gibbs AR, Attanoos R, Churg A, Popper H, Corrin B, et al. Pathology of asbestosis: An update of the diagnostic criteria response to a critique. Arch Pathol Lab Med. 2016;140(9):950–2.

67. Gopar Nieto R, Cabello A, Aguilar Madrid G, Juárez Pérez A, Haro García L, Carmina JR. Actualización sobre la epidemiología, fisiopatología, diagnóstico y tratamiento del mesotelioma maligno pleural. *Rev Mex del Inst Mex del Seguro Soc* [Internet]. 2017;54(2016):1–11. Available from: <http://www.medigraphic.com/pdfs/imss/im-2016/im166l.pdf>
68. INC. Asbesto (aminato) [Internet]. La nutrición en el tratamiento del cáncer (PDQ®)–Versión para pacientes. 2016 [cited 2020 Apr 28]. p. 1. Available from: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/asbesto>
69. Puche PP. Amianto o asbesto: una ruina basada en las evidencias. 2015;1–9.
70. Centers for Disease Control and Prevention. CDC - Guía de bolsillo de NIOSH sobre riesgos químicos, Apéndice C - Otros límites de exposición [Internet]. 2017 [cited 2020 Nov 8]. p. 1. Available from: <https://www.cdc.gov/spanish/niosh/npg-sp/apendicec-sp.html>
71. Minisiterio de Salud y Protección Social. Observatorio Nacional de Cáncer. Minsalud. ONC Colombia. Bogotá; 2018. 1–59 p.
72. Ministerio del Trabajo, Instituto Nacional de Cancerología. Sistema de Vigilancia Epidemiológica del Cáncer Ocupacional en Colombia - SIVECAO Por la prevención del cáncer ocupacional en Colombia [Internet]. Bogotá; 2016. 116 p. Available from: <http://fondoriesgoslaborales.gov.co/documents/publicaciones/guias/SIVECAO.pdf>
73. Paper T. Asbestos Analytical Equipment: Calibration Requirements. 2018;(January).
74. Organización Mundial de la Salud. Determinación de concentración de fibras suspendidas en el aire [Internet]. OMS, editor. Ginebra; 1997. 1–68 p. Available from: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41982/9243544969_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
75. Isidro ontés I, Abu Shams K, Alday E, Carretero Sastre JL, Ferrer Sancho J, Freixa Blanxart A, et al. Normativa sobre el asbesto y sus enfermedades pleuropulmonares. *Arch Bronconeumol* [Internet]. 2005;41(3):153–68. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300289605706062>
76. B. Murphy D, Oldfield R, Schwartz S, W. Davidson M. Introduction to Phase Contrast Microscopy | MicroscopyU [Internet]. MicroscopyU. 2017 [cited 2020 Dec 6]. Available from: <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>
77. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Determinación de fibras de amianto y otras fibras en aire. Método del filtro de membrana / Microscopía óptica de contraste de fases. (Método multifibra) [Internet]. España; 2005 [cited 2017 May 4]. p. 26. Available from: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/M>

- etodosAnalisis/Ficheros/MA/MA_051_A04.pdf
78. Saito G. Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic® [Internet]. CONACYT. 2020 [cited 2020 Nov 20]. Available from: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>
 79. Clavijo J. Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*. 2013;3(3).
 80. Perez P. Utilización de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y de Transmisión (TEM) para el Análisis de las Pastas Estudiadas. 2011;1–19. Available from: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6489/15Brv15de20.pdf?sequence=15&isAllowed=y>
 81. Pardell X. El microscopio electrónico de barrido SEM - Apuntes de Electromedicina Xavier Pardell [Internet]. El microscopio electrónico de barrido SEM. 2018 [cited 2021 Jan 31]. p. 1. Available from: <https://www.pardell.es/el-microscopio-electronico-de-barrido-sem.html>
 82. Universidad de Alicante. SEM: Microscopía electrónica de barrido [Internet]. Alicante; 2012 [cited 2020 Apr 30]. p. 1–11. Available from: <https://sstti.ua.es/va/instrumentacio-cientifica/unitat-de-microscopia/microscopia-electronica-d-escombratge.html>
 83. Ipohorski M, Bozzano PB. Microscopía electrónica de barrido. *Cienc Invest* [Internet]. 2013 [cited 2020 Nov 21];63(3):43–53. Available from: <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
 84. Kang KW, Echarri JM, Llorente CL. Servicio de microscopía electrónica de barrido y microanálisis del limf – facultad de ingeniería – unlp. *Segundas Jornadas Investig y Transf*. 2013;35(3):660–5.
 85. Construpedia. Controles y Mediciones en Concentraciones de Amianto | Construpedia, enciclopedia construcción [Internet]. [cited 2020 Apr 30]. Available from: https://www.construmatica.com/construpedia/Controles_y_Mediciones_en_Concentraciones_de_Amianto
 86. Pang TWS, Robinson AE. A technique to prepare asbestos air samples for light and electron microscopy. *Br J Ind Med*. 1981;38(4):389–93.
 87. Stefano L De, Luca F De, Produzione E, Spa R. SEM Quantitative Determination of Asbestos in Bulk Materials. 2002;13–5. Available from: https://microscopy-analysis.com/sites/default/files/magazine_pdfs/mag_170_2002_May_DeStefano_1.pdf
 88. Bobby G, Connor P. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) - Chemistry LibreTexts [Internet]. [cited 2020 Nov 20]. Available from: [https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_\(EDS\)](https://chem.libretexts.org/Courses/Franklin_and_Marshall_College/Introduction_to_Materials_Characterization__CHM_412_Collaborative_Text/Spectroscopy/Energy-Dispersive_X-ray_Spectroscopy_(EDS))
 89. Dominique Drouin, Ph.D. BI. Casino [Internet]. 2016 [cited 2020 Sep 14]. Available from: <https://www.gel.usherbrooke.ca/casino/>

90. Demers H, Poirier-Demers N, Couture AR, Joly D, Guilmain M, De Jonge N, et al. Three-dimensional electron microscopy simulation with the CASINO Monte Carlo software. *Scanning*. 2011;33(3):135–46.
91. Isabel Gómez Pinilla, Xabier Arroyo Rey. CAI de Técnicas Geológicas [Internet]. 2013. 2013 [cited 2020 Apr 30]. Available from: <https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx>
92. Linan. Difractómetro de Rayos-X (XRD) [Internet]. Difractómetro de rayos-x (XRD). 2017 [cited 2020 Apr 30]. p. 1. Available from: http://www.linan-ipcicyt.mx/XRD_Bruker_D8_Advance.html
93. Instituto potosino de investigación científica tecnológica división de materiales avanzados. Manual de Operación del difractómetro de rayos X D8 ADVANCE, BRUKER AXS [Internet]. Available from: <http://www.linan-ipcicyt.mx/Manual XRD.pdf>
94. Correa P. Sibaté y el asbesto, las pruebas que faltaban, Sera necesario un plan de manejo de riegos. [Internet]. Bogotá D.C; 2019 [cited 2020 May 13]. Available from: <https://www.elespectador.com/noticias/salud/sibate-y-el-asbesto-las-pruebas-que-faltaban-articulo-863002>
95. Noticias RCN. Asbesto cobró la vida de varios integrantes de una familia en Sibaté, Cundinamarca [Internet]. 2019 [cited 2020 May 13]. Available from: <https://noticias.canalrcn.com/nacional-pais/asbesto-cobro-vida-varios-integrantes-una-familia-sibate-cundinamarca>
96. Riihimáki, Hillkka; Viikari-juntura E. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. *Encicl Salud y Segur en el Trab*. 1998;6:30.20.
97. Risso, Pablo; Díaz, Pablo; Tartalini, Vanina; Avalos, Martina; Bolmaro R. Determinación de asbesto por medio de microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de energía dispersiva de rayos x. *EPA* 1985b;(1):1985–6.