



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**“CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE ASBESTOS
(DRX; SEM) EN MATERIALES INDUSTRIALES
Y EN LA ZONA CONTAMINADA DE
SAN PEDRO BARRIENTOS (ESTADO DE MÉXICO)”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓLOGA

PRESENTA
GÓMEZ CRUZ KARINA

DIRECTOR DE TESIS
DRA. TERESA PI I PUIG



MÉXICO D.F. CD. UNIVERSITARIA, 2015

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas a Dios, único autor de todo lo que tengo, lo que soy y lo que he logrado en esta vida. Gracias por guiar a mi familia y a mí, y por siempre ponernos los medios para salir adelante.

Gracias infinitas a los dos ángeles que se me han dado como padres, a mi mamá Ángela Julieta Cruz Matamoros y a mi papá José Gómez Magallanes, porque gracias a su incansable trabajo, sacrificio y esfuerzo, hemos logrado llegar hasta este punto, gracias por la confianza que han depositado en mí y en mis hermanas, por alentarnos, por ayudarnos, por jamás decir que no y por demostrarnos siempre que cualquier cosa en este mundo se puede lograr con dedicación. Gracias por su cariño y amor incondicional, los respeto, los admiro y sin duda alguna ustedes me inspiran a ser mejor. Los amo.

Gracias infinitas a mis hermanas Gaby, Adry, July, Faby; y a mi hermano José, por todo lo que me han dado y enseñado a lo largo de la vida, gracias por su ejemplo, por su ayuda, por estar siempre cuando los he necesitado y cobijarme, gracias por su cariño, por su amistad; simplemente gracias por ser mis hermanos. Con ustedes he reído, aprendido y crecido; y estoy segura de juntos seguiremos riendo, aprendiendo y creciendo. Los quiero.

Gracias a mis amigos, aunque pocos, pero verdaderos amigos; a Coco, a Rosa, a Lupita, a Isra, a Ale y a Karen, gracias por su amistad, por su ayuda, por su lealtad y por todo lo que me regalaron durante los cinco años que estuvimos juntos; estoy realmente agradecida de que compartiéramos el mismo objetivo y hayan sido ustedes quienes me acompañaran en el camino hacia él. Gracias.

Gracias especiales a la Doctora Teresa Pi Puig, por aceptarme y por buscar un tema que se relacionara con el área ambiental, gracias por brindarme su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo y por el tiempo que me dedicó, a pesar de siempre estar muy ocupada; pero sobre todo gracias por su paciencia y gentileza hacia mí.

Muchas gracias, a mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, porque los colores azul y oro se llevan tatuados en la piel y en el corazón para toda la vida. Por su puesto, gracias a la gloriosa Facultad de Ingeniería porque ahí aprendí mucho de lo que sé, gracias a los profesores por la entrega que pusieron al transmitirme sus conocimientos y por contagiarme de su entusiasmo por la Geología.

Al Doctor Rogelio Pérez Padilla, del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias; gracias por el valioso tiempo que nos dedicó, por atendernos tan amablemente; gracias también por las fuentes bibliográficas que nos proporcionó y por contactarnos con la Dra. Aguilar.

AGRADECIMIENTOS

A la Doctora Guadalupe Aguilar Madrid, del Área de Calificación y Evaluación de Enfermedades de Trabajo del Centro Médico Nacional S. XXI, gracias por su atenta colaboración y entusiasmo en este proyecto, y por su revisión, corrección, comentarios y aportaciones a mi tesis.

A la Doctora Mayahuel Ortega Avilés, del Centro de Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional por tomar fotografías y realizar análisis EDS de mis muestras.

A la Doctora Adela Margarita Reyes Salas, del Instituto de Geología, UNAM; gracias por explicarme el funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido, por tomar fotografías y realizar análisis EDS de algunas de mis muestras; gracias también por sus revisiones, corrección y comentarios a mi tesis.

A la Maestra Sonia Ángeles García, del Instituto de Geología, UNAM; gracias por dedicarme parte de su valioso tiempo y tomar fotografías de algunas de mis muestras, sin tener algún compromiso conmigo.

A Luisa Mainou del Laboratorio de Restauración de Material Orgánico del Instituto Nacional de Antropología e Historia, gracias por tomar fotografías de algunas de mis muestras.

A la Ingeniera María del Consuelo Macías Romo, del Instituto de Geología, UNAM; gracias por explicarme el procedimiento para la elaboración de mis láminas pulidas y por su supervisión y ayuda en la elaboración de las mismas.

Al Doctor Enrique Alejandro González Torres, de la Facultad de Ingeniería, UNAM; gracias por su revisión, corrección y comentarios a mi tesis.

Al Ingeniero Alfredo Victoria Morales, de la Facultad de Ingeniería, UNAM, gracias por su revisión, corrección y comentarios a mi tesis.

A las personas del Pueblo de San Pedro Barrientos, gracias por su amable atención y guía durante mi trabajo de campo.

Gracias a todas aquellas personas que no menciono en nombre pero que de alguna forma participaron en la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico con mucho amor a mi familia y a Dios, quienes siempre han estado a mi lado y me han apoyado.

Dedicada también a los seres humanos que en algún momento de su vida estuvieron conmigo y que de alguna manera contribuyeron a mi formación personal, gracias por haber existido y por formar parte de mi vida.

RESUMEN

En este proyecto de tesis se realizó un estudio y análisis mineralógico de asbestos aplicando dos técnicas de caracterización: Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

En una primera fase del estudio se eligieron 15 muestras de materiales comerciales y de uso cotidiano (tejas, tinacos, asbesto comprimido, tela y cuerda de asbesto, aislante térmico) que en la literatura se reportan fabricados con amianto, con la finalidad de determinar si tales materiales, debido a su contenido de asbesto (siendo éste de naturaleza serpentínica o anfibolítica), representan o no, peligro a la salud de aquellas personas que los fabrican y de quienes los consumen.

Los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de materiales fueron comparados entre sí con el objetivo de demostrar las semejanzas y diferencias en su composición mineralógica y de acuerdo a ello se estableció cuál podría ser más peligroso.

Así mismo, se recabaron 20 muestras de los suelos cercanos a la antigua fábrica: Asbestos de México ubicada en el Pueblo de San Pedro Barrientos, para determinar las variedades y cantidades de amianto presentes. Como la zona de muestreo fue dividida en tres áreas, los resultados fueron comparados entre sí, para delimitar el área que pudiera ser más peligrosa para los habitantes del pueblo.

En una segunda fase del estudio, los resultados mineralógicos, morfológicos y dimensionales de las fibras de asbesto, se cotejaron con los publicados en la literatura médica para definir su peligrosidad y se consultó la legislación mexicana con respecto al uso y exposición al asbesto.

Finalmente, se exponen una serie de conclusiones y recomendaciones que buscan mejorar la reglamentación mexicana con relación al uso del asbesto.

ABSTRACT

ABSTRACT

In this thesis project mineralogical analysis of asbestos were performed using two characterization techniques: X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM).

In the first phase of the study 15 samples of commercial materials and household (tiles, water tanks, compressed asbestos, asbestos cloth and rope, thermal insulation) which are reported in the literature as made with asbestos were chosen, in order to determine if those materials represent a danger over the health (being of serpentine or amphibolite nature) of those who make and consume them due to their asbestos content.

The results obtained for each material analyzed were compared to each other in order to demonstrate the similarities and differences in their mineralogical composition and accordingly to this was established which could represent more danger.

Also, 20 soil samples were taken around the old factory: Asbestos of Mexico located in San Pedro Barrientos town, to determine the varieties and quantities of asbestos in each sample. As the sampling area was divided into three areas, the results were compared with each other to define the area that could be the most dangerous for the villagers.

In a second phase of the study asbestos fibers were compared mineralogically, morphologically and dimensionally with those published in the literature to define hazard and Mexican laws regarding the use and exposure to asbestos were consulted, and contrasted with that from another countries, mainly in Latin America.

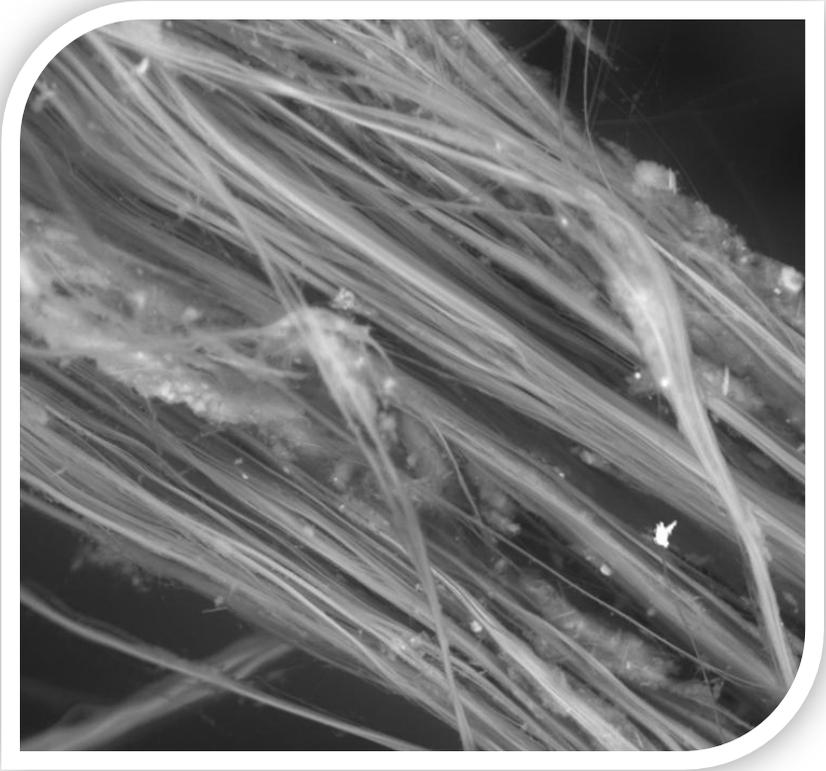
Finally, a serie of conclusions and recommendations are given in order to improve Mexican regulations regarding the use of asbestos.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Justificación.....	15
1.3. Objetivos Generales	15
REFERENCIAS	17
Capítulo 2. GENERALIDADES DEL ASBESTO	24
2.1. Mineralogía y estructura cristalina	24
2.2. Origen y Modos de ocurrencia	28
2.3. Principales yacimientos en el mundo	31
2.4. Yacimientos en México.....	33
2.5. Clasificación industrial de los asbestos	36
2.6. Los peligros del Asbesto	42
2.7. Medidas de prevención y control	45
2.8. Reglamento.....	47
2.9. Contexto mexicano en relación al asbesto.....	49
2.10. San Pedro Barrientos	56
REFERENCIAS	59
Capítulo 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	67
3.1. Introducción.....	67
3.2. Difracción de Rayos X (DRX)	70
3.3. Microscopía	79
REFERENCIAS	85
Capítulo 4. RESULTADOS	94
4.1. Analítica (DRX y MEB) para los materiales industriales	94
4.2. Analítica (DRX; MEB) para las muestras de San Pedro Barrientos, Tlalnepantla de Baz	149
Capítulo 5. DISCUSIÓN.....	175
5.1 Herramientas para la caracterización mineralógica de los asbestos	175
5.2 Resultados mineralógicos.....	176

ÍNDICE GENERAL

5.3 Aspecto médico-salud.....	177
5.4 Revisión de la legislación mexicana en relación al uso de los asbestos	179
REFERENCIAS.....	182
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	185
6.1. CONCLUSIONES	185
6.2. RECOMENDACIONES.....	186
ANEXOS	189
Anexo A. Fichas mineralógicas de los asbestos	189
Anexo B. Otras propiedades de los asbestos	195



CAPÍTULO 1.
INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El asbesto o amianto es un mineral incombustible, altamente resistente al calor, a la electricidad y a la acción de agentes químicos; todas estas propiedades lo han convertido en un gran atractivo comercial, por lo que es utilizado para la elaboración de numerosos productos desde la antigüedad.

En la actualidad los minerales del grupo del asbesto son también, ampliamente conocidos por los efectos nocivos que representan para la salud de la población expuesta ocupacional y no ocupacionalmente a su inhalación (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986).

Por ser el asbesto un conjunto de minerales fibrosos (anfíboles y serpentinas), la forma de caracterizarlos debería ser mediante las herramientas utilizadas convencionalmente por la mineralogía (Difracción de rayos X, microscopía óptica y electrónica), ya que solo con estas técnicas se puede evaluar y cuantificar el tipo de asbesto (crisotilo o anfíboles) que contiene un material industrial y/o una zona contaminada con el mismo.

Este trabajo es una investigación sobre los asbestos en nuestro país y se enmarca en el campo de la mineralogía aplicada a la salud o mineralogía médica, la cual aborda el estudio de los efectos (nocivos o benéficos) de los minerales o sus derivados con interés industrial o comercial en la salud y en el medio ambiente desde que se extraen hasta que se desechan o reciclan.

En este caso estamos abordando un estudio mineralógico enfocado en la caracterización y cuantificación de asbestos en: a) Materiales industriales fabricados con asbesto; b) Suelos del pueblo de San Pedro Barrientos (Estado de México), los cuales fueron contaminados por encontrarse circundantes a una antigua fábrica que utilizaba fibras de estos minerales para la elaboración de diferentes productos como láminas y tinacos.

1.1.1. El asbesto en México

Las industrias de amianto llegaron a México en 1970 a raíz de que Estados Unidos cerró sus plantas debido a las demandas que interpusieron los trabajadores por daños a la salud (Aguilar, *et al.*, 2003).

En México existen pequeños yacimientos de asbesto, sin embargo, ninguno tiene desde el punto de vista económico y de legislación la posibilidad de ser explotable.

INTRODUCCIÓN

Por esta razón, las industrias que fabrican productos con asbesto, se han visto en la necesidad de importar tal materia de países productores como Canadá, Brasil, Zimbawe y Sudáfrica.

Por lo que se refiere al destino de la producción, gran parte de ésta se queda en el mercado mexicano en donde la población se convierte en un destacado comprador, sin embargo, con la prohibición del uso del amianto en varios países de América Latina, México se ha convertido en el principal proveedor de estos países a los que les vendemos los productos con asbesto una vez manufacturados (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986).

1.1.2. El aspecto legislativo

Estudiar la problemática en torno al asbesto conduce a poner de manifiesto un ejemplo de la transferencia del riesgo que sistemáticamente se viene efectuando a los países de economía dependiente por parte de los países económicamente desarrollados (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986).

Al analizar la legislación de los diferentes países sobre el uso del asbesto, se encuentra una disparidad en las leyes y reglamentos por lo que respecta al tipo, amplitud y severidad de las mismas (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986). Ejemplo de ello, es que en algunos países (Chile, Argentina, Uruguay, Honduras) existe la restricción total del uso de asbesto, y en otros solo se prohíben determinados tipos o simplemente no se prohíbe, como es el caso de México, donde hay instituciones como el IMFI (Instituto Mexicano de Fibroindustrias) que promueven el uso “seguro y responsable” de las fibras de crisotilo.

Por lo que respecta a la permisividad legislativa muchos países establecieron como límite máximo permisible en el trabajo entre 1 y 2 fibras por centímetro cúbico (f/cc). En 1984, México estableció un límite de 5 f/cc y; aunque en los últimos años la cifra del máximo permitido por ley ha disminuido considerablemente, no se controla el cumplimiento de esta normativa.

Con respecto al marco legal mexicano, existe la Norma Oficial Mexicana NOM-125-SSA1-1994 (esta norma fue sustituida en el 2014 por la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-2014) que establece unos requisitos sanitarios teóricos para el proceso y uso de asbesto.

1.2. Justificación

En México existen muy pocos estudios sobre la medición y caracterización de los minerales del grupo del asbesto en materiales industriales y suelos contaminados. Por este motivo se ha hecho un primer trabajo de mineralogía aplicada a la salud, tratando de establecer en el Instituto de Geología de la UNAM, una nueva línea de investigación, pues aunque esta rama de la geología sea relativamente reciente, el impacto de los minerales fibrosos en la salud humana ha sido reconocido durante muchos años.

Los avances en las técnicas analíticas, así como la investigación interdisciplinaria que interconecta las ciencias de la tierra y las ciencias médicas, están proporcionando nuevas visiones del papel que juegan los minerales en algunas enfermedades humanas de escala local a global. La visión interdisciplinaria del problema podrá ayudar a futuro a entender, mitigar y posiblemente erradicar problemas de salud relacionados con el asbesto, obligando a las autoridades, con base en evidencias científicas de diferente índole, a prohibir su uso.

1.3. Objetivos Generales

Este trabajo tiene dos objetivos principales que se describen a continuación:

- 1) Caracterizar de manera detallada la naturaleza mineralógica de: a) Materiales industriales fabricados con minerales del grupo del asbesto; b) Suelos contaminados con minerales fibrosos, a través de las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Dentro de esta caracterización es importante identificar la naturaleza mineralógica de los asbestos (DRX), cuantificar en qué proporción se encuentran (DRX), y determinar la textura (tamaño y forma) de las fibras (MEB).
- 2) Contrastar de manera objetiva los resultados mineralógicos obtenidos para los materiales industriales y los suelos contaminados, con los datos médicos de la literatura y los referentes a la legislación y normativa de uso del asbesto para evaluar su peligrosidad y su vinculación con enfermedades de tipo respiratorio. Con este trabajo se busca también apoyar a los médicos que trabajan en diagnosticar las enfermedades ocupacionales ofreciéndoles una herramienta y proponer cambios a la normativa sobre el uso del asbesto en México.

1.3.1. Objetivos específicos

- Aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Geológica, así como desarrollar nuevas habilidades técnicas (DRX; MEB), que me permitan iniciarme en la disciplina de la mineralogía aplicada a la salud y de esta forma colaborar en el desarrollo sostenible del país.
- Caracterizar los distintos tipos de fibras de asbesto que se usan para la fabricación de diferentes materiales industriales como son: láminas, tinacos, cartón de asbesto, asbesto comprimido, tela y cuerda de asbesto, aislantes térmicos; mediante DRX.
- Caracterizar las variedades de asbestos presentes en los suelos contaminados del pueblo de San Pedro Barrientos.
- Determinar morfología y dimensiones (longitud y grosor) de las fibras mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Revisar la realidad mineralógica (tipos de asbesto, proporción de fibras y textura de las fibras) para evaluar la peligrosidad de estos minerales con base en estudios médicos realizados anteriormente a este trabajo.
- Establecer una metodología para posteriores investigaciones.
- Proponer cambios en la normativa mexicana sobre el uso del asbesto en nuestro país.

REFERENCIAS

Aguilar G. M., Juárez C. A. P., Markowitz S., Hernández M. A., Sánchez F. R. R. y Vázquez H. G. (2003). *Globalization and the Transfer of Hazardous Industry: Asbestos in Mexico, 1979-2000*. Volume 9, N° 3.

Gavira L. S. (1986). *El asbesto y la salud en la ciudad de México: Un caso de transferencia del riesgo y del consumo*.



CAPÍTULO 2.
GENERALIDADES
DEL ASBESTO

Capítulo 2. GENERALIDADES DEL ASBESTO**ÍNDICE DE CONTENIDO**

2.1. Mineralogía y estructura cristalina.....	24
2.2. Origen y modos de ocurrencia.....	28
2.3. Principales yacimientos en el mundo.....	31
2.4. Yacimientos de México.....	33
2.5. Clasificación industrial de los asbestos.....	36
2.5.1. Aplicaciones industriales.....	38
2.6. Los peligros del asbesto.....	42
2.7. Medidas de prevención y control.....	45
2.7.1. Equipos de protección personal.....	46
2.8. Reglamento.....	47
2.9. Contexto mexicano en relación al asbesto.....	49
2.9.1. Importaciones y exportaciones de asbesto.....	50
2.9.2. Marco legislativo mexicano en materia del uso del asbesto.....	51
2.9.2.1. Normas Oficiales mexicanas.....	51
2.9.2.1.1. Norma oficial mexicana 125 (NOM-125-SSA1-1994)	52
2.9.2.1.2. Norma oficial mexicana 10 (NOM-010-STPS-2014)..	52
2.9.2.1.3. Norma oficial mexicana 48 (NOM-048-STPS-1993)..	52
2.9.2.1.4. Norma oficial mexicana 17 (NOM-017-STPS-2008)..	54
2.9.2.1.5. Norma oficial mexicana 21 (NOM-021-STPS-1993)..	54
2.9.2.1.6. Norma oficial mexicana 30 (NOM-030-STPS-1993)..	55
2.9.2.1.7. Norma oficial mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993).	55
2.9.2.1.8. Norma oficial mexicana 7 (NOM-007-SCT2-1993)....	55
2.9.2.1.9. Norma oficial mexicana 24 (NOM-024-SSA1-1993)..	55
2.10. San Pedro Barrientos.....	56
2.10.1. Localización del área de estudio.....	56

GENERALIDADES DEL ASBESTO

2.10.2. Asbestos de México S.A. en el pueblo de San Pedro Barrientos.....	56
Referencias.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Minerales del grupo de los silicatos con hábito asbestiforme.....	25
Figura 2.2. Estructura de las hojas de silicato del crisotilo y estructura de dobles cadenas de los silicatos en los anfíboles.....	26
Figura 2.3. Estructura microscópica de las fibras de crisotilo.....	27
Figura 2.4. Estructura microscópica de las fibras de anfíbol.....	28
Figura 2.5. Depósitos de asbesto en el mundo.....	29
Figura 2.6. Mina Lac D'Amiante (Lake Asbestos), Blake Lake.....	31
Figura 2.7. Mapa tectónico simplificado de la ofiolita de las Minas Thetford y sección estratigráfica a lo largo del Macizo de Thetford.....	32
Figura 2.8. Mapa de las provincias geológicas mexicanas donde se han descubierto zonas asbestíferas.....	34
Figura 2.9. Pliegues de tipo chevrón en la serpentina Cañón del Novillo.....	35
Figura 2.10. Diversos productos hechos con asbesto.....	39
Figura 2.11. Esquema sobre el ingreso de las fibras de asbesto hacia los pulmones.....	42
Figura 2.12. Radiografía frontal de un pulmón con asbestosis y radiografía frontal de un pulmón con mesotelioma y placa pleural.....	44
Figura 2.13. Máscaras para la protección contra la inhalación de polvo o fibras....	47
Figura 2.14. Casos de mesotelioma pleural por género. México, 1979-2004.....	50
Figura 2.15. Mapa de las industrias de asbesto en el área metropolitana de la Ciudad de México.....	56
Figura 2.16. Esquema de la localidad San Pedro Barrientos, extensión de la fábrica Asbestos de México S.A., ubicación de las muestras tomadas y división del sitio de muestreo.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación Quebec según lo establecido por la Asociación Minera de Amianto, Quebec.....	37
Tabla 2.2. Utilización de fibras de asbesto por categoría de producto y de proceso	40
Tabla 2.3. Usos del asbesto.....	41
Tabla 2.4. Sustitutos del asbesto.....	46
Tabla 2.5. Regulación Internacional de asbestos.....	48

Capítulo 2. GENERALIDADES DEL ASBESTO

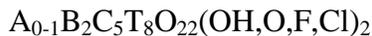
2.1. Mineralogía y estructura cristalina

La palabra asbesto o amianto proviene del latín *asbestos* y significa inextinguible o incombustible (San Juan y Muñoz, 2013), es un término comercial utilizado para designar a los minerales con hábito fibroso que han sido ocupados en la industria (Virta, 2002, 2005, 2006; Regueiro y González, 2008).

En un sentido mineralógico, esta palabra incluye a dos grupos minerales pertenecientes a los silicatos: el grupo de las serpentinas y el grupo de los anfíboles (Virta 2002, 2004; Van Gosen, 2005; Carretero y Pozo, 2007).

Dentro del grupo de las serpentinas se distingue el crisotilo (*Figura 2.1. A*), el cual es conocido también como asbesto blanco, éste es un silicato de magnesio hidratado y su composición química estequiométrica se puede escribir como $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ pero que también puede contener pequeñas cantidades de Fe, Mn, Ni y trazas de Al (Virta 2002, 2004, 2005).

En el grupo de los anfíboles son reconocidas cinco variedades asbestiformes (*Figura 2.1. B, C, D, E y F*): actinolita, antofilita, amosita (grunerita), crocidolita (riebeckita) y tremolita (Virta, 2004) la composición química media de éstos puede representarse como:



Donde: $A = Na^+, K^+$

$B = Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Li^+$

$C = Al, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Mg, Mn, Cr$

$T = Si^{4+}, Al^{3+}$

En esta fórmula A, B, y C corresponden a cada uno de los sitios catiónicos dentro de la estructura cristalina, es decir, A corresponde a las posiciones irregulares y relativamente grandes de cationes con coordinación octaédrica a cubo-octaédrica, B a las posiciones de menor regularidad con coordinación octaédrica o cúbica y finalmente C a las posiciones octaédricas (Virta 2002; Carretero y Pozo, 2007).



Figura 2.1. Minerales del grupo de los silicatos con hábito asbestiforme. Crisotilo en A, Actinolita en B, Antofilita en C, Amosita en D, Crocidolita en E y Tremolita en F (Imágenes tomadas de https://www.flickr.com/photos/asbestos_pix/8468401913/in/photostream/)

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Los bloques básicos de construcción de las fibras de asbesto son los tetraedros de silicio que pueden presentarse en hojas ($\text{Si}_4\text{O}_{10}^{4-}$) (Figura 2.2. A), como en el crisotilo, o en dobles cadenas ($\text{Si}_4\text{O}_{11}^{6-}$) (Figura 2.2. B), como en los anfíboles. Las hojas y las cadenas tienen una carga negativa, así como unidades hidroxilo (OH^-) intercaladas para equilibrar la carga iónica en las estructuras (Virta, 2004).

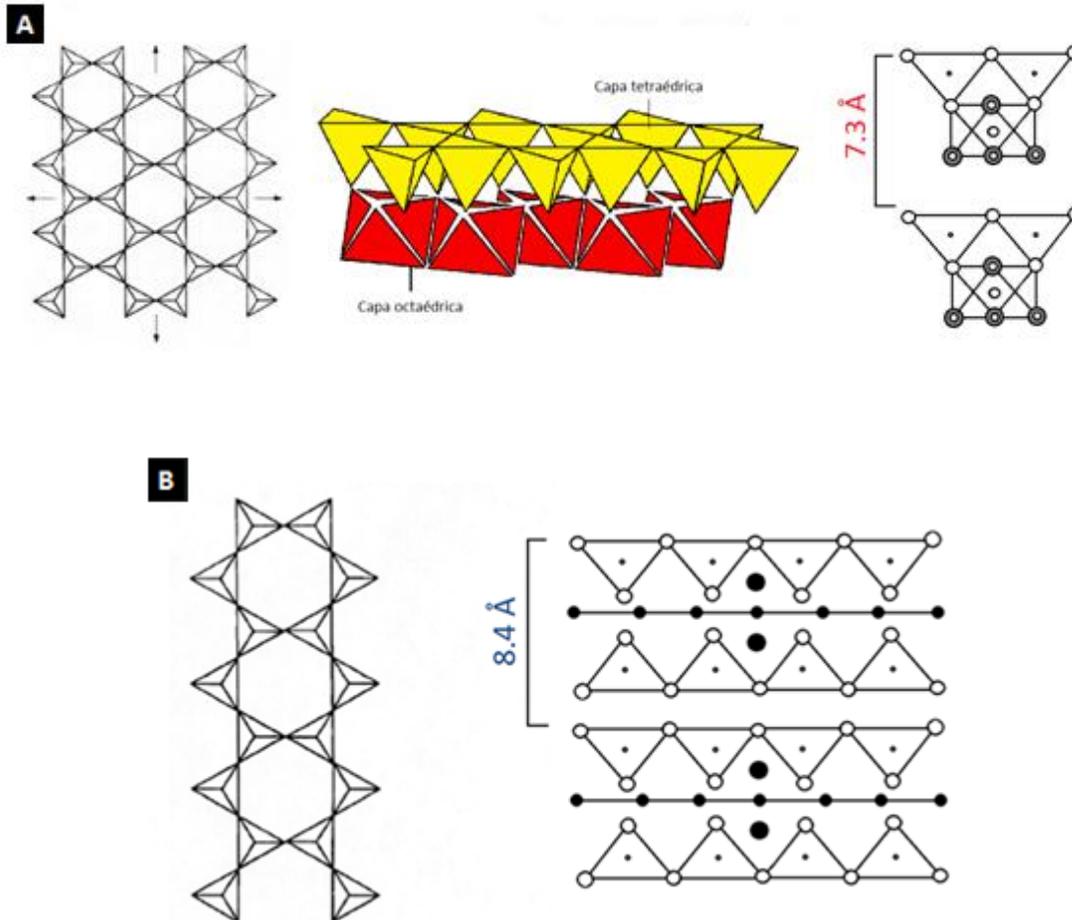


Figura 2.2. Estructura de las hojas de silicato del crisotilo, análoga a la de las micas (A). Estructura de dobles cadenas de los silicatos en los anfíboles (B). (Tomado de Virta 2002)

En el caso del crisotilo, una capa de brucita octaédrica que tiene la fórmula $(\text{Mg}_6\text{O}_4(\text{OH})_8)^{4-}$ se intercala entre cada hoja de tetraedros de sílice (Figura 2.3), compartiendo los átomos de oxígeno que se separan por distancias de 0.305 [nm] en la capa de silicato y 0.342 [nm] en la capa de brucita. Esta falta de coincidencia de las distancias induce una curvatura de las hojas; las hojas concéntricas que forman las fibras tienen un radio de curvatura desde 2,5 hasta 3,0 [nm] para las capas internas y de hasta 25 [nm] para las capas externas, produciendo fibras unidad (fibrillas) con diámetros externos que tienen un rango de entre 20 y 50 [nm] (Virta, 2002).

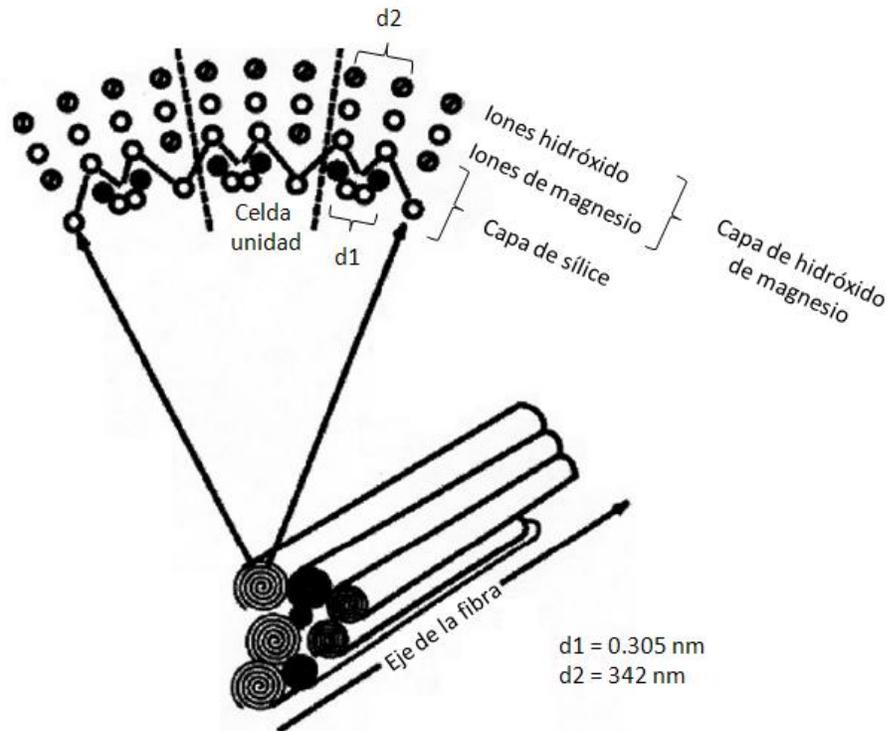


Figura 2.3. Estructura microscópica de las fibras de crisotilo. (Tomado y modificado de Virta 2002)

La estructura cristalina de los anfíboles consiste en dos cadenas de tetraedros de sílice colocados espalda con espalda, las cadenas están basadas en unidades Si_4O_{11} , separadas por una banda de siete cationes con dos grupos hidroxilo unidos al catión central de cada celda unitaria (*Figura 2.4*). Estos son casi siempre llamados I-bares debido a su forma en sección transversal y se apilan para formar la estructura final, con un marcado clivaje desarrollado entre las cadenas. La estructura cristalina atómica de los anfíboles no conduce inherentemente a la formación de fibras, pues la formación de éstas debe resultar de una múltiple nucleación y de condiciones de crecimiento específicas (Virta 2002, 2004), para que los anfíboles formen fibras el crecimiento del cristal debe ser preferencial a la dirección de la longitud de la cadena.

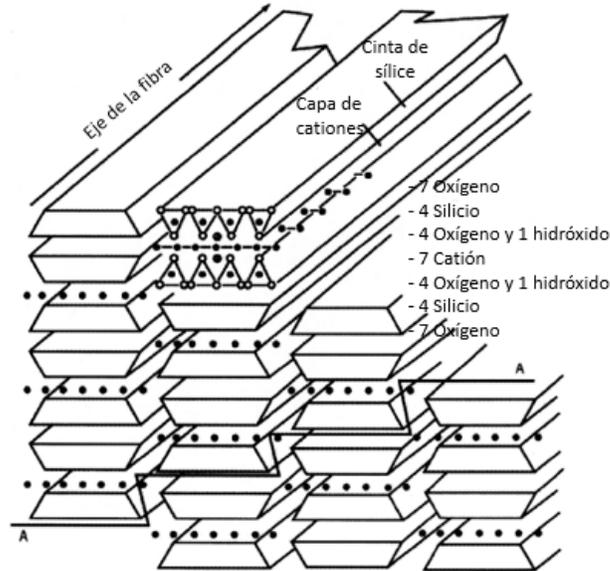


Figura 2.4. Estructura microscópica de las fibras de anfíbol. (Tomado y modificado de Virta 2002)

2.2. Origen y Modos de ocurrencia

Los principales depósitos de asbesto ocurren en las raíces de cadenas montañosas donde se ha producido metamorfismo regional de rocas básicas o ultrabásicas (*Figura 2.5*), ejemplos clásicos de ello son Los Urales, Los Apalaches y Las Montañas Rocallosas (Virta 2004, 2005).

La génesis de las fibras de asbesto como depósitos minerales requieren de ciertas condiciones con respecto a la composición química, nucleación y crecimiento de la fibra; tales condiciones deben prevalecer durante un período de tiempo suficientemente largo y libre de perturbación para permitir un continuo crecimiento de las cadenas de silicato en estructuras fibrosas (Virta, 2002).

La roca huésped en la mayoría de los depósitos de crisotilo es de composición ultrabásica (Virta, 2004), clasificando a éstos como Tipo I y Tipo II. Los depósitos Tipo I ocurren en rocas ultramáficas de tipo alpino, entre ellas ofiolitas y serpentinas, mientras que aquellos que son de Tipo II se pueden encontrar en intrusiones ultramáficas estratiformes. El resto de la producción de crisotilo se deriva de calizas dolomíticas serpentinizadas, también conocidas como depósitos Tipo III (Virta 2004, 2005). La amosita y la crocidolita se encuentran en formaciones sedimentarias ferruginosas metamorizadas, o depósitos tipo IV, que incluyen rocas de hierro bandeado, cuarzitas ferruginosas y argilitas silicificadas ricas en hierro. La tremolita y la antofilita se asocian con rocas ultrabásicas metamorizadas. (Virta, 2004, 2005).

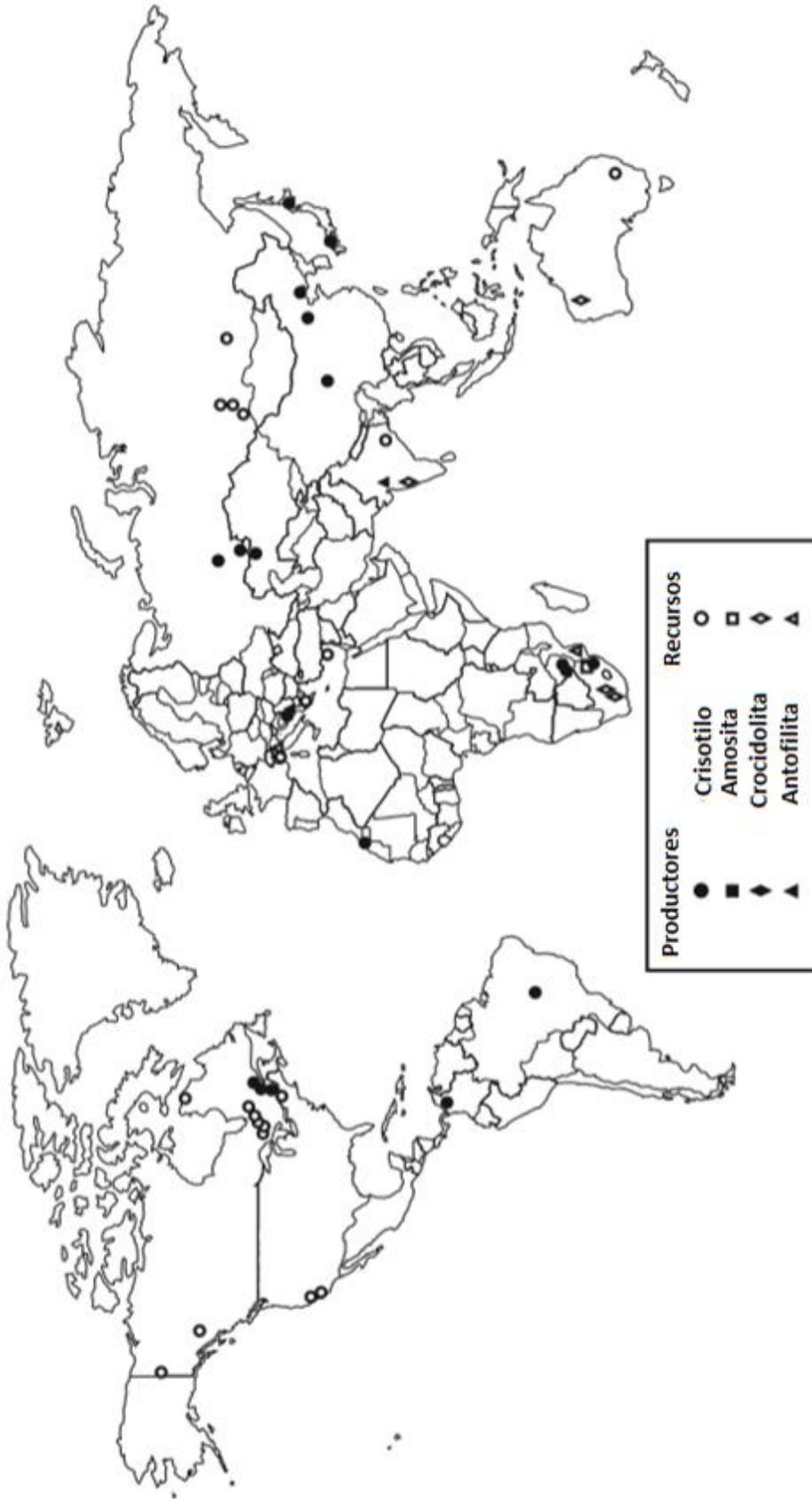


Figura 2.5. Depósitos de asbesto en el mundo. (Tomado y modificado de Virta, 2004)

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Como ya se ha venido puntualizando, las fibras de crisotilo se presentan como venas en serpentinas, en rocas ultramáficas serpentinizadas, y en mármoles dolomíticos serpentinizados.

Se ha sugerido que las rocas ultrabásicas, que contienen olivino, piroxenos ricos en magnesio, y anfíboles, son alterados por procesos hidrotermales para formar minerales de serpentina; posteriormente, en un evento metamórfico, estos minerales de serpentina se disuelven parcialmente y se cristalizan como fibras de crisotilo. La génesis de cada depósito de crisotilo implica características específicas relacionadas con la composición de los minerales precursores, los esfuerzos y las deformaciones en la matriz de la roca huésped, el contenido de agua, los ciclos de temperatura, etc. (Virta, 2002).

El crecimiento de las fibras de crisotilo en ángulo recto con las paredes de las venas, es conocido como *cross-fiber*, y es el tipo más común en los depósitos; cuando la orientación de las fibras sigue el plano de la vena se llama *slip fiber* (Virta, 2004), y cuando están fuertemente inclinadas son referidas como *oblique fiber*.

Las venas pueden ser relativamente cortas y largas, o lenticulares, en forma de stockworks o en sistemas paralelos conocidos como *ribbon fiber*.

En otras condiciones locales, los agregados de fibras cortas se encuentran dispersos y sin orientación preferente (*mass fiber*); en tales casos el contenido de fibra de la roca puede ser muy alto, de hasta 50%, y es llamada *mass-fiber* (Virta, 2002, 2004).

La mayor parte de las fibras de crisotilo se extraen de depósitos donde sus longitudes pueden alcanzar varios centímetros, pero muy a menudo no son mayores a 1 cm, estas fibras son extremadamente delgadas, por ejemplo, la fibra unidad tiene un diámetro medio de 0.025 micrómetros aproximadamente, las fibras macroscópicas de crisotilo son agregados de esas fibras unitarias que por lo general presentan diámetros de 0.1 a 100 micrómetros; sus longitudes van desde una fracción de un milímetro a varios centímetros (Virta, 2002).

El origen geológico de los anfíboles asbestiformes parece ser bastante variado. En el caso del depósito de crocidolita ubicado en Sudáfrica (Transvaal), las fibras se formaron durante reacciones químicas secundarias que tuvieron lugar en las formaciones de rocas de hierro bandeado donde la roca huésped se consolidó de un gel de hidróxido de hierro y sílice coloidal.

La presencia de tensión mecánica es necesaria para la formación de crocidolita, ya que las fibras se forman en lugares donde hay cizallamiento (*slip fiber*) o dilatación de rocas (*cross fiber*). Los depósitos de amosita encontrados en formaciones rocosas

similares son el resultado de un proceso metamórfico de alta temperatura (Virta, 2002).

2.3. Principales yacimientos en el mundo

El yacimiento más importante de crisotilo está en Canadá (*Figura 2.6*), en la provincia de Quebec, cerca de Thetford, en este yacimiento los principales centros productores fueron la Mina Blak Lake (*Figura 2.6*) y Thetford (Regueiro y González, 2008; Virta, 2004, 2006). Tal distrito minero suponía aproximadamente el 50% de la producción mundial hasta el 2011 que fue el año en que Canadá detuvo las actividades mineras. El yacimiento presenta características pertenecientes a los depósitos Tipo I y Tipo II y se encuentra en la zona de los Apalaches (*Figura 2.7*). El crisotilo se encuentra principalmente en peridotitas altamente serpentinizadas (Virta, 2004).

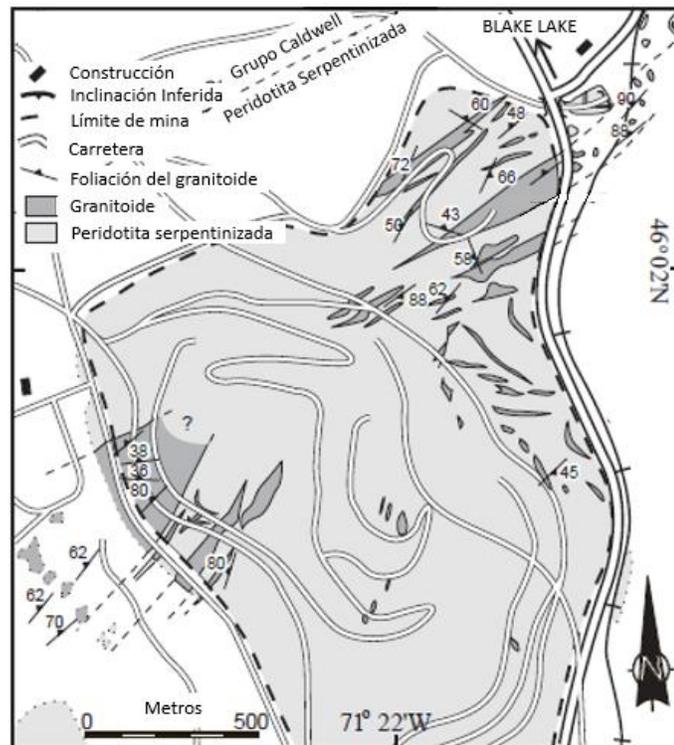


Figure 2.6. Mina Lac D'Amiante (Lake Asbestos), Blake Lake. (Tomado y modificado de Whitehead, et. al., 2000)

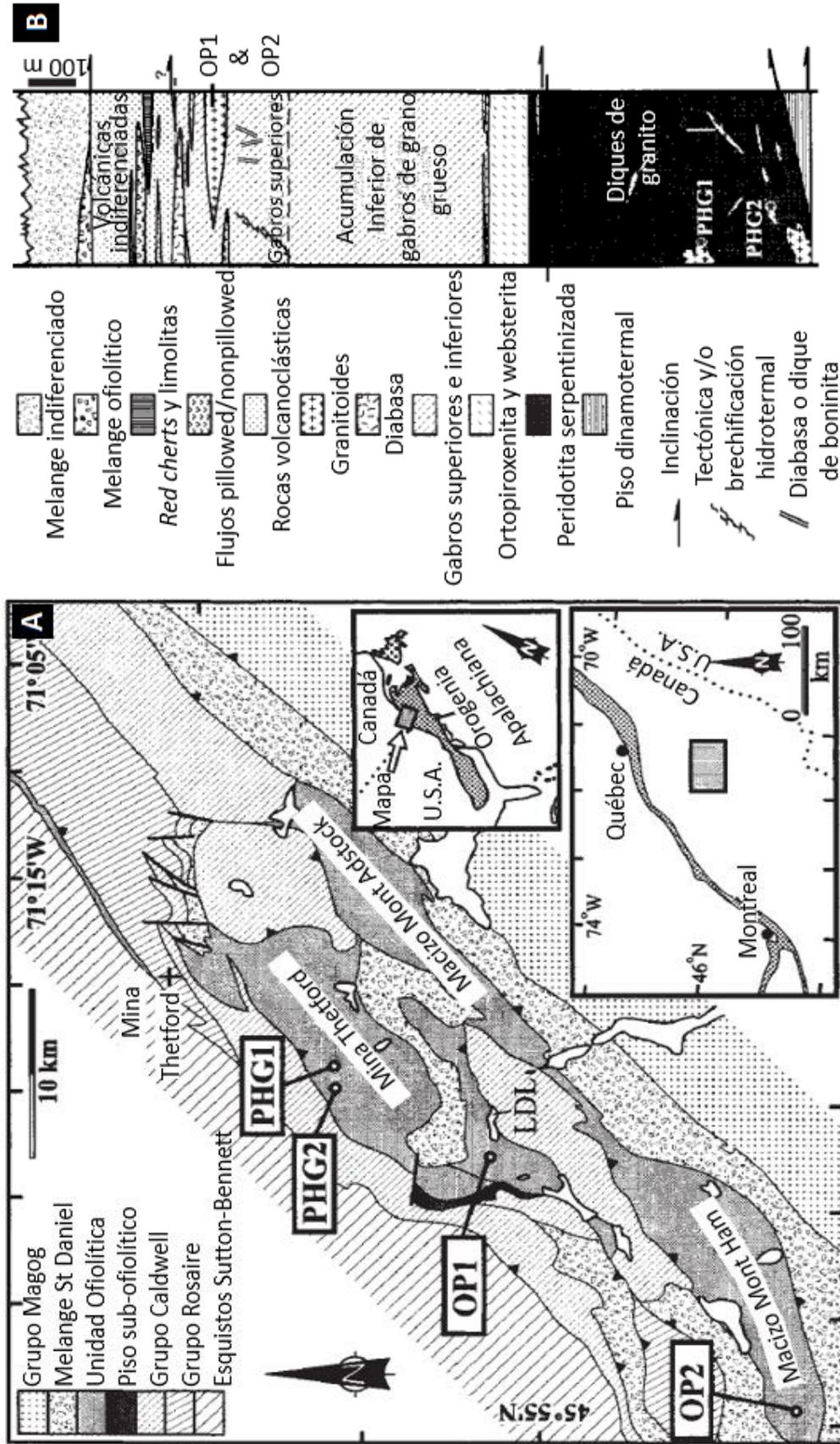


Figura 2.7. Mapa tectónico simplificado de la ofiolita de las Minas Thetford en (A) y, sección estratigráfica a lo largo del Macizo de Thetford en (B). (Tomado y modificado de Whitehead, *et. al.*, 2000)

Por orden de importancia, al yacimiento de Canadá le sigue el de Bazhenov situado en los Urales, el cual se presenta en una extensión peridotítica de forma lenticular, donde las fibras tienen una disposición en *cross fiber* (Regueiro y González, 2008).

Otro depósito principal, es el de Bulawayo, Zimbabwe, el cual se encuentra cerca de la base de un sill ultrabásico lenticular, que está intrusionado por gneises. El sill tiene una composición dunítica en la base, y peridotítica, piroxenítica y gabroica en la cima. El crisotilo está presente como stockwork de venas *cross fiber* (Virta, 2004).

Adicionalmente a los depósitos de rocas ultrabásicas, existen aquellos en calizas dolomíticas serpentinizadas o depósitos Tipo III, los cuales son característicos del Distrito Carolina en el Transvaal, Sudáfrica y en las regiones del Río Salado y Sierra Ancha en Arizona, Estados Unidos; en los depósitos de Arizona el crisotilo se presenta de forma tabular y en vetas delgadas discontinuas, donde la serpentización ocurrió durante la intrusión de sills diabásicos (Virta, 2004).

Además de estos yacimientos, son importantes otros ubicados en Sudáfrica, China, Estados Unidos, Italia y Chipre. Por ejemplo, en Sudáfrica a lo largo del sistema Transvaal, es posible encontrar depósitos Tipo IV, donde la crocidolita y la amosita ocurren en formaciones de rocas de hierro bandeado, cuarzitas ferruginosas o argilitas silicificadas ricas en hierro (Virta, 2004) se presentan en venas con una orientación *cross fiber*, se asocian a éstos estructuras anticlinales y sinclinales.

Por otro lado, los depósitos de antofilita es característico encontrarlos en Finlandia (Paakkila y Maljasalmi) y en Estados Unidos (Yancey County), los primeros son series de lentes de material ultrabásico anfibolitizado y serpentizado, los segundos se asocian con peridotitas y piroxenitas alteradas en forma de *mass fiber*.

Las fibras de tremolita se han encontrado en Italia (en el Distrito Sondrio y Aosta).

Finalmente, otros lugares donde se ha reportado la existencia y producción de anfíboles asbestiformes son: Bulgaria, Rumania, Taiwán, Turquía, Yugoslavia y la India (principalmente actinolita) (Virta, 2004).

2.4. Yacimientos en México

En México los yacimientos de asbesto se han descubierto por lo menos en doce entidades, siendo una de las más importantes la zona asbestífera El Novillo en Tamaulipas, las demás entidades corresponden a las provincias geológicas Cuicateca (ambiente volcanosedimentario de arco submarino), el Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas (ambiente sedimentario marino asociado a orogenia), El Complejo Orogénico Guerrero-Colima (Volcanosedimentario de arco submarino) y el Cinturón

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Orogénico de Cedros-Margarita (volcanosedimentario asociado a subducción) (Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 2008; *Figura 2.8*).

En Tamaulipas como se ha mencionado la región minera para el asbesto (serpentina) es El Cañón del Novillo; donde los principales yacimientos se ubican en los municipios de El Mante, Victoria y Cruillas (SGM, 2011).

Un reconocimiento geológico realizado en El Cañón del Novillo revela que está formado por rocas metamórficas principalmente gneísicas y esquistos. Los gneises tienen una edad precámbrica y los esquistos sugieren una edad paleozoica temprana a tardía (Ortega, 1978).

Se observó que con frecuencia los gneises son cortados por zonas transversales de cataclasis, estas zonas por lo general están acompañadas por diques máficos de textura porfídica. Entre los minerales formados por retrogresión metamórfica se encuentra la serpentina (Ortega, 1978).

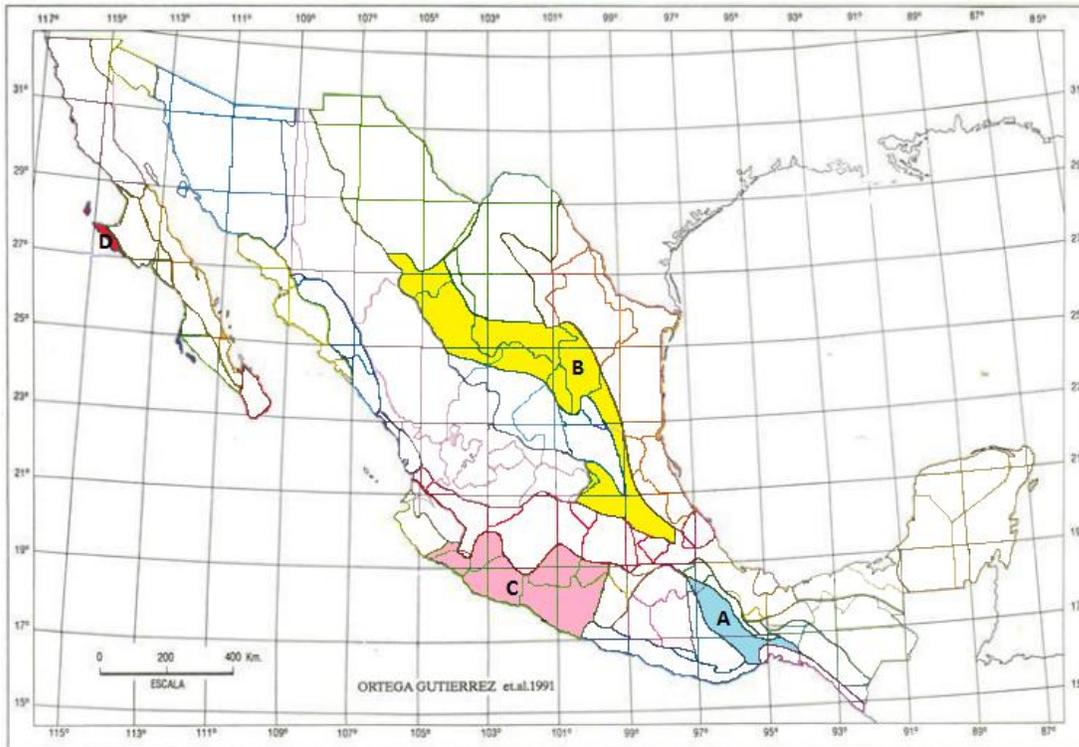


Figura 2.8. Provincias geológicas mexicanas donde se han descubierto zonas asbestíferas: **A.** Cuicateca, **B.** El Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas, **C.** El Complejo Orogénico Guerrero-Colima y en **D.** El Cinturón Orogénico de Cedros-Margarita.

Las serpentinitas forman cuerpos alargados en el sentido de la foliación, algunos muestran en su estructura una serie de pliegues angulares muy cerrados (*Figura 2.9*),

definidos por bandas alternantes de colores verde claro y verde oscuro. Esta estructura puede corresponder al bandeamiento original magmático de una antigua peridotita.

Los estudios bajo el microscopio petrográfico indican que el crisotilo se encuentra como pseudomorfo reemplazando al olivino, dentro de Hazburgitas y Wherlitas. También hay otras variedades de rocas verdes asociadas a las serpentinitas que posiblemente sean metagabros y/o metadiabasas, que en lámina delgada estas rocas consisten además de otros minerales de actinolita. Otra roca asociada es la metacaliza que bajo el microscopio revela pequeñas cantidades de tremolita (Ortega, 1978).



Figura 2.9. Pliegues de tipo chevrón en la serpentinita Cañón del Novillo (Tomado de Ortega, 1978)

El segundo yacimiento más importante de asbestos en México es el ubicado en Oaxaca, que se encuentra en el complejo Ultramáfico-Máfico de Cuicatlán-Concepción Pápalo perteneciente al terreno Cuicateco. Este complejo fue relacionado a lentes ofiolíticos formados en la Cuenca Cuicateca (Ortiz, *et al*, 2006). El terreno Cuicateco incluye corteza oceánica y rocas de arco del Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Delgado-Argote, 1989), que sobreyacen estructuralmente al terreno Maya.

El asbestos en Cuicatlán-Concepción Pápalo es de la variedad crisotilo (Ortiz, *et al*, 2006) y se encuentra alojado en mantos de serpentinita de 100-300 m de espesor, cuyo protolito corresponde a harzburgitas y en menor proporción wherlitas y dunitas (Delgado-Argote, 1989), asociados a esquistos de talco y leucodioritas, concordantes con la foliación del encajonante (Ortiz, *et al*; 2006).

El complejo está incluido en rocas volcanosedimentarias (meta-lavas andesíticas, filonitas, meta-riolitas, meta-areniscas y meta-lodolitas) mesozoicas afectadas por metamorfismo en facies de esquistos verdes (Delgado-Argote, 1989). Los mantos de

GENERALIDADES DEL ASBESTO

serpentinita se asocian a minerales tales como tremolita y garnierita (Ortiz, *et al*; 2006).

Cabe mencionar, que existen otros estados de la República Mexicana donde es posible encontrar variedades asbestiformes de anfíboles, por ejemplo la actinolita se presenta en Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Durango, Hidalgo, San Luis Potosí, Veracruz y Zacatecas. Por su parte, depósitos de antofilita se encuentran en Hidalgo. Y finalmente, la tremolita se encuentra en los estados de Baja California Sur, Chiapas, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, San Luis Potosí, Veracruz y Zacatecas (Panczner, 1987).

2.5. Clasificación industrial de los asbestos

Para la clasificación de los asbestos, se consideran varios parámetros que son utilizados como criterios de evaluación estándar (Virta, 2002). Todos los sistemas de clasificación están basados en la longitud de las fibras, así como en su flexibilidad/fragilidad, ya que estas propiedades determinan su posible uso, y en gran medida, su valor comercial (Kisor, 2009). Otros parámetros que se toman en cuenta son el grado de apertura (tendencia de los asbestos a dividirse en fibras más delgadas) y área superficial (expresa la extensión del cuerpo fibroso, el área superficial de las fibras de asbesto, depende del grado de apertura y usualmente es de 1 a 30 $\left[\frac{m^2}{g}\right]$).

El punto de referencia internacional o método más ampliamente aceptado para la caracterización del crisotilo es la prueba de Quebec Standar (QS). Esta prueba es un método de tamizado en seco que permite el fraccionamiento de una muestra de fibra de asbesto en cuatro fracciones de tamaños decrecientes (Virta, 2002), tal prueba se realiza en la máquina QS, la cual consiste de una pila de tres cajas de tamiz de $\frac{1}{2}$ [pg], cribas de la malla 4 y 10 (colocadas en ese orden de arriba hacia abajo), y una caja inferior que sirve como almacén. Se colocan dieciséis onzas de asbesto en el tamiz superior y la pila de tamices se agita mecánicamente en un agitador rotatorio de 600 revoluciones a una velocidad de 238 [rpm] (Virta y Mann; en Carr, 1994). Esta prueba se ha utilizado como base para el desarrollo de un sistema de calidad que comprende nueve grados principales de fibra (*Tabla 2.1*).

Una segunda técnica industrialmente importante para evaluar la longitud de las fibras es la clasificación Bauer-McNett (BMN). En este método, una suspensión de fibras se hace circular a través de una serie de cuatro rejillas con disminución del tamaño de la abertura (posición vertical), produciendo de esta manera cinco fracciones (malla: 4, 14, 35, 200 y -200) (Virta, 2002). Otros sistemas de clasificación se han ideado para las fibras de crisotilo, pero históricamente el sistema QS se ha utilizado como referencia.

Tabla 2.1. Clasificación Quebec según lo establecido por la Asociación Minera de Amianto, Quebec. (Tomada y modificada de Virta y Mann, 2002)					
Grupo					Longitud [mm]
Grupo N° 1.- Crudo (Venas <i>cross-fiber</i> , teniendo $\geq \frac{3}{4}$ pg)					19.05
Grupo N° 2.- Crudo (Venas <i>cross-fiber</i> , teniendo $\frac{3}{4} \leq \frac{3}{8}$ pg)					9.525-19.05
Fibras recuperadas por malla, oz					
	$\frac{1}{2}$ pg	Malla 4	Malla 10	Almacén	
Grupo N° 3.- Fibras para tejido					6-9.5
3F	10.5	3.9	1.3	0.3	
3K	7	7	1.5	0.5	
3R	4	7	4	1	
3T	2	8	4	2	
3Z	1	9	4	2	
Grupo N° 4.- Fibras para lámina					3-6
4A	0	8	6	2	
4D	0	7	6	3	
4H	0	5	8	3	
4H	0	5	7	4	
4K	0	4	9	3	
4M	0	4	8	4	
4R	0	3	9	4	
4T	0	2	10	4	
4Z	0	1.5	9.5	5	
Grupo N° 5.- Fibras para papel					3-6
5D	0	0.5	10.5	5	
5K	0	0	12	4	
5M	0	0	11	5	
5R	0	0	10	6	
5Z	0	0	8.6	7.4	
Grupo N° 6.- Desperdicio o revoque					3
6D	0	0	7	9	
6F	0	0	6	10	
Grupo N° 7.- Cortos					3
7D	0	0	5	11	
7F	0	0	4	12	
7H	0	0	3	13	
7K	0	0	2	14	
7M	0	0	1	15	
7R	0	0	0	16	

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Tabla 2.1. (Cont.) Clasificación Quebec según lo establecido por la Asociación Minera de Amianto, Quebec. (Tomada y modificada de Virta y Mann, 2002)				
Grupo				Longitud [mm]
Fibras recuperadas por malla, oz				
	½ pg	Malla 4	Malla 10	Almacén
Grupo N° 7.- Cortos				3
7T	0	0	16	
7RF y 7TF	0	0	16	
7W	0	0	16	
Grupo N° 8 y 9.- Arena. Rellenos que requieren elevada densidad, enrejada, grava para techados.				-
8S	0	0	16	
	Mínimo 50 lb por pie ³			
8T	0	0	16	
	Mínimo 75 lb por pie ³			
8T	0	0	16	
	Mínimo 75 lb por pie ³			

Debido a que las especificaciones de longitud de las fibras de asbesto para uso industrial son en milímetros, no se puede establecer una relación entre el tamaño de estas fibras y el tamaño de las fibras que se han clasificado como potencialmente peligrosas para el sistema respiratorio humano (fibras que tienen una longitud igual o mayor a 5µm, un diámetro menor a 3µm y una relación entre longitud y diámetro igual o superior a 3:1).

2.5.1. Aplicaciones industriales

Las fibras de asbesto se han utilizado en una amplia variedad de aplicaciones industriales. En la época de gran consumo en los países industrializados, se han enumerado unas 3.000 aplicaciones. Es importante mencionar que el crisotilo es el que ha tenido mayor dominio en la industria en los últimos años, seguido por la crocidolita y la amosita; mientras que la antofilita, la actinolita y la tremolita, esencialmente no tienen aplicación industrial (Virta, 2002).

Las principales propiedades de estos grupos minerales que pueden ser aprovechadas en la industria son su capacidad de aislamiento térmico, eléctrico y de sonido; no inflamabilidad; refuerzo de matriz; capacidad de adsorción y su inercia química. Estas propiedades han conducido a diversas clases de productos (*Figura 2.10*), por ejemplo: papeles y fieltros para pisos, material para techados, tuberías, aislamiento eléctrico, textiles de asbesto (hilo, tela, cintas y cuerdas), también se encuentra una

amplia aplicación en productos térmicos y de aislamiento, productos de fricción en frenos o almohadillas de embrague (Virta, 2005).

Las propiedades de refuerzo de las fibras de asbesto han sido explotadas en productos de fibrocemento sobre todo por las industrias de la construcción y del agua.



Figura 2.10. Diversos productos hechos con asbesto. Tubería forrada en papel de asbesto (A). Productos de fricción: pasta de frenos (B). Guantes ignífugos (C). Tejas (D).

Otras aplicaciones implican el refuerzo de productos plásticos hechos de PVC, compuestos fenólicos, de polipropileno, de nylon, etc. El refuerzo de resinas termoestables y termoplásticas se ha utilizado para el desarrollo de productos de la industria automotriz, electrónica y de imprenta. La incorporación de fibras de asbesto (principalmente crisotilo) en matrices de caucho produce materiales que se utilizan para la fabricación de envases y juntas; otras formulaciones complejas del mismo, tienen utilidad como materiales de fricción para revestimientos de frenos y pastillas, también se han empleado como agentes de refuerzo en recubrimientos, selladores, adhesivos y formulaciones (Virta, 2002, 2004).

Finalmente, el efecto de refuerzo combinado con la alta capacidad de absorción de las fibras fue explotado para aumentar la estabilidad dimensional en vinilo, tejas y carreteras de asfalto.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

En la *Tabla 2.2* se resumen algunas de sus aplicaciones en combinación con otros materiales, la misma muestra que en los últimos años tales aplicaciones implican la unión de asbesto dentro de una matriz orgánica o inorgánica y que los productos de asbesto-cemento representan la mayor parte del uso de este mineral en el mundo.

Tabla 2.2. Utilización de fibras de asbesto por categoría de producto y de proceso (Tomada y modificada de Virta, 2002)		
Asbesto unido con otros materiales (más del 98% del uso total)		
Unido con materiales inorgánicos	De cemento Portland, silicatos de calcio hidratado, carbonatos de magnesio	Productos de fibrocemento, placas aislantes
Unido con materiales orgánicos	Aceites, alquitranes, elastómeros, plásticos, resinas	Aceites, alquitranes, elastómeros, plásticos, productos de resinas para techos, calafateo, embalaje, juntas, baldosas, como refuerzo en láminas de plástico, materiales de fricción (guarniciones para frenos, embragues), termoplásticos, termoestables
Asbesto utilizado como mezclas de fibras sueltas (menos de 0,1% del uso total)		
Mezclas con materiales inorgánicos	Cemento, yeso, silicatos de calcio hidratado, carbonatos de magnesio	Productos de calor, electricidad y de aislamiento de sonido
Asbesto como fibra textil (menos de 1% del uso total)		
Cintas y mechas		
Hilo	Tejidos	Telas, correas, tubos, juntas

Por lo general cada grupo de productos requiere una selección de las fibras, en la *Tabla 2.3* se muestran algunas aplicaciones en relación con sus grados, de acuerdo al método Quebec Standard (QS).

Tabla 2.3. Usos del asbesto (Tomada y modificada de Virta, 2002)	
Grado	Usos
<p>Fibra larga: <i>Crudo N° 1</i> (se refiere a las fibras obtenidas en la mina sin haber sido sometidas a algún proceso de molienda) <i>Crudo N° 2</i> <i>Crudo N° 3</i></p>	<p>Textiles</p> <p>Textiles, aislantes</p> <p>Textiles, envases, forros para frenos, forros de embrague</p>
<p>Fibra mediana: <i>N° 4</i></p> <p><i>N° 5</i></p> <p><i>N° 6</i></p>	<p>Tuberías de asbesto-cemento, forros para frenos, plásticos</p> <p>Tubos y láminas de asbesto-cemento, productos moldeados y de papel, forros de frenos y juntas</p> <p>Productos de asbesto-cemento, forros de frenos y juntas, yeso, productos para reforzar hojas de vinilo</p>
<p>Fibra corta: <i>N° 7</i></p> <p><i>N° 8</i></p>	<p>Moldes para forros de frenos y de embrague, plásticos, como refuerzo en vinilo, pavimentos y tejas de asfalto, compuestos de asfalto, aislamiento térmico, compuestos para calafatear, juntas, pinturas y aditivos en lodos de perforación</p> <p>Similar al N° 7</p>

2.6. Los peligros del Asbesto

La relación entre la exposición laboral a las fibras de asbesto en el aire y algunas enfermedades respiratorias es uno de los temas más estudiados y controversiales de la epidemiología moderna (Virta, 2004).

Es ampliamente conocido que las fibras debido a su ligereza, se quedan en suspensión en el aire durante largo tiempo, y al ser inhaladas se alojan en los pulmones (*Figura 2.11*), lo cual puede ser potencialmente peligroso, ya que no son fáciles de expulsar, por lo que pueden permanecer alojadas en los pulmones para siempre (Regueiro y González, 2008).

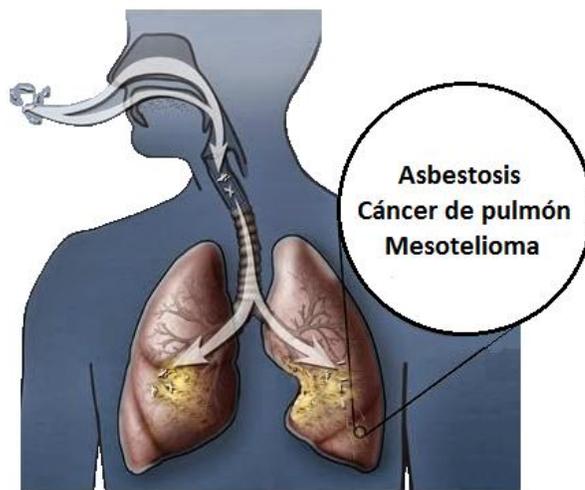


Figura 2.11. Esquema sobre el ingreso de las fibras de asbesto hacia los pulmones y su permanencia en ellos.

Otros factores críticos además de la ligereza, son el tamaño, el periodo de exposición, la concentración, la solubilidad y la presencia de hierro en las fibras. Por ejemplo, cuando éstas son cortas penetran más profundamente en los pulmones, sin embargo cuando son largas son más difíciles de expulsar (Virta, 2004). En cuanto a la solubilidad, el crisotilo es más soluble que los anfíboles asbestiformes y se elimina más rápidamente, reduciendo su tiempo de residencia en el pulmón. Aunado a lo anterior la investigación sugiere que la presencia de hierro en estos minerales cataliza la formación de radicales libres que pueden intervenir en el desarrollo celular y en la citotoxicidad del mismo (Virta, 2004). El tiempo de exposición al asbesto es importante porque los períodos largos aumentan la carga pulmonar, contrarrestando los efectos de solubilidad de las fibras y como causa de ello inducir o producir diversas enfermedades respiratorias entre las que destacan la asbestosis, el mesotelioma y el cáncer de pulmón (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986).

La asbestosis es una neumoconiosis colagénica (*Figura 2.12. A*) producida por la inhalación (boca y nariz) constante de polvo o fibras de asbesto, las cuales circulan por los conductos aéreos hasta los pulmones, depositándose principalmente en la pleura (pleura visceral y pleura parietal) y en la zona del parénquima. Una vez que las fibras llegan a contactar la pared de las vías respiratorias no pueden volver a la corriente de aire expirado, quedando incrustadas en las paredes celulares. Tal enfermedad produce una irritación de los tejidos que disminuye la habilidad de los pulmones para absorber oxígeno. El cuerpo intenta disolver dichas fibras produciendo un ácido, debido a la resistencia química de éstas, dicho ácido no las disuelve, pero irrita el tejido circundante y produce cicatrices; eventualmente tal irritación y cicatrización pueden ser tan graves que los pulmones dejan de funcionar. Los primeros síntomas aparecen generalmente a partir de los 5-10 años desde la primera exposición, sin embargo dependiendo de la intensidad y duración de la exposición, el periodo de latencia puede ser mayor (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986; San Juan y Muñoz, 2013).

El mesotelioma es una neoplasia (tumor maligno) del mesotelio (*Figura 2.12.B*), membrana de origen embrionario que recubre varias cavidades corporales: la pleura (cavidad torácica), el peritoneo (cavidad abdominal incluyendo el mesenterio) y el pericardio epitelio (recubrimiento del corazón). El tejido mesotelial también recubre los órganos reproductivos masculinos y femeninos internos (San Juan y Muñoz, 2013). Este tipo de cáncer es peculiar ya que su única causa conocida es la exposición a ambientes con asbestos, se estima que es responsable entre un 85 y 90% de las ocasiones. Los síntomas aparecen habitualmente tras un periodo de latencia que oscila entre 15 y 40 años. La enfermedad conduce inevitablemente a la muerte (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986; Regueiro y González, 2008). Se tiende a señalar en la historiografía médica, que el mesotelioma está más ligado a la inhalación de asbesto tipo crocidolita. La exposición a concentraciones mínimas, las cuales pueden encontrarse aún en ambientes no puramente laborales, ha sido capaz de conducir a mesotelioma. Se reconocen dos tipos de mesotelioma:

1. Mesotelioma pleural: Es un tumor primitivo que nace en la pleura. Crece engrosando la serosa del pulmón, la que se endurece comprimiendo simultáneamente el órgano. Puede invadir la pleura contralateral y consigue a veces destruir las costillas. El mesotelioma da metástasis en ganglios regionales, costillas, pulmón, contralateral, riñones, suprarrenales y cerebro.
2. Mesotelioma peritoneal: Muchos de los órganos en el abdomen están envueltos en una membrana fina de células mesoteliales que se conocen como peritoneo. El mesotelioma peritoneal es un tumor de esta membrana. Su única causa conocida es el contacto previo con el asbesto.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Las causas del cómo y el por qué las fibras de asbesto hacen que las células del mesotelio se tornen anormales y cancerosas no están definidas, teniendo diversas respuestas de la ciencia médica: se ha diagnosticado que hay efectos de irritación e inflamación de las células mesoteliales; que se altera la función de las estructuras celulares que son esenciales para la división celular normal; que se provoca la producción de radicales, moléculas que dañan al ADN, y convierte a las células en cancerosas; o bien, se producen oncoproteínas, que hacen que las células mesoteliales ignoren las restricciones normales de división celular, y esto puede contribuir al desarrollo de cáncer (San Juan y Muñoz, 2013).

El cáncer de pulmón tiene una asociación etiológica con la exposición al asbesto por tres razones fundamentales: En primer lugar, éste se presenta entre el 12 y el 20% de las autopsias de trabajadores que manipulan asbesto. En segundo lugar, se presenta en un grupo de edad más joven que en la población general (menores de 35 años). Por último, la localización más frecuente del cáncer de pulmón en la población no expuesta al asbesto es en los campos pulmonares medios y superiores, mientras que en los trabajadores expuestos al asbesto se localiza comúnmente en las bases pulmonares. El periodo de latencia entre exposición y aparición de los primeros signos o síntomas clínicos es también largo, generalmente de 15 a 30 años (Gavira, Marín y Urriaga, 1986; Regueiro y González, 2008).

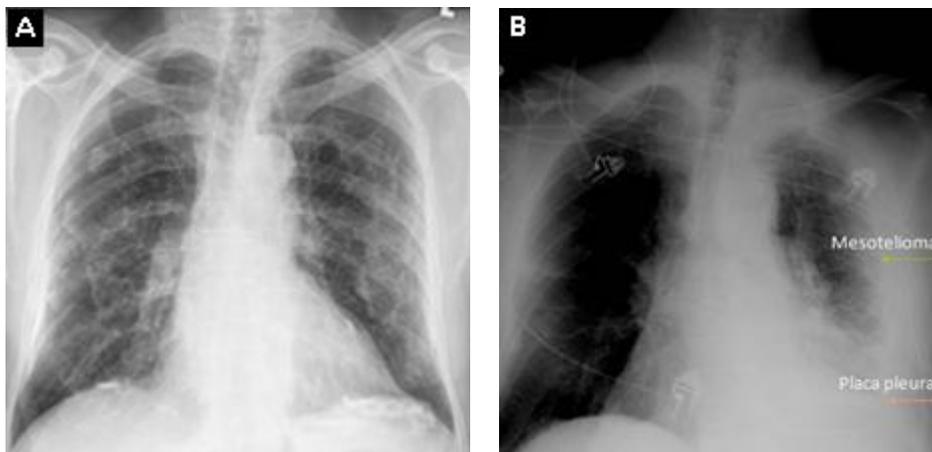


Figura 2.12. Radiografía frontal de un pulmón con asbestosis, se observa la aparición de estructuras similares a un panal de abejas y fibrosis pleural asociada (A). Radiografía frontal de un pulmón con mesotelioma y placa pleural (B). (Tomado de Isaza 2012)

Ante el problema ambiental que genera la inhalación de asbesto, se ha propuesto la sustitución de este mineral, por otros materiales fibrosos (*Ver Tabla 2.4*), sin embargo los datos epidemiológicos sobre la mayoría de los sustitutos es insuficiente para establecer correlaciones estadísticamente significativas entre la exposición y las

enfermedades pulmonares, en consecuencia, la toxicidad de las fibras sustitutas sigue siendo un tema de investigación activo (Virta, 2002).

2.7. Medidas de prevención y control

Las preocupaciones de salud relacionadas con el asbesto se plantearon por primera vez en 1900 en el Reino Unido. Sin embargo, fue hasta la década de 1960 cuando los investigadores establecieron una correlación positiva entre la exposición de los trabajadores a las fibras de asbesto y cáncer en el aparato respiratorio (Virta, 2002, 2004).

Este hallazgo provocó un gran esfuerzo dentro de la comunidad científica para desentrañar cuestiones importantes como la influencia del tamaño de la fibra, la forma, la estructura cristalina y la composición química; así como la relación y consecuencias entre los niveles de exposición y las enfermedades en diferentes tipos de industrias y el desarrollo de tecnologías para reducir la exposición de los trabajadores (Virta, 2004).

En función del tipo de mineral, su utilización y el grado de peligrosidad, las medidas de prevención consisten en:

- Evitar la producción de polvo en actividades mineras o industriales.
- Sustituir los minerales patógenos por otros materiales no perjudiciales.
- Dotar a los trabajadores de equipos de protección.
- Imponer una concentración máxima de partículas respirables por metro cúbico de aire.

La sustitución de los minerales más utilizados con potencial peligroso por análogos sintéticos es una medida de prevención para evitar el desarrollo de enfermedades por inhalación de polvo mineral. Así, el asbesto se está sustituyendo por fibra de vidrio o fibras refractarias de aluminosilicatos (en la *Tabla 2.4* se muestran otros ejemplos de sustitutos). Sin embargo, es importante realizar con ellos ensayos de patogenicidad porque, en algunos casos, los materiales empleados para sustituir al asbesto pueden ser igual o más peligrosos para la salud humana (Carretero y Pozo, 2007).

Otras medidas de prevención para evitar el polvo en las actividades mineras e industriales son:

- Diseño óptimo de todas las etapas de operación, para evitar la producción de polvo mineral.
- Riego de las pistas por las que se realiza el transporte.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

- Instalación de sistemas de extracción de aire del interior de las galerías y naves industriales.
- Instalación de sistemas colectores de polvo.
- Instalación de sistemas supresores de polvo mediante vía húmeda.

Tabla 2.4. Sustitutos del asbesto (Tomada y modificada de Virta, 2005)

Morfología acicular a fibrosa	Morfología no fibrosa
Fibra aramida	Biotita
Fibra de carbón	Carbonato de calcio
Fibra de celulosa	Silicato de calcio
Fibra de vidrio	Diatomita
<i>Mineral wool</i>	Polipropileno fibrilado
Fibras de nylon	Grafito
Paligorskita	Moscovita
Fibra de poliacrilonitrilo	Perlita
Fibra de polibencimidazol	Serpentina
Fibra de polietileno	Sílice
Fibra de polipropileno	Talco
Fibra de politetrafluoroetileno	Vermiculita
Fibra de alcohol polivinílico	
Fibra de titanato de potasio	
Sepiolita	
Wollastonita	
<i>Wool</i>	

Los sustitutos del asbesto marcados en color azul son de origen mineral

2.7.1. Equipos de protección personal

Cuando las concentraciones de polvo superan el valor límite de exposición permisible, los trabajadores deben usar siempre el equipo adecuado de protección respiratoria (Instituto del Asbesto (IA), Instituto del Crisotilo, Instituto Mexicano de Fibro Industrias (IMFI) y Quebec Asbestos Mining Association (QAMA), 2011). Los equipos de seguridad de los trabajadores consisten esencialmente en máscaras de protección contra la inhalación de polvo (*Figura 2.13.*), adicionalmente se ha propuesto la ubicación del trabajador en un recinto cerrado que lo aisle de éste. Para medir la exposición de los trabajadores al polvo en el aire existen unos ciclones personales que muestrean y seleccionan el tamaño de las partículas que pueden llegar a los pulmones.



Figura 2.13. Máscaras para la protección contra la inhalación de polvo o fibras. (Tomado de Isaza, 2012).

También es conveniente usar ropa de protección especial, para evitar la contaminación de ropa de trabajo. La ropa de protección debe ser desechable y constar de una sola pieza (overol), además debe ser retirada inmediatamente después de su uso y desecharse en un contenedor especial (AI, Instituto del Crisotilo, IMFI y QAMA, 2011).

2.8. Reglamento

La identificación de los riesgos para la salud asociados a largo plazo, la exposición a altos niveles de fibras de asbesto, junto con el hecho de que grandes cantidades de estos minerales se utilizaron en una amplia variedad de aplicaciones, impulsó la promulgación de regulaciones para limitar la exposición máxima de fibras en el aire en los ambientes de trabajo.

Los límites de exposición pueden ser definidos como valores medios o máximos, medidos ya sea como un peso o como un número de fibras por unidad de volumen. En general, los límites de exposición varían considerablemente de un país a otro (*Tabla 2.5.*), presentando un rango que va desde 0,2 fibras por centímetro cúbico para una exposición de 4 a 8 horas hasta 2 f/cm³ (Carretero y Pozo, 2007; Virta, 2002).

De acuerdo con las diferencias demostradas entre los distintos tipos de fibras de asbesto, las regulaciones laborales en muchos países especifican diferentes límites de exposición para el crisotilo y los anfíboles. Por lo general, los límites de exposición para los anfíboles van de la mitad a una décima parte que para el crisotilo (Virta, 2002).

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Tabla 2.5. Regulación Internacional de Asbestos (Tomada y modificada de IA, Instituto del Crisotilo, IMFI y QAMA, 2011)				
País	Asbestos en el trabajo			Polvo de asbestos en emisiones atmosféricas
	Crisotilo f/cc	Crocidolita f/cc	Amosita f/cc	
Argentina	2	0.2	0.5	NA; UR
Bulgaria	1	0.1	0.1	
Brasil	2	NA	NA	NA (minas P.E.L. 0.7 f/cc)
Canadá-Quebec	1	0.2	0.2	2 f/cc, minas y molidos
Colombia	1	NA	NA	
U.A.E.	2	0.2	NA	Crocidolita: 0.2 f/cc Crisotilo: 0.5 f/cc
Ecuador	1	NA	NA	NA
Unión europea	0.1	0.1	0.1	0.1 mg/m ³ ; UR
Hungría	2	2	2	
India	2	2	2	4 f/cc o 0.2 mg/m ³
Indonesia	1	1	1	NA
Corea	1	NA	NA	Enero 1, 2007
México	1	0.2	0.5	NA, UR
Moroco	0.6	0.3	NA	NA
Nueva Zelanda	1	0.1	0.1	NA
Nigeria	1	NA	NA	
Pakistán	2	NA	NA	
Portugal	0.1	0.1	0.1	0.1 mg/m ³ ; E.U.
Rumania	2	2	2	
Rusia	0.6	NA	NA	
Senegal	0.5	NA	NA	NA
Sudáfrica	0.2	1	1	NA
España	0.1	0.1	0.1	0.1 mg/m ³
Sri Lanka	0.5 mg/m ³	NA	NA	Emisiones no visibles
Suecia	2	NA	NA	0.05 f/cc
Taiwán	1	NA	NA	
Tailandia	5	NA	NA	UR
Turquía	2	0.2	0.5	0.1 mg/m ³
Estados unidos	0.1	0.1	0.1	Emisiones no visibles
Vietnam	1	NA	NA	
Zimbabue	1	NA	NA	

N/A No aplica; UR Bajo revisión

Los valores de esta tabla corresponden al año 2011, sin embargo, en México el valor límite cambió en el 2014 a 0.1 f/cc para todos los tipos de asbestos, se desconoce si en los países restantes los valores presentados en la tabla han cambiado o siguen vigentes.

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) definió como fibras de asbesto aquellas que tienen una longitud igual o mayor a $5\mu\text{m}$, un diámetro menor a $3\mu\text{m}$ y una relación entre longitud y diámetro igual o superior a 3:1 (Virta, 2002; Van Gosen et al., 2005). Las fibras que cumplen con tales características son consideradas las más peligrosas para el sistema respiratorio humano (Virta, 2002; Van Gosen et al., 2005).

2.9. Contexto mexicano en relación al asbesto

A pesar de todo lo que se sabe sobre los efectos peligrosos para la salud y los efectos adversos del amianto, la producción mundial anual se mantiene en más de 2 millones de toneladas. Rusia es ahora el principal productor de asbesto en todo el mundo, seguido por China, Kazajstán, Brasil, Canadá, Zimbabue y Colombia. Estos seis países representaron el 96% de la producción mundial de asbesto en 2007. Rusia tiene suficientes minas ricas en este mineral y la mayor parte de las 925.000 toneladas extraídas anualmente son exportadas (LaDou, et al, 2010). Todas las formas de amianto están prohibidas en 52 países, incluyendo aquellos que son miembros de la Unión Europea. Sin embargo, un gran número de naciones ubicadas en Asia, Europa del Este, América Latina y África, siguen utilizando, importando y exportando asbesto y productos que lo contienen (LaDou, et al, 2010).

Más del 85% de la producción mundial de amianto se utiliza en la actualidad para la fabricación de productos en los países en desarrollo, donde a menudo existe poca o ninguna protección de los trabajadores y de las comunidades. China es, con mucho, el mayor consumidor de asbesto actualmente, seguido por Rusia, India, Kazajstán, Brasil, Indonesia, Tailandia, Vietnam y Ucrania (LaDou, et al, 2010).

Aunque México no aparezca en las listas de mayores consumidores de asbesto en el mundo, es uno de los principales en América Latina.

En México las muertes debido al mesotelioma pleural han incrementado significativamente en el periodo de 1979 a 2000 (*Figura 2.14*).

Durante este periodo, hubo 793 muertes por mesotelioma pleural maligno. Ninguna de las cuales fue reconocida como enfermedad ocupacional, de acuerdo a los registros del Seguro Social, 491 fueron hombres y 302 fueron mujeres.

Los análisis de las defunciones por edad muestran que 252 de los casos se produjeron entre los 40 y 59 años. Casi el 90% de las personas que murieron a causa de esta enfermedad no tuvo más que la educación primaria (Aguilar, et al, 2003). Un tercio de las muertes por mesotelioma pleural (256) se registraron en la zona metropolitana del Valle de México; lo cual coincide con la ubicación geográfica de mayor concentración de industrias de asbesto en el país (Aguilar, et al, 2003).

GENERALIDADES DEL ASBESTO

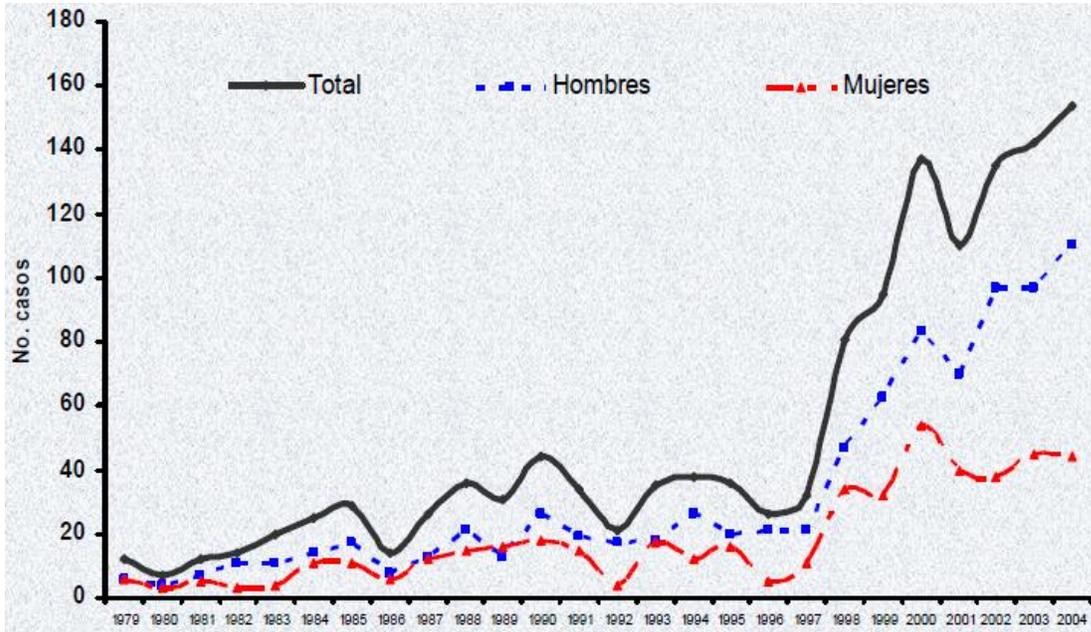


Figura 2.14. Casos de Mesotelioma pleural por género. México, 1979-2004 (Tomado de Aguilar, *et al.*, 2003)

Aunque la importancia del amianto ha declinado, el número de productos mexicanos que contienen el mineral se ha triplicado, la exportación de estos productos a América Central creció rápidamente en los pasados 10 años.

Hasta el momento en América Latina sólo cuatro países han prohibido el uso de este mineral, entre los que figuran Chile, Argentina, Uruguay y Honduras (San Juan y Muñoz, 2013).

A diferencia de estos países, México, sigue la política de Canadá sobre el uso responsable y seguro del crisotilo, sin embargo, aunque hay avances en el desarrollo de las tecnologías limpias, las empresas transnacionales suelen transferir tecnologías más viejas y obsoletas, y por lo tanto menos protectoras (Aguilar, 2003). Lo que sugiere que el país sólo ahora está empezando a experimentar las enfermedades relacionadas con el asbesto, y dado el largo período de latencia para el desarrollo de las mismas, es probable que la incidencia de éstas aumente en las próximas décadas.

2.9.1. Importaciones y exportaciones de asbesto

México ha importado asbesto desde 1932, para el 2001, había 1881 empresas en el país importadoras de las diferentes formas de asbesto. Canadá duplicó sus ventas en toneladas de amianto y aumentó su participación en las importaciones mexicanas del

mineral de 30% a 68% entre 1992 y 2000; por su parte, Brasil triplicó sus ventas de asbesto en México durante el mismo período (Aguilar, et al., 2003).

En general, las importaciones de asbesto en México disminuyeron de 35.3 toneladas a 26.1 toneladas entre 1992 y 2000. El costo de un kilogramo de este mineral cayó de 0.51 dólares a 0.46 dólares en el mismo lapso. Durante los noventa, 96% de los productos de amianto fabricados en México fueron exportados a los Estados Unidos, sin embargo, para el 2000, este porcentaje se redujo a 58% (Aguilar, et al., 2003).

De acuerdo con los registros de 1994 a 2003, las exportaciones de asbesto de Canadá a México representaron \$ 114 713 210 millones de USD (Aguilar, 2010).

Para el 2008, las ventas canadienses de crisotilo en México valían \$ 3.6 millones (CAN) y representaron el 3.5% de las exportaciones anuales de asbesto (Kazan, 2012).

Según datos procedentes del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la Base de Datos Estadísticos de Comercio de las Naciones Unidas, en 1999, el 13 por ciento de las importaciones mexicanas de crisotilo provinieron de Brasil; para el año 2009, esta cifra aumentó a 66 por ciento (Kazan, 2012).

2.9.2. Marco legislativo mexicano en materia del uso del asbesto

2.9.2.1. Normas Oficiales Mexicanas

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) en una conferencia convocada el 4 de junio de 1986, en Ginebra, elaboró el convenio 162 con respecto al uso del asbesto en condiciones de seguridad (San Juan y Muñoz, 2013). Esta normativa internacional, recomienda medios de prevención para la exposición al polvo de asbesto, incluyendo métodos de empaquetado, rotulación, transporte, almacenaje e información sobre el manejo de residuos de asbestos o borra. En el campo laboral, menciona disposiciones sobre la supervisión y control de la salud de los trabajadores, también menciona la necesidad de promover instrucción y capacitación a los trabajadores, sobre los riesgos del asbesto y cómo prevenirlos. El documento concluye dando recomendaciones en el uso de asbesto en trabajos de construcción, demolición (remoción) y remodelación (San Juan y Muñoz, 2013).

Aunque México no ha ratificado este convenio, la Secretaria de Salud, en colaboración con la Secretaria del Trabajo y Prevención Social, el Gobierno del Distrito Federal, el Instituto Mexicano de Fibro-Industrias, el Grupo Técnico de Aspectos Legales del Registro Internacional de Sustancias Potencialmente Tóxicas y las empresas Eureka y Mexalit Industrial, trabajaron en la elaboración de la NOM-125-SSA1-1994, que establece los requisitos sanitarios para el proceso y uso

GENERALIDADES DEL ASBESTO

“seguro” del asbesto (Anglés, 2012). Esta norma toma como referencia otras normas oficiales mexicanas, las cuales se irán desglosando a lo largo del texto.

2.9.2.1.1. Norma Oficial Mexicana 125 (NOM-125-SSA1-1994)

En esta norma se establecen las medidas para prevenir los daños a la salud de la población laboralmente expuesta a las fibras de asbesto, así como las medidas que deben tomarse para proteger la salud de la población circunvecina a los establecimientos que procesan tales fibras. Para lograr lo anterior se debe notificar a la Dirección General de Salud Ambiental y/o a las Delegaciones de Regulación Sanitaria de los Servicios de Salud Estatales de la Secretaría de Salud las operaciones en donde las fibras de asbesto son procesadas y en general en todos aquellos procesos en donde se utilicen o manipulen fibras de asbesto, el titular de la empresa debe dar información sobre los riesgos de exposición al asbesto a los establecimientos subcontratados y a sus trabajadores; así mismo deberá vigilar que éstos se ajusten a las normas oficiales mexicanas correspondientes y tomen las medidas preventivas necesarias.

2.9.2.1.2. Norma Oficial Mexicana 10 (NOM-010-STPS-2014).

El objetivo de esta norma oficial es establecer los procesos y medidas para prevenir riesgos a la salud del personal ocupacionalmente expuesto a agentes químicos contaminantes del ambiente laboral.

Esta norma clasifica al asbesto (todas sus formas, incluyendo al crisotilo) como un contaminante potencialmente cancerígeno. Y marca como valor límite de exposición en la atmosfera laboral la cantidad de 0.1 fibras/cm³.

2.9.2.1.3. Norma Oficial Mexicana 48 (NOM-048-STPS-1993)

Esta norma establece los procedimientos para determinar en la atmosfera ocupacional la cantidad de fibras de asbesto suspendidas, mediante el muestreo de referencia y evaluación en microscopio óptico de las muestras tomadas.

De manera general el método consiste en obtener las muestras por aspiración de un volumen conocido de aire a través de una membrana-filtro que retiene partículas sólidas en la atmosfera ocupacional. El filtro se transforma de membrana opaca en un espécimen transparente ópticamente homogéneo mediante la acción de trietanolato de propilo o triacetina y/o acetona, y observando en un microscopio de contraste de fases, se miden y cuentan las fibras de asbesto. El resultado se expresa en fibras por

centímetro cúbico de aire a partir del número de fibras retenido por el filtro y el volumen medido de aire muestreado.

Para llevar a cabo el método se necesita un microscopio binocular equipado de contraste de fases. El muestreo debe realizarse de modo que los resultados representen la exposición de fibras de asbesto a que puede estar sujeto el trabajador, bajo las condiciones típicas de operación durante un turno completo. Para estimar la exposición del trabajador en la atmosfera ocupacional, las muestras deben tomarse en su zona de respiración. Dicha zona consiste en un hemisferio de 300 mm de diámetro extendido al frente de su cara y medido sobre una línea bisectriz a sus orejas.

El principal propósito de este método es que las estimaciones de exposición sean reportadas sobre la base de un periodo de referencia de 8 horas y calcular la exposición como si hubiera sido tomada en las 8 horas.

El procedimiento que debe seguirse para la preparación de las muestras con acetona y triacetina es el siguiente: en un vaporizador de acetona consistente de un matraz de boca esmerilada y un refrigerante, agregar acetona al matraz y calentarla, hasta el punto de ebullición y esperar a que salga por la boquilla una cantidad moderada de vapor de acetona. Poner el filtro hacia arriba en un portaobjetos, sostenerlo con unas pinzas y aproximarlo a unos 15 o 25 mm de la boquilla durante 3 a 4 s. Usando una jeringa poner de una a tres gotas de acetato de glicerol (triacetina) sobre el filtro transparentado con acetona. Una preparación alternativa es la realizada únicamente con triacetina, en ésta utilizando un escalpelo se corta el sector del filtro que se va a analizar, sobre un portaobjetos se coloca una delgada capa de triacetina, posteriormente se coloca la parte cortada del filtro y sobre éste se pone un portaobjetos.

Para el conteo deben considerarse como fibras todas las partículas cuya longitud sea mayor a 5µm y tengan una relación longitud a diámetro, igual o mayor que 3:1.

El conteo se realiza tomando en cuenta el número de fibras contenidas en cada campo, entendiéndose como tal la superficie limitada por el área de conteo en la retícula ocular. Debe hacerse una exploración total utilizando el aumento de 100x o 150x, después debe utilizarse el objetivo de 40x para enfocar el plano del polvo. Los campos de conteo deben ser escogidos al azar a lo largo del área completa del filtro. Se cuentan 100 campos, si hay muchas fibras se deberán contar 20 campos por lo menos. El número de fibras por campo o carga debe ajustarse a la carga máxima, la cual no debe excederse de 5 fibras por campo, en caso de exceder las 10 fibras, éste se debe rechazar.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Para evaluar la exposición ocupacional mediante el cálculo de la concentración para una muestra simple, se debe aplicar la ecuación:

$$c = \frac{A}{a} \cdot \frac{N}{n} \cdot \frac{1}{V}$$

Donde: A = Área total del filtro menos el área de sujeción ocupada por el portafiltros (mm)

a = Superficie del círculo de la retícula (mm²)

N = Número total de fibras contadas

n = Número de campos reticulares observados

V = Gasto. Tiempo.

Cuando se toman numerosas muestras de diferente duración, se calcula el valor promedio de tiempo ponderado a partir de los valores simples con la ecuación que sigue:

$$CTW = \frac{\sum Ci + ti}{\sum ti} = \frac{C1t1 + C2t2 + \dots + Cntn}{t1 + t2 + \dots + tn}$$

Donde: C1 = valor simple de concentración fibras/ml

Ci = Concentración total de fibras/ml

T1 = Duración de un número (m)

Ti = Duración total del muestreo (m)

n = Número total de muestras

2.9.2.1.4. Norma Oficial Mexicana 17 (NOM-017-STPS-2008)

Esta norma establece los requisitos mínimos para que el patrón seleccione, adquiera y proporcione a sus trabajadores, el equipo de protección personal correspondiente para resguardarlos y atenuar los agentes del medio ambiente de trabajo que puedan dañar su integridad física y su salud. De acuerdo a esta norma, **los trabajadores deben utilizar un respirador contra partículas cuando estén expuestos a un ambiente laboral con polvos o partículas (donde se incluyen las fibras de asbesto).**

2.9.2.1.5. Norma Oficial Mexicana 21 (NOM-021-STPS-1993)

Esta norma establece los requerimientos y características de los informes de accidentes y enfermedades laborales, para que las autoridades del trabajo lleven una estadística nacional de los mismos, los informes deben contener los datos personales del trabajador, así como los datos de la empresa a la que presta sus servicios y deben remitirse al Centro Nacional de Información y Estadísticas del Trabajo.

2.9.2.1.6. Norma Oficial Mexicana 30 (NOM-030-STPS-1993)

Esta norma establece las definiciones empleadas en el uso del equipo de protección respiratoria, así como su clasificación de acuerdo a su modo de operación, incluyendo la capacidad y limitaciones del mismo.

De acuerdo a esta norma los respiradores que ofrecen mayor protección a los trabajadores en ambientes con asbesto, son los respiradores purificadores de aire, específicamente el respirador para partículas, éstos están equipados con filtros para remover las partículas del aire, previamente a su inhalación.

2.9.2.1.7. Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993)

Esta norma considera como residuos peligrosos a las fibras de asbesto puro, incluyendo polvo y productos fácilmente desmenuzables con la presión de la mano (todos los residuos que contengan asbesto el cual no esté sumergido o fijo en un aglutinante natural o artificial). Todas las bolsas que hayan tenido contacto con la fibra de asbesto, así como los materiales filtrantes provenientes de los equipos de control como son: filtros, mangas, respiradores personales y otros; que no hayan recibido un tratamiento para atrapar la fibra en un aglutinante. Todos los residuos de los procesos de manufactura cuya materia prima sea el asbesto y la fibra se encuentre en forma libre, polvo o fácilmente desmenuzable con la presión de la mano.

2.9.2.1.8. Norma Oficial Mexicana 7 (NOM-007-SCT2-1993)

Esta norma establece las características y especificaciones que se deben cumplir para el marcado de los envases y embalajes destinados al transporte de materiales, sustancias y residuos peligrosos.

2.9.2.1.9. Norma Oficial Mexicana 24 (NOM-024-SSA1-1993)

Esta norma establece el valor permisible para la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente, además de indicar las características, dimensiones, símbolos y colores de las etiquetas que deben tener todos los envases y embalajes, que identifican los riesgos que representan durante su transportación y manejo los materiales y residuos peligrosos.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

2.10. San Pedro Barrientos

2.10.1. Localización del área de estudio

El pueblo de San Pedro Barrientos se encuentra en el Estado de México, forma parte de los 19 pueblos que integran el municipio de Tlalnepantla de Baz, se ubica en medio de la industrialización que empezó en la década de los 30's.

2.10.2. Asbestos de México S.A. en el pueblo de San Pedro Barrientos

El desarrollo de industrias de asbesto en México se remonta a 1930, cuando Techo Eterno Eureka, S. A. de C. V., una compañía de asbesto cemento, abre una planta en la Ciudad de México. A partir de entonces, la proliferación de compañías que manufacturaban productos de asbesto fue en incremento, hasta que se aceleró en los 70's debido a la gran migración de compañías americanas y europeas en respuesta a una mayor regulación del amianto en los países desarrollados.

Aproximadamente el 50% de las industrias que utilizan asbesto se encuentran cerca de zonas residenciales con una alta densidad de población en un radio de 2 km (Figura 2.15).

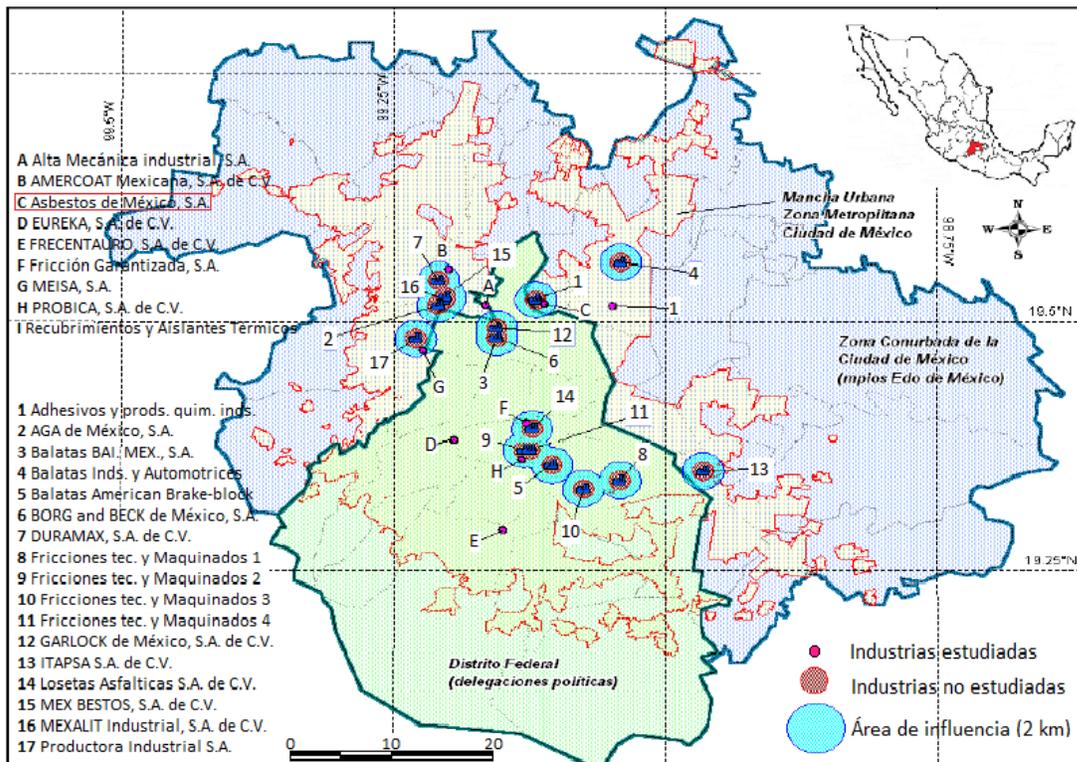


Figura 2.15. Industrias de Asbesto en el área metropolitana de la Ciudad de México (Tomado y modificado de Aguilar; et al., 2003)

Tal es el caso de la compañía Asbestos de México, instalada en el país en 1943 en el pueblo de San Pedro Barrientos ubicado en el Estado de México (Figura 2.16), la fábrica operó por 56 años hasta que finalmente cerró en 1998, sin embargo, no hay registro de limpieza del suelo donde ahora hay bodegas.

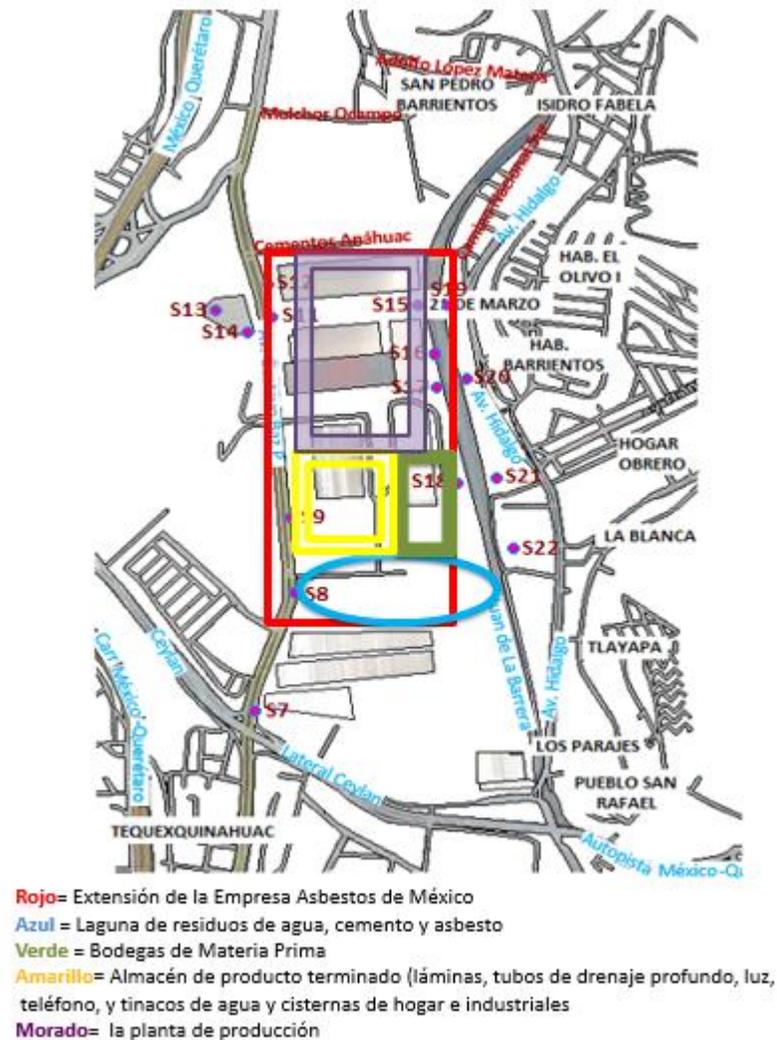


Figura 2.16. Esquema de la localidad San Pedro Barrientos, extensión de la fábrica Asbestos de México S.A., ubicación de las muestras tomadas y división del sitio de muestreo.

En esta fábrica el procedimiento empleado para la extracción de las fibras era en seco o *dry milling*, esta técnica consiste en desgastar la roca poco a poco en piezas de 2.5 [mm] de tamaño, tales piezas se ponen dentro de un molino (*hammer mill*) y posteriormente pasan por un procedimiento de cribado en una serie de tamices de diferente malla, se resalta que tal técnica produce una cuantiosa liberación de partículas.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Gavira *et al.* (1986), hace referencia a dos estudios realizados en la fábrica Asbestos de México, uno en 1963 y otro en 1979, el primero puntualizó que la cuantificación de partículas en el ambiente laboral sobrepasaba el límite máximo permisible que para ese entonces era igual a 164 millones de partículas por metro cubico de aire; las cifras detectadas en el estudio fueron: 1526, 4666, 3903 y 20880 millones. En la investigación de 1979 aunque no se especifican los valores ni la técnica empleada, se menciona que los niveles de asbesto estaban por encima de los límites permisibles.

REFERENCIAS

A. Bibliográficas

Carr, D. D. (1994). *Industrial Minerals and Rocks*. 6a ed. Ann Arbor, Michigan: Braun-Brumfield, Inc. pp. 97-122.

Carretero M. I. y Pozo M. (2007). *Mineralogía Aplicada: Salud y Medio Ambiente*. Madrid: Thomson. pp. 144-147, 302-308, 311-314.

Kisor, K. C. (2009). *Uses of Industrial Minerals, Rocks and Freshwater*. New York: Nova Science Publishers, Inc. pp. 9-19.

Panczner W. D. (1987). *Minerals of Mexico*. New York: Van nostrand reinhold company.

B. Hemerográficas

Aguilar G. M., Juárez C. A. P., Markowitz S., Hernández M. A., Sánchez F. R. R. y Vázquez H. G. (2003). *Globalization and the Transfer of Hazardous Industry: Asbestos in Mexico, 1979-2000*. Volume 9, N° 3.

Aguilar G. M., Robles E. P., Juárez C. P., Alvarado I. C., Rico F. M. y García J. K. (2010). *Case control Study of Pleural Mesothelioma in Workers with Social Security in Mexico*. American Journal of Industrial Medicine.

Anglés M. H. (2012). *Sustancias Peligrosas, Riesgo y Salud en México. Marco Normativo*.

Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros (Delegación Poza Rica). (2008). *Geopetales: Asbesto y otros minerales estratégicos*. Boletín de Geociencias. Vol. 2. N° 4.

Delgado L. A. A. (1989). *Regional Implications of the Jurassic-Cretaceous Volcanosedimentary Cuicateco Terrane, Oaxaca, Mexico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. Vol. 28-5.

Echegoyen C. R. y Rivera R. R. M. (2013). *Asbestosis y mesotelioma pleural maligno*. Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM, Vol. 56. N° 2.

Gavira L. S. (1986). *El asbesto y la salud en la ciudad de México: Un caso de transferencia del riesgo y del consumo*.

GENERALIDADES DEL ASBESTO

Instituto del Asbesto (IA), Instituto del Crisotilo, Instituto Mexicano de Fibroindustrias (IMFI) y Quebec Asbestos Mining Association (QAMA). (2011). *El uso seguro del Asbesto Crisotilo. Un manual sobre las medidas preventivas de control.*

Kazan L. A. (2012). *The Asbestos Debacle. Who is driving Mexico's asbestos policy?* International Journal of Health Services, Volume 42, N° 1, Pages 109–118.

LaDou, J.; Castleman, B.; Frank, A.; Gochfeld, M.; Greenberg, M.; Huff, J.; Kant, T. J.; Landrigan, P. J.; Lemen, R.; Myers, J.; Soffritti, M.; Soskolne, C. L.; Takahashi, K.; Teitelbaum, D.; Terracini, B. y Watterson A. (2010). *The Case for a Global Ban Asbestos.* Environmental Health Perspectives, Volume 118, N° 7.

Ortega F. G. (1978). *El gneis Novillo y rocas metamórficas asociadas en los cañones del Novillo y de La Peregrina, área de Ciudad Victoria, Tamaulipas.* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Vol. 2. N° 1.

Ortiz L. E. H., Escamilla, J. C. C., Flores, K. C., Ramírez, M. C. y Acevedo, O. S. (2006). *Características geológicas y potencial metalogenético de los principales complejos ultramáficos-máficos de México.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario. Tomo LVII, N° 4.

Regueiro M. y González B. (2008). El amianto: Mineralogía del riesgo en *Demolición y reciclaje.* N° 43.

San Juan S. C. y Muñoz C. T. (2013). *Fibras grises de la muerte: El silencio del mayor genocidio industrial en Chile.* Santiago: Global Greengrants Fund; Unidos contra el asbesto (UCA).

Servicio Geológico Mexicano. (2011). *Panorama Minero del Estado de Tamaulipas.* Septiembre de 2011.

Van Gosen B. S., Lowers H. A., Bush A. L., Meeker G. P., Plumlee G. S., Brownfield I. K. y Sutley S. J. (2005). *Reconnaissance Study of the Geology of U.S. Vermiculite Deposits—Are Asbestos Minerals Common Constituents?.* U.S. Geological Survey Bulletin 2192

Virta R. L. (2002). *Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses.* Open File Report 02-149. Reston, VA: USGS.

Virta R. L. (2004). *Asbestos: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2004.*

Virta R. L. (2005). *Mineral Commodity Profiles—Asbestos: U.S. Geological Survey Circular 1255–KK.*

Virta R. L. (2006). *Worldwide Asbestos Supply and Consumption Trends from 1900 through 2003*: U.S. Geological Survey Circular 1298.

Whitehead J., Dunning G. R. y Spray J. G.(2000). *U-Pb geochronology and origin of granitoid rocks in the Thetford Mines ophiolite, Canadian Appalachians*. GSA: Bulletin. Vol. 112. N° 6.

C. Cibergráficas

Isaza D. L. (2012). *Asbestos*. [Citado en 2014 en xa.yimg.com/kq/groups/20557464/2064970042/name/ASBESTOS]



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Capítulo 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO**ÍNDICE DE CONTENIDO**

3.1. Introducción.....	67
3.2. Difracción de Rayos X.....	70
3.2.1. Principios básicos.....	70
3.2.2. Generación de rayos X.....	70
3.2.3. Fenómeno de la difracción.....	71
3.2.4. Métodos utilizados en DRX.....	73
3.2.4.1. Método del polvo.....	73
3.2.4.2. Muestras orientadas.....	74
3.2.5. Analítica en los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos..	76
3.2.6. Analítica de la fracción fina en los materiales industriales.....	77
3.2.7. Eliminación de carbonatos.....	78
3.2.8. Semicuantificación mineralógica.....	78
3.3. Microscopia.....	79
3.3.1. Microscopio estereoscópico.....	79
3.3.1.1. Observación en el microscopio estereoscópico de los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos.....	79
3.3.2. Microscopia Electrónica de Barrido.....	80
3.3.2.1. Principios básicos.....	80
3.3.2.2. Los detectores.....	81
3.3.2.3. El vacío.....	82
3.3.2.4. Métodos utilizados en MEB (Preparación de muestras).....	82
3.3.2.5. Analítica de los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos.....	83
Referencias.....	85

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Metodología general a la que fueron sometidas las muestras en la etapa 1.	68
Figura 3.2. Metodología general a la que fueron sometidas las muestras en la etapa 2.	69
Figura 3.3. Representación esquemática de un tubo de rayos X.....	71
Figura 3.4. Esquema de las condiciones para la difracción de rayos X de una fila de átomos.....	72
Figura 3.5. Esquema representativo de la derivación de la ecuación de Bragg.....	73
Figura 3.6. Ilustración esquemática de los componentes esenciales de un difractor de rayos X.....	74
Figura 3.7. Esquema del procedimiento para la preparación de una muestra orientada.	75
Figura 3.8. Difractor de rayos X del Instituto de Geología, UNAM.....	76
Figura 3.9. Microscopio Estereoscópico en el que se observaron los materiales y suelos estudiados.....	79
Figura 3.10. Esquema de los componentes de la óptica del MEB convencional.....	80
Figura 3.11. Vista esquemática de un microscopio electrónico de barrido.....	81
Figura 3.12. Microscopio Electrónico de Barrido del Instituto de Geología, UNAM....	83

Capítulo 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.1. Introducción

Para la realización de este estudio en una primera fase se seleccionaron 15 muestras de materiales comunes fabricados con asbesto y se caracterizó su mineralogía de forma detallada mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) (*Figura 3.1*).

En una segunda etapa, con ayuda de la bibliografía se eligió un lugar que tuviera afectación por asbestos, el sitio elegido se encuentra en el Estado de México en el municipio de Tlalnepantla de Baz en el pueblo de San Pedro Barrientos, en esta zona se tomaron 27 muestras de suelo, las cuales fueron analizadas mediante las dos técnicas mencionadas anteriormente (*Figura 3.2*).

Se decidió la utilización conjunta de ambas técnicas porque mientras que la difracción de rayos X nos permite conocer la composición mineralógica de los materiales mencionados, la microscopía electrónica de barrido nos permite conocer la composición elemental de los minerales ya determinados por DRX, y visualizar el tamaño y la forma (transversal y longitudinal) de las fibras de crisotilo y de anfíboles.

Los análisis por difracción de rayos X se realizaron en un difractómetro Shimadzu DRX-6000 (materiales industriales) y un difractómetro EMPYREAN (suelos de San Pedro Barrientos) del Instituto de Geología de la UNAM. Para los materiales fabricados con asbesto se empleó el método de roca total y de muestras orientadas (para la fracción fina), adicionalmente se realizó un procedimiento utilizando ácido acético para eliminar el exceso de carbonatos que presentaban algunas muestras. Para los suelos únicamente se utilizó el método de roca total.

El análisis por MEB para los materiales industriales se llevó a cabo en un microscopio de barrido de doble haz MEB-FIB, modelo Quanta 3D FEG de FEI Co., con tip de emisión de campo y presión variable del Centro de Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional. Para los análisis EDS (Energía Dispersiva de Rayos X) se utilizó un Detector EDS, modelo Apollo 10 marca EDAX, del mismo instituto. El análisis por SEM para los suelos de San Pedro Barrientos se realizó en un microscopio electrónico de barrido de la marca ZEISS, modelo EVO/MA10, ubicado en el Instituto de Geología de la UNAM.

La metodología detallada de cada técnica para las muestras se incluye en los siguientes apartados.

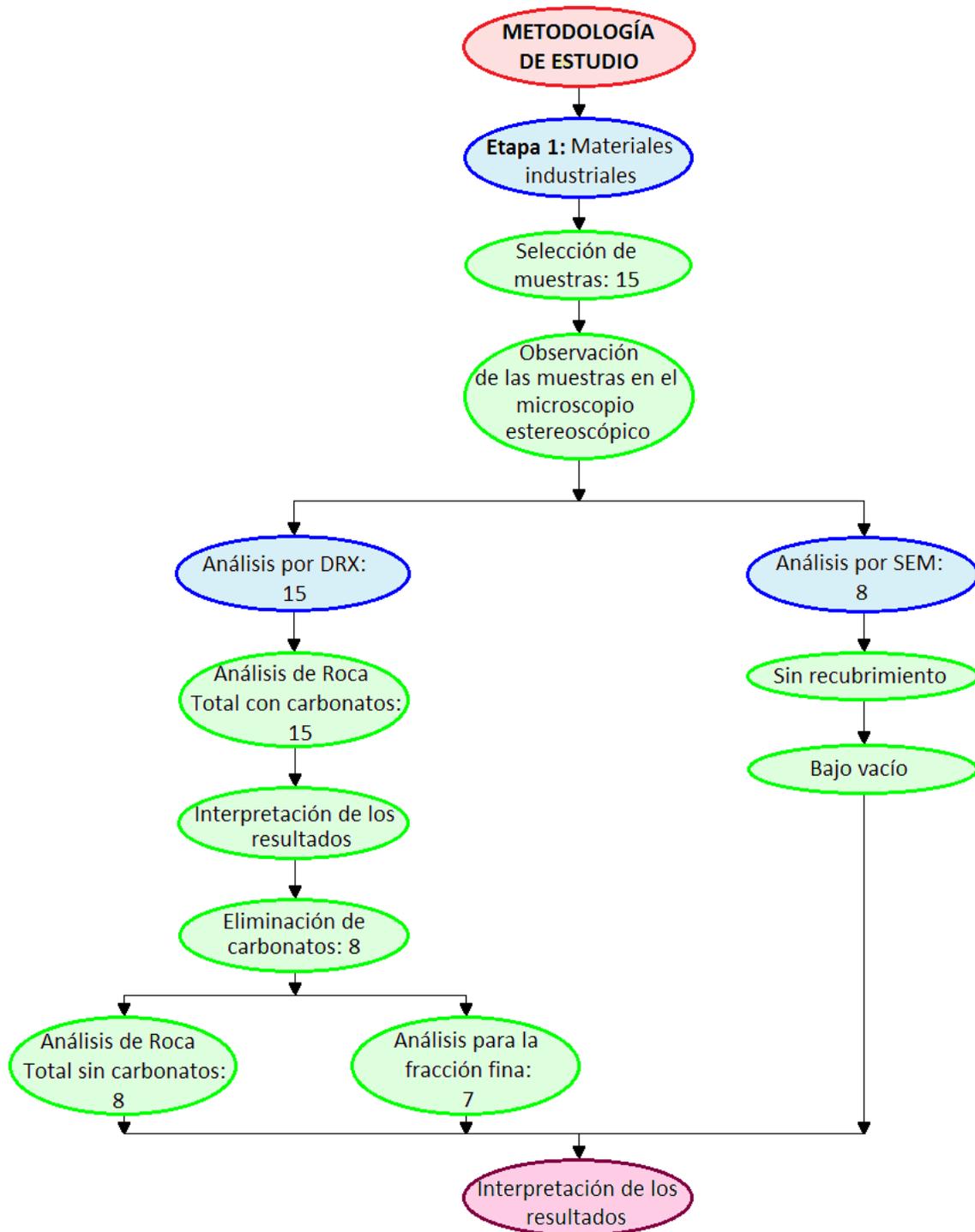


Figura 3.1. Metodología general a la que fueron sometidas las muestras de los materiales industriales en la etapa 1.

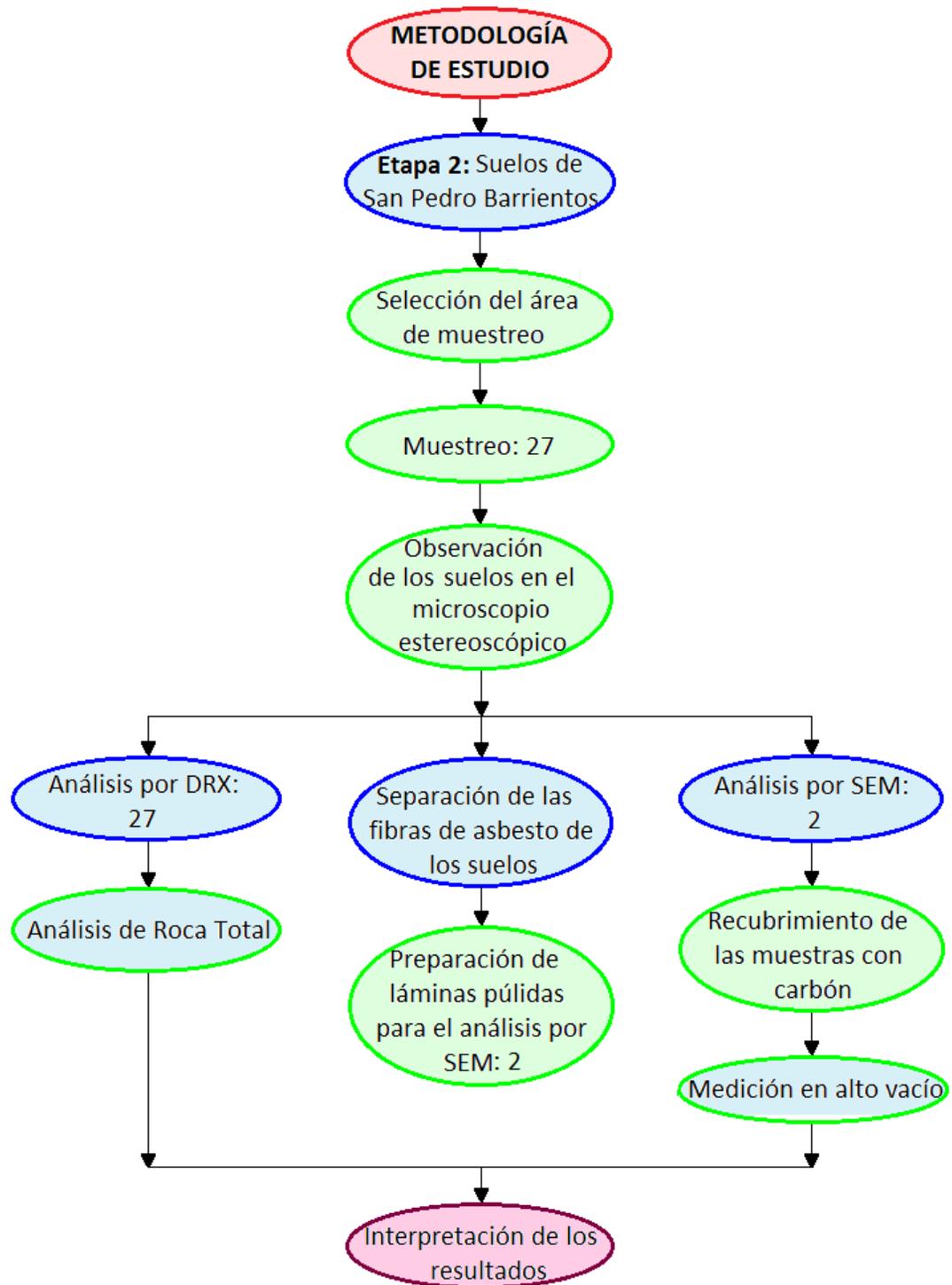


Figura 3.2. Metodología general a la que fueron sometidas las muestras de los suelos de San Pedro Barrientos en la etapa 2.

3.2. Difracción de Rayos X (DRX)

Desde el descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Roentgen Conrad en 1895, y la primera aplicación de un experimento de rayos X para el estudio de material cristalino en 1912 por Max von Laue; las técnicas de difracción de rayos X han sido fundamentales y las más ampliamente utilizadas en la identificación de minerales y otros materiales que presentan estructura cristalina (Klein, 2001).

3.2.1. Principios básicos

En los sólidos cristalinos los átomos se encuentran ordenados y forman arreglos regulares (Arellano, 2009). Estos arreglos se caracterizan por tener una unidad mínima tridimensional llamada celda unitaria, la cual está ordenada con periodicidades características, o periodos de identidad, a lo largo de los ejes cristalográficos (Klein, 2001).

Cuando un haz de rayos X incide en una disposición de este tipo en tres dimensiones y pasa a través de ella su distribución espacial cambia, ya que el rayo hace que los electrones en su trayectoria vibren con la frecuencia de la radiación X incidente (Klein, 2001) y esto es posible porque el material cristalino se encuentra separado por distancias comparables en magnitud a la longitud de onda (Díaz, 2008) de la radiación utilizada. Al atravesar el material parte del haz no interactúa con los átomos, otra parte es absorbida por los electrones que vibran y actúan como una fuente de nuevas frentes de onda, emitiendo esta energía como radiación X de la misma frecuencia y longitud de onda (Klein, 2001); el resto del haz es difractado, esto se produce cuando las ondas dispersadas en algunas direcciones específicas se refuerzan entre sí, produciendo un efecto de dispersión cooperativo conocido como difracción. Esta última fracción de rayos X es la que nos proporciona información sobre el arreglo de los átomos en el sistema que se estudia (Arellano, 2009), pues la distribución de las partículas difractadas es discreta y está relacionada con el orden espacial de los átomos que la originaron (Arellano, 2009).

3.2.2. Generación de rayos X

La fuente de rayos X se genera en un tubo en el que los electrones que se mueven a alta velocidad, procedentes de un filamento calentado (cátodo) bombardean un anticátodo de metal que actúa como blanco (Klein, 2001; Carretero y Pozo, 2007).

La radiación resultante emerge habitualmente a través de una ventana de berilio (*Figura 3.3*), y está constituida por dos componentes: (a) una banda continua de radiación originada por los electrones del filamento al convertir su energía cinética en

rayos X al colisionar con los átomos del anticátodo y (b) un conjunto de líneas de intensidad variable denominada radiación característica (Carretero y Pozo, 2007).

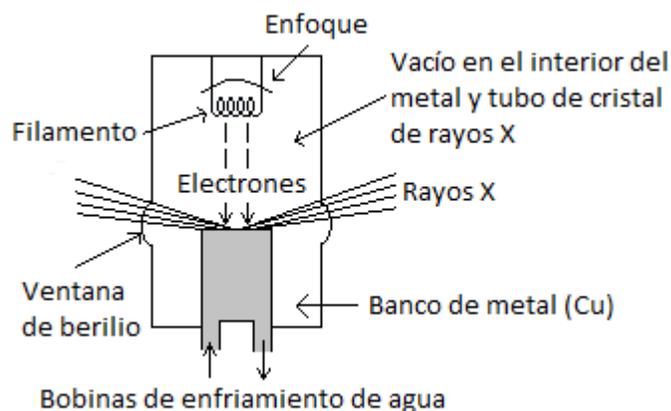


Figura 3.3. Representación esquemática de un tubo de rayos X. El filamento de tungsteno se calienta a muy alta temperatura, haciendo que los electrones se evaporen. La diferencia de voltaje entre el filamento y el metal objetivo acelera los electrones hacia el objetivo. Cuando los electrones golpean el blanco, los rayos X que son producidos son capaces de salir de la carcasa del tubo de rayos X a través de ventanas de berilio. (Tomado de Klein, 2001).

Los electrones acelerados con energía suficientemente alta desplazan a los electrones dentro de las capas electrónicas interiores de un átomo. Ya que la energía de éstos, es ligeramente menor que la energía de los electrones acelerados. Un electrón de una capa superior llena inmediatamente el hueco de electrones, y el exceso de energía se libera como un fotón. La energía, y por lo tanto la longitud de onda, corresponde a la transición electrónica particular de un átomo dado. Esos fotones de alta energía tienen longitudes de onda cortas en el rango $0.1-5\text{\AA}$, y son llamados rayos X (Wenk y Bulakh, 2004).

Los rayos X utilizados en la investigación de los cristales tienen longitudes de onda del orden de 1\AA (Klein, 2001).

3.2.3. Fenómeno de la difracción

La interacción entre la materia cristalina y la radiación X da lugar a una dispersión, en ésta se producen interferencias, tanto constructivas como destructivas. Si dos rayos están desfasados media longitud de onda, darán lugar a una interferencia destructiva. Pero si los rayos están desfasados una longitud de onda (*Figura 3.4*), en la interferencia se refuerzan, originándose la difracción (Carretero y Pozo, 2007).

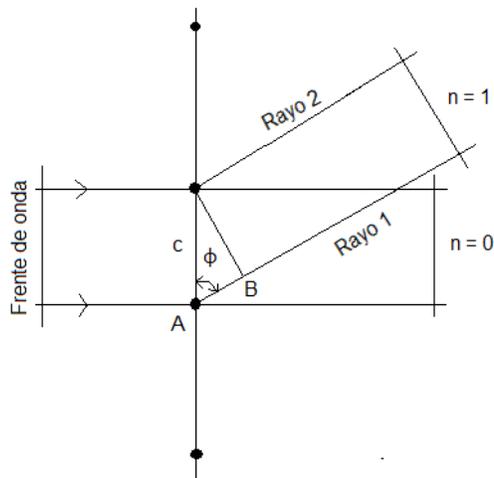


Figura 3.4. Condiciones para la difracción de rayos X de una fila de átomos. En la figura se ilustra que los rayos 1 y 2 están en fase sólo cuando la distancia entre AB represente un número entero de longitud de onda, es decir, cuando $AB = n\lambda = cc \cos \phi$. (Tomado y modificado de Klein, 2001).

La relación entre la radiación y la estructura del cristal viene dada por la ley de Bragg, que se expresa por la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Donde, n es un número entero (orden de reflexión, generalmente con un valor igual a 1); λ , es la longitud de onda de los rayos X (generalmente $\text{CuK}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$); d, es el espaciado en angstroms entre planos reticulares paralelos con un ángulo θ (ángulo de incidencia) cuya magnitud es función de los índices de Miller (h, k, l) y de los parámetros de red.

Los rayos X son difractados por el cristal solo si se cumple que el ángulo de incidencia $\sin \theta$ es igual a $n\lambda/2d$.

Sintetizando, la ley de Bragg supone que si un haz de ondas paralelas, monocromático y en fase, de rayos X incide con un ángulo θ en dos planos paralelos de átomos $P \cdot P'$ y $Q \cdot Q'$ separados por una distancia d, dos rayos de este haz (1 y 2) pueden ser dispersados (1' y 2') por dos átomos A y C de tal manera que ocurre interferencia constructiva; es decir, que ambas ondas tengan la misma longitud de onda y la misma fase cuando sufren dispersión, reforzándose mutuamente (Figura 3.5). Para ello la diferencia de distancia recorrida entre 1-A-1' y 2-C-2' equivalen a un número entero, n, de longitud de onda λ (Díaz, 2008).

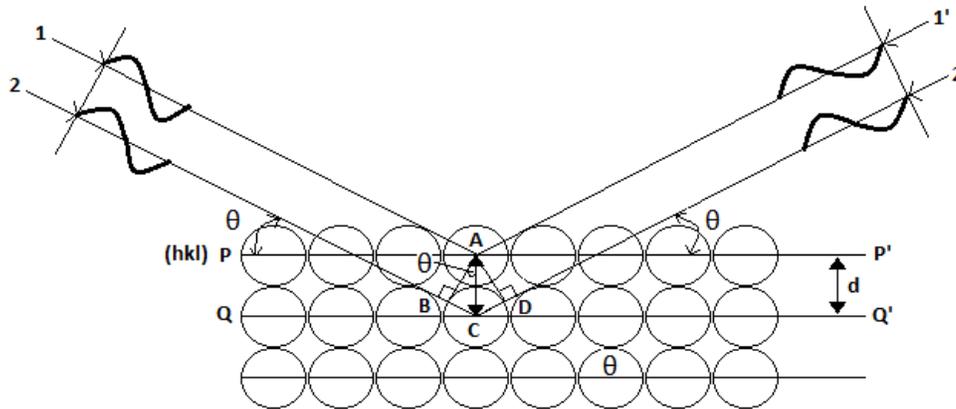


Figura 3.5. Derivación de la ecuación de Bragg, explicando la difracción como reflexión sobre una pila de planos reticulares con un espaciado interplanar d . Todos los puntos en el plano (hkl) se dispersan en fase. (Tomado y modificado de Wenk y Bulakh, 2004).

3.2.4. Métodos utilizados en DRX

3.2.4.1. Método del polvo

En este método la muestra se pulveriza finamente -(el polvo consiste idealmente de partículas cristalinas orientadas completamente al azar)- se coloca en un portamuestras (placa de metal) y se introduce en el difractómetro de rayos X, donde la muestra es sometida a la acción de la radiación X. Para asegurar la aleatoriedad de la orientación de estas partículas con respecto al haz de rayos X que incide, el eje de la placa se hace girar en el camino del haz durante la exposición, mientras que un detector (contador) de rayos X, montado en un brazo, gira alrededor de ella para recoger las señales de rayos X difractados (Klein, 2001).

La muestra, la fuente de rayos X y el contador están en un mismo plano. La muestra y el contador se acoplan mecánicamente de modo que una rotación de θ de la muestra represente un giro de 2θ del contador (*Figura 3.6.*), lo cual asegura el mantenimiento de los ángulos incidente y difractado (Klein, 2001; Díaz, 2008).

En el método del polvo el patrón de difracción no es un conjunto de puntos discretos, ya que aquí por cada uno de los puntos del monocristal se genera un círculo, cuyo radio corresponde a la distancia entre el centro del patrón y la posición del punto de difracción (Arellano, 2009).

Esta poderosa herramienta registra la información presente como un gráfico, llamado difractograma o patrón de difracción, donde la escala vertical que representa la altura de los picos es la respuesta electrónica provocada por el pulso generado cuando un haz difractado entra en el detector de rayos X. El ángulo 2θ en el que se produce la difracción se lee en una escala horizontal. Las alturas de los picos son directamente

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

proporcionales a las intensidades de los efectos de difracción (Klein, 2001). Los picos de alta intensidad que aparecen en un difractograma se registran cuando algún conjunto de planos cristalográficos cumple con la condición de difracción de Bragg.

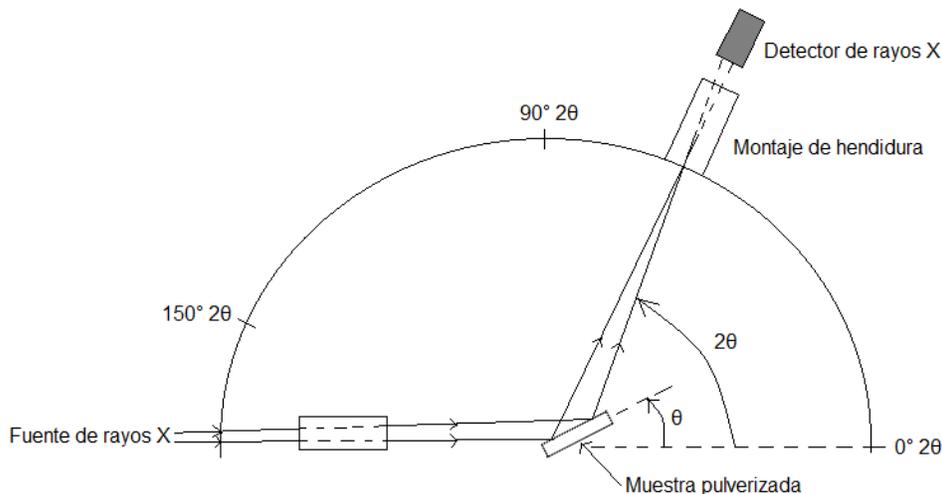


Figura 3.6. Ilustración esquemática de los componentes esenciales de un difractómetro de rayos X. En dicho instrumento el soporte de la muestra gira (θ) °, mientras que el brazo del detector gira $2(\theta)$ °. (Tomado y modificado de Klein, 2001).

Conociendo la longitud de onda de los rayos X y el valor del ángulo de difracción (2θ), es muy fácil calcular el valor del espaciado (d), bien mediante aplicación de la ecuación de Bragg o utilizando tablas de conversión de ángulo a espaciado (Carretero y Pozo, 2007).

3.2.4.2. Muestras orientadas

En el caso de los minerales del grupo de los filosilicatos, la pequeña dimensión de su dominio coherente de difracción (mosaico más pequeño que difracta) y la diferencia entre las dimensiones de sus cristalitos hacen que no se respeten por completo las condiciones de difracción de Bragg, ya que en estas se consideran los cristales infinitos (Carretero y Pozo, 2007).

Para poder identificar correctamente estos minerales, se provoca la orientación de sus partículas de manera que éstas se disponen en el portamuestras sobre sus planos (001), al orientar los minerales se encuentran uno encima del otro en el mismo plano, por lo que el efecto de difracción se mejora para los pequeños cristalitos. La orientación produce un pseudo-macrocristal que difracta aproximadamente como si miles de los cristalitos se convirtieran en un solo cristal grande (Velde, 1992), por lo tanto las características de difracción resultantes se mejoran en la dirección cristalográfica paralela al espacio basal, sin embargo, los otros planos de difracción

en los cristales que no son paralelos a la estructura del espacio basal se pierden casi totalmente en el espectro de difracción (Velde, 1992; Carretero y Pozo, 2007).

Para el estudio de los minerales de la arcilla se obtiene primero la fracción inferior a dos micras mediante métodos de decantación o centrifugación (Carretero y Pozo, 2007). Enseguida se elabora el agregado orientado, a partir de una suspensión de la fracción arcilla, se toma con pipeta una muestra de esta suspensión y se coloca en un portaobjetos de vidrio que se deja orientar y secar a temperatura ambiente (*Figura 3.7*).

Las propiedades de orientación de las arcillas se pueden utilizar también para identificar fases esmectíticas, mediante la incorporación de diferentes moléculas polares (H_2O y etilenglicol, que dan un aumento 5\AA y 7\AA en espesor) se cambia el espaciado basal de las arcillas esmectíticas, lo cual permite una definición más precisa de ellas (Velde, 1992).

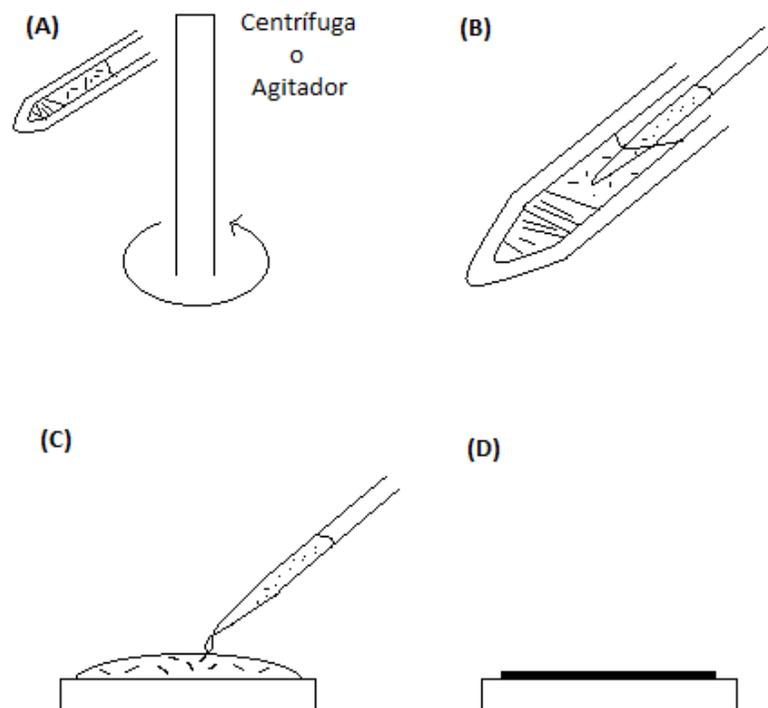


Figura 3.7. Diferentes pasos para la preparación de una muestra orientada. **(A)** Proceso de centrifugación o agitación. **(B)** Suspensión de la fracción arcilla. **(C)** Sedimentación de la suspensión de arcilla concentrada en un portaobjetos de vidrio. **(D)** Muestra orientada después del secado.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.2.5. Analítica de roca total en los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos

Para la realización de este estudio se utilizó el difractómetro Shimadzu XRD-6000 (*Figura 3.8. A*), equipado con tubo de cobre de foco fino, monocromador y detector de centello; y el difractómetro EMPYREAN (*Figura 3.8. B*), equipado con tubo de cobre de foco fino y monocromador, y detector pixcell; ambos difractómetros ubicados en el laboratorio de rayos X del Instituto de Geología, UNAM. La técnica de roca total consistió en el análisis por difracción de rayos X de una muestra representativa del suelo y del material con contenido de asbesto. Tal muestra se obtuvo molturando y homogeneizando un fragmento de aproximadamente 3g del material hasta conseguir un polvo muy fino, el cual se colocó de forma uniforme y compacta en un portamuestras de aluminio de doble carga, de manera que la superficie generada fuera lisa y en el nivel de la superficie de medición. El portamuestras cargado se introdujo en el difractómetro para su exposición a los rayos X en una rutina de 2° por minuto en escaneo continuo y un rango de medición de 4 a 70° (2θ).

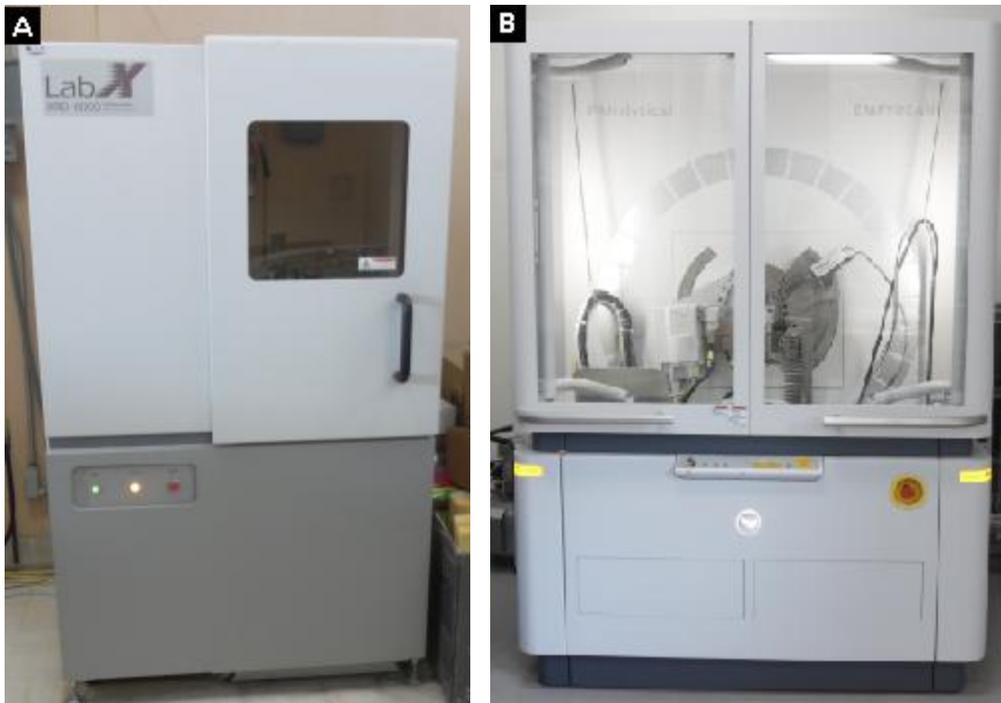


Figura 3.8. Difractómetro de rayos X Shimadzu XRD-6000 en (A) y difractómetro de rayos X EMPYREAN en (B), ubicados en el Instituto de Geología de la UNAM.

3.2.6. Analítica de la fracción fina en los materiales industriales

Los análisis de muestra orientada se realizaron mediante la preparación de una suspensión obtenida a partir de la mezcla del polvillo (utilizado en el análisis de roca total) con agua destilada. Los pasos que se siguieron para conseguir tal suspensión fueron los siguientes:

1. Se vertió el polvo en un recipiente con tapadera
2. Se le agregó agua destilada
3. El recipiente se tapó y se dejó en agitación durante 24 horas (lo cual provocó la sedimentación de la fracción más gruesa y la suspensión de material menor a $2\mu\text{m}$)
4. Transcurridas las 24 horas, con una pipeta se tomó una muestra de la suspensión y se colocó en un portaobjetos de vidrio
5. Se dejó secar a temperatura ambiente durante un día.

Para obtener un fraccionamiento más preciso del tamaño de los minerales, se realizó el método de centrifugación; el proceso fue el siguiente:

1. De la preparación anterior, se retiró la suspensión de material menor a $2\mu\text{m}$
2. Se vertió la fracción gruesa en dos tubos de ensayo y se les agregó agua destilada
3. Ambos tubos se introdujeron en una centrifuga a una velocidad de 600 revoluciones durante 5 minutos (con este procedimiento se consiguió una suspensión que contenía la fracción correspondiente a $4\mu\text{m}$)
4. Una porción de la suspensión obtenida se colocó en un portaobjetos y se dejó secar
5. El resto de la suspensión se vertió en otros dos tubos de ensayo a los que se les agregó más agua destilada y nuevamente se introdujeron en la centrifuga a una velocidad de 6000 revoluciones por 5 minutos, obteniendo así una suspensión con la fracción $<2\mu\text{m}$, ésta también se colocó en un portaobjetos y dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas.

Una vez secas todas las muestras fueron sometidas a radiación X en una rutina de medición continua y velocidad de 2 grados (2θ) por minuto.

En este análisis no fue necesaria la incorporación de moléculas polares, ni calentamiento para la identificación de fases expandibles; pues los minerales encontrados en el rango de las arcillas corresponden básicamente al grupo de la caolinita y la serpentina, los cuales de acuerdo al diagrama de flujo de identificación de minerales de arcilla, no presentan cambios al ser tratados con etilenglicol, ni al ser calentados a 400 y 550 °C; puesto que las temperaturas de descomposición de los minerales estudiados rebasan los 550°C.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.2.7. Eliminación de carbonatos

Al empezar con la interpretación de los resultados se advirtió que en varias de las muestras de los materiales industriales el contenido de calcita formaba aproximadamente el 50% de la composición mineralógica total, lo que se infiere causó interferencia en las difracciones e impidió un mejor reconocimiento de las demás fases. Por esta razón se escogieron aquellas muestras que presentaban una gran proporción de calcita y se causó la eliminación de la misma, a través de los siguientes pasos:

1. En recipientes de porcelana se vertieron aproximadamente 4 gramos de polvo de cada una de las muestras
2. Se les agregó 20 ml de ácido acético y 15 ml de agua destilada
3. La preparación resultante se dejó reposar durante una semana
4. Al transcurrir este tiempo, con el objetivo de eliminar el ácido, las muestras fueron lavadas con agua destilada
5. Posteriormente se calentaron a una temperatura de 80°C para anular la fase líquida.

Una vez terminado el proceso anterior, todas las muestras se colocaron en portaobjetos y fueron nuevamente sometidas a radiación X, siguiendo la rutina de medición ya utilizada.

3.2.8. Semicuantificación mineralógica

El análisis cuantitativo se refiere a la determinación de las cantidades de diferentes fases en una muestra, su objetivo es llegar a determinar las proporciones de las fases con una precisión numérica confiable a partir de los datos experimentales (Pinilla, 2005). Todos los análisis cuantitativos requieren de una precisa y exacta determinación del patrón de difracción de la muestra en términos de las posiciones e intensidades de los picos.

Los métodos cuantitativos más efectivos, son aquellos que particularmente incluyen un modelamiento del patrón total, el cual es generado mediante la aplicación de un software analítico especializado. Estos métodos relacionan las intensidades de los picos ya sea entre dos fases o contra un estándar (Pinilla, 2005).

En nuestro caso de estudio el software que se utilizó emplea el método RIR (Reference Intensity Ratios), este método se define como la relación entre los picos de mayor intensidad de la fase de interés y el de un patrón estándar, normalmente la reflexión 113 del corindón, en una mezcla 50:50 (p/p).

3.3. Microscopía

3.3.1. Microscopio estereoscópico

El microscopio estereoscópico o lupa binocular es un instrumento de amplificación de imágenes que consiste en la utilización de una o más lentes convergentes en un solo sistema óptico. Dependiendo de la curvatura de la superficie de la lente la lupa pueden ampliar las imágenes de los objetos desde 5, 8,10, 12, 20 y hasta 50 veces.

3.3.1.1. Observación en el microscopio estereoscópico de los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos

Todas las muestras de los materiales industriales y de los suelos, fueron observadas en un microscopio estereoscópico de la marca ZEISS (*Figura 3.9*), con un aumento de 40x, para verificar la presencia de las fibras de asbesto y de realizar un reconocimiento general de los diferentes componentes mineralógicos.



Figura 3.9. Microscopio Estereoscópico en el que se observaron los materiales y suelos estudiados.

3.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La posibilidad de observar muestras íntegras y en sus tres dimensiones mediante la microscopía electrónica, fue hecha realidad con la aparición del microscopio electrónico de barrido (MEB) en 1965.

Esta técnica tiene muchas aplicaciones en la mineralogía y es el instrumento ideal para documentar la morfología de las muestras y sus variaciones en composición (Wenk y Bulakh, 2004).

3.3.2.1. Principios básicos

El microscopio electrónico de barrido utiliza el flujo de electrones secundarios y retrodispersados del material para formar una imagen de intensidad cuando éste es bombardeado por un haz de electrones (Velde, 1992).

El fundamento del MEB radica en que los electrones emitidos por un cátodo pasan a través de una columna en la que se ha hecho un vacío de alrededor de 10^{-7} Torr. En ella, el haz inicial es concentrado por una serie de lentes electromagnéticas (condensadora, objetivo) (*Figura 3.10.*) desde unos 25.000-50.000 nm hasta unos 10 nm, es decir, su diámetro va disminuyendo hasta hacerse casi puntual. Al mismo tiempo, la intensidad de corriente se disminuye desde unos 10^{-14} A hasta unos 10^{-10} - 10^{-12} A (Renau y Faura, 1993).

El haz electrónico con estas últimas características, es desplazado sobre toda la superficie de la muestra a modo de un pincel que iría barriendo la muestra con continuas idas y venidas.

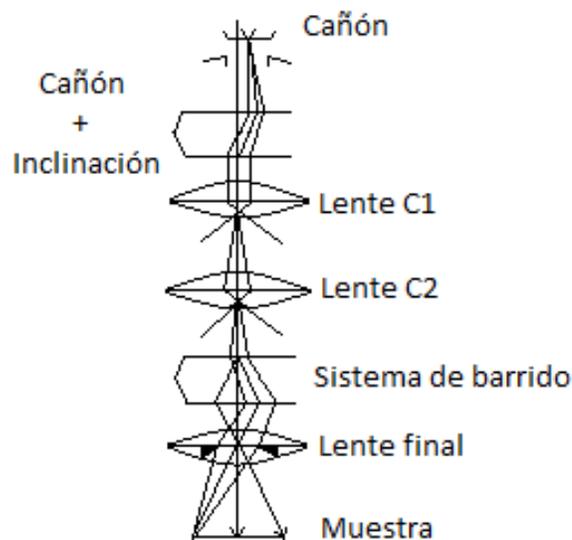


Figura 3.10. Componentes de la óptica del MEB convencional (Tomado y modificado de Renau y Faura, 1993).

3.3.2.2. Los detectores

Hay varios tipos de señales producidas por el haz de electrones (Wenk y Bulakh, 2004). En la interacción del haz electrónico con la superficie de la muestra se producen electrones secundarios que, tras ser captados por un detector, son hechos incidir sobre un escintilador, donde cada electrón dará origen a varios fotones. Dichos fotones son dirigidos hasta un fotomultiplicador, en donde cada fotón dará origen a un fotoelectrón que produce gran cantidad de electrones secundarios. Lo que se consigue es una amplificación de la información sobre la muestra suministrada de estos electrones. Los electrones secundarios, finalmente, previo paso por un videoamplificador, son dirigidos hacia un tubo de rayos catódicos (CRT) sobre cuya pantalla se producirá la imagen (*Figura 3.11*) (Renau y Faura, 1993).

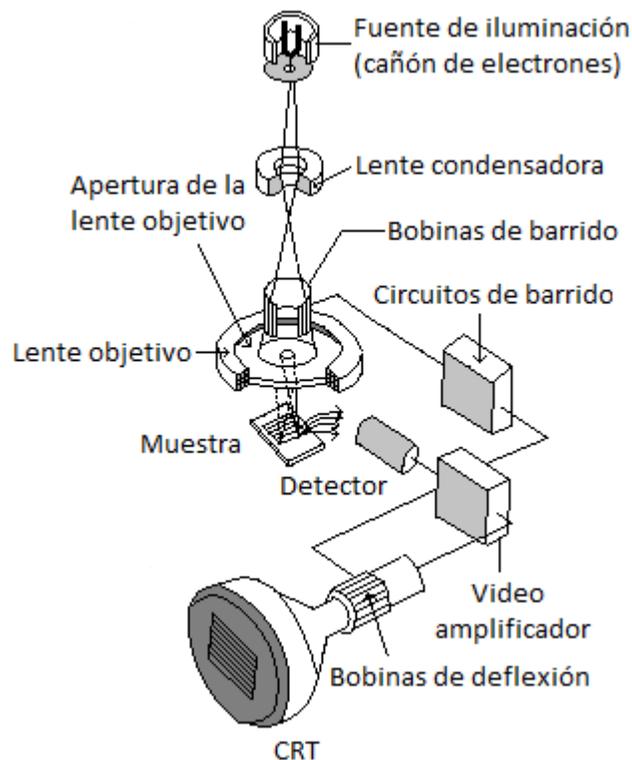


Figura 3.11. Vista esquemática de un microscopio electrónico de barrido. (Tomado y modificado de Wenk y Bulakh, 2004).

La imagen exhibe una topografía exagerada con muchos detalles. Algunos electrones son retrodispersados (BE), después de la interacción con la superficie de la muestra. La intensidad de la señal retrodispersada depende de la orientación de los cristales y la topografía de la superficie, que es en gran medida un efecto de sombra en el trayecto del rayo (Wenk y Bulakh, 2004).

3.3.2.3. El vacío

Mientras el MEB funciona, la columna y la muestra deben estar siempre al vacío, lo que significa que la mayoría de las moléculas de aire son removidas del interior del microscopio. La ausencia de moléculas en la ruta del haz, permite que éste viaje libremente y logre incidir sobre la muestra. El vacío se logra mediante la combinación de una bomba rotatoria que hace un vacío previo y una bomba de difusión de aceite (Nieto, 2010).

3.3.2.4. Métodos utilizados en MEB (Preparación de muestras)

La preparación de las muestras para el análisis MEB puede ser mínima, dependiendo de la naturaleza de éstas y los datos requeridos. Generalmente se necesita que cumplan ciertas características como que sean estables en el vacío y eléctricamente conductoras. La mayoría de las muestras metálicas cumplen estas condiciones con poca o ninguna preparación.

Las muestras que son eléctricamente aislantes generalmente se recubren con una capa delgada de material, ya sea carbono, oro, o algún otro metal o aleación conductora.

La elección del material para el revestimiento depende de los datos a adquirir, por ejemplo el carbono es mejor, si la prioridad es el análisis elemental, mientras que los revestimientos metálicos son más eficaces para aplicaciones de formación de imágenes de electrones de alta resolución (Dunlap y Adaskaveg, 1997).

Existen dos métodos comúnmente utilizados para recubrir las muestras no metálicas: la pulverización iónica y la deposición al vacío.

El tiempo de recubrimiento mediante pulverización iónica simple, dura una hora y media de principio a fin, aproximadamente. El revestimiento por bombardeo iónico se compone de varias moléculas de metal, se lleva a cabo bajo vacío parcial, donde las moléculas de gas argón se ionizan en el campo de alto voltaje entre el cátodo y el ánodo. Los iones de argón cargados positivamente se aceleran hacia el cátodo que está hecho del mismo metal del revestimiento. En el método de bombardeo iónico no son necesarios altos vacíos y la cantidad de oro u otro metal utilizado es pequeño (Dunlap y Adaskaveg, 1997).

El otro método de revestimiento es la evaporación de un metal en deposición al vacío. Una muestra se coloca en una cámara de vacío y una cantidad apropiada de metal de revestimiento se sitúa en una cesta de alambre de tungsteno o de boro-lantano. Cuando se evacua la cámara, el filamento de alambre de tungsteno se calienta hasta el punto en que el metal de revestimiento se condensa sobre la muestra de vaporización. El metal fluye desde el filamento en una línea recta (Dunlap y Adaskaveg, 1997).

Alternativamente, una muestra que sea eléctricamente aislante puede ser examinada sin necesidad de recubrirla con algún material conductor en bajo vacío.

3.3.2.5. Analítica por MEB de los materiales industriales y suelos de San Pedro Barrientos

Para llevar a cabo el estudio a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido se utilizó un microscopio de barrido de doble haz MEB-FIB, modelo Quanta 3D FEG de FEI Co., con tip de emisión de campo y presión variable del Centro de Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional. Para los análisis EDS se utilizó un Detector EDS, modelo Apollo 10 marca EDAX, del mismo instituto; en adición a este equipo se utilizó también un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), marca ZEISS, modelo MA10 asociado a un equipo para microanálisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) BRUKER, ubicado en el Instituto de Geología de la UNAM (*Figura 3.12*). Las condiciones de trabajo fueron a 15 Kv, con presión variable y algunas muestras con 15 Kv y alto vacío a base de electrones secundarios y retrodispersos, con 30 segundos de adquisición para los espectros.



Figura 3.12. Microscopio Electrónico de Barrido del Instituto de Geología, UNAM.

El número de muestras analizadas mediante esta técnica fue de ocho para los materiales industriales y dos para los suelos de San Pedro Barrientos (se escogieron aquellos ejemplares que de acuerdo al análisis semicuantitativo mostraban mayor cantidad de asbesto, así pues, resultó una muestra para el área 2 y una para el área 3; debido a que los suelos del área 1 son los que contienen menos amianto, no se realizó el análisis por MEB para ninguna de las muestras que conforman esta área).

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el estudio de los asbestos en los suelos de San Pedro Barrientos, se elaboraron láminas pulidas, tales láminas se consiguieron realizando el siguiente procedimiento:

1. Colocar cinta doble cara en un vidrio grueso
2. Pegar de manera aleatoria las fibras de crisotilo y anfíbol (previamente separadas del resto del suelo)
3. Adherir en el vidrio una probeta cuidando que las fibras quedan encerradas
4. Preparar una solución, que consiste en combinar 8 gramos de resina epoxica con 1.2 gramos de cementante (catalizador), ésta debe agitarse a poca velocidad y de manera continua, hasta que ambos compuestos queden completamente mezclados, una vez obtenido lo anterior, la mezcla se deja reposar por 15 minutos para que se anulen las burbujas generadas
5. La solución se vierte en la probeta colocada en el vidrio, de manera que las fibras quedan cubiertas
6. Se deja a temperatura ambiente por cuatro horas para que fragüe
7. Cuando la mezcla solidifique, retirar la probeta contenida en el vidrio
8. Pulir la preparación, hasta conseguir que las fibras queden expuestas

Como el equipo MEB utilizado tiene la característica de utilizar presión variable no fue necesario deshidratar las muestras, pero para mejorar la imagen fueron recubiertas con carbón (en una evaporadora de carbón de la marca ZEISS), una vez recubiertas fueron colocadas en el equipo para su estudio en alto vacío.

En el caso de las muestras de los materiales industriales no fue necesario recubrirlas para hacerlas conductivas, por lo que se colocaron sobre cinta de carbón con doble pegamento en un portamuestras metálico e introducidas en el equipo para su estudio en bajo vacío, ya que en esta modalidad de medición, los electrones que inciden sobre la muestra, se pueden estabilizar inyectando nitrógeno, de esta manera se evita que el espécimen que se está estudiando obtenga carga y provoque ruido a la hora de realizar los análisis.

REFERENCIAS

A. Bibliográficas

Carretero M. I. y Pozo M. (2007). *Mineralogía Aplicada: Salud y Medio Ambiente*. Madrid: Thomson.

Klein C. (2001). *Manual of Mineral Science*. 2a ed.

Velde B. (1992). *Introduction to Clay Minerals: Chemistry, origins, uses and environmental significance*. London: Chapman & Hall.

Wenk H. R. y Bulak A. (2004). *Minerals: Their Constitution and Origin*. United Kingdom: Cambridge.

B. Hemerográficas

Arellano J. M. J. (2009). *Análisis por microscopia electrónica y difracción de rayos X de la estructura del fosfato octacálcico obtenido por precipitación y de la hidroxiapatita obtenida por hidrólisis del mismo*. Tesis de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales. UNAM.

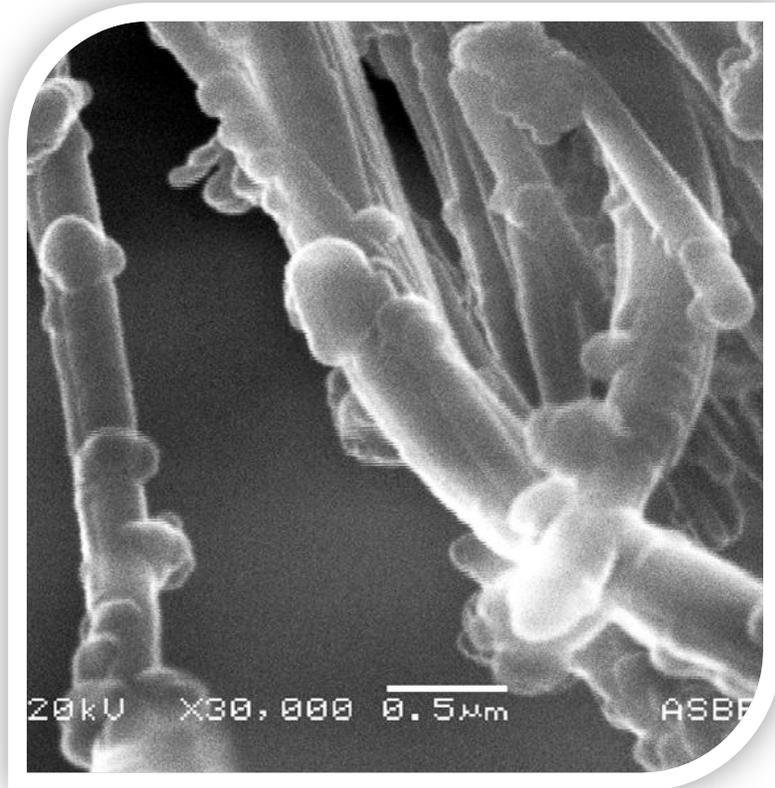
Díaz F. A. L. (2008). *Síntesis de nanopartículas de TiO₂ y su caracterización por microscopia electrónica de barrido y difracción de rayos X*. Facultad de Química. UNAM.

Dunlap M. y Adaskaveg J. E. (1997). *Introduction to the Scanning Electron Microscope: Theory, Practice, & Procedures*. Facility for advanced instrumentation, U. C. Davis

Nieto M. G. L. (2010). *Fundamentos en la preparación de muestras para microscopia electrónica de barrido*. Tapachula, Chiapas. ECOSUR, Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido.

Pinilla J. A. (2005). *Implementación de los métodos RIR y Rietveld para análisis cuantitativo de fases cristalinas con y sin presencia de material amorfo por Difracción de Rayos X de muestras policristalinas*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de maestro en Química. Facultad de ciencias. Universidad Industrial de Santander.

Renau P. J. y Faura M. (1993). *Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido*. Sección de Microscopía Electrónica. Centro de Investigación: Hospital La Fé.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Capítulo 4. RESULTADOS

ÍNDICE

4.1. Analítica (DRX y MEB) para los materiales industriales.....	94
4.1.1. Resultados sin tratamiento con ácido acético.....	96
4.1.1.1. Láminas.....	96
4.1.1.2. Tinacos.....	104
4.1.1.3. Otros asbestos.....	112
4.1.1.4. Materiales para construcción.....	125
4.1.2. Resultados después del tratamiento con ácido acético.....	128
4.1.2.1. Láminas.....	128
4.1.2.2. Tinacos.....	133
4.1.2.3. Materiales para construcción.....	136
4.1.3. Resultados para la fracción fina.....	139
4.1.3.1. Láminas.....	139
4.1.3.2. Tinacos.....	142
4.1.3.3. Materiales para construcción.....	145
4.1.4. Comparación mineralógica entre los materiales industriales analizados	146
4.2. Analítica (DRX y MEB) para las muestras de San Pedro Barrientos.....	149
4.2.1. Introducción.....	149
4.2.1.1. Resultados por DRX para los suelos de San Pedro Barrientos.....	153
4.2.1.2. Resultados por MEB para los suelos de San Pedro Barrientos.....	163
4.2.1.3. Resultados por DRX para las láminas tomadas en San Pedro Barrientos.....	169

RESULTADOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Muestras de las láminas 1 y 2, y fibras de crisotilo y anfíbol presentes en las mismas.....	96
Figura 4.2. Difractograma de la muestra lámina 1.....	98
Figura 4.3. Difractograma de la muestra lámina 2.....	98
Figura 4.4. Difractograma de la muestra lámina 3.....	99
Figura 4.5. Difractograma de la muestra lámina 4.....	99
Figura 4.6. Difractogramas sobrepuestos de todas la muestras de lámina.....	100
Figura 4.7. Fibra de crisotilo en la lámina 1 vista a 100 μm	101
Figura 4.8. Fibra de crisotilo en la lámina 1 vista a 10 μm	101
Figura 4.9. Conjunto de fibras de crisotilo en la lámina 3 a una escala de 5 μm	102
Figura 4.10. Conjunto de fibras de crisotilo en la lámina 3 a una escala de 1 μm	102
Figura 4.11.A. Conjunto de fibras de crisotilo en la lámina 3 vistas a 100 μm	103
Figura 4.11.B. Gráfico del análisis EDS de la lámina 3.....	103
Figura 4.12. Muestras de los tinacos 1 y 2, y fibras de crisotilo presentes en los mismos.....	104
Figura 4.13. Difractograma de la muestra tinaco 1.....	106
Figura 4.14. Difractograma de la muestra tinaco 2.....	106
Figura 4.15. Difractograma de la muestra tinaco 3.....	107
Figura 4.16. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras de tinaco.....	108
Figura 4.17.A. Fibras de crisotilo y anfíbol en el tinaco 1 vistas a 100 μm	109
Figura 4.17.B. Gráfico EDS del anfíbol en el tinaco 1.....	109
Figura 4.18.A. Fibra de crisotilo en el tinaco 1 vistas a 20 μm	110
Figura 4.18.B. Gráfico del análisis EDS de la fibra de crisotilo.....	110
Figura 4.19. Fibras de crisotilo en el tinaco 1 vistas a 5 μm	111
Figura 4.20. Fibras de crisotilo en el tinaco 1 vistas 0.5 μm	111
Figura 4.21. Grupo de materiales incluidos en otros asbestos.....	113
Figura 4.22. Difractograma de la muestra asbesto comprimido.....	115
Figura 4.23. Difractograma de la muestra cartón de asbesto.....	115
Figura 4.24. Difractograma de la muestra tela de asbesto.....	116
Figura 4.25. Difractograma de la muestra polvo de asbesto.....	116
Figura 4.26. Difractograma de la muestra cuerda de asbesto.....	117
Figura 4.27. Difractograma de la muestra protector de asbesto.....	117
Figura 4.28. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras del grupo otros asbestos.....	118
Figura 4.29. Vista general del asbesto comprimido a 100 μm	119
Figura 4.30. Fibra de crisotilo en el asbesto comprimido vista a 10 μm	119
Figura 4.31. Vista general del cartón de asbesto a 10 μm	120
Figura 4.32. Fibra de crisotilo en el carton de asbesto vista a 10 μm	120
Figura 4.33. Polvo de asbesto visto a 100 μm	121

Figura 4.34. Polvo de asbesto a 10 μm	121
Figura 4.35.A. Fibra de crisotilo en el polvo de asbesto vista a 5 μm	122
Figura 4.35.B. Gráfico del análisis EDS de la fibra de crisotilo.....	122
Figura 4.36. Vista general de la cuerda de asbesto a 100 μm	123
Figura 4.37. Fibras de crisotilo a 10 μm	123
Figura 4.38. Fibra de amosita en el protector térmico vista a 10 μm	124
Figura 4.39. Fibras de crisotilo y amosita en el protector térmico vistas a 10 μm ...	124
Figura 4.40. Muestra del mortero y del concreto sellador.....	125
Figura 4.41. Difractograma de la muestra mortero 1.....	126
Figura 4.42. Difractograma de la muestra concreto sellador.....	127
Figura 4.43. Difractogramas de todas las muestra del grupo materiales para construcción.....	128
Figura 4.44. Difractograma de la muestra lámina 1 Ac.....	130
Figura 4.45. Difractograma de la muestra lámina 2 Ac.....	130
Figura 4.46. Difractograma de la muestra lámina 3 Ac.....	131
Figura 4.47. Difractograma de la muestra lámina 4 Ac.....	131
Figura 4.48. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras de lámina tratadas con ácido acético.....	132
Figura 4.49. Difractograma de la muestra tinaco 1 Ac.....	134
Figura 4.50. Difractograma de la muestra tinaco 2 Ac.....	134
Figura 4.51. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras de tinaco tratadas con ácido acético.....	135
Figura 4.52. Difractograma de la muestra mortero 1 Ac.....	137
Figura 4.53. Difractograma de la muestra concreto sellador Ac.....	137
Figura 4.54. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras del grupo materiales para construcción tratadas con ácido acético.....	138
Figura 4.55. Difractograma de la muestra lámina 1 Ac Or.....	140
Figura 4.56. Difractograma de la muestra lámina 3 Ac Or.....	140
Figura 4.57. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras orientadas de lámina.....	141
Figura 4.58. Difractograma de la muestra tinaco 1 Ac Or.....	143
Figura 4.59. Difractograma de la muestra tinaco 2 Ac Or.....	143
Figura 4.60. Difractogramas sobrepuestos de todas las muestras orientadas de tinaco.....	144
Figura 4.61. Difractograma de la muestra mortero 1 Ac Or.....	145
Figura 4.62. Mapa de las industrias de asbesto en el área metropolitana de la Ciudad de México.....	149
Figura 4.63. Mapa de mortalidad por mesotelioma pleural maligno por Estado de la República Mexicana (1979-2004).....	150

RESULTADOS

Figura 4.64. Esquema de la localidad de San Pedro Barrientos, ubicación de las muestras tomadas y división del sitio de muestreo.....	151
Figura 4.65. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 1.....	154
Figura 4.66. Fibras de crisotilo y anfíbol en Barrientos S11.....	155
Figura 4.67. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 2.....	158
Figura 4.68. Fibras de crisotilo y anfíbol en Barrientos S17.....	159
Figura 4.69. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 3.....	162
Figura 4.70.A. Fibra de crocidolita presente en la muestra de suelo Barrientos S13 vista a 20 μm	163
Figura 4.70.B. Gráfico del análisis EDS.....	163
Figura 4.71. Fibra de crocidolita en la muestra de suelo Barrientos S17 vista a 100 μm	164
Figura 4.72. Fibra de crocidolita en la muestra de suelo Barrientos S17 vista a 10 μm	164
Figura 4.73.A. Fibra de crocidolita vista a 2 μm	165
Figura 4.73.B. Gráfico del análisis EDS de la fibra de crocidolita.....	165
Figura 4.74. Fibras de crocidolita vistas a 20 μm	166
Figura 4.75. Fibras de crocidolita vistas a 100 μm	166
Figura 4.76. Conjunto de fibras de crisotilo presentes en la lámina 6 B.....	169
Figura 4.77. Muestra de la <i>lámina 5 B</i> y de la <i>lámina 6 B</i> después de haberlas tratado con ácido acético.....	170
Figura 4.78. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de lámina tomadas en San Pedro Barrientos.....	171
Figura 4.79. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de lámina tomadas en San Pedro Barrientos después de haberlas tratado con ácido acético.....	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Análisis de roca total de láminas sin tratarlas con ácido acético.....	97
Tabla 4.2. Análisis de rocas total de tinacos sin tratarlos con ácido acético.....	105
Tabla 4.3. Análisis de roca total de otros asbestos sin tratarlos con ácido acético.....	114
Tabla 4.4. Análisis de roca total de materiales para construcción sin tratarlos con ácido acético.....	126
Tabla 4.5. Análisis de roca total de láminas después de tratarlas con ácido acético.....	129
Tabla 4.6. Análisis de roca total de tinacos después de tratarlos con ácido acético.....	133
Tabla 4.7. Análisis de roca total de materiales para construcción después de tratarlos con ácido acético.....	136
Tabla 4.8. Análisis para la fracción fina de láminas.....	139
Tabla 4.9. Análisis para la fracción fina de tinacos.....	142
Tabla 4.10. Análisis para la fracción fina de materiales para construcción.....	145
Tabla 4.11. Resumen de los resultados para los materiales industriales.....	147
Tabla 4.12. Análisis de roca total de las muestras del Área 1.....	154
Tabla 4.13. Análisis de roca total de las muestras del Área 2.....	157
Tabla 4.14. Análisis de roca total de las muestras del Área 3.....	161
Tabla 4.15. Resumen de los resultados para los suelos de San Pedro Barrientos.....	167
Tabla 4.16. Análisis de roca total de láminas (Barrientos) sin tratarlas con ácido acético.....	169
Tabla 4.17. Análisis de roca total de láminas (Barrientos) después de haberlas tratado con ácido acético.....	170

RESULTADOS

Capítulo 4. RESULTADOS

4.1. Analítica (DRX y MEB) para los materiales industriales

Para la realización de este estudio se seleccionaron 15 muestras de materiales fabricados con asbesto, se observaron en el microscopio estereoscópico y posteriormente se sometieron a las técnicas de Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido para caracterizar su mineralogía de forma detallada.

En una primera etapa se analizaron las 15 muestras, siguiendo el método del polvo que consiste en:

1. Molturar y homogeneizar un fragmento de la muestra con un mortero de ágata o alumina hasta obtener un polvo fino.
2. Colocar el polvo en un portamuestras de aluminio de forma compacta y uniforme.
3. Introducir el portamuestras cargado al difractómetro para su exposición a la radiación X.

Todas las muestras se midieron en un rango de 4 a 70° en una rutina de 2° por minuto en escaneo continuo. Como el tubo era con cátodo de cobre la longitud de onda utilizada es $\lambda = 1.54 \dots \text{Å}$

En una segunda etapa, se seleccionaron aquellas muestras que presentaban un porcentaje elevado de carbonatos para su eliminación con ácido acético y con el fin de lograr en el difractograma una señal más clara de los asbestos. Cabe destacar que los asbestos son minerales que resisten este ataque ácido por lo que la mineralogía de los mismos no se afecta con dicho procedimiento. Una vez eliminados los carbonatos, las muestras seleccionadas fueron nuevamente sometidas al análisis de roca total por DRX. Posteriormente por centrifugación, de estas mismas muestras se separó la fracción fina (>2micras) para completar la identificación y caracterización de filosilicatos en fracción orientada.

Una vez completados los análisis por Difracción de Rayos X, se eligió un ejemplar representativo de cada grupo de los materiales estudiados por DRX para analizarlos mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido; el total de muestras estudiadas a través de este método fue de ocho. Se obtuvieron imágenes y algunos análisis EDS (procedimiento estándar para identificar y cuantificar la composición elemental de las áreas de interés de la muestra estudiada).

Los resultados obtenidos por DRX se sintetizaron en tablas, donde se indica el número de muestra, el nombre, las fases que se identificaron (colocadas por orden de abundancia decreciente), la ficha PDF correspondiente a cada una de las fases

encontradas, datos de cristalinidad del material (ésta se representará con las letras CM) y abundancia (análisis semicuantitativo; SM) en porcentaje de las fases.

Las tablas se elaboraron tomando en cuenta el tipo de material industrial estudiado, así pues, resultó una para las *láminas*, otra para los *tinacos*, una más para *otros asbestos*, y finalmente otra para *materiales para construcción*.

Se introducen también los difractogramas de cada una de las muestras, así como la comparación gráfica entre los diferentes ejemplares de cada uno de los grupos.

Los símbolos utilizados en los difractogramas para abreviar los nombres de los minerales fueron tomados de Kretz, 1983 y se enlistan enseguida:

Mineral	Símbolo
Antofilita	Ath
Calcita	Ca
Cuarzo	Qtz
Crisotilo	Ctl
Ettringita	Ett
Grunerita	Gru
Hatrurita	Ha
Hematita	Hem
Pirofilita	Prl
Riebeckita	Rbk
Yeso	Gp

Los símbolos correspondientes a grupos mineralógicos son los recomendados por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), a continuación se enlistan:

Grupo Mineralógico	Símbolo
Feldespatos	Fsp
Mica	Mca

En adición a los gráficos obtenidos por DRX, se incluyen también las imágenes obtenidas por MEB y los análisis EDS de las muestras elegidas.

RESULTADOS

4.1.1. Resultados sin tratamiento con ácido acético

4.1.1.1. Láminas

Se examinaron 4 láminas de origen distinto. Macroscópicamente la lámina 1 muestra un color gris oscuro por un lado de su superficie, mientras que por el otro este color tiende a ser más claro. Al tacto tiene textura rugosa y suave, respectivamente. A simple vista es posible ver las fibras de asbesto (crisotilo) que la componen, las cuales muestran un color blanco verdusco y longitudes de varios milímetros. La teja es dura y compacta; al quiebre se observan una serie de capas. Por su parte, la lámina 2 (*Figura 4.1.A*) es de color gris claro, con ciertas coloraciones de gris oscuro, su textura es rugosa por ambos lados. Se observan las fibras de crisotilo y de anfíbol, las primeras blancas y las segundas azuladas (*Figura 4.1.B*), al igual que la teja anterior, es dura y compacta. La lámina 3 se diferencia de las demás por su color rojizo (*Figura 4.1.C*), tiene también coloraciones blancas, causadas por las fibras de crisotilo (*Figura 4.1.D*), tiene una superficie áspera. En cuanto a la lámina 4, comparte características similares a las de la lámina 2 en lo que se refiere a coloración, presencia de las dos variedades de fibras, y textura.

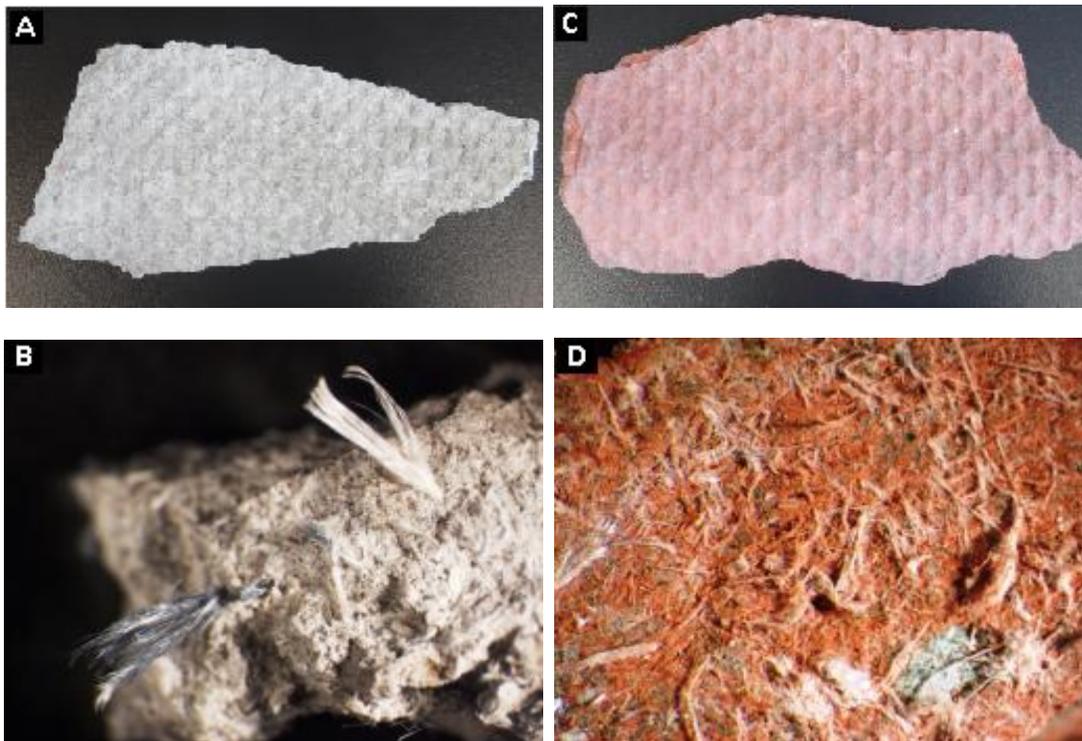


Figura 4.1. Muestra de la *lámina 1* en A. En B, fibras de crisotilo y anfíbol (16x) en la *lámina 1*. Muestra de la *lámina 3* en C, nótese su color rojo debido a la presencia de Hematita. En D, fibras de crisotilo (32x) en la *lámina 3*.

Resultados por Difracción de Rayos X

Con base en los resultados obtenidos por DRX, se concluye que la composición de las láminas (y/o tejas) de asbesto es muy similar, donde los minerales con mayor frecuencia y abundancia son la calcita y el cuarzo, seguidos por los asbestos (ya sea crisotilo o alguna variedad de anfíbol asbestiforme). De esta manera se puede afirmar que tales minerales son la base para la fabricación de las tejas, sin embargo también pueden contener aunque en menor abundancia otras fases como la hematita, por ejemplo, que está presente en la lámina 3 y que le da la coloración rojiza.

Tabla 4.1. Análisis de Roca Total de láminas sin tratarlas con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Lámina1 Karina120135	Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] <i>Trazas de Cuarzo [SiO₂]</i> <i>Trazas de Caolinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄]</i>	85 15 - -	5-586 43-0662 - -	37
2	Lamina2 Asbestos101714	Cuarzo [SiO ₂] Calcita [CaCO ₃] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i>	46 38 11 6 -	46-1045 5-586 98-3-8218 52-1562 -	37
3	Lámina3 Asbestos105049	Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Hematita [Fe ₂ O ₃] <i>Trazas de Cuarzo [SiO₂]</i>	80 10 6 4	5-586 25-645 01-1053 46-1045	36
4	Lamina4 Asbestos112504	Cuarzo [SiO ₂] Calcita [CaCO ₃] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i>	47 40 7 6 -	46-1045 5-586 98-3-8218 25-645 -	36
Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita) En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica CM = Cristalinidad del material					

RESULTADOS

Gráficos

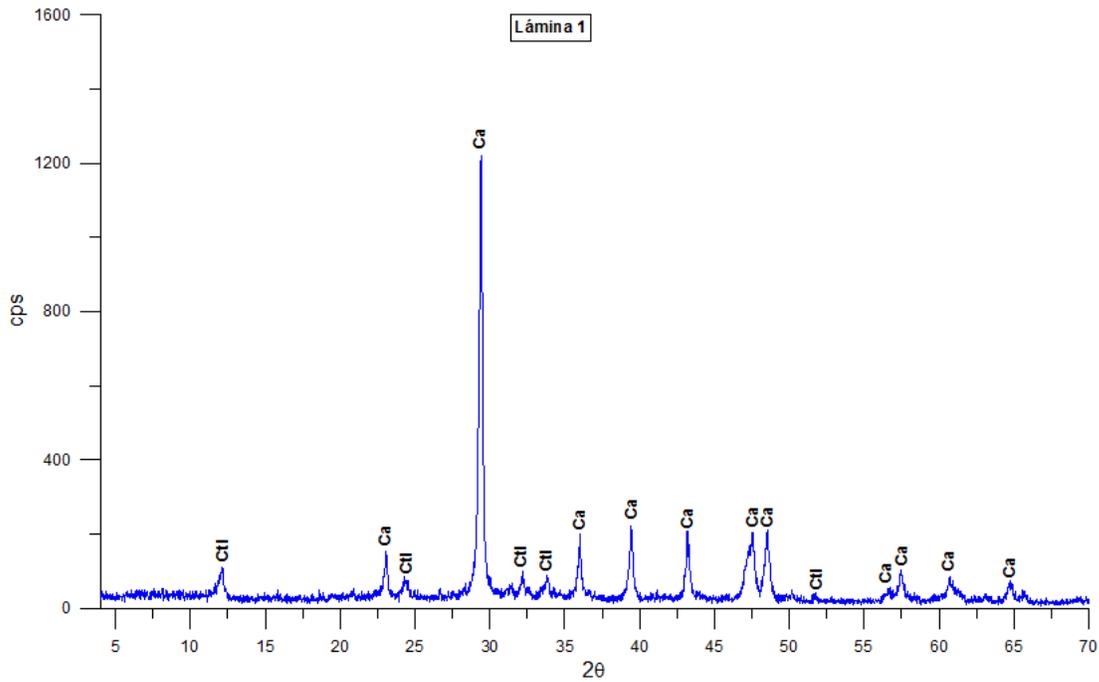


Figura 4.2. Diffractograma de la muestra *lámina 1*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

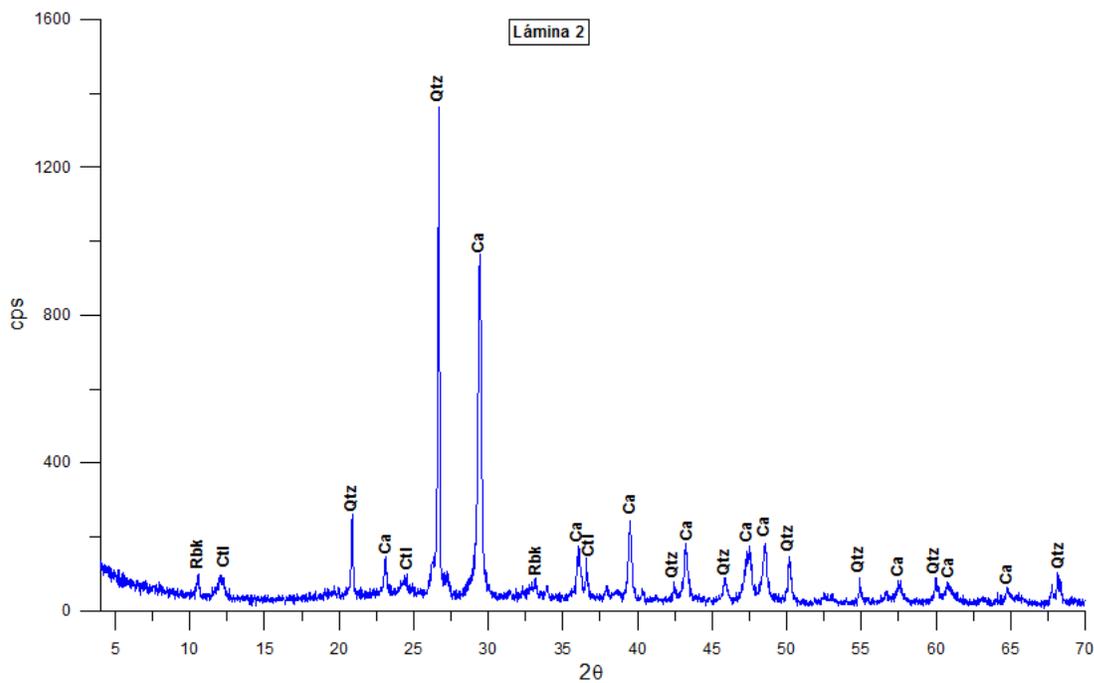


Figura 4.3. Diffractograma de la muestra *lámina 2*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

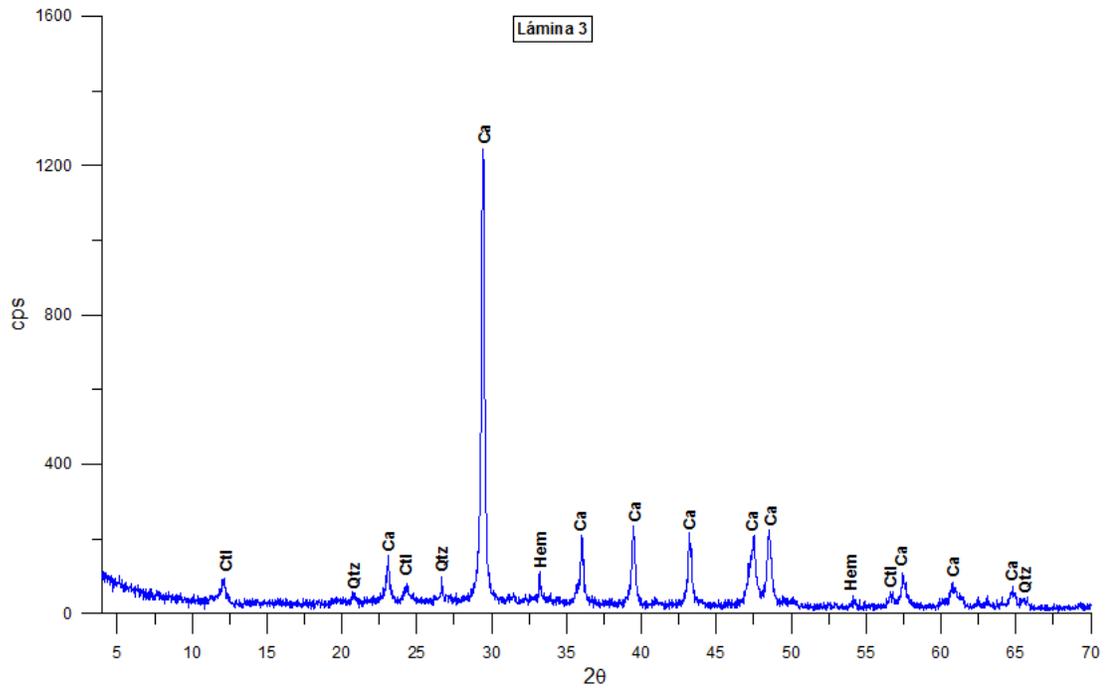


Figura 4.4. Difractograma de la muestra *lámina 3*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

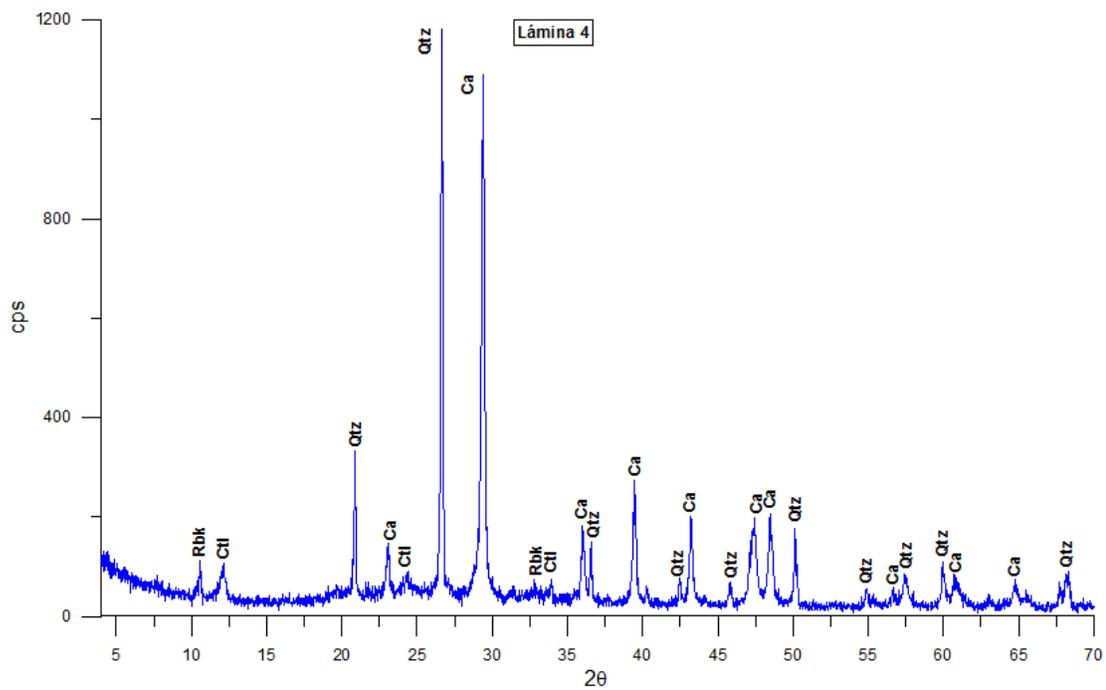


Figura 4.5. Difractograma de la muestra *lámina 4*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación gráfica

Al comparar entre sí los difractogramas de cada una de las láminas se observa que el crisotilo (asbesto blanco) está presente en todas ellas, tal mineral ocupa entre 6% y 15%. En tanto que el cuarzo y la calcita tienen porcentajes que van desde el 38 hasta el 85%.

Una de las diferencias más sobresalientes es la presencia de crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita, también llamada asbesto azul) en las láminas 2 y 4, ocupando el 11 y el 7%, respectivamente, en la composición mineralógica total.

Si se suman ambos tipos de asbestos (crisotilo y anfíbol) presentes en las láminas 2 y 4, el porcentaje que éstos alcanzan son del 17 y 13%. Con tales resultados se diría que estas dos láminas son las más peligrosas, porque además del alto porcentaje de amianto que contienen, albergan dos variedades de asbesto, entre ellas la crocidolita que es considerada una de las más peligrosas para el ser humano por su morfología y contenido de Fe.

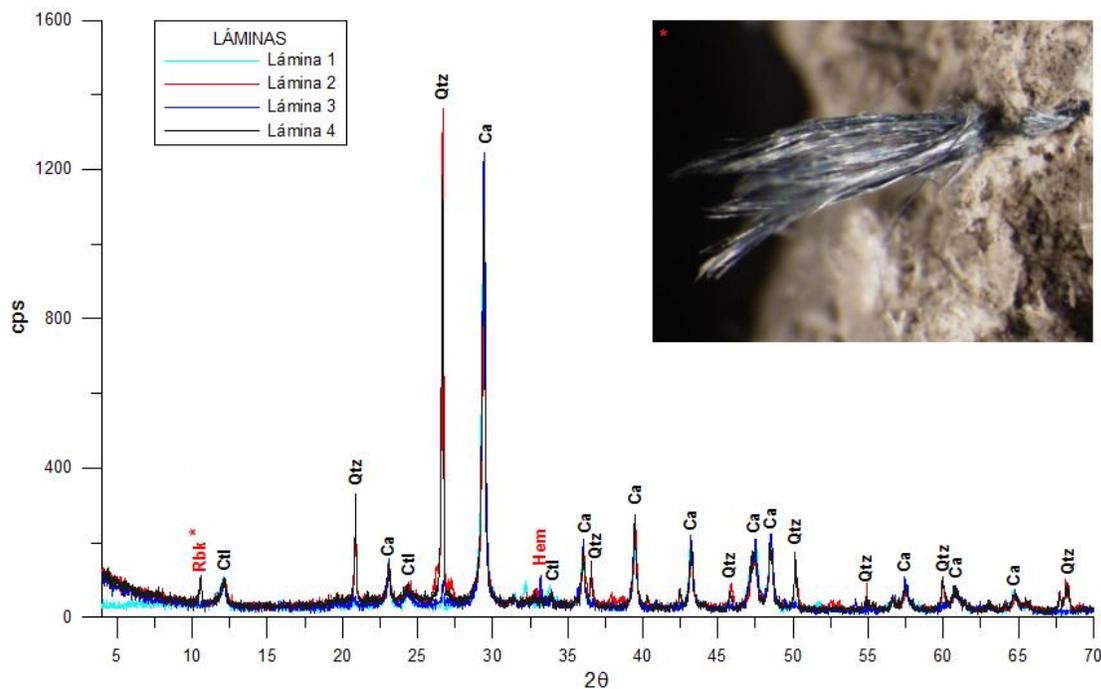


Figura 4.6. Difractogramas sobrepuestos de las láminas 1, 2, 3 y 4, en donde se indican en letras negritas las fases comunes entre los cuatro materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en una o dos láminas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983. En la esquina superior derecha se observa una foto de un trozo de la Lámina 2, tomada con el microscopio estereoscópico (16x), donde se observan las fibras de crocidolita que componen la teja.



Figura 4.7. Fibra de crisotilo vista a 100 μm . En la fibra se observa la característica flexibilidad que la distingue de los anfíboles asbestiformes, así como su facilidad para separarse en fibrillas. Particularmente en esta imagen, la fibra principal tiene una longitud aproximada de 358 μm y un diámetro promedio de 33 μm . Aunque las fibrillas que se le desprenden conservan esta longitud no es así con su diámetro, el cual tiene una variación de 0.87 μm a 2.10 μm .

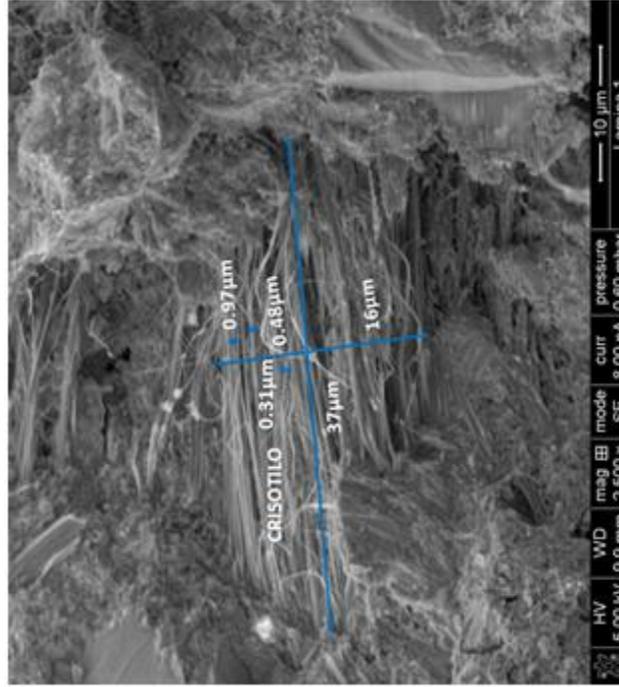


Figura 4.8. Fibra de crisotilo vista a 10 μm , en ésta se nota una fibra con un diámetro aproximado de 16 μm , la cual está compuesta por fibras de diámetro más pequeño de entre 0.31-0.97 μm , la longitud que deja ver es de 37 μm , sin embargo, debido a que no se aprecian sus extremos se infiere que este valor es superior.

Lámina 3

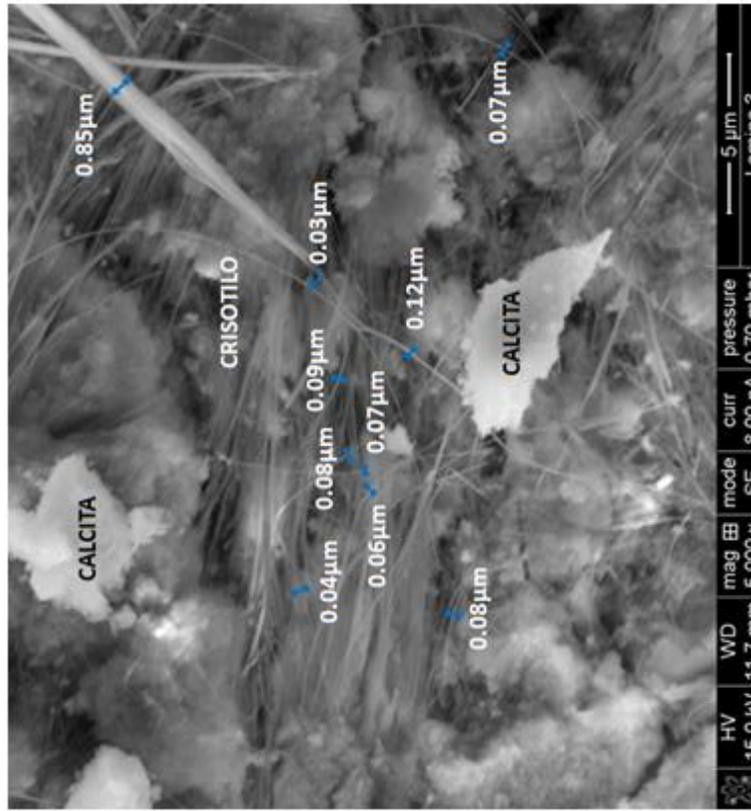


Figura 4.9. Conjunto de fibras de crisotilo en la lámina 3 a una escala de 5 μm.

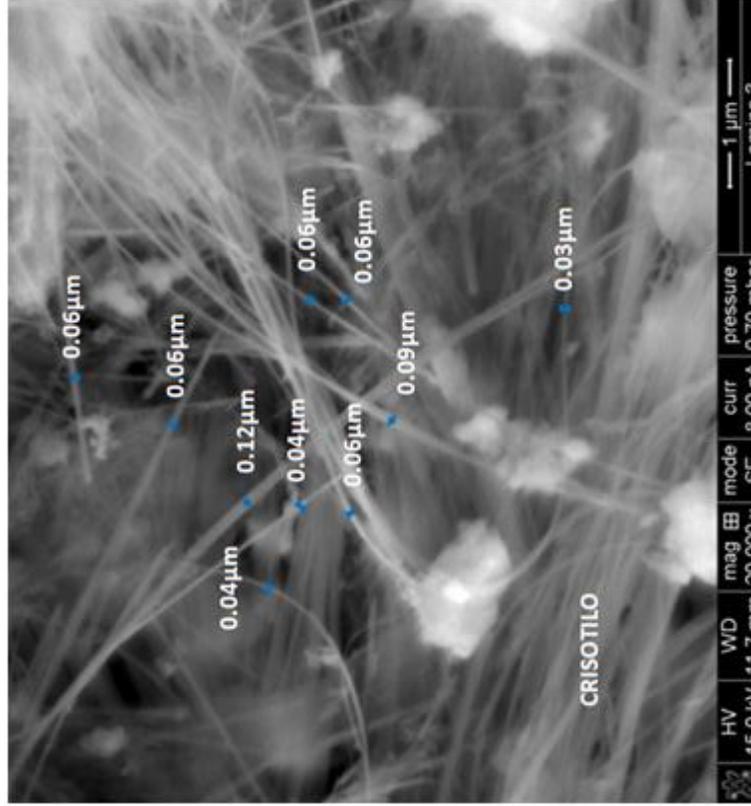


Figura 4.10. Conjunto de fibras de crisotilo en la lámina 3, vistas a 1 μm.

Lámina 3

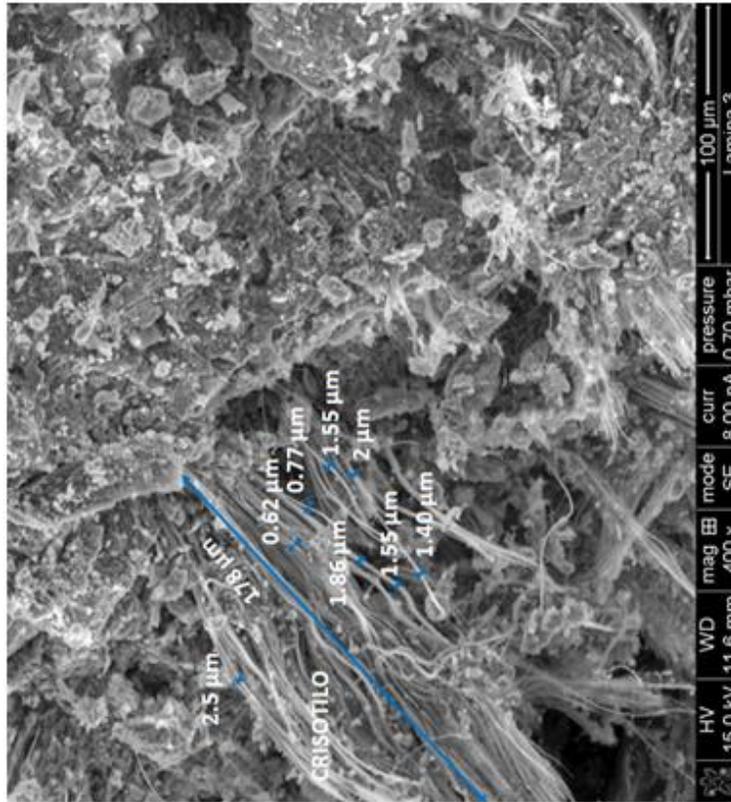


Figura 4.11.A. Conjunto de fibras de crisotilo vistas a 100 μm que muestran una longitud de 178 μm . No obstante, tales fibras no alcanzan a salir completamente en el campo visual, indicando que éstas tienen una longitud mayor a la reportada. El diámetro de las diferentes fibrillas varía, estando en un rango de 0.62 a 2.5 μm .

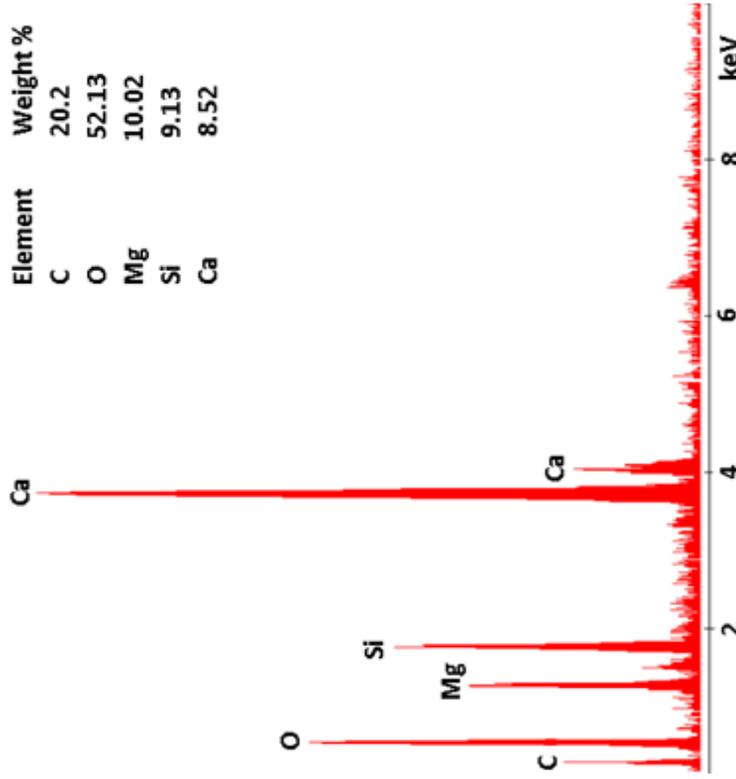


Figura 4.11.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de crisotilo que se observa en la *Figura 4.11.A.* La composición elemental no indica presencia de Fe en la misma.

RESULTADOS

4.1.1.2. Tinacos

Se estudiaron 3 muestras de tinacos. El tinaco 1 (*Figura 4.12.A*), presenta tonalidad gris claro, es compacto y duro, las fibras de crisotilo son visibles a simple vista, al tacto es áspero.

El tinaco 2 exhibe un color grisáceo, texturalmente es liso y suave, las fibras de crisotilo (*Figura 4.12.B*) que lo componen son menos notorias que las del tinaco 1, al romperse se observan una serie de capas de pequeño grosor, entre estas capas se puede ver una serie de fibras entrelazadas.

Por su parte, el tinaco 3 (*Figura 4.12.C*) comparte la misma coloración grisácea que sus semejantes, así como la presencia de fibras de crisotilo (*Figura 4.12.D*), las cuales le dan tonalidades blancas en ciertos lugares; al tacto es terroso y liso.

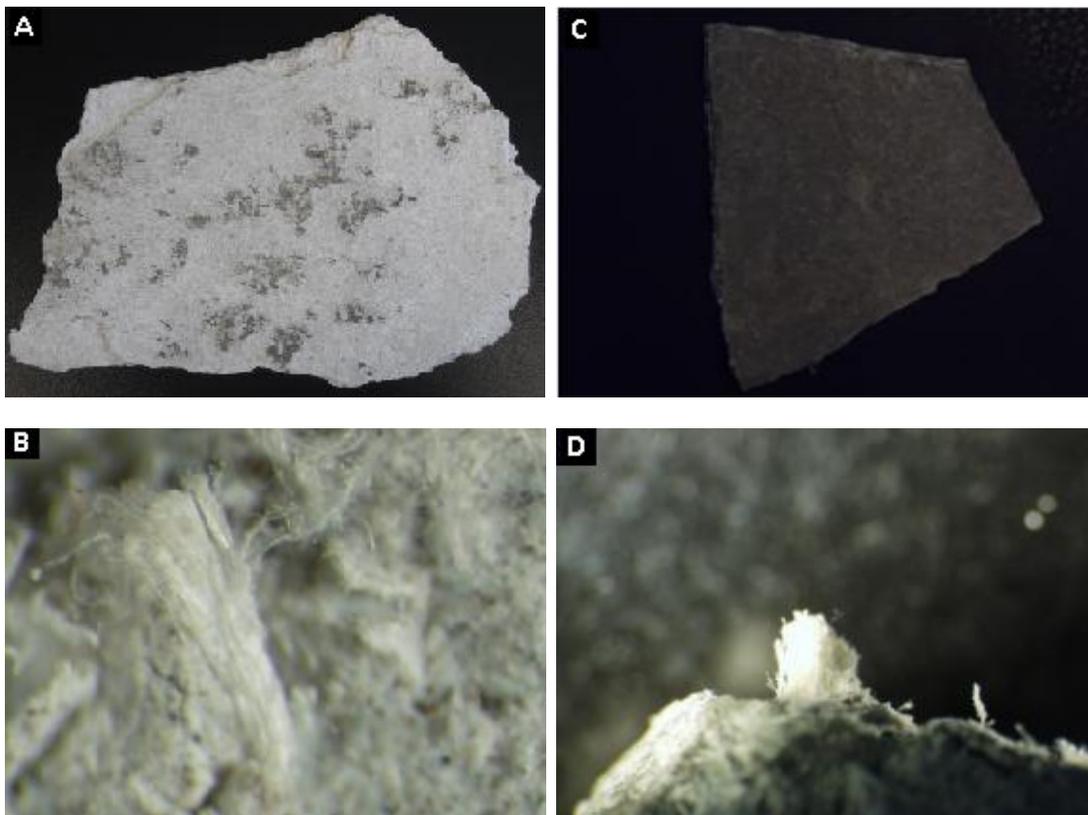


Figura 4.12. Muestra del *tinaco 1*, en A. Conjunto de fibras de crisotilo en el *tinaco 2* (20x) en B. Muestra del *tinaco 3*, en C. Fibra de crisotilo en el *tinaco 3* (20x) en D.

Resultados por Difracción de Rayos X

En cuanto a la composición de los tinacos con base en los resultados por DRX, observamos que la calcita es el mineral predominante. Así también rectificamos la presencia de minerales fibrosos, en este caso del crisotilo, que está presente en menor abundancia que la calcita. Otras fases que se incluyen son el cuarzo, que se destaca por su superioridad en *tinaco 1*; las micas y los posibles feldespatos, pero en menor cantidad.

Tabla 4.2. Análisis de Roca Total de *tinacos* sin tratarlos con ácido acético.

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Tinaco 1 Asbestos144839	Cuarzo [SiO ₂] Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄ <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i> <i>Trazas de Anfíboles [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i>	42 39 18 - -	46-1045 5-586 25-645 - -	30
2	Tinaco 2 Asbestos190141	Calcita [CaCO ₃] Ettringita [Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ 26H ₂ O] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄ Trazas de Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] <i>Trazas de Yeso [CaSO₄2H₂O]</i> <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i> <i>Trazas de Anfíboles [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i>	55 30 11 4 - - -	5-586 98-9-823 25-645 98-9-5348 - - -	28
3	Tinaco 3 Asbestos133237	Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄ Cuarzo [SiO ₂] Trazas de Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] <i>Trazas de Anfíboles [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i> <i>Trazas de Caolinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄]</i>	79 8 9 4 - -	5-586 43-662 46-1045 98-9-5348 - -	35
En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica CM = Cristalinidad del material					

RESULTADOS

Gráficos

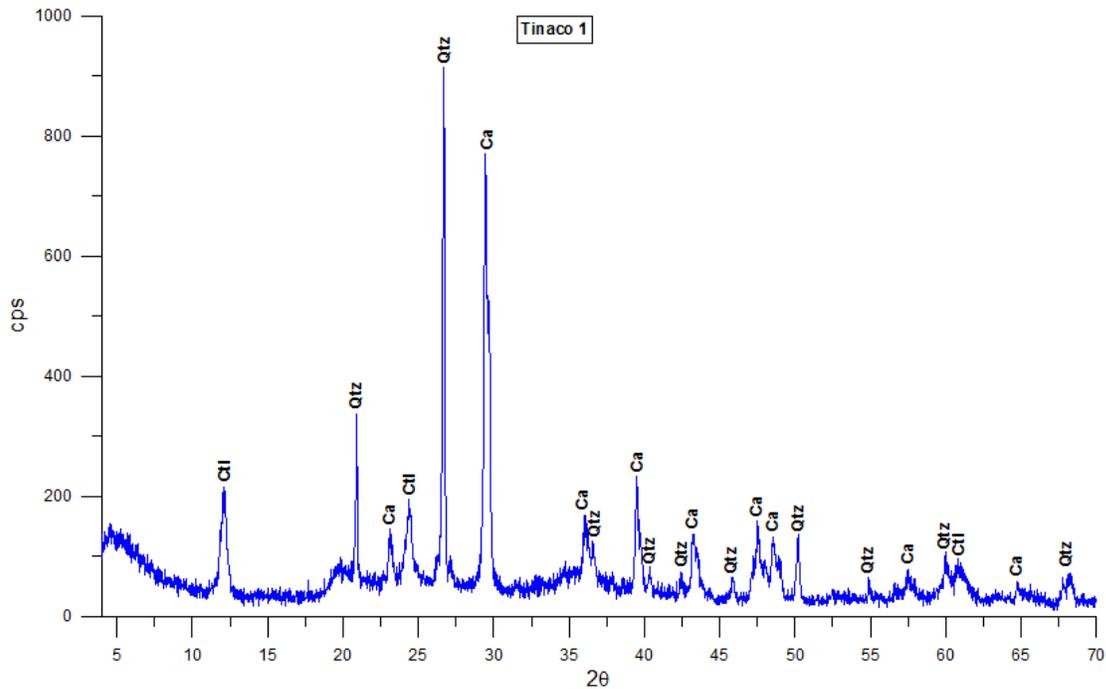


Figura 4.13. Difractograma de la muestra *tinaco 1*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

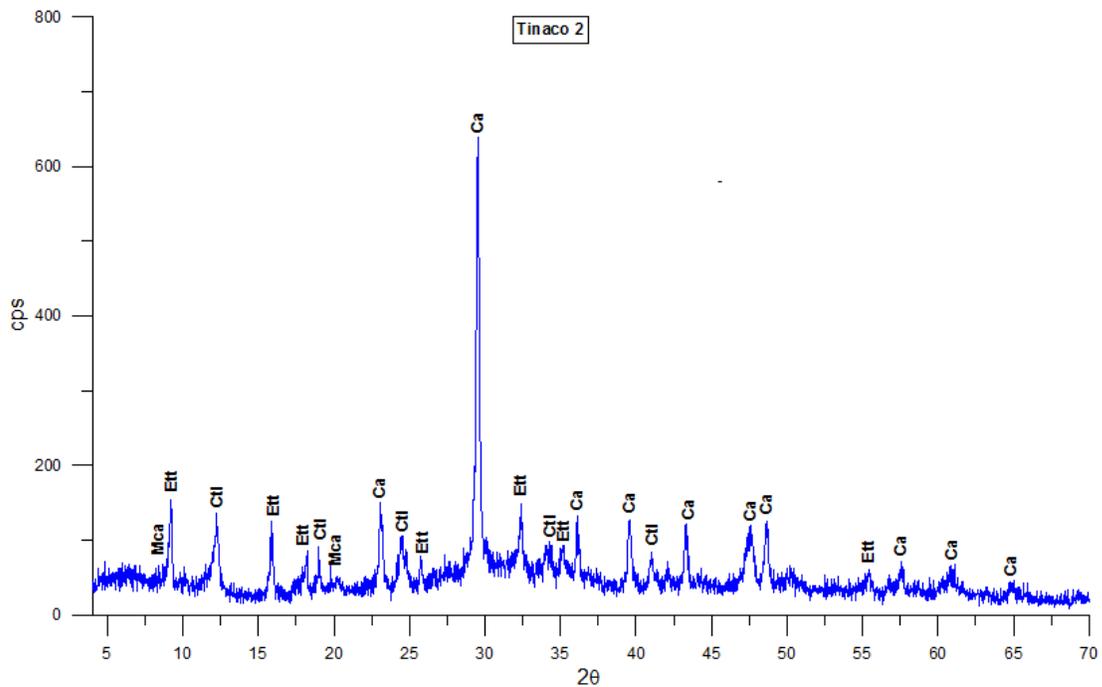


Figura 4.14. Difractograma de la muestra *tinaco 2*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

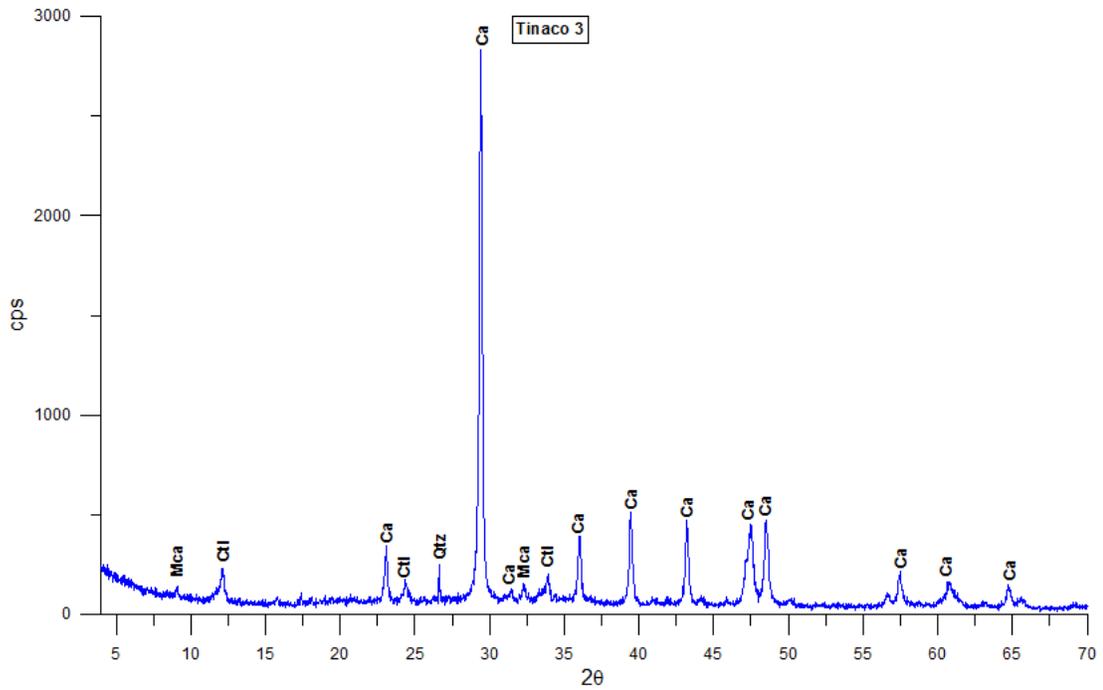


Figura 4.15. Difractograma de la muestra *tinaco 3*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación gráfica

Sobreponiendo los difractogramas de cada uno de los tinacos, se observa que las fases comunes en éstos son la calcita, el cuarzo y el crisotilo, este último mostrándose con porcentajes que varían del 8 al 18%. Otros posibles minerales presentes en todos los tinacos son los anfíboles asbestiformes, los cuales no se han podido comprobar debido a que probablemente se encuentren en cantidades muy pequeñas, pero que no se descartan porque geológicamente es posible encontrarlos con el crisotilo.

Entre las fases que no se presentan en todas las muestras de tinaco que se estudiaron son la ettringita y el yeso que únicamente los contiene el *tinaco 2*, la caolinita y las micas exclusivamente en los *tinacos 2 y 3*, y los feldespatos presentes en los tinacos 1 y 2.

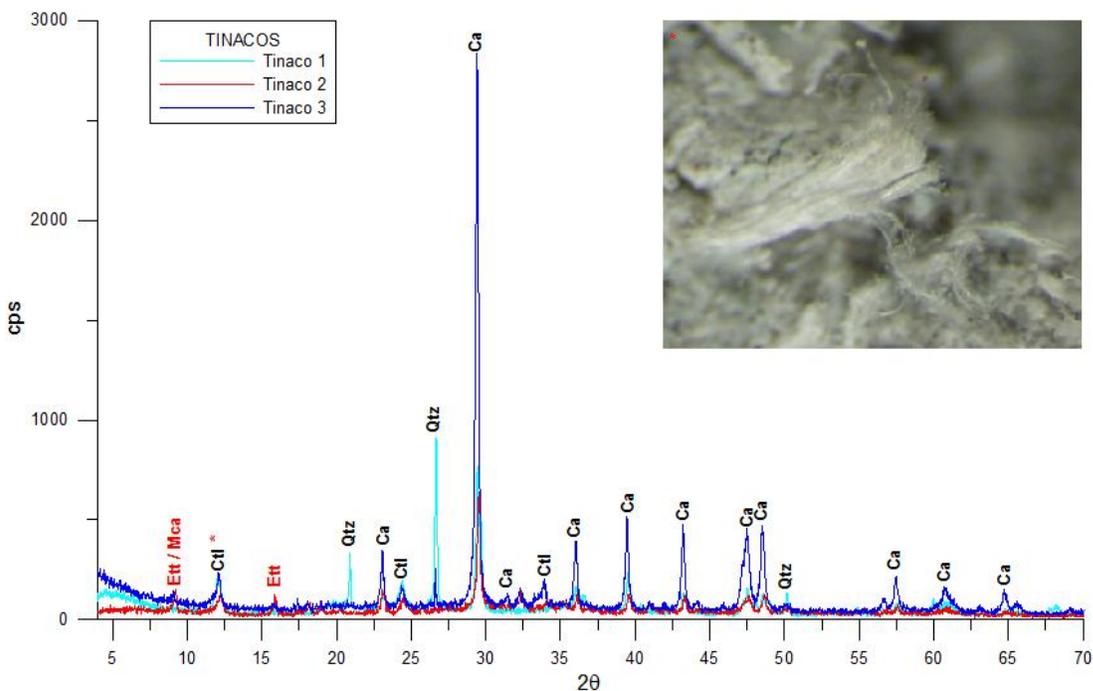


Figura 4.16. Difractogramas sobrepuestos de los *tinacos 1, 2 y 3* en donde se indican en letras negras las fases comunes entre los tres materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en uno o dos tinacos. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983. En la esquina superior derecha se observa una foto de un trozo del *Tinaco 2*, tomada con el microscopio estereoscópico (20x), donde se observan las fibras de crisotilo que componen el tinaco.

Resultados por Microscopia Electrónica de Barrido

Tinaco 1

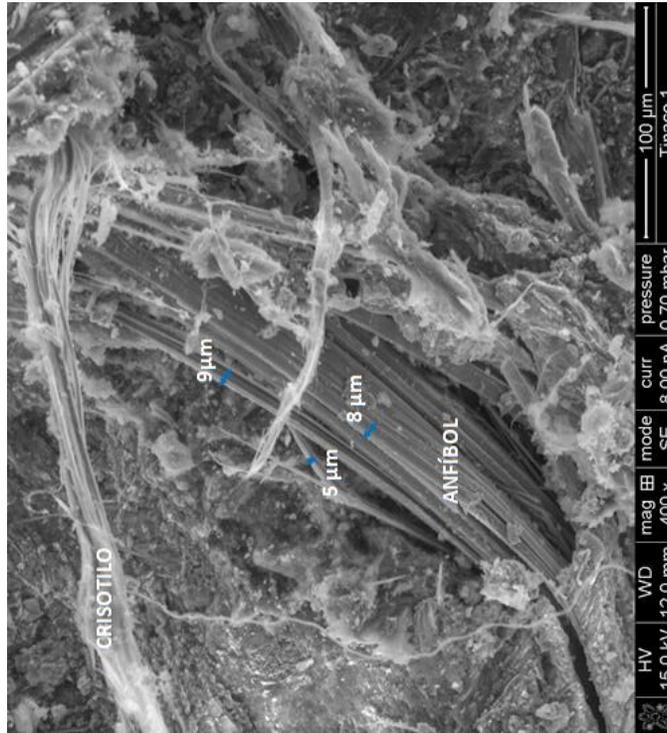


Figura 4.17.A. Fibra de crisotilo y anfíbol con vista de 100 μm. Ambas fibras muestran longitudes mayores a 100 μm. Se observa que la fibra de anfíbol al igual que la de crisotilo está compuesta por fibras más delgadas, pero que en comparación con las de crisotilo tienen un diámetro mayor que ronda entre 5-9 μm aproximadamente, además de estar más compactas entre sí.

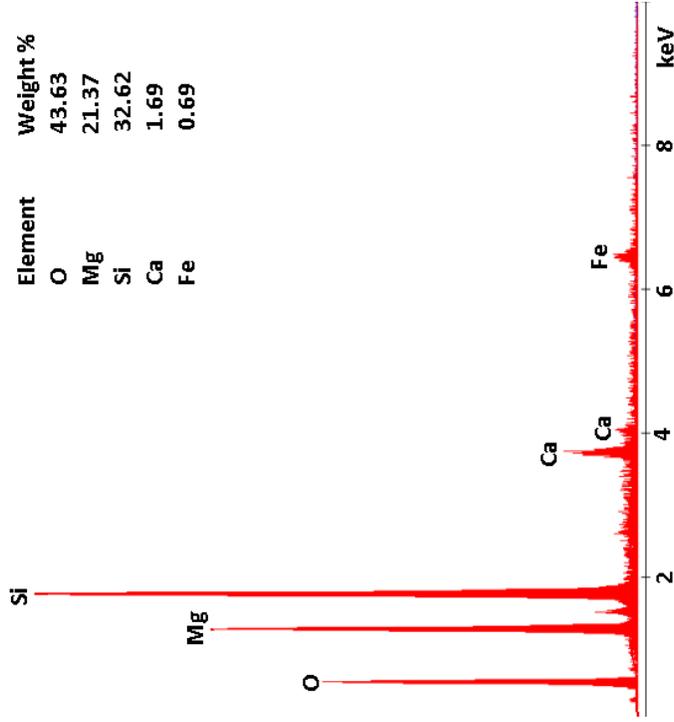


Figura 4.17.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de anfíbol que se observa en la *Figura 4.17.A.* La composición elemental indica presencia de 0.69% de Fe en la misma.

Tinaco 1

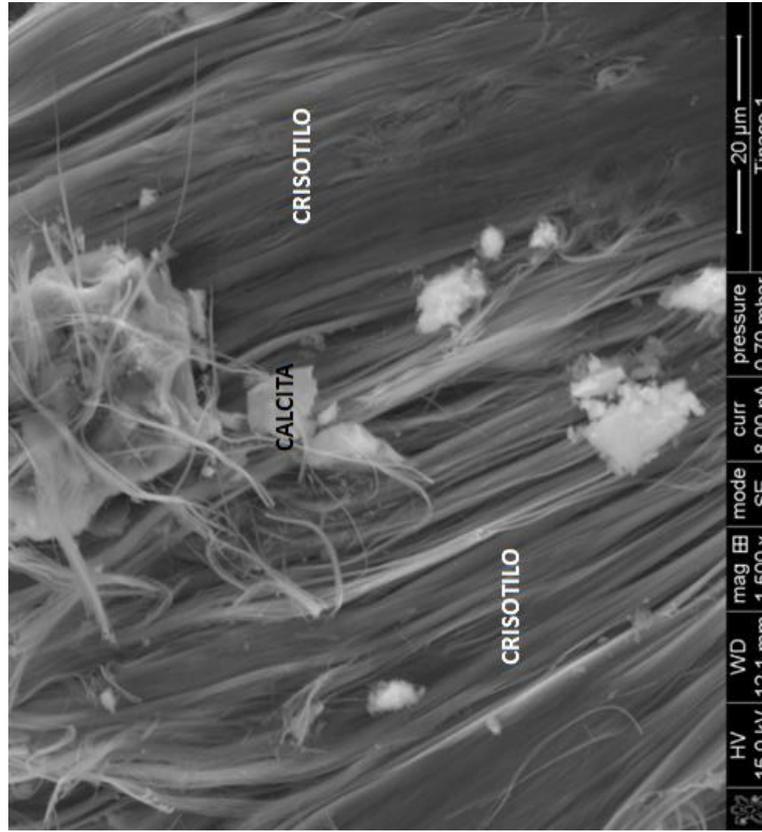


Figura 4.18.A. Fibra de crisotilo a 20 µm. Se observa la separación de fibrillas con diámetros muy pequeños. Entre esas fibrillas se observan cristales de calcita, siendo ésta una fase muy común en la composición de los productos estudiados.

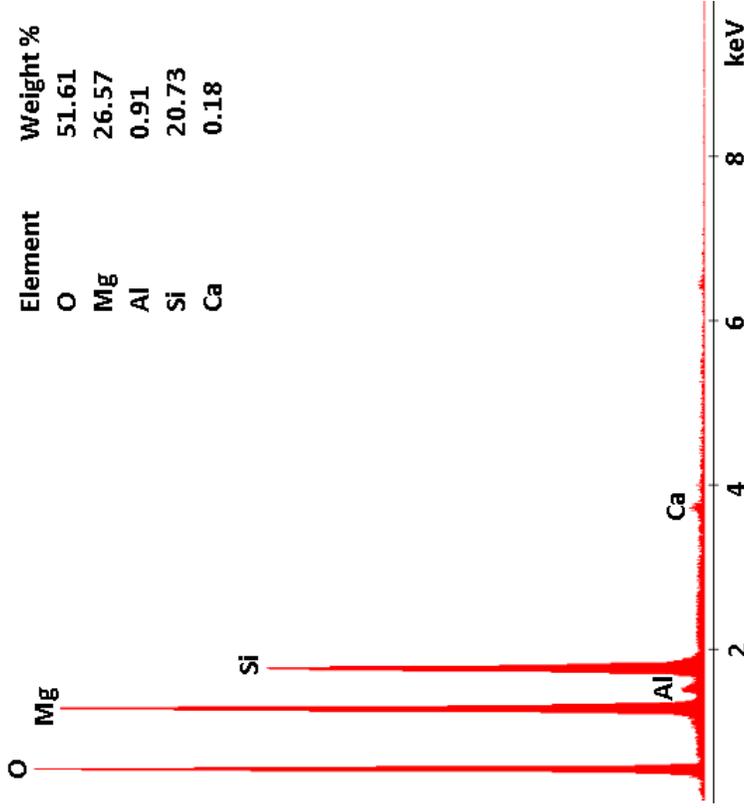


Figura 4.18.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de crisotilo que se observa en la *Figura 4.18.A*. La composición elemental no indica presencia de Fe en la misma.

Tinaco 1

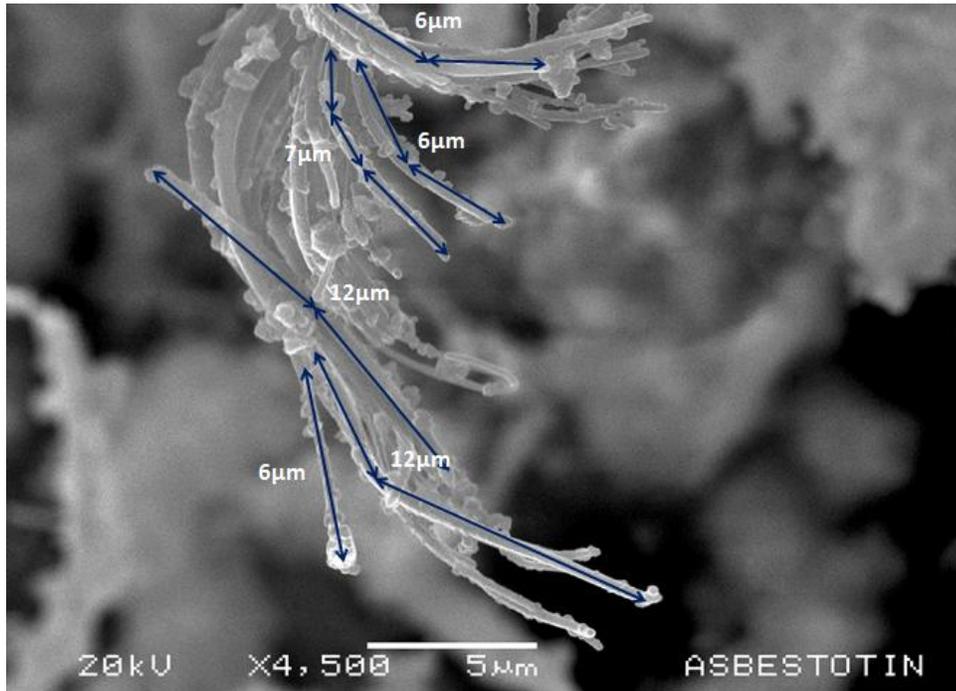


Figura 4.19. Fibras de crisotilo en la muestra de *tinaco 1*, a una escala de 5 μm. El largo de las fibras varía entre 6 y 12 μm.

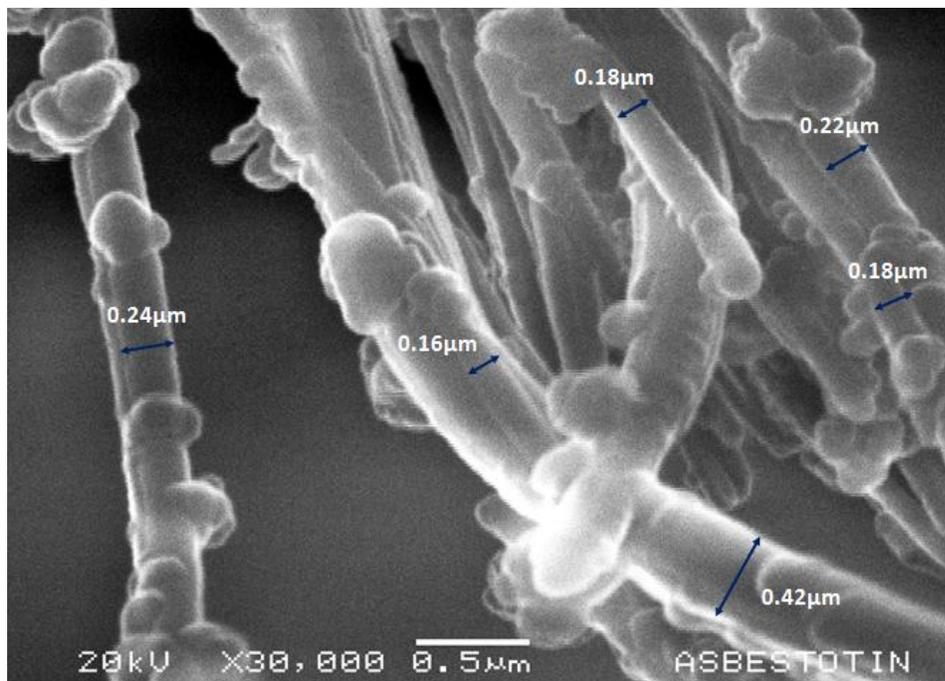


Figura 4.20. Fibras de crisotilo en la muestra de *tinaco 1*, a 0.5 μm. El ancho de las fibras es de 0.16 a 0.24 μm.

RESULTADOS

4.1.1.3. Otros asbestos

Dentro de este grupo se incluyeron seis materiales de diversa naturaleza, así pues se analizó asbesto comprimido, cartón de asbesto, tela de asbesto, cuerda de asbesto, polvo de asbesto y un aislante térmico (protección asbesto).

El asbesto comprimido presenta color gris oscuro, con pequeñas manchas blancas; es flexible, pero quebradizo; texturalmente es terroso, suave y liso; se asemeja al plástico. A simple vista es posible ver que las fibras de amianto que lo constituyen tienen longitudes no mayores a 3 milímetros.

El cartón de asbesto tiene coloración gris claro, casi blanca; se rompe fácilmente; presenta textura rugosa, sin embargo al tacto es suave y flexible; las fibras de crisotilo se observan a nivel macroscópico. Industrialmente el cartón de asbesto se utiliza como aislante para estufas, calentadores, hornos y otros procesos donde se requiera proteger contra fuego y calor, se utiliza también para sellar bridas y otras superficies paralelas en equipos que manejen gases calientes producidos por combustión y otros medios similares. Sirve como barrera cortafuego, como recubrimiento para refractarios en la cara exterior, para la fabricación de juntas y/o empaques sujetas a altas temperaturas, y para dar cierta dureza a otros materiales.

Por su parte, la tela de asbesto es de color blanco, tiene un grosor de 4 milímetros, es suave y terrosa, las fibras de amianto que la conforman se desprenden fácilmente, a vista macroscópica dan la apariencia de ser polvo; este tipo de tela se utiliza principalmente como aislante térmico en hornos, se emplea también para la fabricación de ropa de seguridad (guantes, trajes para bomberos), mamparas térmicas, cubiertas, aislamiento de tuberías y empaques sujetos a compresiones y esfuerzos moderados, para bandas transportadoras.

El polvo de asbesto presenta color blanco grisáceo, al tacto es terroso y suave. Es el activo principal en una gran variedad de productos manufacturados, primordialmente en materiales de construcción (tejas, baldosas y azulejos, productos de papel y productos de cemento con asbesto), productos de fricción (embrague de automóviles, frenos, componentes de la transmisión), materiales textiles termo-resistentes, envases, paquetería y revestimientos, equipos de protección individual y pinturas.

La cuerda de asbesto es blanca con coloraciones grisáceas, las fibras que la componen son largas algunas de aproximadamente 1.5 centímetros, no obstante contiene otras más pequeñas, las cuales son fácilmente desprendibles; es un material flexible. Estas cuerdas se usan para el aislamiento en tuberías, manoplas aislantes, escapes, para sellar las puertas de hornos, se utiliza en medios de vapor, gases y la mayoría de las soluciones acuosas, especialmente como sello en compuertas de calderas.

La muestra aquí llamada *protección de asbesto* es de color blanco, texturalmente es lisa y terrosa, es compacta, en esta muestra las fibras de asbesto blanco y marrón se pueden ver a simple vista. Funciona como aislante térmico.

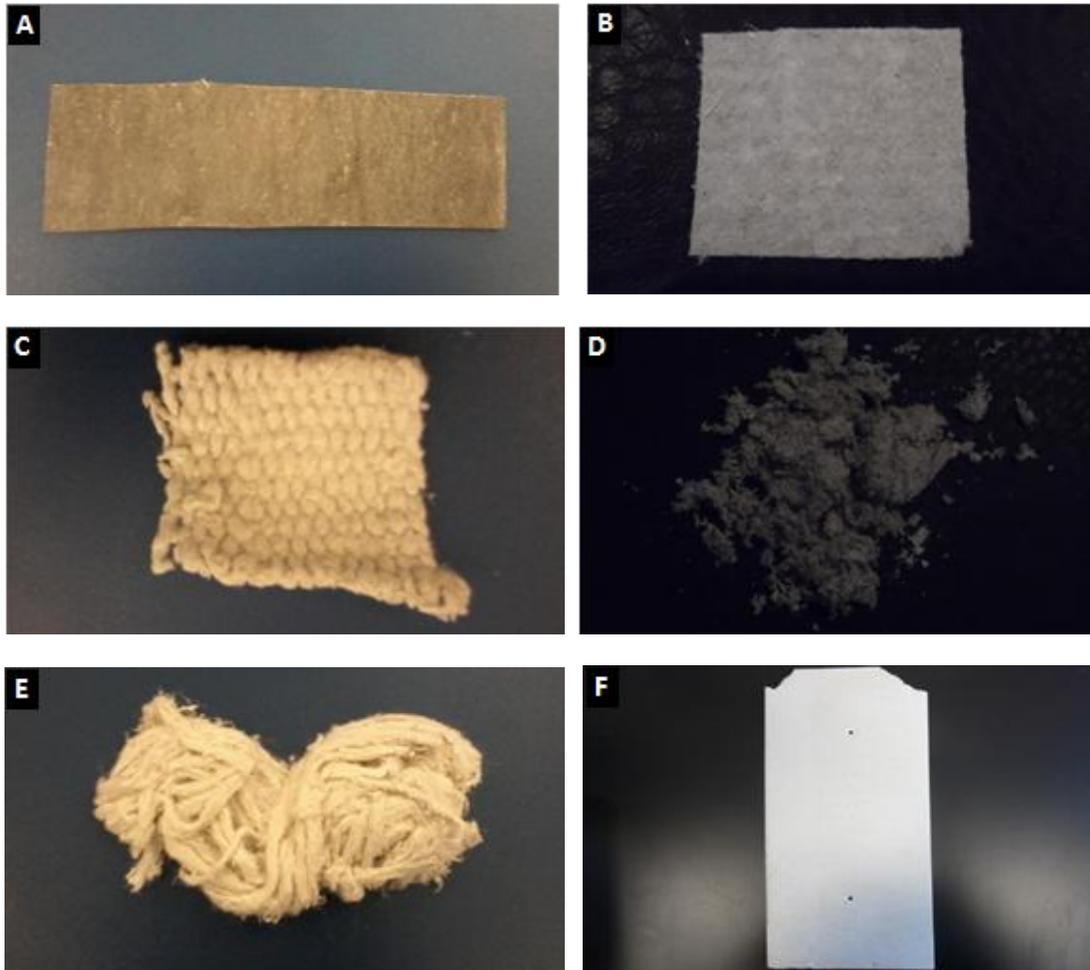


Figura 4.21. Grupo de materiales incluidos en *otros asbestos*. Asbesto comprimido en A, cartón de asbesto en B, tela de asbesto en C, polvo de asbesto en D, cuerda de asbesto en E, y aislante térmico en F.

RESULTADOS

Resultados por Difracción de Rayos X

Para estos productos los análisis indican que el mineral con mayor abundancia en gran parte de ellos es el crisotilo, el cual generalmente se presenta en dos de sus formas: como ortocrisotilo y clinocrisotilo (composicionalmente ambos tipos de crisotilo son iguales, sin embargo se diferencian por el sistema cristalino en el que crecen, así pues, el clinocrisotilo crece en el sistema monoclinico, mientras que el ortocrisotilo lo hace en el sistema ortorrómbico), a veces cualquiera de estos dos o ambos politipos llegan a ocupar el 100% de la composición mineralógica total, como es el caso del cartón y la cuerda de asbesto; sin embargo también hay otros casos donde además del crisotilo están presentes otras fases como la calcita, el cuarzo, la pirofilita y los feldespatos, y minerales pertenecientes al grupo de los anfíboles y las micas.

Tabla 4.3. Análisis de roca total de *otros asbestos* sin tratarlos con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	AsbestoComprimido 123118	Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄ Trazas de Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Trazas de Cuarzo [SiO ₂] <i>Trazas de Anfíbol [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i> <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i> <i>Trazas de Talco [Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂]</i>	67 27 3 3 - - -	5-586 25-645 98-9-5348 46-1045 - - -	44
2	CartonAsbesto 204305	Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄	100	25-645	26
3	Tela Asbesto 130423	Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄ Antofilita [Mg₇Si₈O₂₂(OH)]₂ <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i> <i>Trazas de Mica [AC₂₋₃T₄O₁₀X₂]</i>	80 20 - -	22-1162 98-3-254 - -	25
4	Polvo Asbesto 200849	Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄ Calcita [CaCO ₃] Pirofilita [Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂] <i>Trazas de Anfíbol [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i> <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i>	61 22 17 - -	98-41-3633 5-586 98-20-1705 - -	28
5	Cuerda asbesto bis Asbestos143952	Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄	100	98-41-363	22
6	ProteccionAsbesto Asbestos160535	Calcita [CaCO ₃] Grunerita (Amosita) [(Fe²⁺)₇Si₈O₂₂(OH)]₂ Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)]₄ Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] <i>Interestratificado</i>	29 26 21 18 7 -	5-58 98-2-4590 46-1045 43-662 98-9-5348 -	28

Grunerita = Amosita (variedad fibrosa de la Grunerita). En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica. CM = Cristalinidad del material

Gráficos

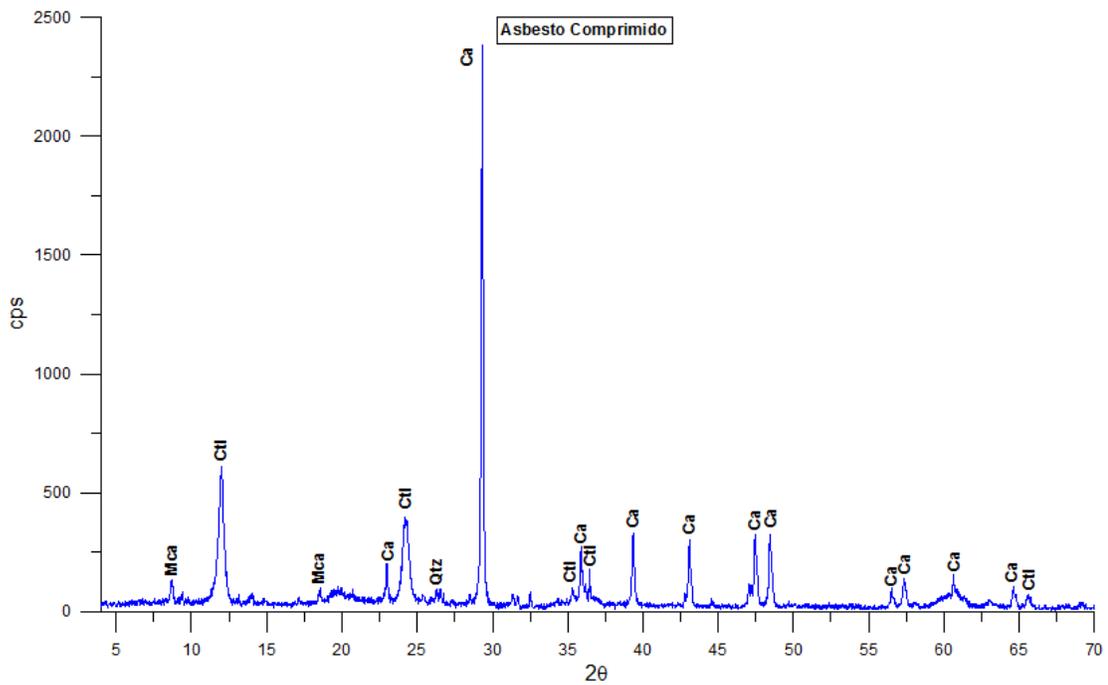


Figura 4.22. Diffractograma de la muestra *asbesto comprimido*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

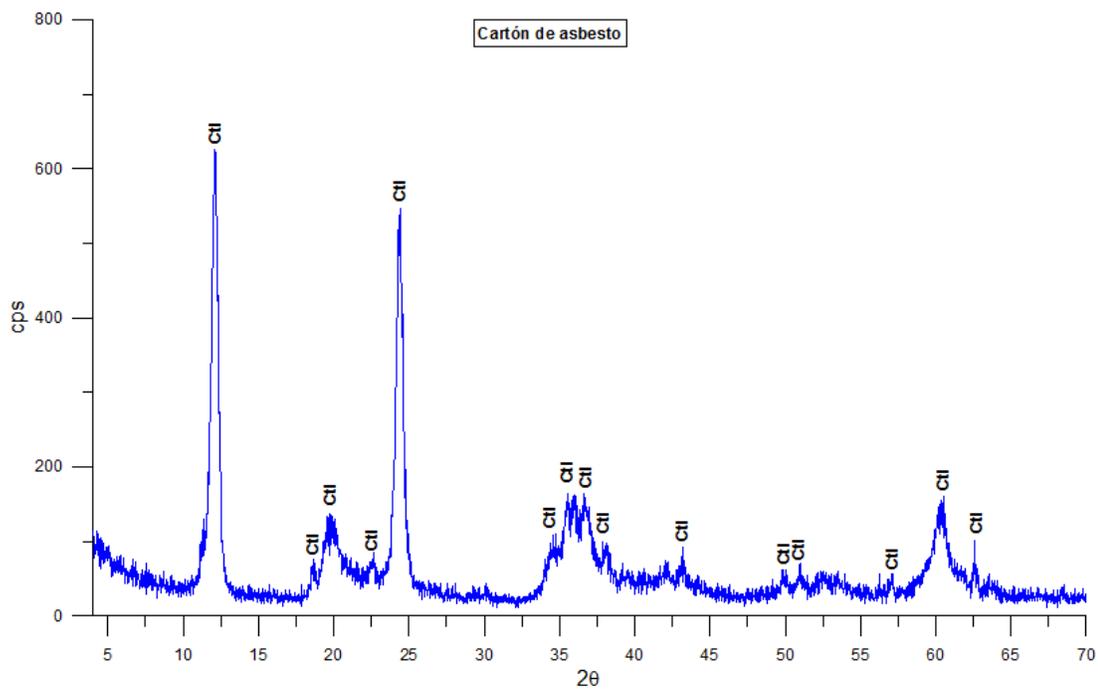


Figura 4.23. Diffractograma de la muestra *cartón de asbesto*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

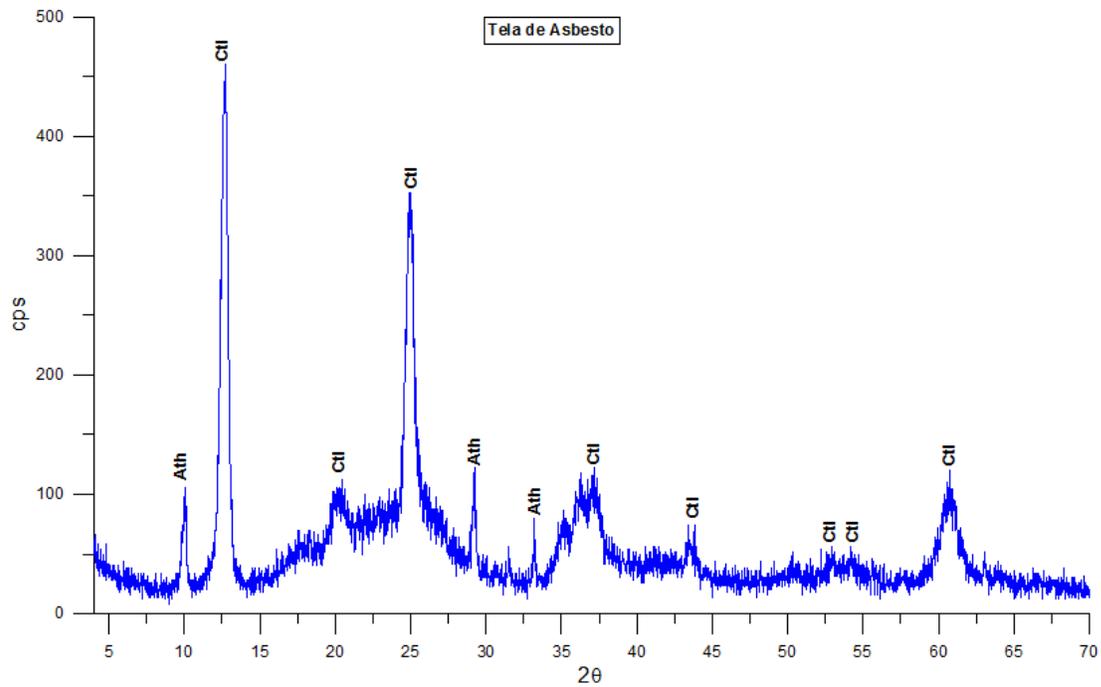


Figura 4.24. Difractograma de la muestra *tela de asbesto*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

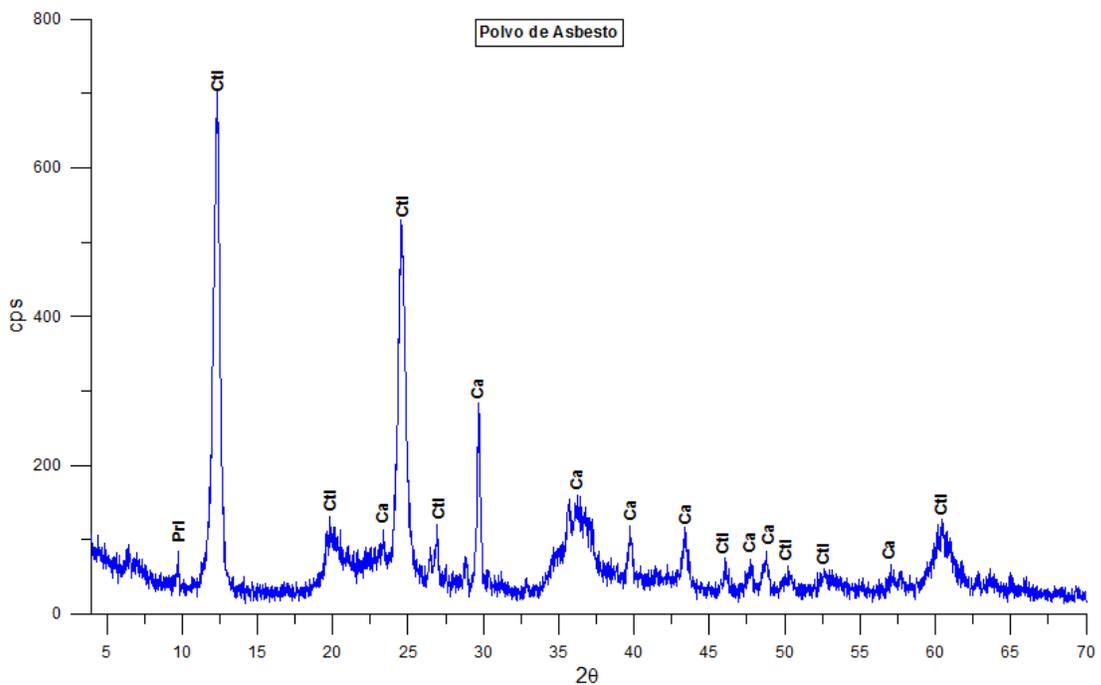


Figura 4.25. Difractograma de la muestra *polvo de asbesto*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

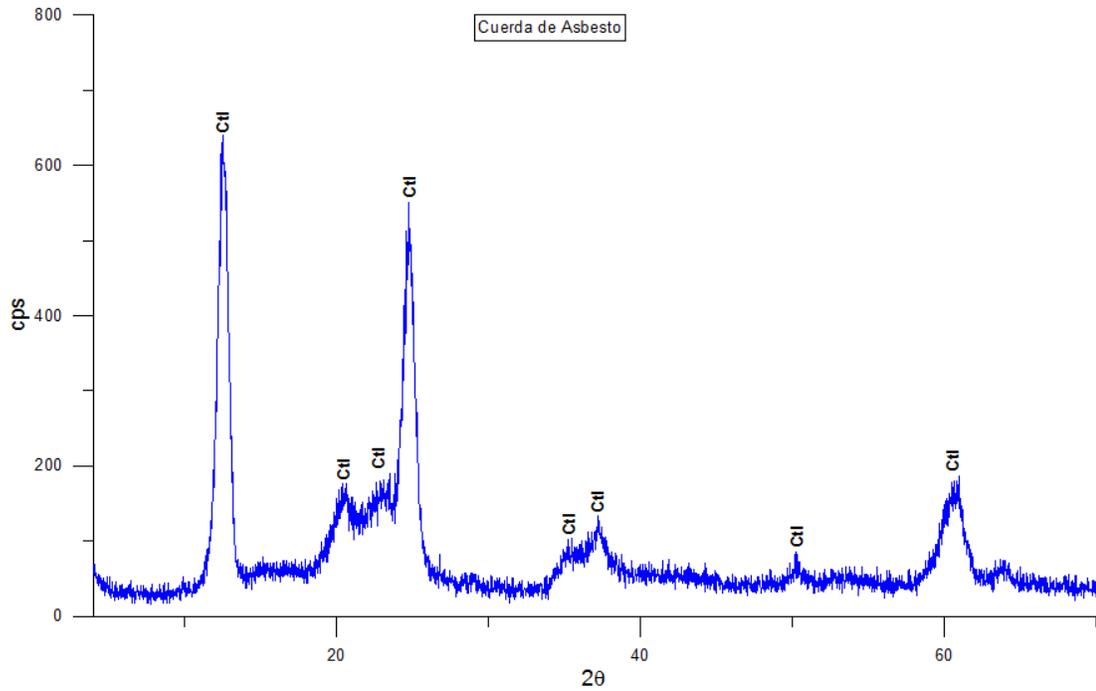


Figura 4.26. Difractograma de la muestra *cuerda de asbesto*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

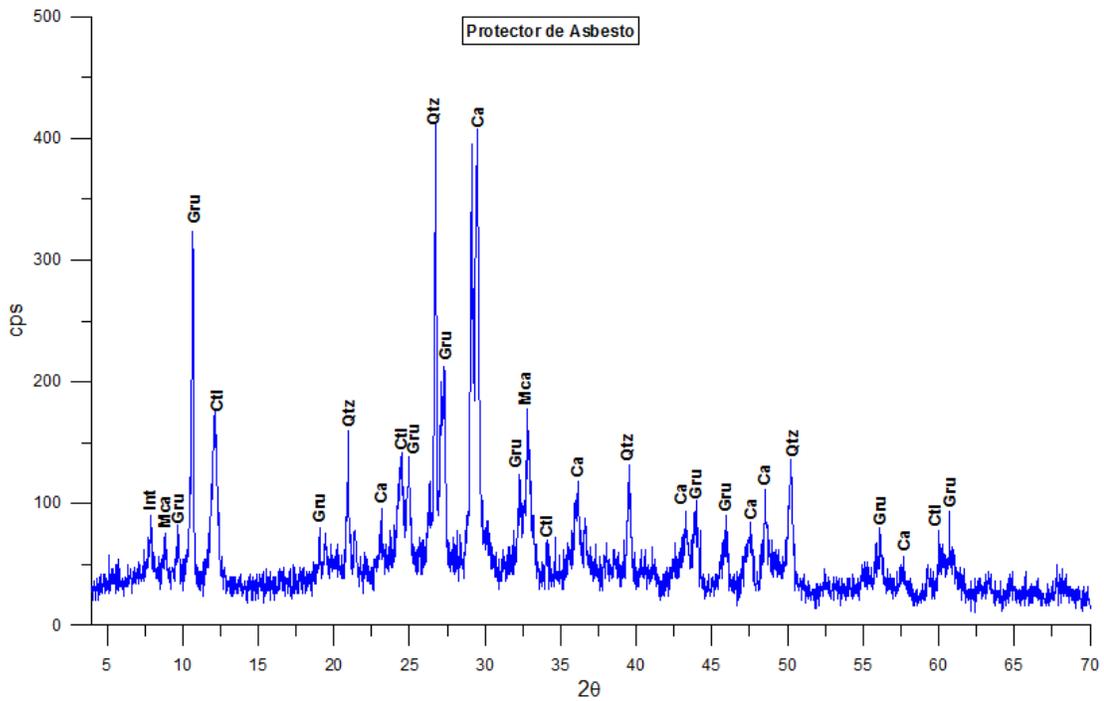


Figura 4.27. Difractograma de la muestra *protector de asbesto*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación gráfica

Con base en estos resultados y en las observaciones en muestra de mano, en principio se pueden clasificar como los materiales más peligrosos a la cuerda de asbesto, la tela de asbesto y el polvo de asbesto, ya que las fibras que contienen al no encontrarse dentro de una matriz sólida, son fácilmente desprendibles y por consiguiente inhalables.

Al comparar entre sí el patrón de difracción obtenido por cada uno de los materiales estudiados, se concluye que el mineral básico para la fabricación de la mayoría de ellos es el crisotilo, representando éste un valor que va desde el 18% hasta el 100%. Por su lado, las variedades de anfíboles asbestiformes ocupan entre el 20 y 26%.

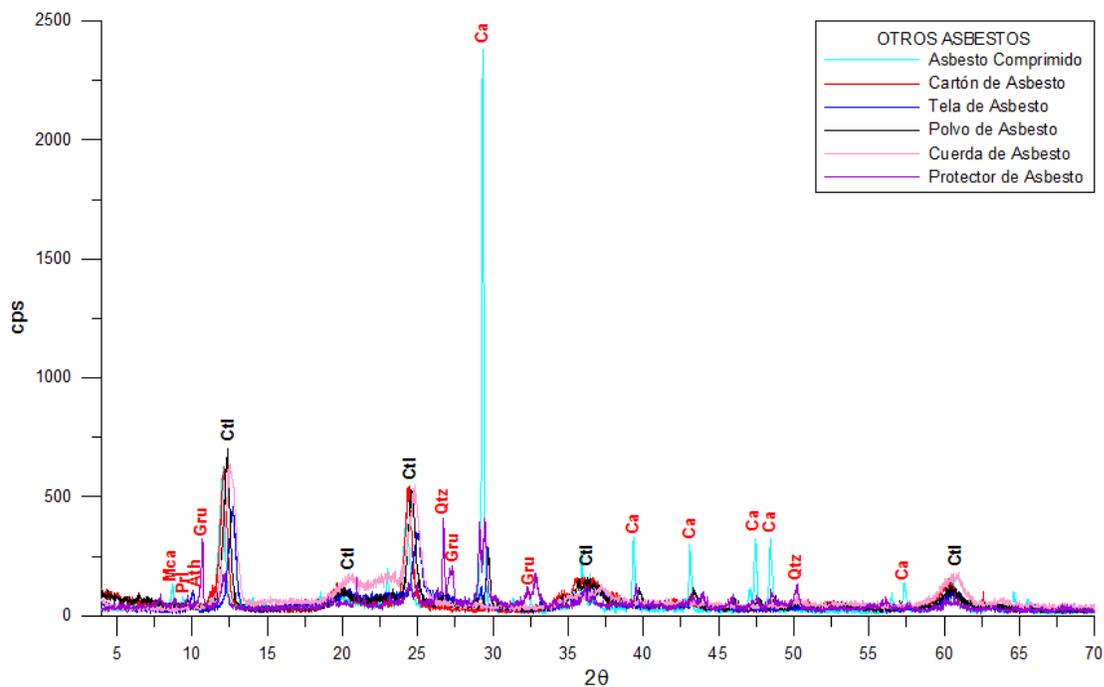


Figura 4.28. Difractogramas sobrepuestos de *otros asbestos* en donde se indican en letras negras las fases comunes en todos los materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en uno o dos materiales. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Resultados por Microscopía Electrónica de Barrido

Asbesto comprimido

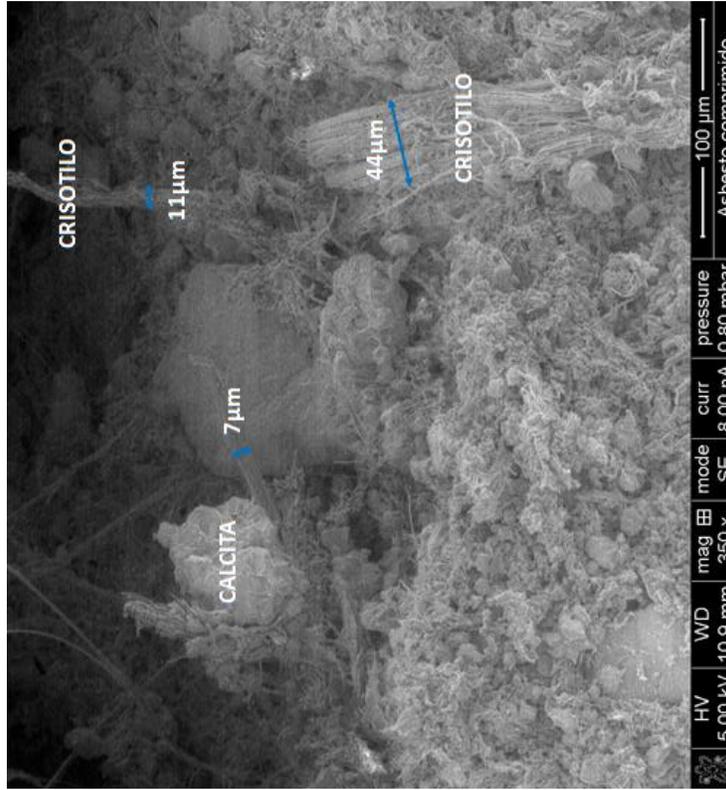


Figura 4.29. Vista general del Asbesto comprimido a 100 μm. Se distinguen las fibras de crisotilo intercaladas en una matriz compuesta por calcita. Tales fibras son mayores en tamaño al valor de la escala utilizada y sus diámetros están en el rango que va de 7 μm a 44 μm aproximadamente.

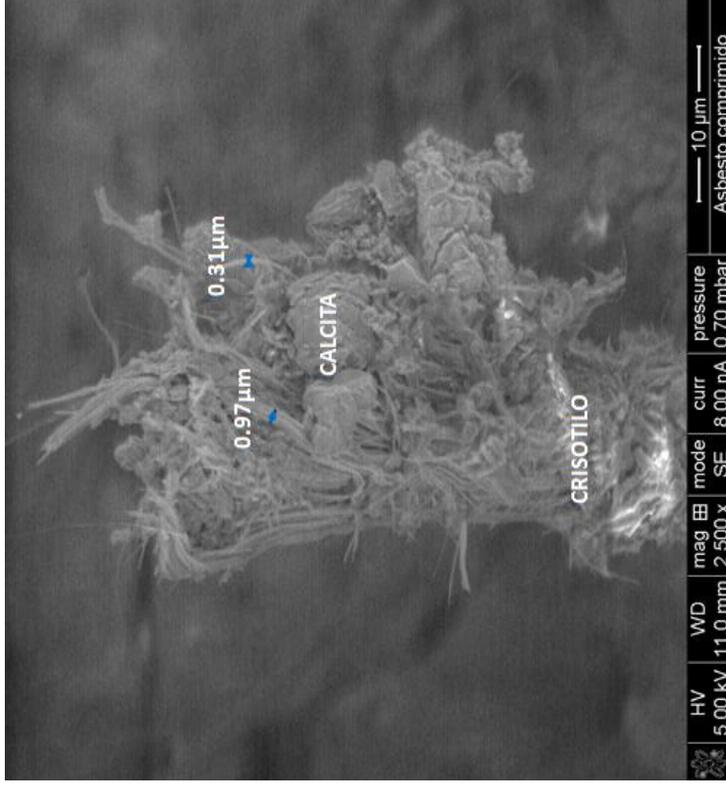


Figura 4.30. Fibra de crisotilo en el asbesto comprimido, vista a 10 μm. Se observan también cristales de calcita intercalados con las fibras.

Cartón de asbesto

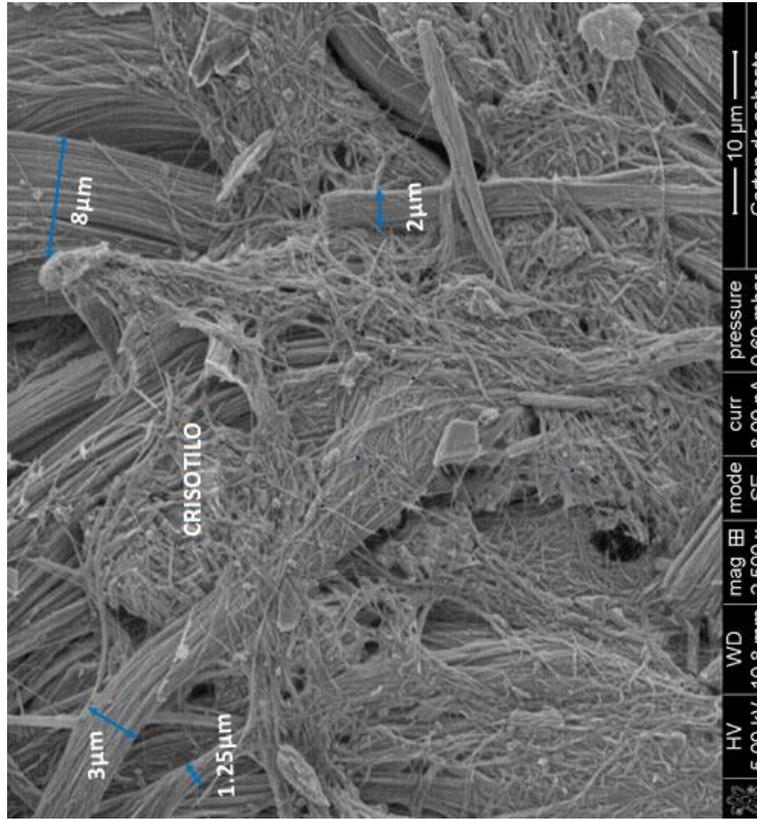


Figura 4.31. Vista general del cartón de asbesto a 10 µm. Se observan algunas fibras compactas que en su conjunto tienen diámetros de 1.25-8 µm aproximadamente, se ven también otras con diámetros aún más pequeños de entre 0.12-0.25 µm. Todas las fibras muestran diversas longitudes, algunas de ellas superiores a 10 µm.

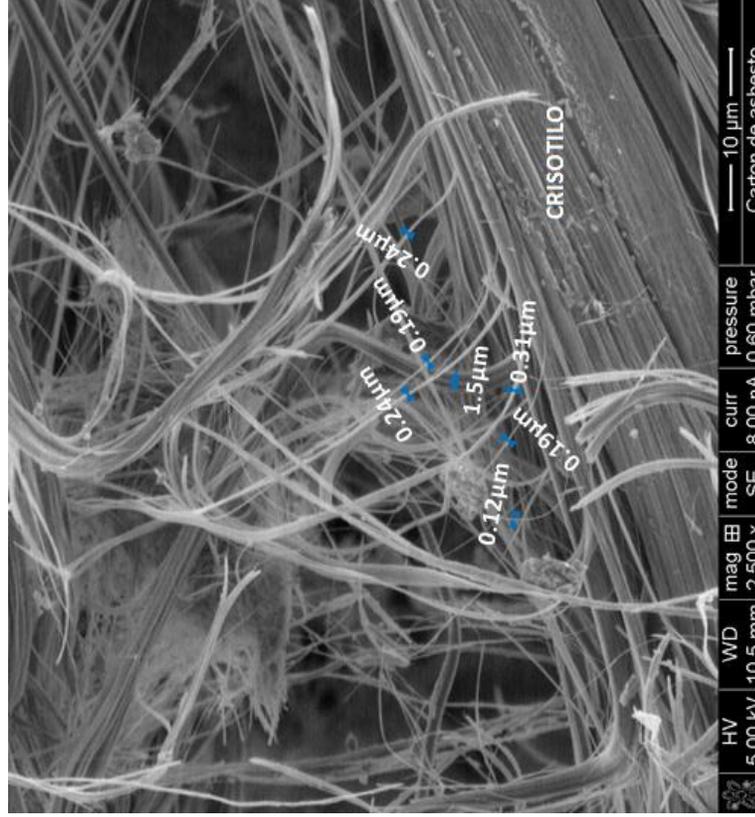


Figura 4.32. Fibra de crisotilo a 10 µm. Se observa la descomposición de la fibra en múltiples fibras, cuyos diámetros oscilan entre 0.12 y 1.5 µm. Se observa también que sus longitudes rebasan las 10 µm.

Polvo de asbesto

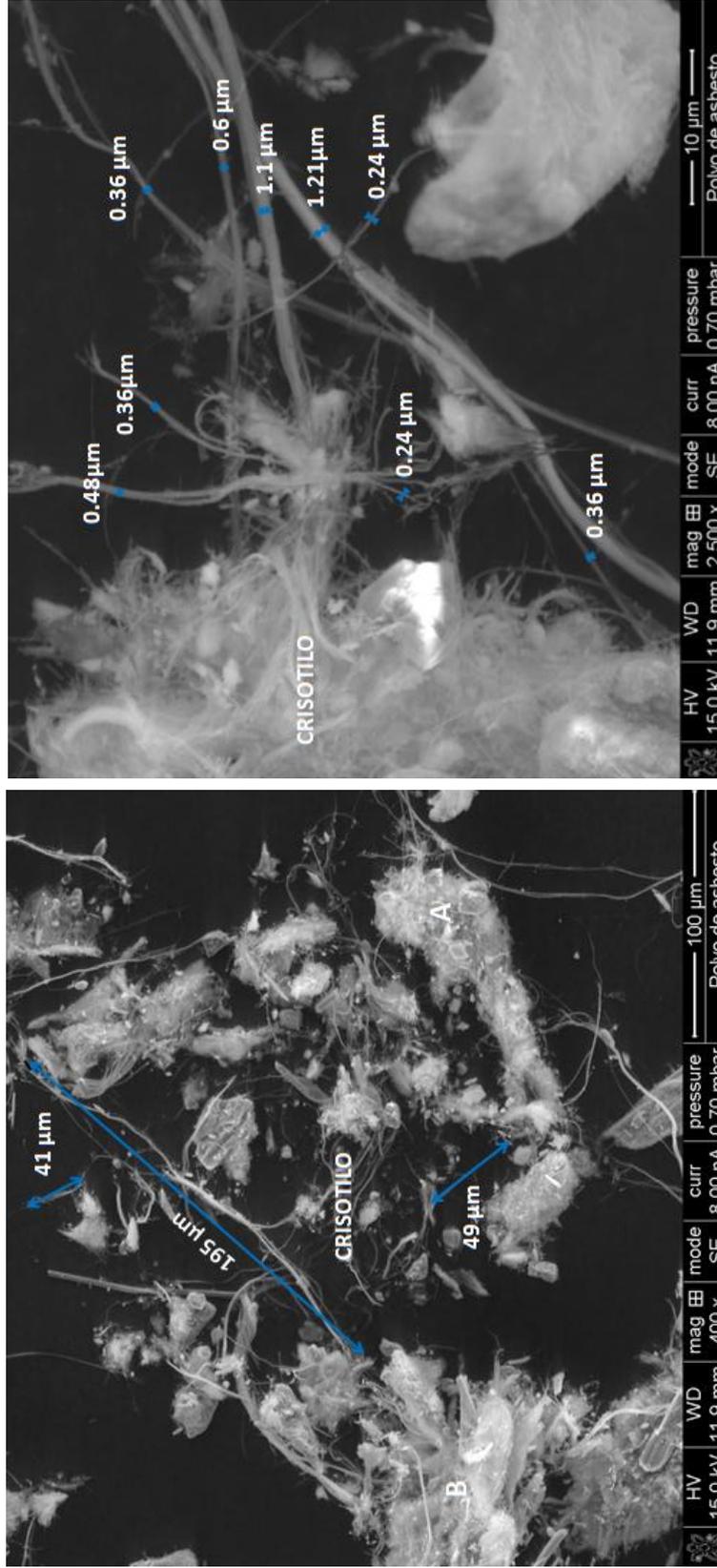


Figura 4.33. Polvo de asbesto a 100 μm . Se observa la gran variedad de tamaños de las fibras, cuyas longitudes van desde las 41 μm hasta las 195 μm . Se observan también agregados de fibras en A y B, donde naturalmente muestran longitudes y diámetros mucho menores.

Figura 4.34. Polvo de asbesto a 10 μm . Los diámetros de las fibras tienen valores en el intervalo de 0.24 a 1.21 μm .

Polvo de asbesto

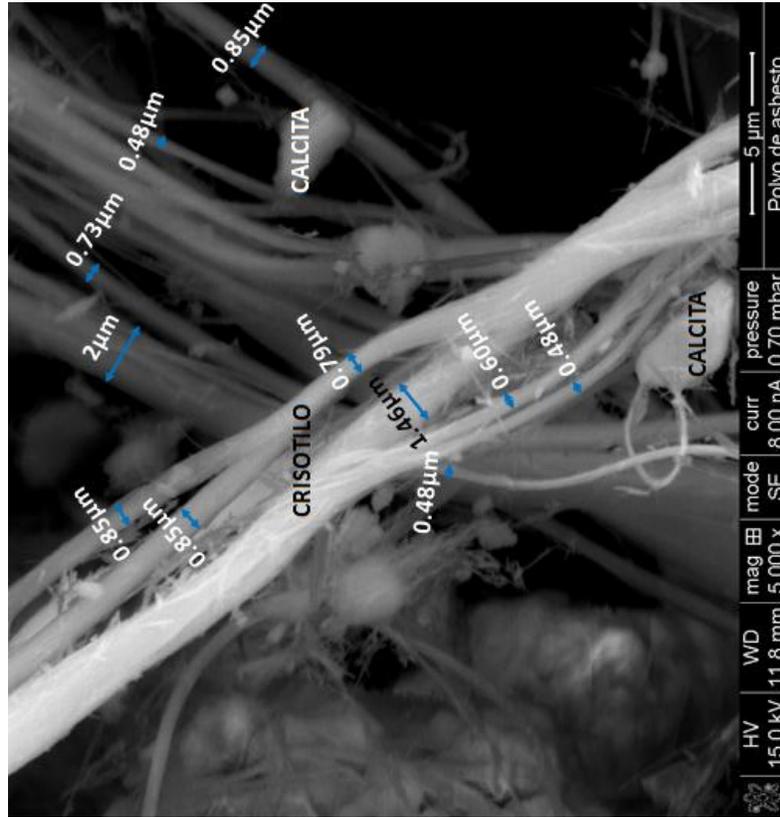


Figura 4.35.A. Fibra de crisotilo a 5 μm. Tales fibras tienen longitudes mayores a 5 μm y exhiben diámetros de 0.48 a 2 μm. Aunados a las fibras se aprecian pequeños cristales de calcita.

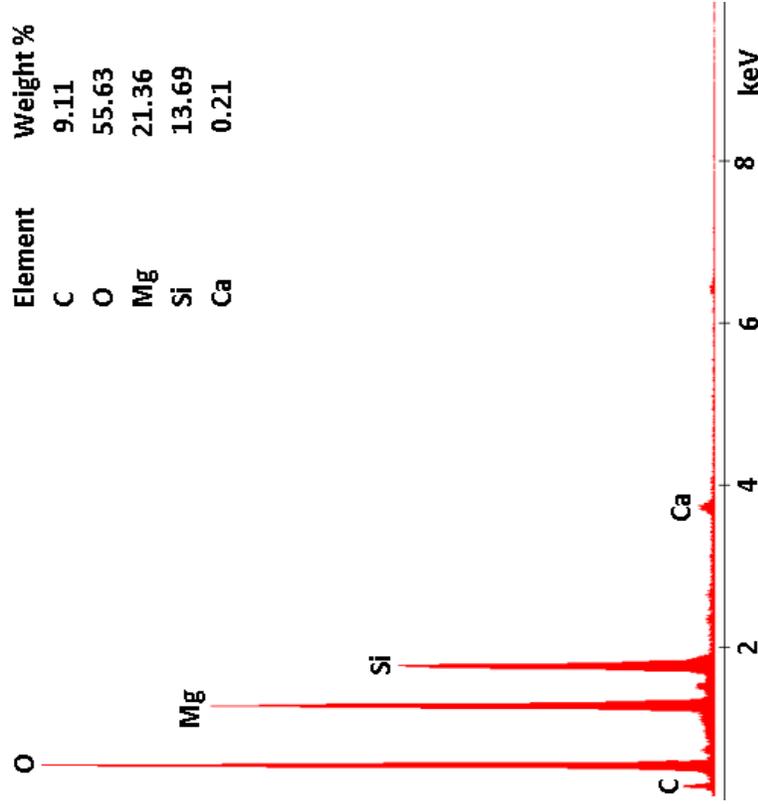


Figura 4.35.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de crisotilo que se observa en la *Figura 4.35.A.* La composición elemental no indica presencia de Fe en la misma.

Cuerda de asbesto

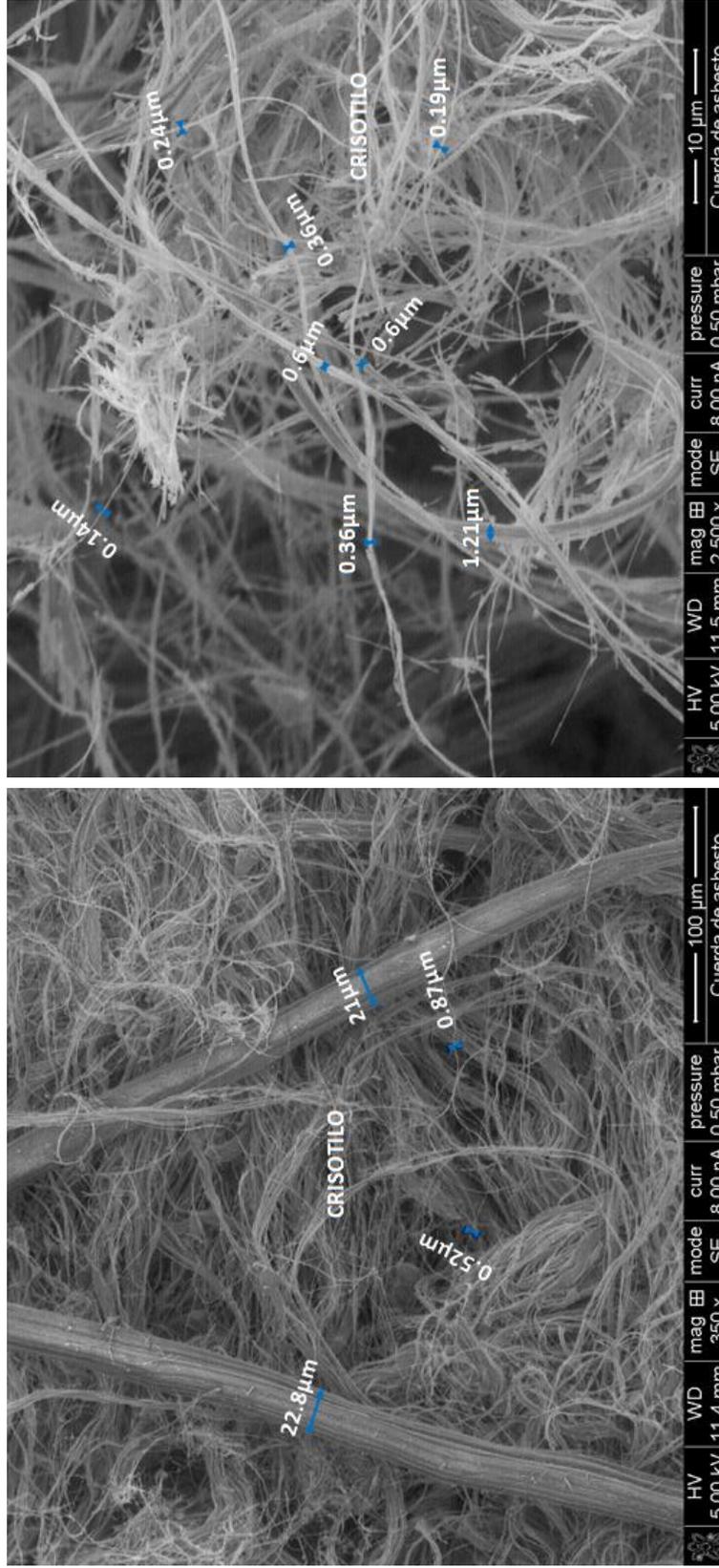


Figura 4.36. Vista general de la cuerda de asbesto a 100 μm. Se observan fibras de gran dimensión y flexibilidad. Algunas de las fibras muestran diámetros de 0.52 a 22.8 μm.

Figura 4.37. Fibras de crisotilo a 10 μm. La serie de fibras que se observan tienen longitudes iguales a 10 μm y algunas otras por debajo de este valor. Sus diámetros van de las 0.19 a las 1.21 μm.

Protector de asbesto (Aislante térmico)

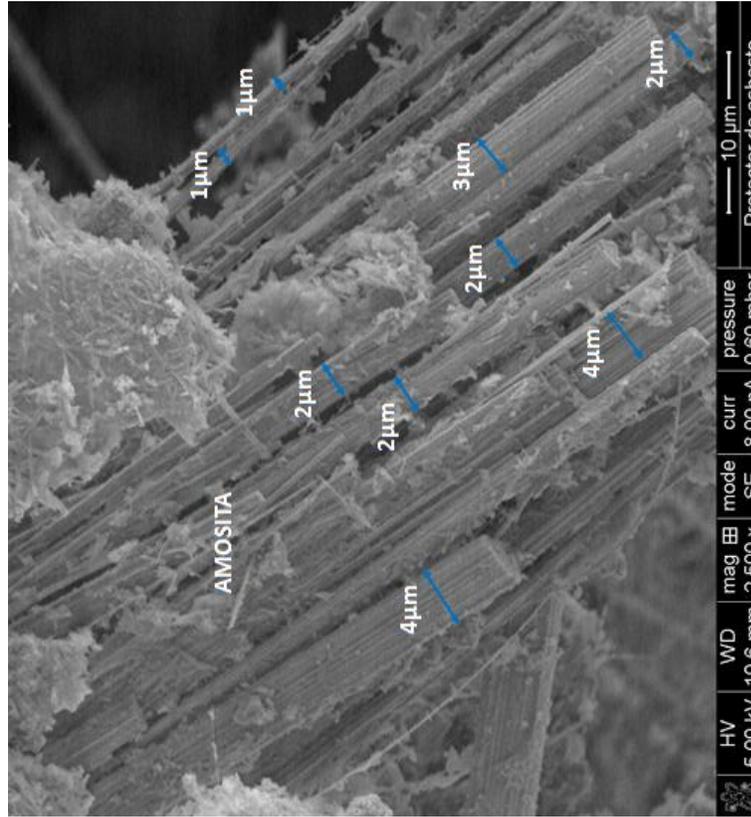


Figura 4.38. Fibra de amosita a 10 μm . Se observa que la fibra está compuesta por fibras más delgadas cuyos diámetros variarían de 1-4 μm .

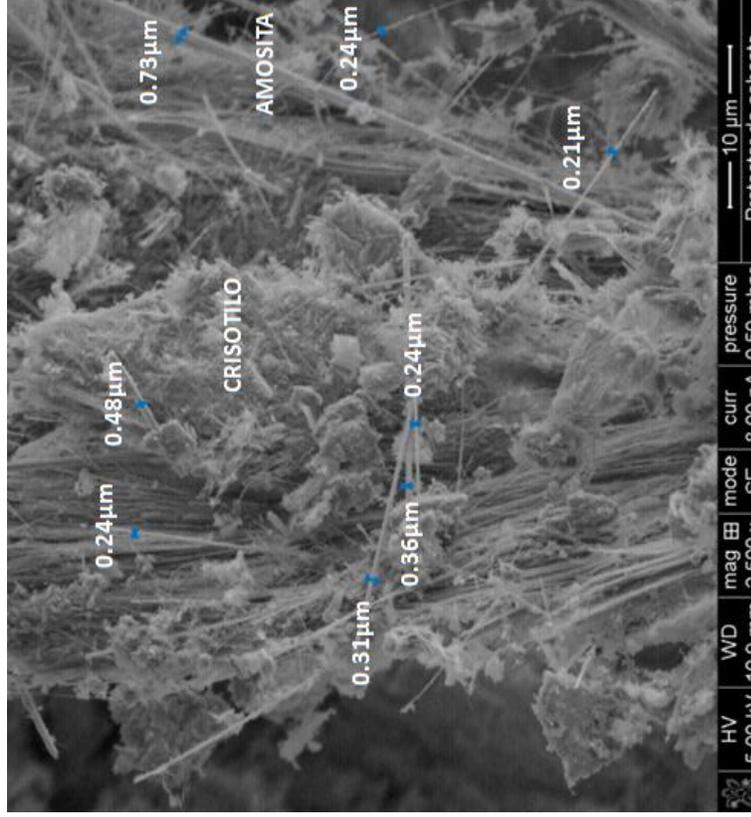


Figura 4.39. Fibras de crisotilo y amosita a una escala de 10 μm , las fibras de crisotilo muestran su característica curvatura y flexibilidad mientras que las de amosita se observan más rígidas. Los diámetros de algunas de ellas varían de 0.21 a 0.73 μm .

4.1.1.4. Materiales para construcción

En esta categoría se analizaron dos tipos de materiales usualmente utilizados en la industria de la construcción, el primero de ellos es el mortero, el cual es de color gris y de tamaño de partícula muy fina. Generalmente se utiliza como material de agarre, para pegar ladrillos, piedras, bloques de hormigón; sirve también para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para el revestimiento de paredes.

El segundo material analizado corresponde a un tipo de concreto sellador, al igual que el mortero es de color gris, y de grano muy fino. Se utiliza como impermeabilizante, para evitar filtraciones, humedad y salitre; para reparar grietas en muros y pisos de concreto, para eliminar la captación de agua entre dos muros, para reforzar losas de concreto para tránsito pesado, para emboquillar pisos en azoteas y exteriores y para anclaje y fijación de maquinaria y muebles de baño.

Físicamente ambos materiales son muy parecidos.

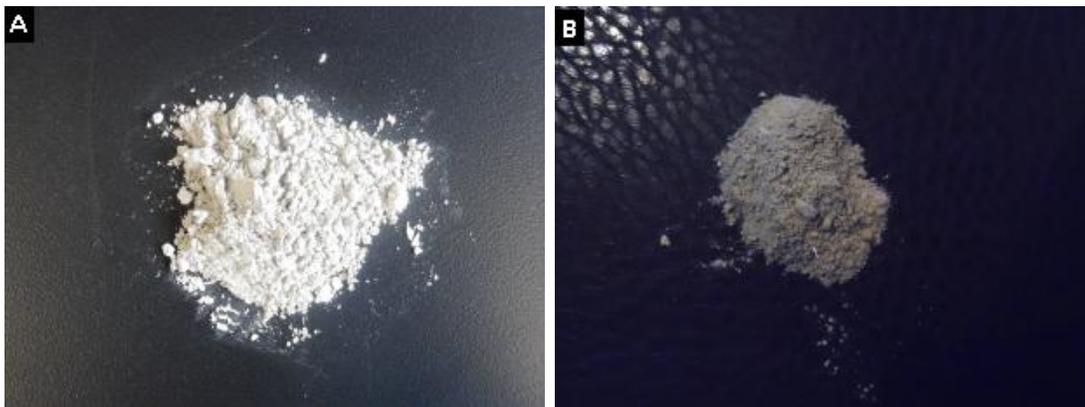


Figura 4.40. Muestra del *mortero* en A y del *concreto sellador* en B.

Resultados por DRX

Tomando en cuenta la literatura se decidió analizar algunos materiales utilizados en la industria de la construcción, porque reportaban cierto contenido de asbestos. Sin embargo en los análisis de los materiales que se escogieron, se observó que la presencia de éstos es de muy pequeña proporción y que su componente principal es la calcita y la hatrurita.

RESULTADOS

Tabla 4.4. Análisis de Roca Total de *materiales para construcción* sin tratarlos con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Mortero1 Karina123509	Hatrurita [Ca ₃ O ₅ Si]	44	98-2-2501	50
		Calcita [CaCO ₃]	43	5-0586	
		Yeso [CaSO ₄ 2H ₂ O]	7	98-16-1622	
		Trazas de Cuarzo [SiO ₂]	4	46-1045	
		Trazas de Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄]	3	98-10-9356	
2	Concreto Sellador 193514	Calcita [CaCO ₃]	62	5-0586	39
		Hatrurita [Ca ₃ O ₅ Si]	17	98-2-4452	
		Yeso [CaSO ₄ 2H ₂ O]	11	98-2-7221	
		Trazas de Cuarzo [SiO ₂]	6	98-3-6225	
		Trazas de Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄]	4	46-1045	

En negritas se indican las fases asbestiformes.
 En cursiva se indican las fases que son posibles.
 SM = Semicuantificación mineralógica
 CM = Cristalinidad del material

Gráficos

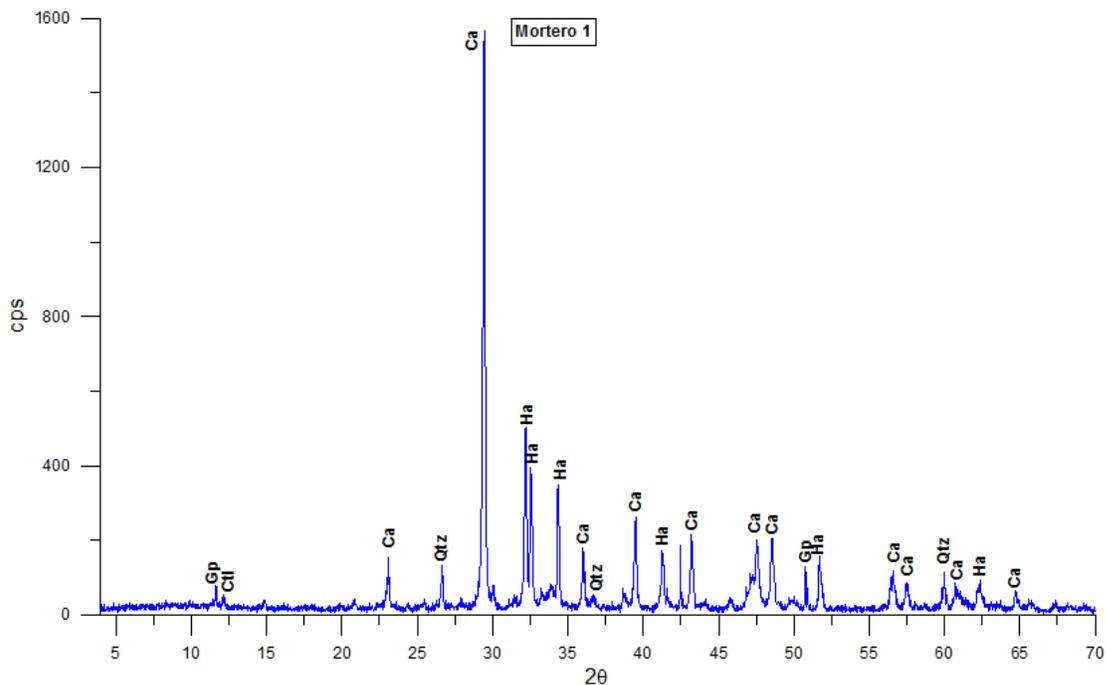


Figura 4.41. Diffractograma de la muestra *mortero 1*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

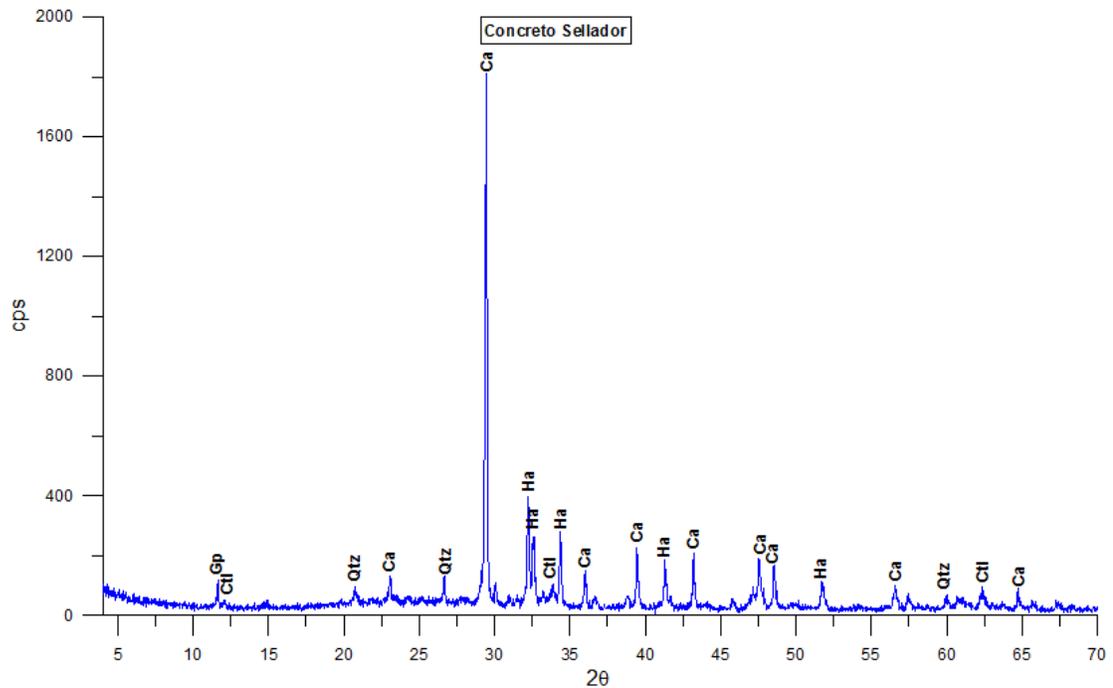


Figura 4.42. Diffractograma de la muestra *concreto sellador*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Correlación gráfica

Sobreponiendo los patrones de difracción se observa que la composición de ambos materiales es muy similar únicamente diferenciándose en la proporción en la que se encuentra cada una de las fases, siendo así, los minerales presentes son la hatrurita (particularmente en este caso, tal mineral se forma por calentamiento), la cual alcanza el 44 y el 17%, en el mortero y en el concreto, respectivamente. Otra fase muy frecuente y que se muestra abundantemente es la calcita, alcanzando valores de hasta el 62%.

Hay también, aunque en escasa cantidad yeso, cuarzo y crisotilo, éste representando un 3 y un 4% en la composición total de los dos materiales.

RESULTADOS

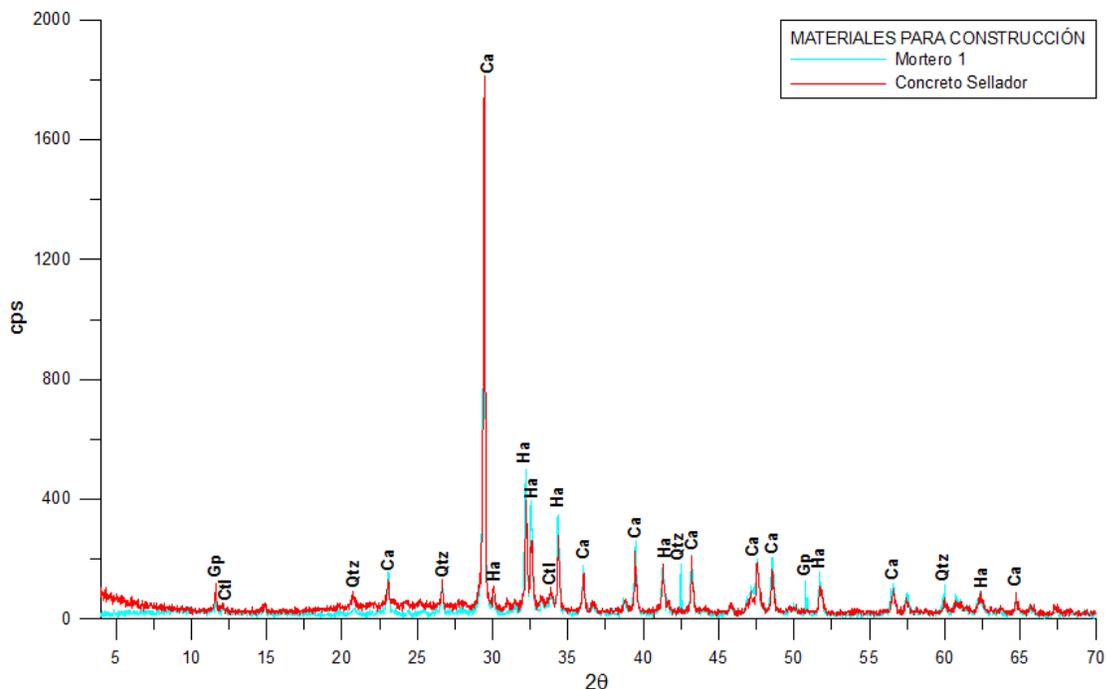


Figura 4.43. Difractogramas superpuestos de *materiales para construcción* en donde se indican en letras negras las fases comunes en ambos materiales. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

4.1.2. Resultados por después del tratamiento con ácido acético

4.1.2.1. Láminas

Debido a que el anterior análisis rutinario por DRX llevado a cabo en cada una de las muestras de lámina, demostró que el porcentaje de carbonatos presentes en éstas era muy elevado (en algunas de ellas de hasta el 85%); se tomó la decisión de agregar a una cierta cantidad de polvo de cada teja, ácido acético para eliminar la calcita.

Resultados por DRX

En esta etapa los análisis muestran que la calcita se ha eliminado por completo, y por lo tanto los minerales que toman su lugar en abundancia son el crisotilo y el cuarzo, en las tejas 1 y 3, y 2 y 4, respectivamente. Se sigue confirmando la presencia de crocidolita en las láminas 2 y 4, y en las láminas 1 y 3 es posible caracterizar otras fases como el yeso en *lámina 1 ac* y la hematita en *lámina 3 ac*.

Tabla 4.5. Análisis de Roca Total de láminas después de tratarlas con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Lámina1 ac Asbestos163656	Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] Yeso [H_4CaO_6S] Cuarzo [SiO_2] Mica [$AC_{2-3}T_4O_{10}X_2$] <i>Trazas de Amesita</i> [$Mg_2Al(AlSiO_5)(OH)_4$] <i>Trazas de Anfíbol</i> [$A_{0-1}B_2C_5(Si,Al,Ti)_8O_{22}D_2$]	47 30 15 7 - -	25-0645 98-2-7221 46-1045 98-59843 - -	14
2	Lamina2 ac Asbestos152235	Cuarzo [SiO_2] Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] Riebeckita [$Na_2[(Fe^{2+})_3(Fe^{3+})_2]Si_8O_{22}(OH)_2$]	79 12 10	46-1045 5-0645 98-3-8218	31
3	Lámina3 ac Asbestos174343	Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] Cuarzo [SiO_2] Hematita [Fe_2O_3] Mica [$AC_{2-3}T_4O_{10}X_2$] <i>Trazas de Feldespato</i> [$(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$] <i>Trazas de Anfíbol</i> [$A_{0-1}B_2C_5(Si,Al,Ti)_8O_{22}D_2$]	37 29 28 6 - -	25-0645 46-1045 001-1053 98-5-9843 - -	18
4	Lamina4 ac Asbestos095652	Cuarzo [SiO_2] Riebeckita [$Na_2[(Fe^{2+})_3(Fe^{3+})_2]Si_8O_{22}(OH)_2$] Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$]	76 14 10	46-1045 98-3-8218 25-0645	31
<p>Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita) En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica CM = Cristalinidad del material</p>					

RESULTADOS

Gráficos

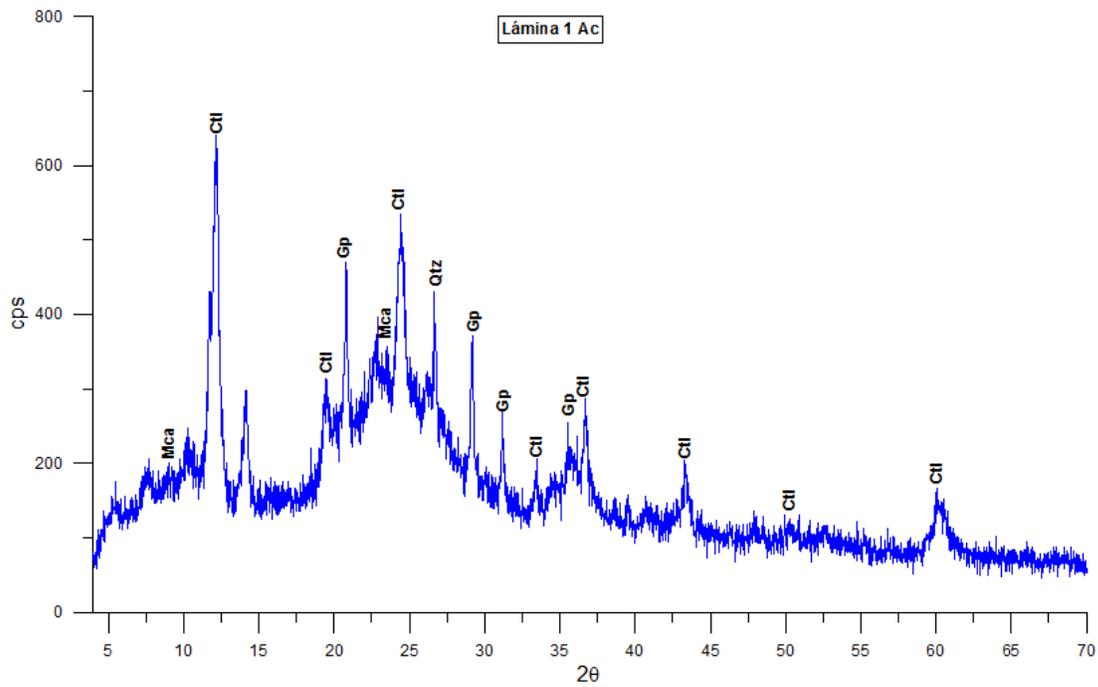


Figura 4.44. Difractograma de la muestra *lámina 1 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

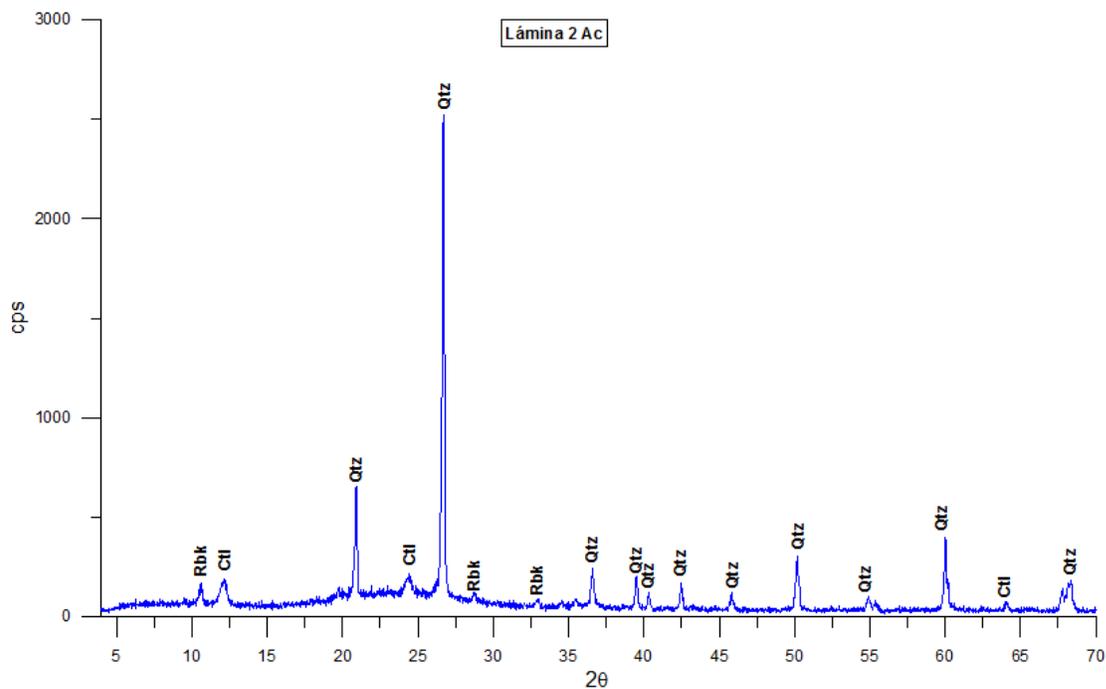


Figura 4.45. Difractograma de la muestra *lámina 2 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

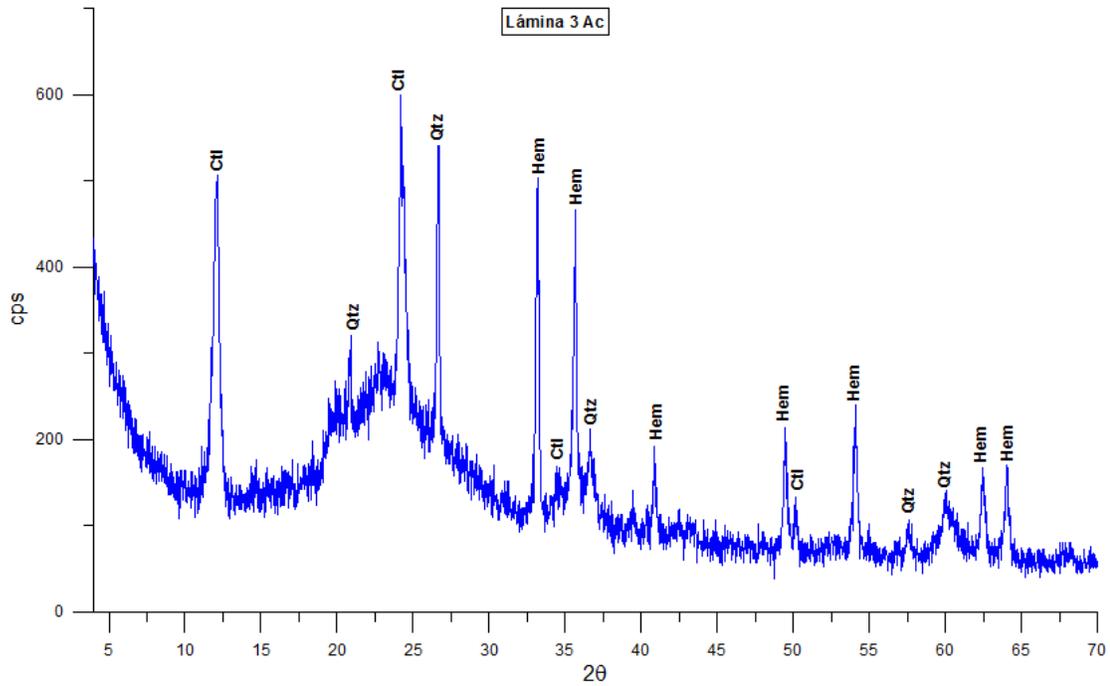


Figura 4.46. Difractograma de la muestra *lámina 3 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

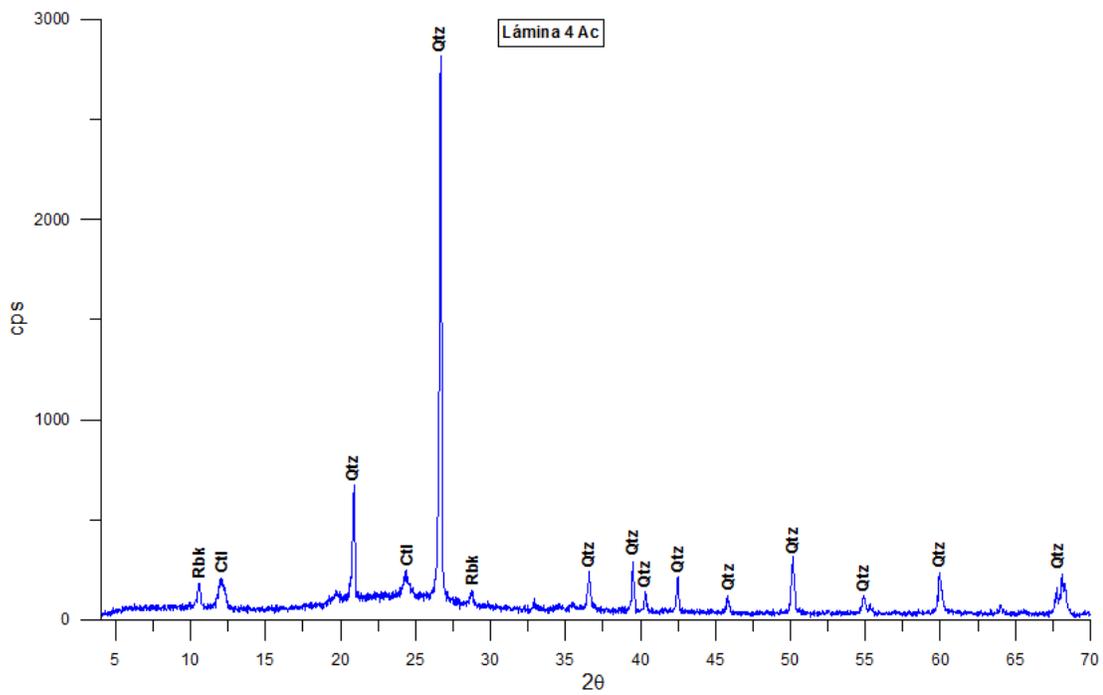


Figura 4.47 Difractograma de la muestra *lámina 4 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación grafica

Al comparar los difractogramas de las *láminas* después de haberlas tratado con ácido acético, se observa que la intensidad de los picos de crisotilo aumenta en todas ellas, siendo más notorio en *lámina 1* y *lámina 2*, donde el mineral tiene mayor predominancia.

En cuanto a las láminas 2 y 4, debido a la presencia de cuarzo la intensidad de éstos es considerablemente menor y por lo tanto la resolución es muy parecida a la que se obtuvo sin realizar el tratamiento con ácido.

Debido a que las muestras no fueron lavadas correctamente después de su tratamiento con ácido, se formaron acetatos sensu latu en la *Lámina 1 Ac* y *Lámina 3 Ac*.

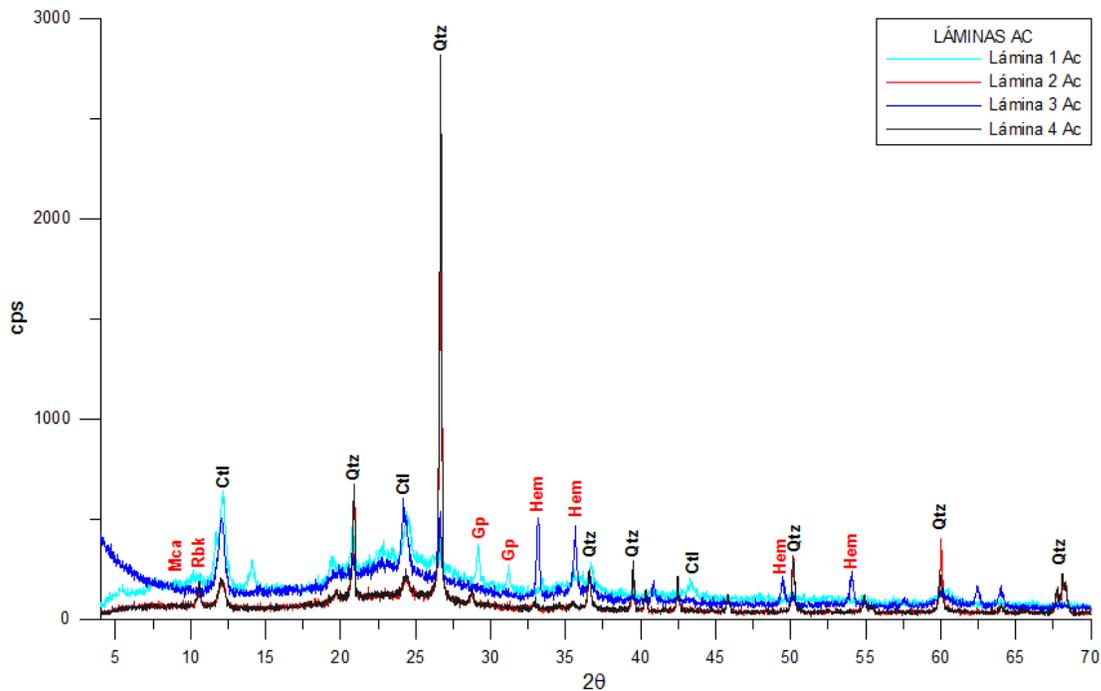


Figura 4.48. Difractogramas sobrepuestos de *láminas Ac* en donde se indican en letras negras las fases comunes entre ellas y en rojo aquellas que solo están presentes en una o dos. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

4.1.2.2. Tinacos

Los análisis preliminares de las muestras de tinacos mostraron que su contenido de carbonatos, al igual que en las láminas, es alto, por lo que las tres fueron tratadas con ácido acético.

Resultados por DRX

Los análisis de las muestras de *tinacos* sugieren que la mayor diferencia que existe entre ellos es el contenido de cuarzo, el cual se presenta en abundancia en la *muestra 1*, seguido por el crisotilo, sin embargo la *muestra 2* exhibe como los minerales más abundantes al yeso y al crisotilo.

Tabla 4.6. Análisis de Roca Total de *tinacos* después de tratarlos con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Tinaco 1 ac Asbestos143024	Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] Trazas de Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] <i>Trazas de Caolinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄]</i>	74 23 2 -	46-1045 25-0645 98-5-9843 -	24
2	Tinaco2 ac Asbestos210438	Yeso [H ₄ CaO ₆ S] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] <i>Trazas de Anfíbol [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i> <i>Trazas de Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i>	49 43 7 - -	98-016-1626 25-0645 98-5-9843 - -	17
En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica CM = Cristalinidad del material					

RESULTADOS

Gráficos

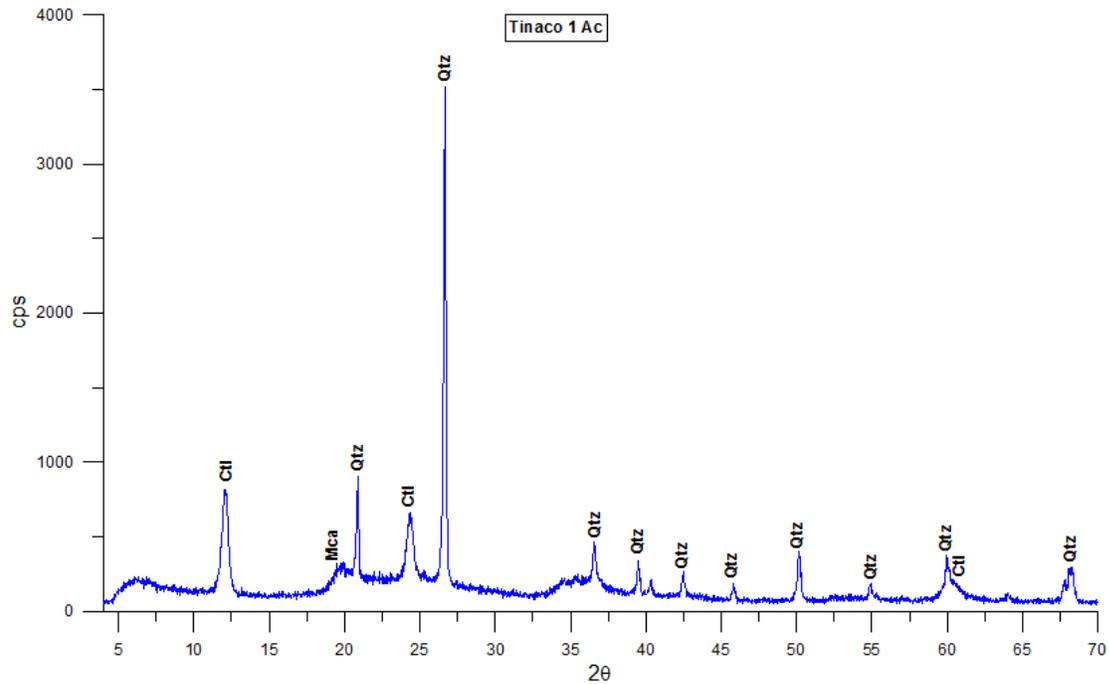


Figura 4.49. Difractograma de la muestra *tinaco 1 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

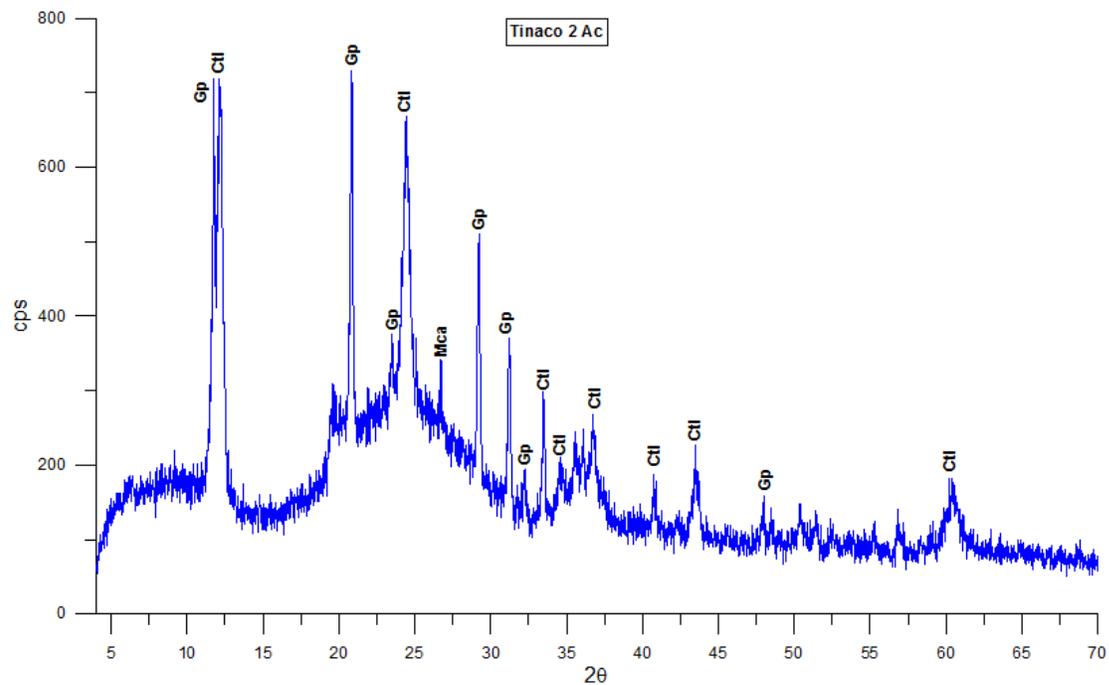


Figura 4.50. Difractograma de la muestra *tinaco 2 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Correlación gráfica

Observando los patrones de difracción de cada una de las muestras de tinacos después de haberlas tratado con ácido acético y comparándolos con los difractogramas pretratamiento, es posible darse cuenta de que se obtuvo mejor resolución, lo que permitió la caracterización de otras fases como el yeso en el caso del *Tinaco 2 ac*.

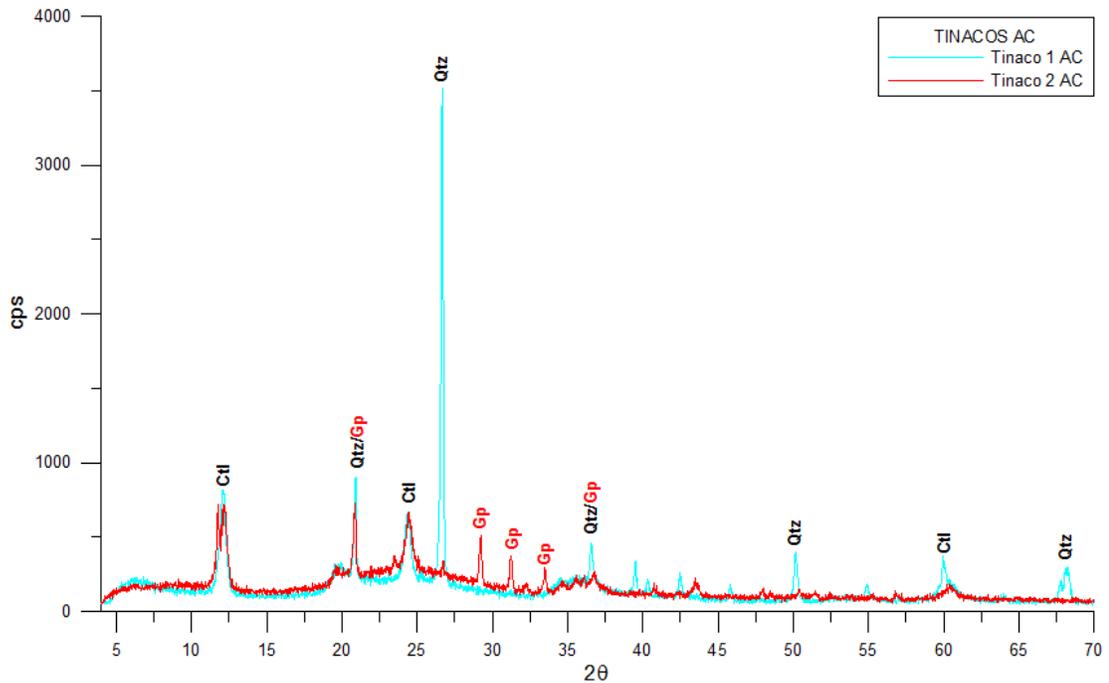


Figura 4.51. Difractogramas superpuestos de las muestras de *tinacos* en donde se indican en letras negras las fases comunes en ambos materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en un tinaco. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

4.1.2.3. Materiales para construcción

Los análisis de los dos materiales dentro de esta categoría también mostraron alto porcentaje de calcita, por lo que fueron tratados con ácido acético.

Resultados por DRX

Los análisis para los materiales utilizados en la industria de la construcción después de haberlos tratado con ácido acético, exhibieron como mineral predominante al cuarzo. En el caso del mortero otra fase que se presenta en abundancia es la pirofilita.

Tabla 4.7. Análisis de Roca Total de *materiales para construcción* después de tratarlos con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Mortero 1 ac Asbestos185030	Cuarzo [SiO ₂] Pirofilita [H ₂ Al ₂ O ₁₂ Si ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Trazas de Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] <i>Trazas de Feldespatos [(K,Na,Ca,Ba,NH₄)(Si,Al)₄O₈]</i> <i>Trazas de Anfíbol [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i>	80 12 6 2 - -	46-1045 98-2-6921 98-5-9844 98-41-3633 - -	9
2	Concretosellador ac Asbestos195716	Cuarzo [SiO ₂] <i>Trazas de Mica [AC₂₋₃T₄O₁₀X₂]</i>	100 -	46-1045 -	13
En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. SM = Semicuantificación mineralógica CM = Cristalinidad del material					

Gráficos

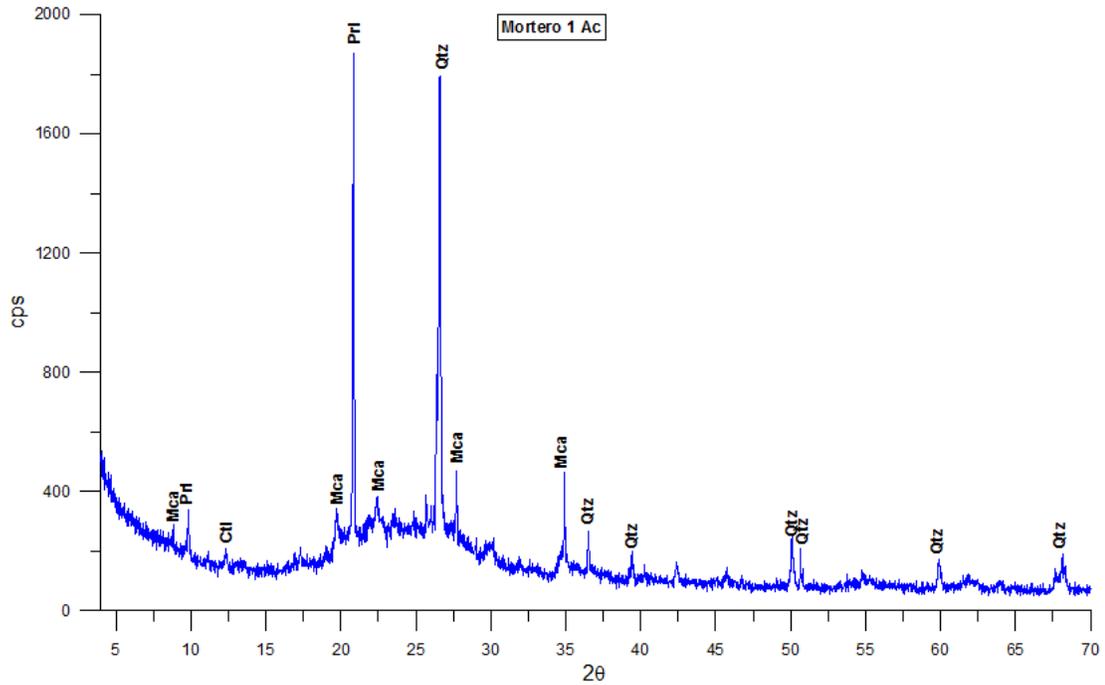


Figura 4.52. Difractograma de la muestra *mortero 1 Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

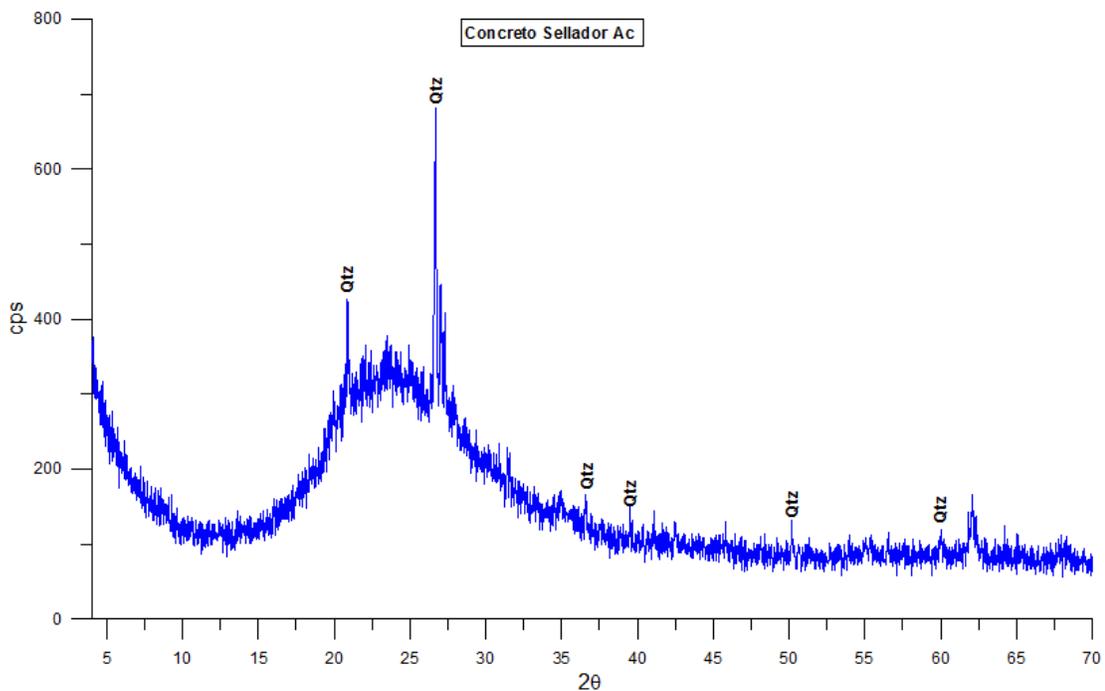


Figura 4.53. Difractograma de la muestra *concreto sellador Ac*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación grafica

El patrón de difracción del concreto sellador sugiere la formación de nuevas fases por reacción con el ácido acético, estas fases corresponden a acetatos sensu latu. Cabe señalar que gran parte del material analizado en esta muestra es amorfo.

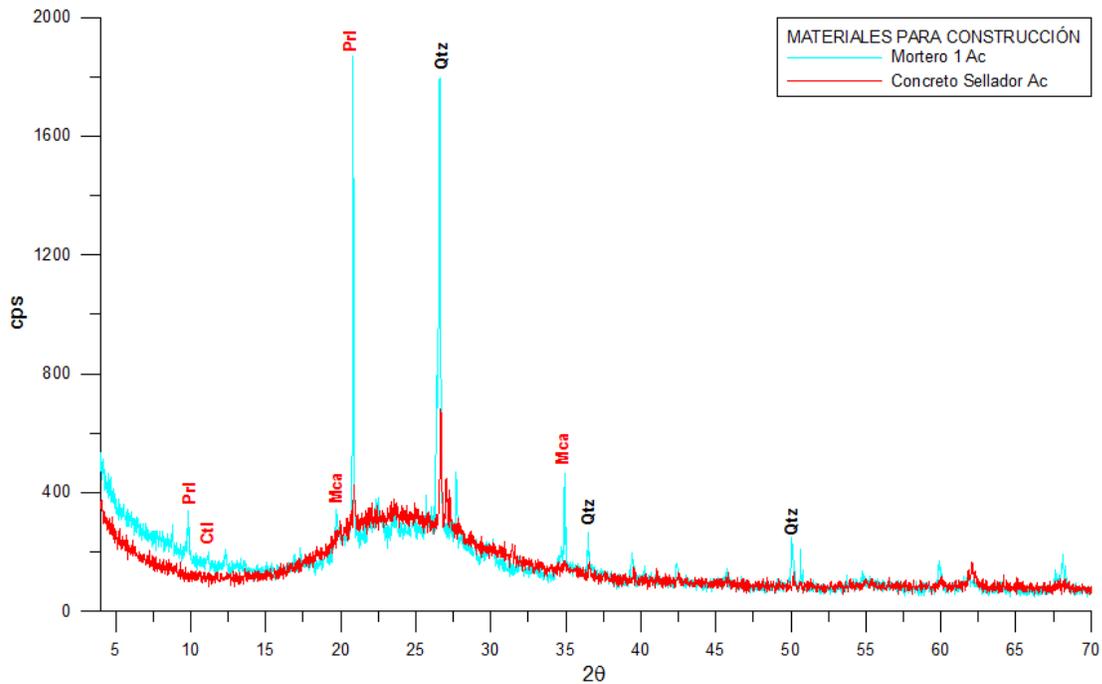


Figura 4.54. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de *materiales para construcción* en donde se indican en letras negras las fases comunes en ambos materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en un material. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

4.1.3. Resultados para la fracción fina

4.1.3.1. Láminas

Para poder identificar correctamente los minerales que tengan dimensiones inferiores a dos micras, se provoca la orientación de sus partículas de manera que éstas se disponen en el portamuestras sobre sus planos (001), al orientar los minerales se encuentran uno encima del otro en el mismo plano, por lo que el efecto de difracción se mejora para los pequeños cristales. La orientación produce un pseudo-macrocrystal que difracta aproximadamente como si miles de los cristalitos se convirtieran en un solo cristal grande, por lo tanto las características de difracción resultantes se mejoran en la dirección cristalográfica paralela al espacio basal, sin embargo, los otros planos de difracción en los cristales que no son paralelos a la estructura del espacio basal se pierden casi totalmente en el espectro de difracción.

De esta manera, y para corroborar la presencia o no, de fibras inferiores a dos micras se realizó la separación de la fracción fina en las cuatro muestras de lámina.

Resultados por DRX

Para la identificación de minerales del grupo de los filosilicatos a parte del crisotilo, se separó la fracción arcilla de cada una de las láminas. En el caso de las láminas 2 y 4, no fue posible la identificación de fases debido a la naturaleza de sus respectivas preparaciones.

Tabla 4.8. Análisis para la fracción fina de láminas

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	FICHAS PDF	CM
1	Lamina 1 ac or Asbestos135130	Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] Cuarzo [SiO_2] Mica [$AC_{2-3}T_4O_{10}X_2$] <i>Trazas de Feldespato</i> [$(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$] <i>Trazas de Anfíbol</i> [$A_{0-1}B_2C_5(Si,Al,Ti)_8O_{22}D_2$]	25-0645 46-1045 98-5-9844 - -	15
3	Lamina 3 ac or Asbestos150102	Cuarzo [SiO_2] Crisotilo [$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$] Hematita [Fe_2O_3] <i>Trazas de Mica</i> [$AC_{2-3}T_4O_{10}X_2$]	46-1045 43-0662 001-1033 -	12
En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. CM = Cristalinidad del material				

RESULTADOS

Gráficos

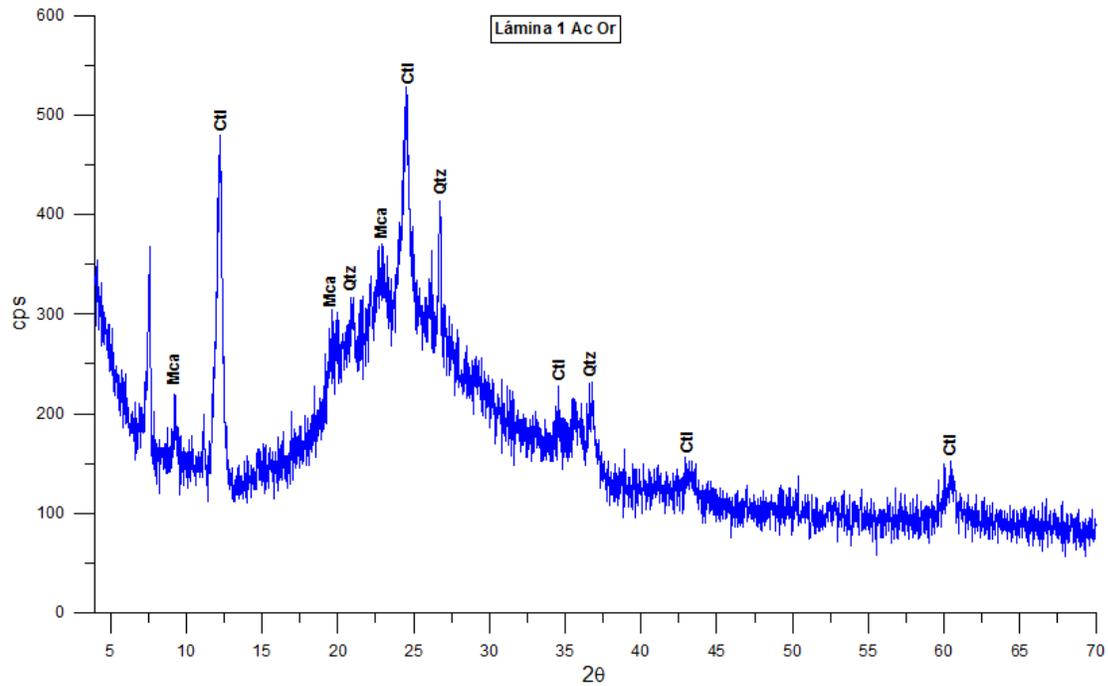


Figura 4.55. Difractograma de la muestra *lámina 1 Ac Or*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

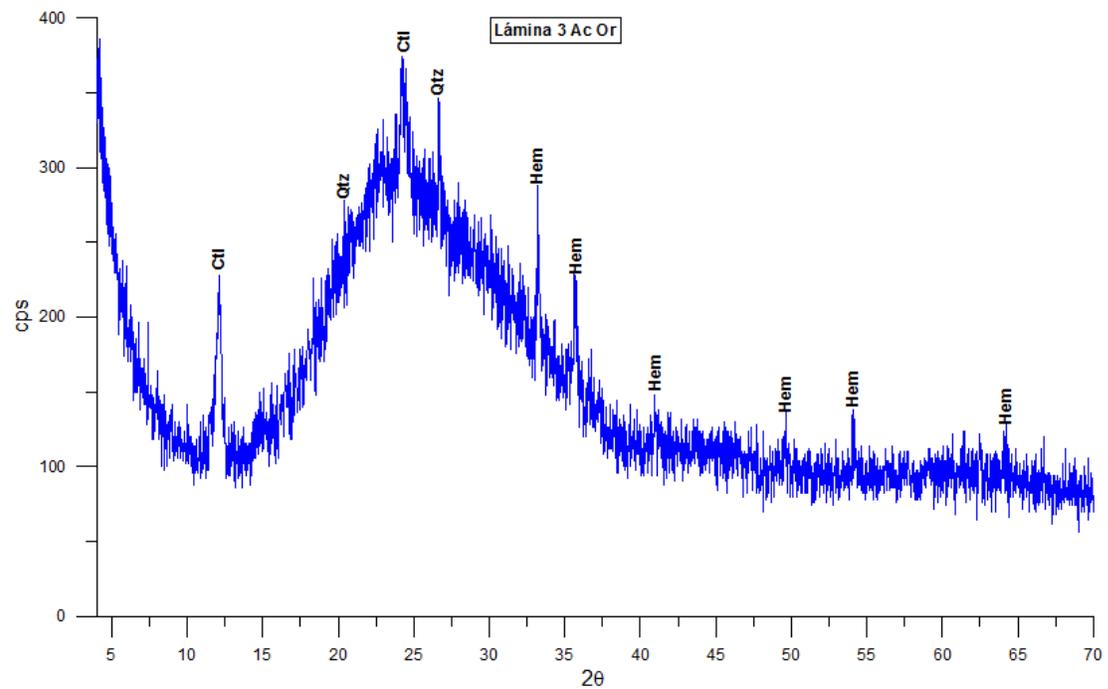


Figura 4.56. Difractograma de la muestra *lámina 3 Ac Or*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Correlación gráfica

Comparación gráfica entre las cuatro muestras de láminas, nótese que el material analizado en las tejas 2 y 4 fue vidrio (material amorfo). A diferencia de las *láminas 1* y *3*, que en su patrón de difracción siguen mostrando los picos en la posición característica del crisotilo. En las láminas no se encontraron filosilicatos.

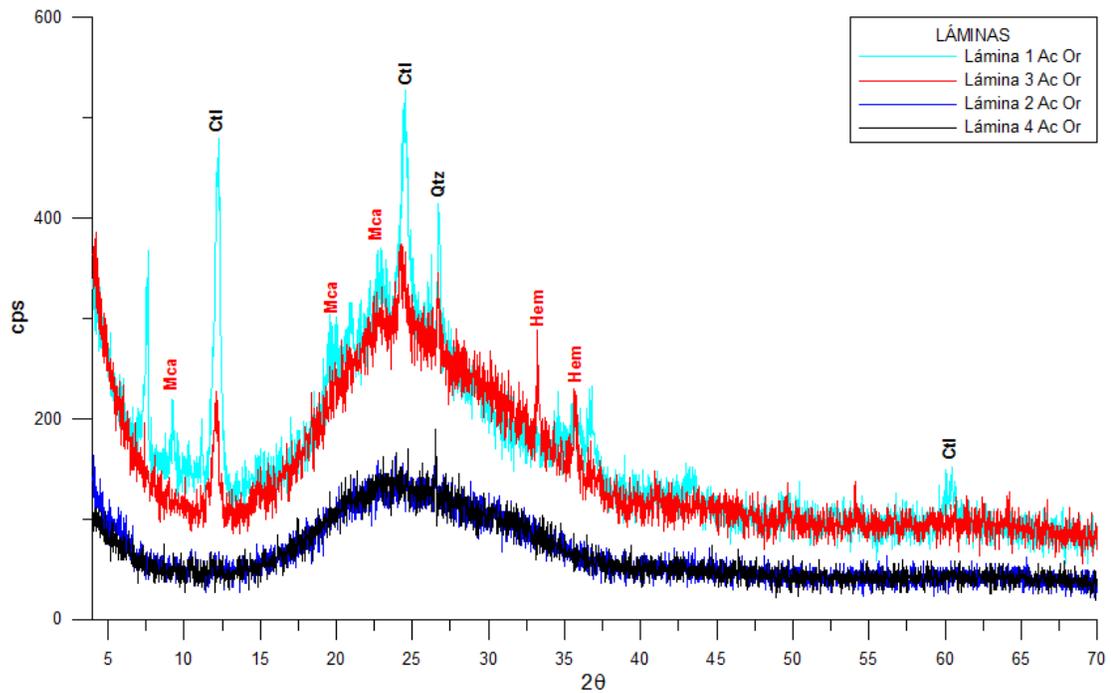


Figura 4.57. Diffractogramas superpuestos de las muestras de *láminas orientadas* en donde se indican en letras negras las fases comunes y en rojo aquellas que solo están presentes en una lámina. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

4.1.3.2. Tinacos

En las muestras de tinacos también se decidió verificar la presencia de fibras de asbesto menores a 2 micras, por lo que se separó la fracción fina y se sometió al análisis por DRX.

Resultados por DRX

Los análisis para la fracción fina de los tinacos no manifestaron presencia de filosilicatos a excepción del ya conocido crisotilo en los análisis de roca total.

Tabla 4.9. Análisis para la fracción fina de *tinacos*

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	FICHAS PDF	CM
1	Tinaco 1 ac or Asbestos142951	Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] <i>Trazas de Mica</i> [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	46-1045 25-0645 -	20
2	Tinaco 2 AC or Asbestos112440	Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Trazas de Cuarzo [SiO ₂] <i>Trazas de Pirofilita</i> [H ₂ Al ₂ O ₁₂ Si ₄]	43-0662 46-1045 -	17

En negritas se indican las fases asbestiformes.
En cursiva se indican las fases que son posibles.
CM = Cristalinidad del material

Gráficos

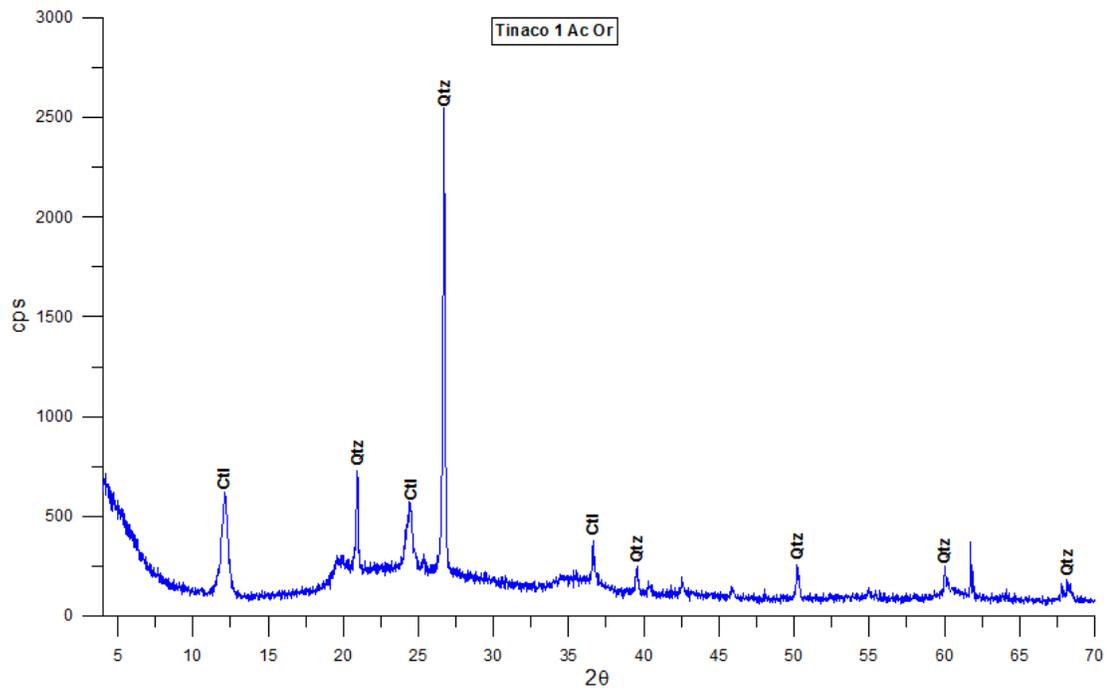


Figura 4.58. Difractograma de la muestra *tinaco 1 Ac Or*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

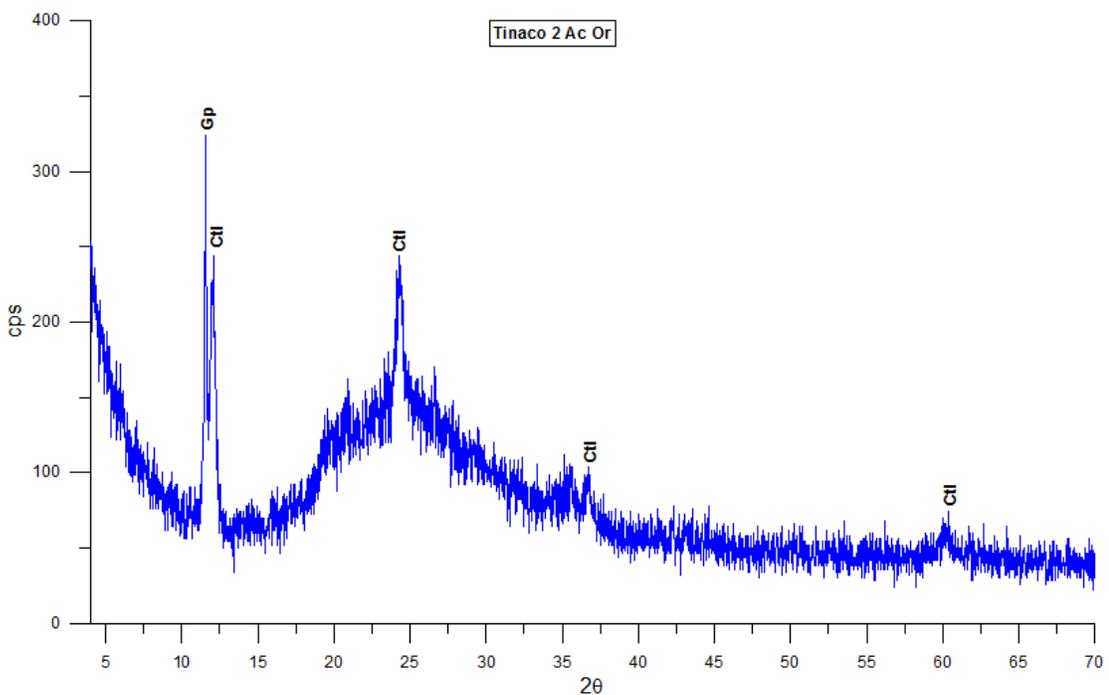


Figura 4.59. Difractograma de la muestra *tinaco 2 Ac Or*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

Correlación gráfica

Ninguno de los tinacos estudiados presenta otros minerales del grupo de los filossilicatos, a excepción del crisotilo.

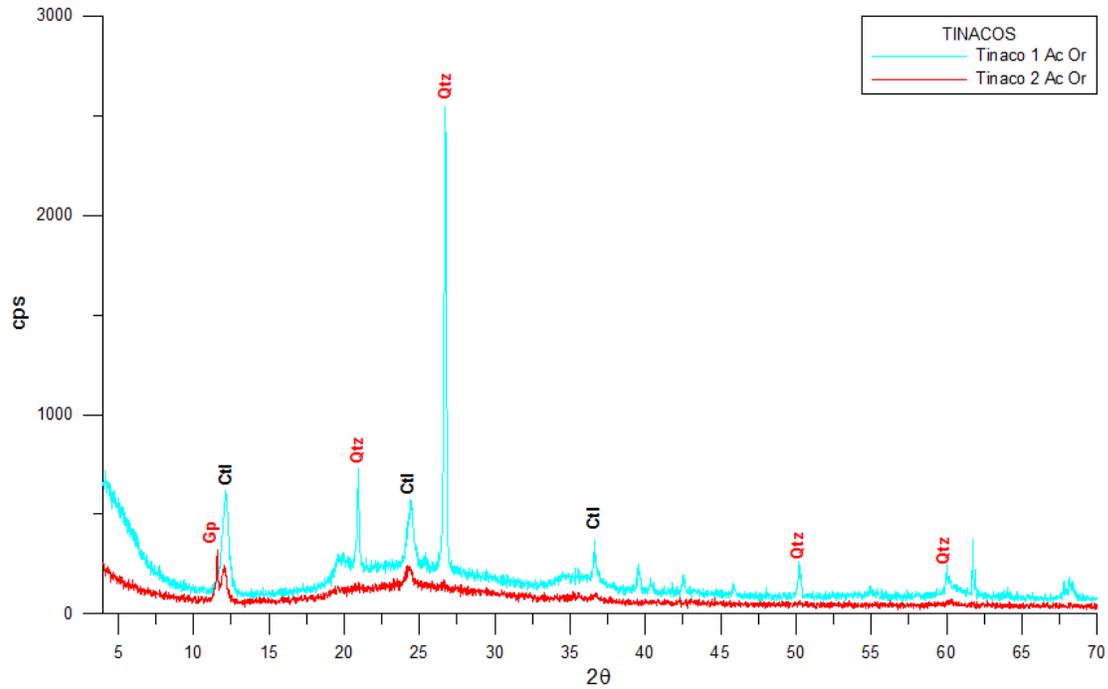


Figura 4.60. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de *tinaco* en donde se indican en letras negras las fases comunes en ambos materiales y en rojo aquellas que solo están presentes en un tinaco. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

4.1.3.3. Materiales para construcción

Resultados por DRX

Debido a la baja resolución del patrón de difracción de los análisis para la fracción fina del *mortero* fue imposible la identificación de minerales pertenecientes al grupo de los filosilicatos.

Tabla 4.10. Análisis para la fracción fina de *materiales para construcción*

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	FICHAS PDF	CM
1	Mortero 1 AC or	Cuarzo [SiO ₂] Feldespato [(K,Na,Ca,Ba,NH ₄)(Si,Al) ₄ O ₈] Trazas de Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] <i>Trazas de Anfíbol [A₀₋₁B₂C₅(Si,Al,Ti)₈O₂₂D₂]</i>	46-1045 - 98-41-3633 -	17
En negritas se indican las fases asbestiformes. En cursiva se indican las fases que son posibles. CM = Cristalinidad del material				

Gráfico

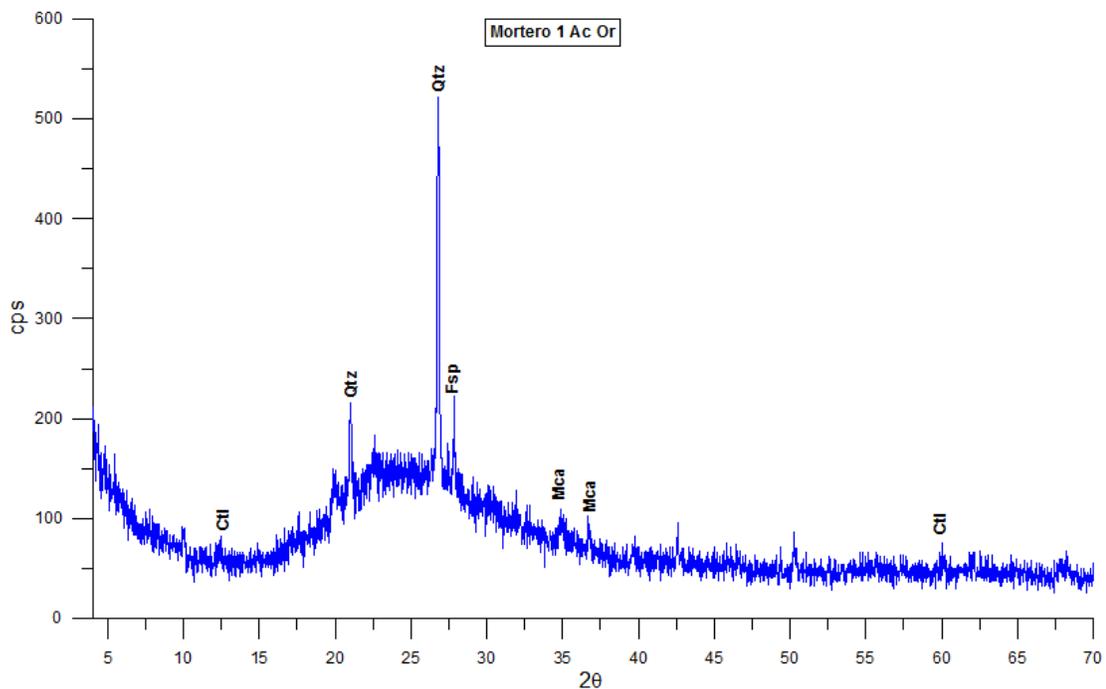


Figura 4.61. Difractograma de la muestra *mortero 1 Ac Or*, en él se indica la mineralogía identificada por DRX. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

RESULTADOS

4.1.4. Comparación mineralógica entre los materiales industriales analizados

A través de los análisis por Difracción de Rayos X, se obtuvo de manera detallada la composición mineralógica, así como el porcentaje aproximado en el que se presentan las fases en los materiales estudiados.

Así pues, comprobamos que los minerales más comúnmente utilizados para la fabricación de estos materiales son la calcita, el cuarzo y los asbestos. Estos últimos presentándose en cualquiera de sus formas, ya sea como crisotilo, antofilita, amosita y crocidolita.

Según los datos obtenidos en este estudio las láminas o tejas en promedio contienen entre el 10 y el 17% de asbesto, los tinacos entre 8 y 18%, los materiales utilizados en la industria de la construcción presentan del 3 al 4% y finalmente los materiales aquí clasificados como *otros asbestos*, llegan a tener hasta el 100% de asbesto en su composición mineralógica, indicando que son los más peligrosos, tanto por su alta concentración de asbestos, como por su morfología, ya que, por ejemplo en el caso de la tela y la cuerda de asbesto las fibras no se encuentran dentro de una matriz, facilitando así su desprendimiento.

A través de la aplicación de Microscopia Electrónica, se definió que las dimensiones de las fibras que se utilizan para la fabricación de todos los productos estudiados, son muy variadas, en donde la mayoría de ellas tienen longitudes mayores a 5 micras y diámetros por debajo de 3 micras. La organización mundial del trabajo estableció que las fibras que cumplieran con tales dimensiones son las más peligrosas para el sistema respiratorio humano, por lo que se concluye que ninguno de los materiales es seguro; y que el uso o la fabricación de cualquiera de ellos representa un riesgo para la salud.

Tabla 4.11. Resumen de los resultados para los materiales industriales

Nombre	% Ctl	Ath	% Anfíboles Gru	Rbk	Longitud µm	Diámetro µm	Color	Normativa	Conclusión
Lámina 1	15	-	-	-	> 10	0.31 a 358	Cti: Blanco	<p><i>Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993):</i> Considera como residuos peligrosos, a aquellos que contengan asbesto el cual no esté sumergido o fijo en un aglutinante natural o artificial</p>	<p>Aunque las fibras de asbesto que componen estos materiales se encuentren dentro de un aglutinante, éstos se consideran peligrosos porque pueden perder su integridad por el desgaste, fracturamiento o ruptura, quedando expuestas las fibras que los constituyen.</p>
Lámina 2	6	-	-	11	Se inferen longitudes similares a las de la lámina 1 y 3	Se inferen diámetros similares a los de la lámina 1 y 3	Cti: Blanco Rbk: Azul grisáceo		
Lámina 3	10	-	-	-	> 5	0.03 a 2.5	Cti: Blanco		
Lámina 4	6	-	-	7	Se inferen longitudes similares a las de la lámina 1 y 3	Se inferen diámetros similares a los de la lámina 1 y 3	Cti: Blanco Rbk: Azul grisáceo		
Tinaco 1	18	-	-	-	> 5	0.16 a 9	Cti: Blanco		
Tinaco 2	11	-	-	-			Cti: Blanco		
Tinaco 3	8	-	-	-			Cti: Blanco		
Asbesto comprimido	27	-	-	-	> 10	0.31 a 44	Cti: Blanco		
Cartón de asbesto	100	-	-	-	> 5	0.12 a 8	Cti: Blanco		
Protección de asbesto (aislante térmico)	18	-	26	-	> 10	0.21 a 4	Cti: Blanco Gru: Castaño		

Tabla 4.11. (Cont.) Resumen de los resultados para los materiales industriales

Nombre	% Ctl	% Anfíboles			Longitud µm	Diámetro µm	Color	Normativa	Conclusión
		Ath	Gru	Rbk					
Tela de asbesto	80	20	-	-	Se inferen longitudes similares a las de la cuerda	Se inferen diámetros similares a las de la cuerda	Ctl: Blanca Ath: Blanca	<i>Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993):</i> Considera como residuos peligrosos, a aquellos que contengan asbesto el cual no esté sumergido o fijo en un aglutinante natural o artificial	Productos altamente peligroso porque las fibras que contienen son fácilmente desmenuzables con la presión de la mano
Cuerda de asbesto	100	-	-	-	> 10	0.14 a 22.8	Ctl: Blanca		
Polvo de asbesto	61	-	-	-	> 5	0.24 a 2	Ctl: Blanca		Producto altamente peligroso por ser asbesto puro
Mortero 1	3	-	-	-	No fue posible medir la longitud	No fue posible medir el diámetro	Debido a que el material es de grano muy fino, las fibras no se distinguen, por lo que es imposible realizar una descripción	<i>Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993):</i> Considera como residuos peligrosos a las fibras de asbesto puro	Productos altamente peligrosos por contener fibras asbesto puro
Concreto Sellador	4	-	-	-	No fue posible medir la longitud	No fue posible medir el diámetro			

4.2. Analítica (DRX; MEB) para las muestras de San Pedro Barrientos, Tlalnepantla de Baz

4.2.1. Introducción

México ha importado asbesto desde 1932, pero no fue hasta la década de 1970 que la mayoría de las industrias que emplean estas fibras se instalaron en el país, notablemente en el área metropolitana (Aguilar et al., 2003, 2010. *Figura 4.62*), siendo las localidades que se encuentran en esta área, las que reportan un mayor número de muertes causadas por enfermedades relacionadas con la inhalación de asbesto (*Figura 4.63*).

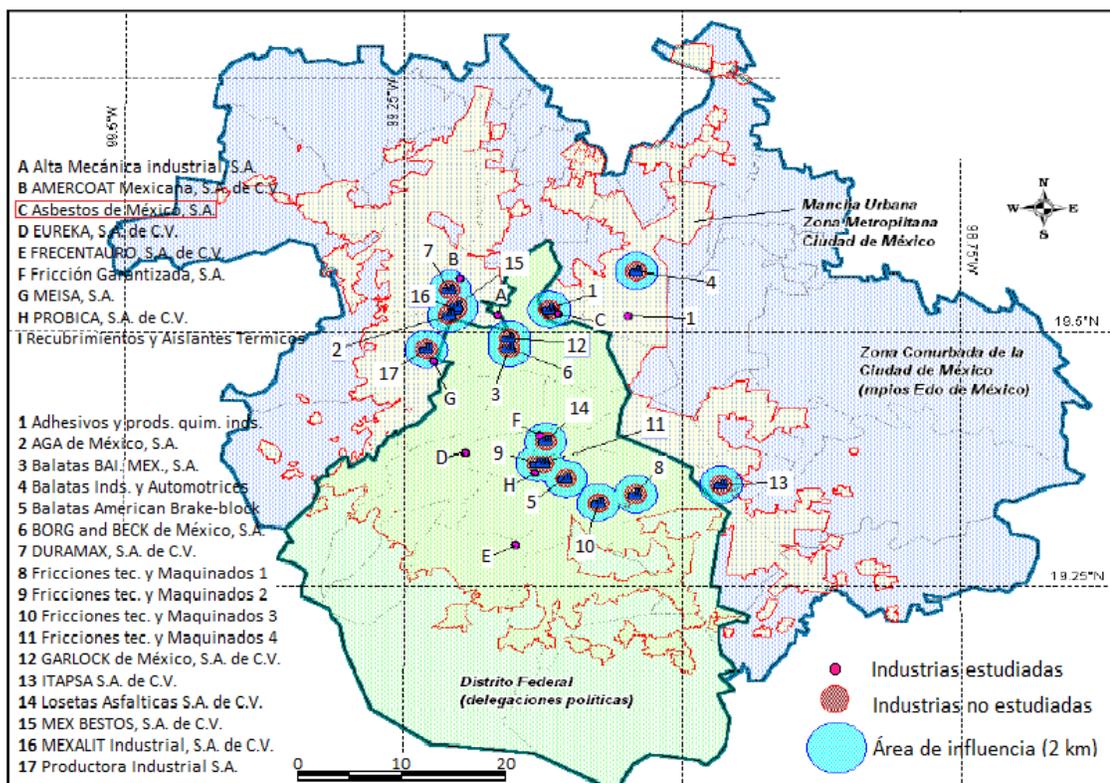


Figura 4.62. Industrias de Asbesto en el área metropolitana de la Ciudad de México. (Tomado y modificado de Aguilar; et al., 2003)

Un claro ejemplo de esta situación es el pueblo de San Pedro Barrientos, localizado al norte de la zona metropolitana del Valle de México (Tlalnepantla de Baz).

RESULTADOS

San Pedro Barrientos fue albergue por muchos años de una empresa que utilizaba amianto para la manufactura de sus productos, aunque cierta empresa cerró en 1998, en la actualidad se siguen reportando casos de mesotelioma, enfermedad cuya única causa conocida es la exposición a ambientes con asbestos (Gavira, Marín y Urtiaga, 1986; Regueiro y González, 2008). Por esta razón y con la finalidad de comprobar la presencia de los minerales en cuestión se realizó la recolección de 27 muestras de suelo circunvecinas al lugar donde se encontraba la fábrica (Asbestos de México), para el muestreo el sitio fue dividido en tres áreas, las cuales se ilustran en la *Figura 4.64*. En adición a los suelos, se tomaron 2 muestras de las láminas que se producían en la fábrica.

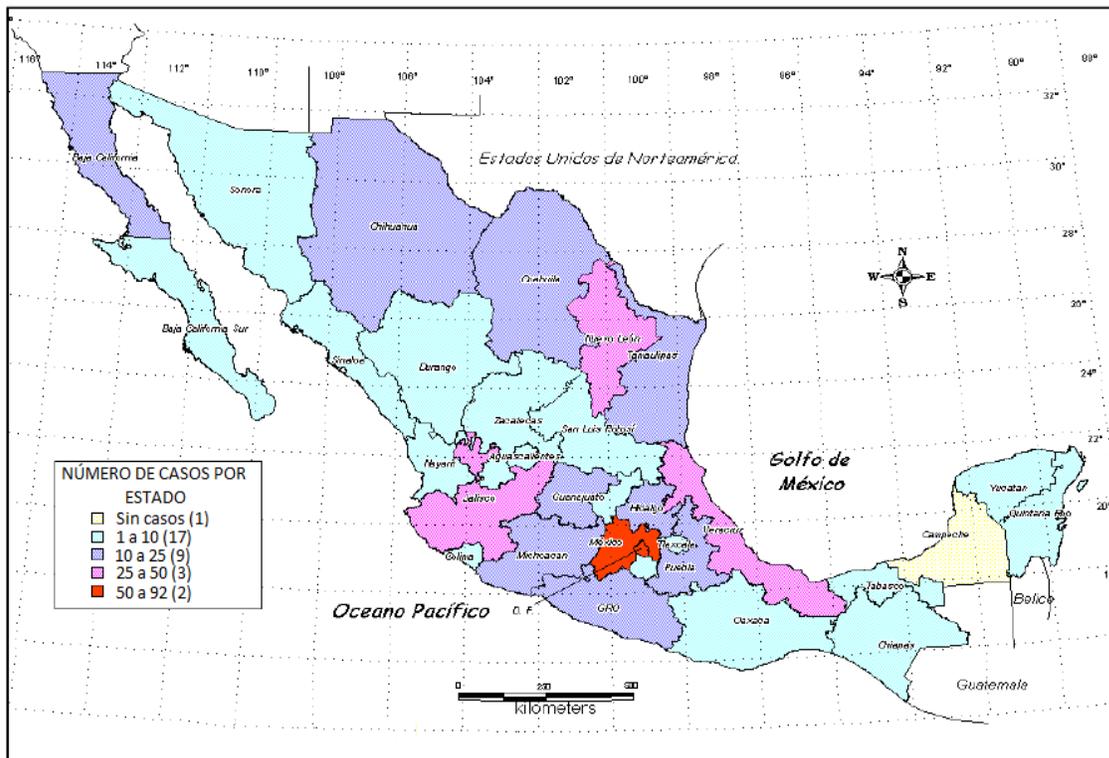


Figura 4.63. Mapa de mortalidad por mesotelioma pleural maligno por Estado de la República Mexicana (1979-2004).

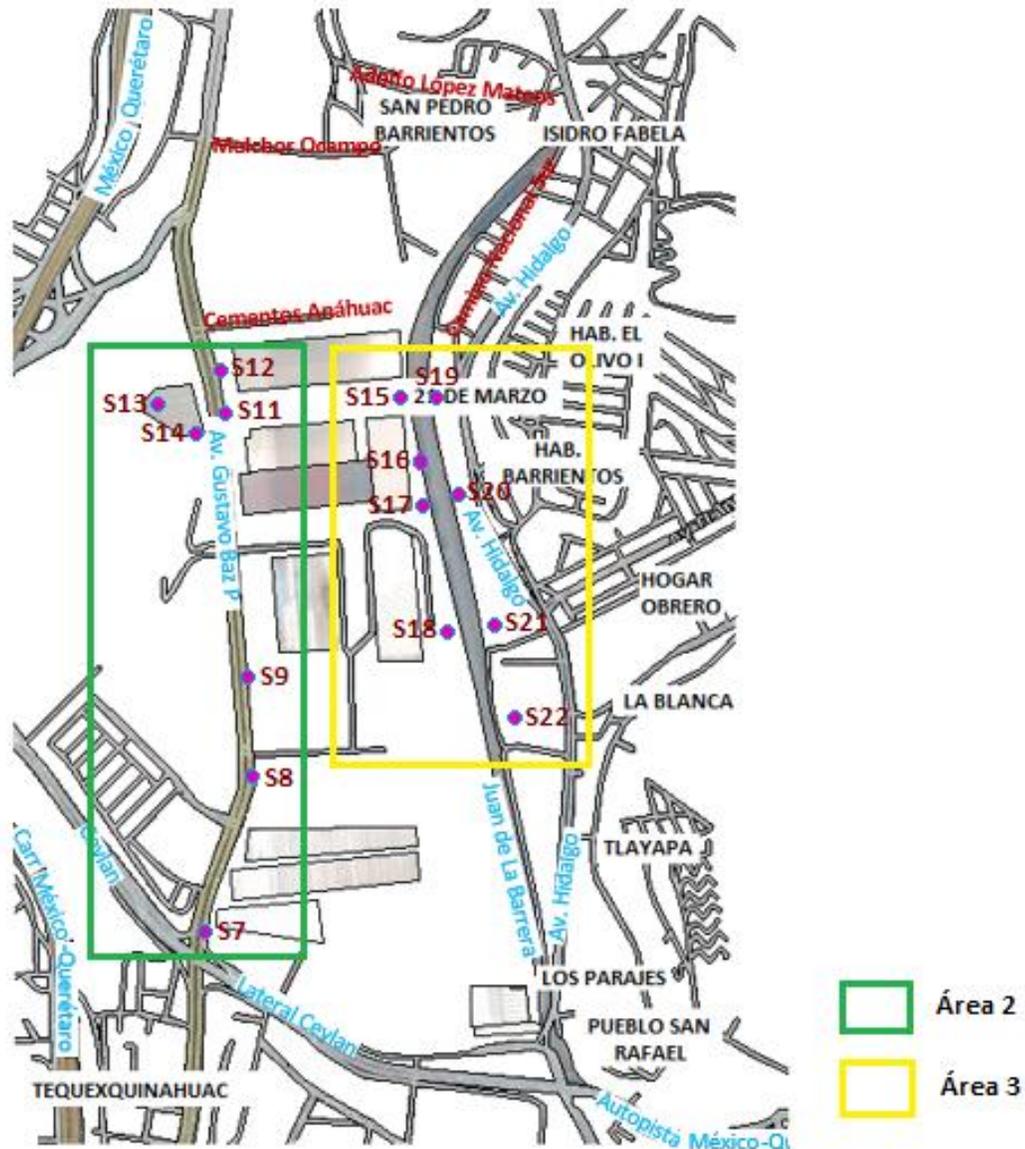


Figura 4.64. Esquema de la localidad San Pedro Barrientos, ubicación de las muestras tomadas y división del sitio de muestreo.

Antes de llevar a cabo las técnicas de caracterización, se realizó la observación de las muestras en un microscopio estereoscópico de la marca ZEISS, con la finalidad de realizar un reconocimiento general de los diferentes componentes mineralógicos y para verificar la presencia y naturaleza de las fibras (color, longitud aproximada, forma) en los suelos.

Posteriormente, todas las muestras fueron analizadas mediante la técnica de Difracción de Rayos X, utilizando el difractómetro EMPYREAN del Instituto de Geología de la UNAM, la medición se realizó en roca total en un rango de 4 a 70° (2theta), un paso de 0.002° y un tiempo de integración de 40s por paso.

RESULTADOS

Los resultados se sintetizaron en 3 tablas, correspondientes a cada área, en éstas se indica el número de muestra, el nombre, las fases que se identificaron, la ficha PDF correspondiente a cada una de las fases encontradas, y la abundancia (análisis semicuantitativo) en porcentaje de las fases.

Con base en el análisis semicuantitativo, se seleccionó una muestra de cada una de las áreas, se realizó nuevamente la observación detallada de los suelos en el microscopio estereoscópico, mediante éste se identificaron las fibras de asbesto y se separaron para su posterior preparación para analizarlas en el Microscopio Electrónico de Barrido.

En esta sección se incluyen los patrones de difracción de cada área, así como las imágenes obtenidas por MEB y los gráficos EDS.

Los símbolos utilizados en los difractogramas para abreviar los nombres de los minerales fueron tomados de Kretz, 1983 y se enlistan enseguida:

Mineral	Símbolo
Calcita	Ca
Caolinita	Kln
Cuarzo	Qtz
Crisotilo	Ctl
Cristobalita	Crs
Riebeckita	Rbk
Tridimita	Trd
Yeso	Gp

Los símbolos correspondientes a grupos mineralógicos son los recomendados por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), a continuación se enlistan:

Grupo Mineralógico	Símbolo
Mica	Mca
Plagioclasa	Plg

En adición a los gráficos obtenidos por DRX, se incluyen también las imágenes obtenidas por MEB y los análisis EDS de las muestras elegidas.

4.2.1.1. Resultados por DRX para los suelos de San Pedro Barrientos

Área 1

En esta área el número de muestras analizadas fue de seis, todas contienen asbesto, siendo la crocidolita la variedad de anfíbol más frecuente, presentándose en todas las muestras, esta fase se encuentra en proporciones que van desde el 3-10%, en tanto la variación del crisotilo es del 1% hasta el 3%. En todas las muestras de esta área se determinaron ambos tipos de asbesto (anfíbol y crisotilo), si éstos dos se suman la cantidad mínima de amianto presente es del 7% (*Barrientos S1*), mientras que la máxima es del 13% (*Barrientos S6*).

Tabla 4.12. Análisis de Roca Total de las muestras del Área 1

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Barrientos S1	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Tridimita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄ Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	85 5 4 3 3	98-020-1648 98-003-8218 98-015-3472 98-041-3633 98-005-9844	19
2	Barrientos S2	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Tridimita [SiO ₂] Cuarzo [SiO ₂] Calcita [CaCO ₃] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄ Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	67 8 7 7 5 3 3	98-006-6127 98-008-1382 98-015-6197 98-016-9921 98-003-8218 98-003-6225 98-005-9844	16
3	Barrientos S3	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄ Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	82 8 5 3 1	98-020-1648 98-007-9634 98-005-9843 98-003-6225 98-005-9843	15
4	Barrientos S4	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄	62 31 3 2	98-002-9361 98-008-9277 98-020-0423 98-003-6225	14
5	Barrientos S5	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄	75 11 9 4 1	98-020-1648 98-004-2498 98-003-8218 98-005-9843 98-007-7747	16
6	Barrientos S6	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH)] ₄ Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	85 10 3 2	98-006-6126 98-003-8218 98-007-7747 98-05-9843	11
SM = Semicuantificación mineralógica. CM = Cristalinidad del suelo. Riebeckita = Crocidolita.					

Correlación gráfica

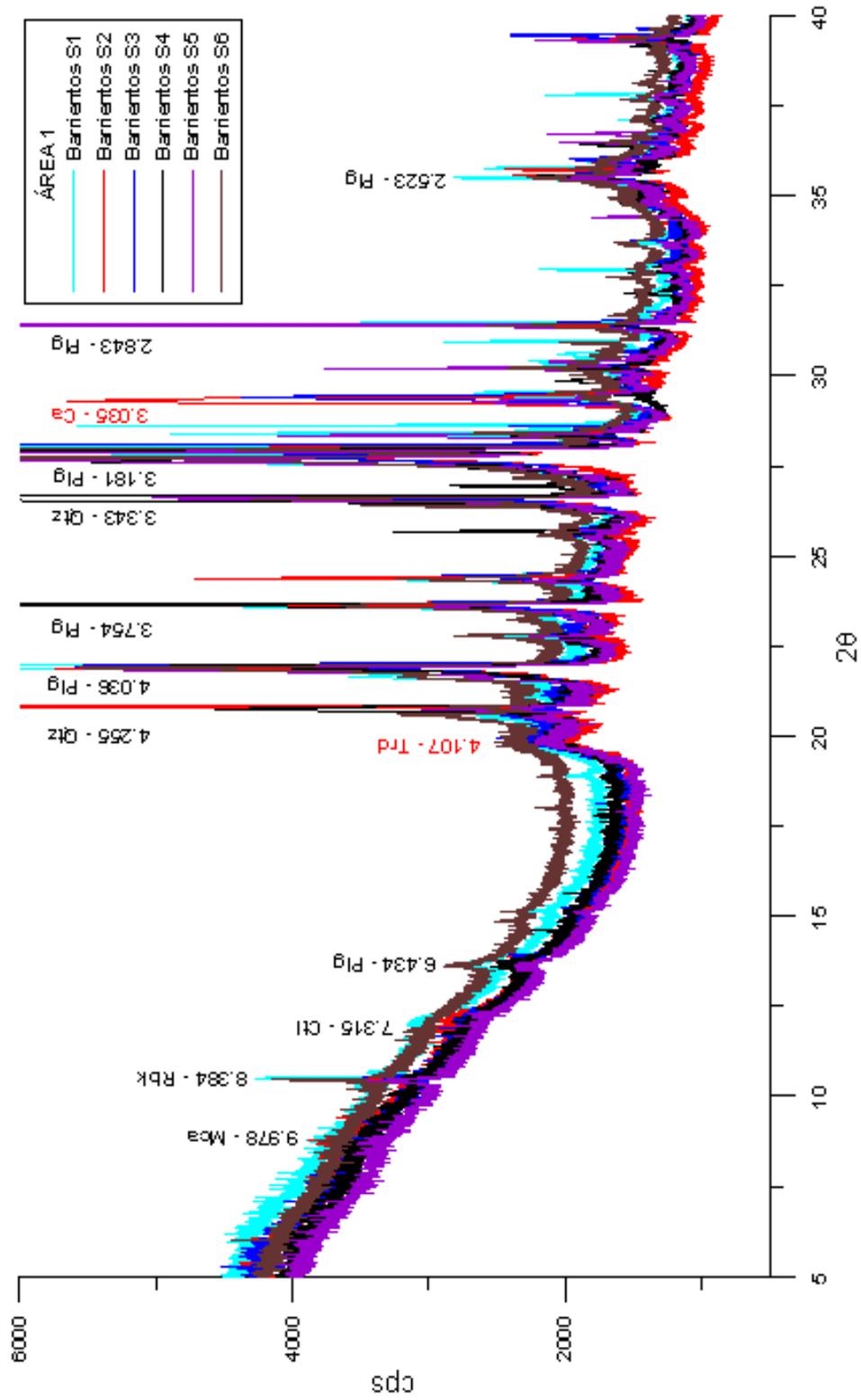


Figura 4.65. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 1, en donde se indican las fases identificadas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Área 2

A través de la observación en el microscopio estereoscópico, se identificaron las fibras de crisotilo (*Figura 4.66.A*) y de anfíbol (*Figura 4.66.B*), ambas fibras se pudieron distinguir fácilmente por su característica morfología y color. Así el crisotilo presentaba coloraciones que iban del blanco al gris, mientras que la tonalidad del anfíbol siempre era azul. En cuanto a la morfología, las fibras de crisotilo se observaban con cierta curvatura y flexibilidad a diferencia de las de anfíbol. Mediante esta observación se advirtió también la variación en los tamaños de las fibras.

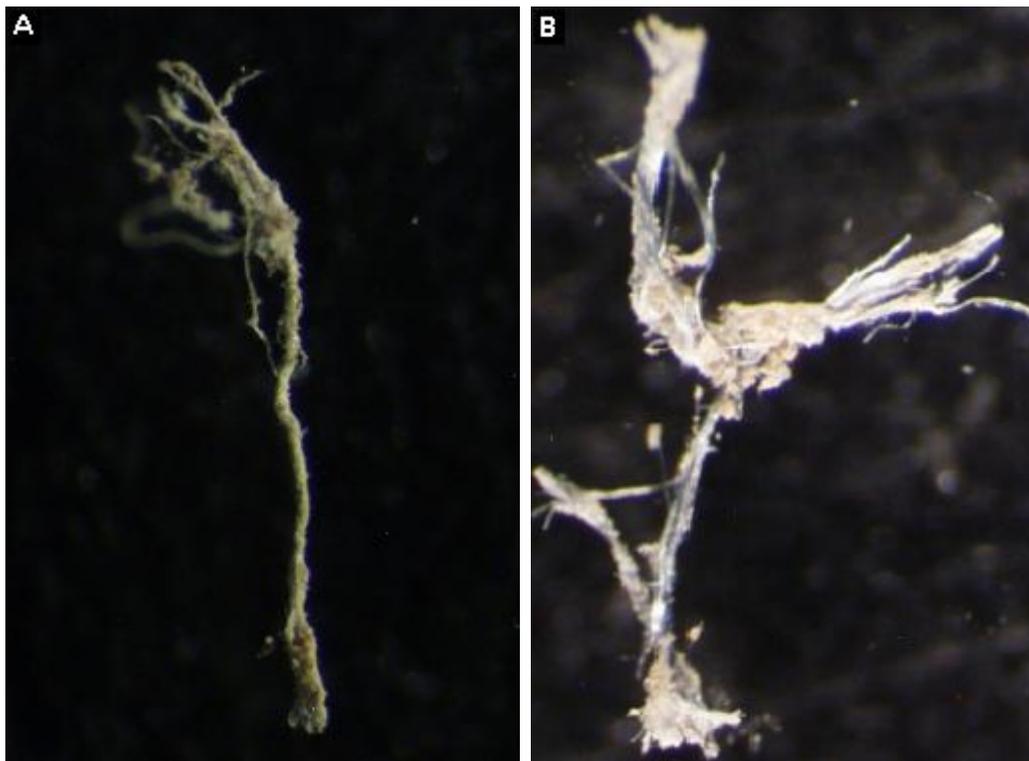


Figura 4.66. Fibra de crisotilo en la muestra *Barrientos S13* en (A). Conjunto de fibras de anfíbol en la muestra *Barrientos S13* (B).

RESULTADOS

Una vez realizada la observación en la lupa binocular, las 10 muestras del Área 2 (área paralela a la Avenida Gustavo Baz) se analizaron mediante DRX, los resultados indican que el crisotilo se encuentra en porcentajes pequeños que van del 1 al 5%, aunque existe una excepción en la muestra *Barrientos S13*, donde el porcentaje de este mineral es igual a 13%; se resalta que en todas las muestras la proporción en la que se presenta el asbesto blanco es menor a la proporción en la que se presentan los anfíboles. La variedad de anfíbol más frecuente es la crocidolita teniendo porcentajes de 1 a 17%. Otras fases con gran abundancia en estos suelos son los feldespatos, la calcita y el cuarzo.

Tabla 4.13. Análisis de Roca Total de las muestras del Área 2

Nº	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Barrientos S7	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Calcita [CaCO ₃] Tridimita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	72 9 7 6 5	98-002-9361 98-002-0179 98-000-1109 98-003-8218 98-041-3633	15
2	Barrientos S8a	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	79 6 6 5 3	98-010-0233 98-004-2498 98-016-6965 98-003-8218 98-041-3633	17
3	Barrientos S8b	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Tridimita [SiO ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	84 3 3 3 2	98-006-6127 98-003-8218 98-000-1440 98-015-8023 98-003-6225	17
4	Barrientos S9a	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Calcita [CaCO ₃] Tridimita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	69 13 7 6 3 1	98-010-0283 98-015-8257 98-008-1382 98-003-8218 98-003-6225 98-005-9843	15
5	Barrientos S9b	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Tridimita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	87 5 4 3 1	98-006-6127 98-015-7696 98-008-1382 98-003-8218 98-003-6225	15
6	Barrientos S10	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Calcita [CaCO ₃] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	68 26 5 2	98-010-0235 98-016-6364 98-003-8218 98-041-3633	21

Tabla 4.13. (Cont.) Análisis de Roca Total de las muestras del Área 2

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
7	Barrientos S11	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Tridimita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	89 4 4 2 1	98-006-6127 98-016-6961 98-000-1440 98-003-8218 98-003-6225	22
8	Barrientos S12	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Calcita [CaCO ₃] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	87 7 3 1 1 1	98-002-9361 98-008-3849 98-015-8257 98-041-3633 98-003-8218 98-005-9844	25
9	Barrientos S13	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	65 17 13 4	98-010-0283 98-003-8218 98-010-9355 98-000-9843	17
10	Barrientos S14a	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Calcita [CaCO ₃] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	46 46 4 2 1	98-020-1648 98-004-0112 98-003-8218 98-003-6225 98-005-9844	17
11	Barrientos S14b	Calcita [CaCO ₃] Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	56 34 6 3 1	98-002-0179 98-002-9361 98-003-8218 98-041-3633 98-005-9843	16
<p>Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita) En negritas se indican las fases asbestiformes. SM = Semicuantificación mineralógica. CM = Cristalinidad del suelo.</p>					

Correlación gráfica

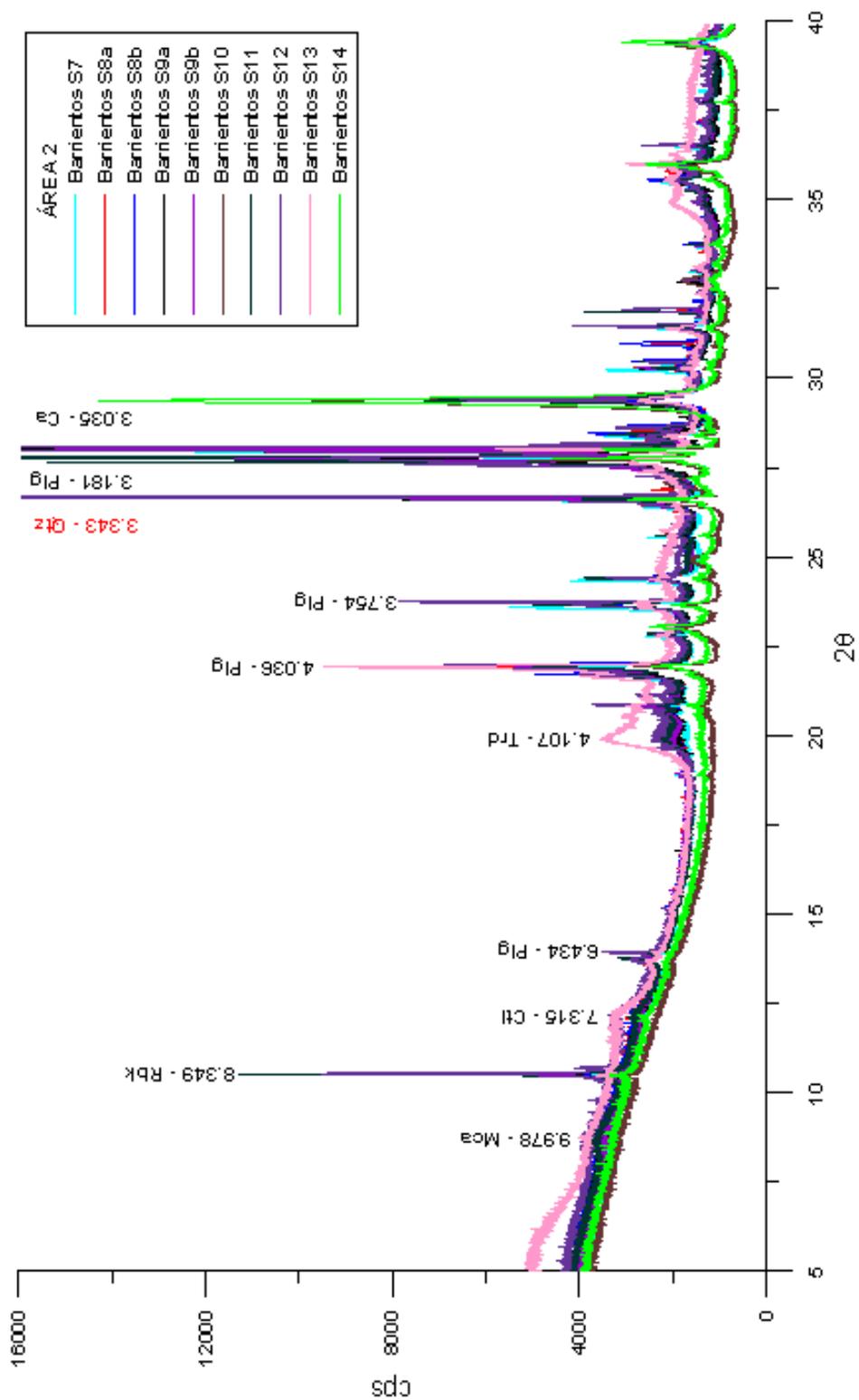


Figura 4.67. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 2, en donde se indican las fases identificadas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

Área 3

Los suelos de esta área también se observaron en el microscopio estereoscópico, de tal manera que se verificó la presencia de minerales fibrosos (de naturaleza serpentinitica y anfibolita, *Figura 4.68*).



Figura 4.68. Fibra de crisotilo en la muestra *Barrientos S17* en (A). Conjunto de fibras de anfíbol en la muestra *Barrientos S17* (B).

RESULTADOS

En el *Área 3* (paralela a la vía ferroviaria) se analizaron 10 muestras de suelo, de las cuales tres no presentan crisotilo (*Barrientos S18*, *Barrientos S15a* y *Barrientos S15b*), los suelos restantes contienen además del crisotilo alguna variedad de anfíbol asbestiforme, siendo la crocidolita la especie más común. En esta área el asbesto blanco suele presentarse en proporciones del 3% hasta el 15%. Otros minerales que acompañan la composición de los suelos estudiados son la calcita, el cuarzo, los feldespatos y las micas.

Tabla 4.14. Análisis de Roca Total de las muestras del *Área 3*

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Barrientos S15a	Calcita [CaCO ₃] Cuarzo [SiO ₂] Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Caolinita [H ₄ Al ₂ O ₉ Si ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂]	73 11 10 4 3	98-015-8257 98-006-1329 98-010-0341 98-006-8697 98-003-8218	28
2	Barrientos S15b	Calcita [CaCO ₃] Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Caolinita [H ₄ Al ₂ O ₉ Si ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	58 18 15 3 3 3	98-004-0107 98-010-0235 98-015-4289 98-003-8218 98-006-8698 98-016-6965	24
3	Barrientos S16	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Calcita [CaCO ₃] Cristobalita [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	75 13 5 3 3 2	98-006-6127 98-004-0107 98-015-3886 98-003-8218 98-020-0721 98-003-6225	21
4	Barrientos S17	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	59 15 11 4	98-020-1648 98-008-6599 98-003-8218 98-005-9843	16
5	Barrientos S18	Calcita [CaCO ₃] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈]	80 9 6 4	98-006-2806 98-010-0341 98-003-8218 98-007-9674	
6	Barrientos S19a	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Yeso [H ₄ CaO ₆ S] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂]	72 10 8 5 5	98-002-9361 98-016-6961 98-008-1652 98-041-3633 98-003-8218	12

Tabla 4.14. (Cont.) Análisis de Roca Total de las muestras del Área 3

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
7	Barrientos S19b	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Tridimita [SiO ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Yeso [H ₄ CaO ₆ S]	61 16 9 7 4 3	98-006-6127 98-003-8218 98-016-6961 98-000-0176 98-041-3633 98-000-2057	13
8	Barrientos S20a	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	75 11 7 7	98-003-0124 98-016-6964 98-003-8218 98-003-6225	18
9	Barrientos S20b	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Cuarzo [SiO ₂] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	87 5 4 3	98-006-6127 98-015-4289 98-003-8218 98-041-3633	17
10	Barrientos S21	Plagioclasa [(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Mica [AC ₂₋₃ T ₄ O ₁₀ X ₂]	90 4 4 2	98-010-0234 98-003-8218 98-041-3633 98-005-9844	14
<p>Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa) En negritas se indican las fases asbestiformes. SM = Semicuantificación mineralógica. CM = Cristalinidad del suelo.</p>					

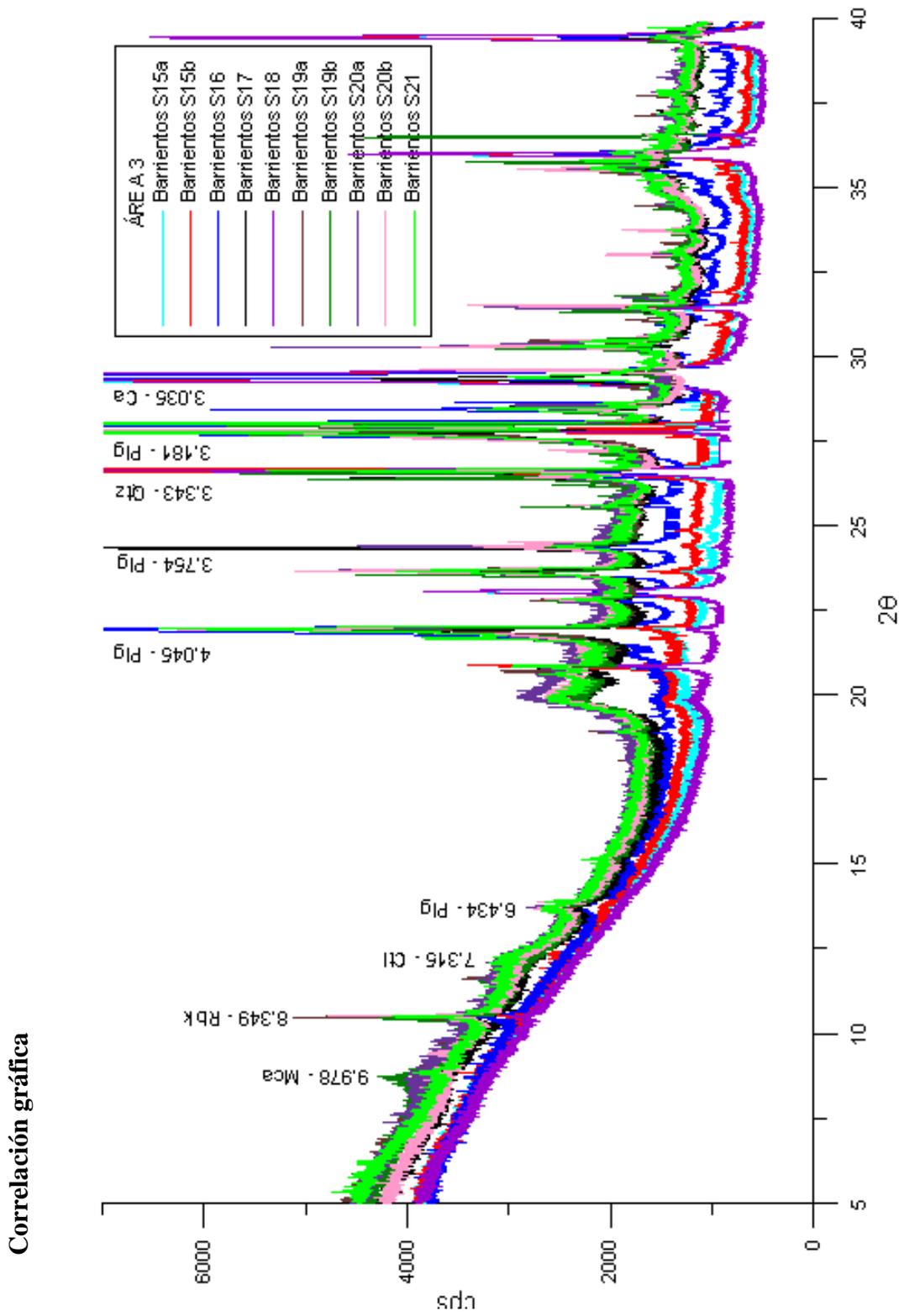


Figura 4.69. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de suelo del Área 3, en donde se indican las fases identificadas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

4.2.1.2. Resultados por Microscopia Electrónica de Barrido para los suelos de San Pedro Barrientos

Área 2: Barrientos S13

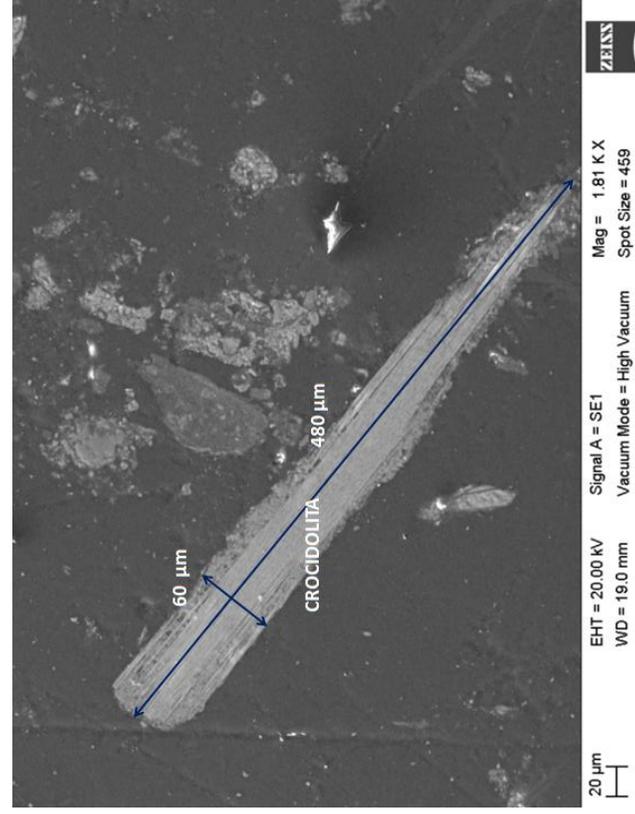


Figura 4.70.A. Fibra de crocidolita presente en la muestra de suelo *Barrientos S13* vista a una escala de 20 μm, tiene una longitud de 480 μm y un diámetro de 60 μm.

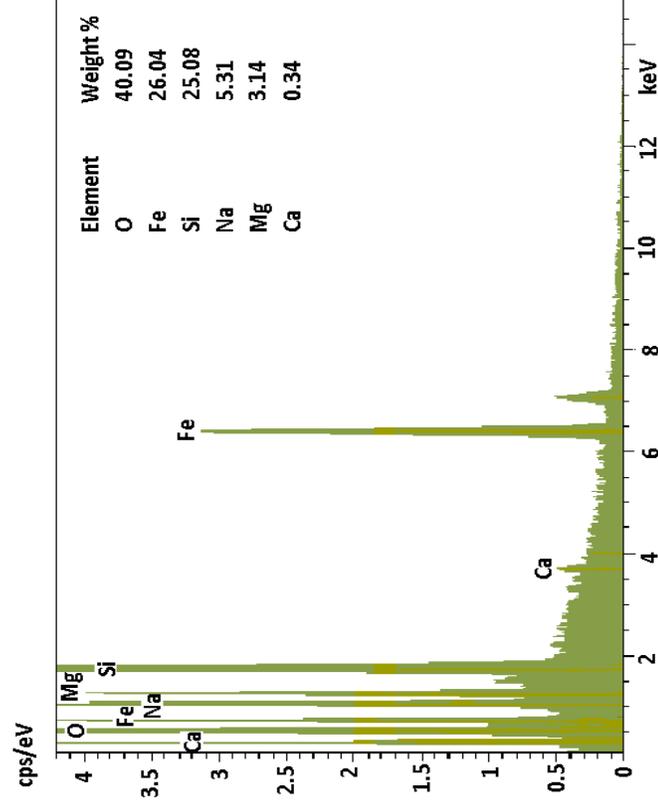


Figura 4.70.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de crocidolita que se observa en la *Figura 4.70.A.* La composición elemental indica presencia de 26.04% de Fe en la misma.

Área 3: Barrientos S17

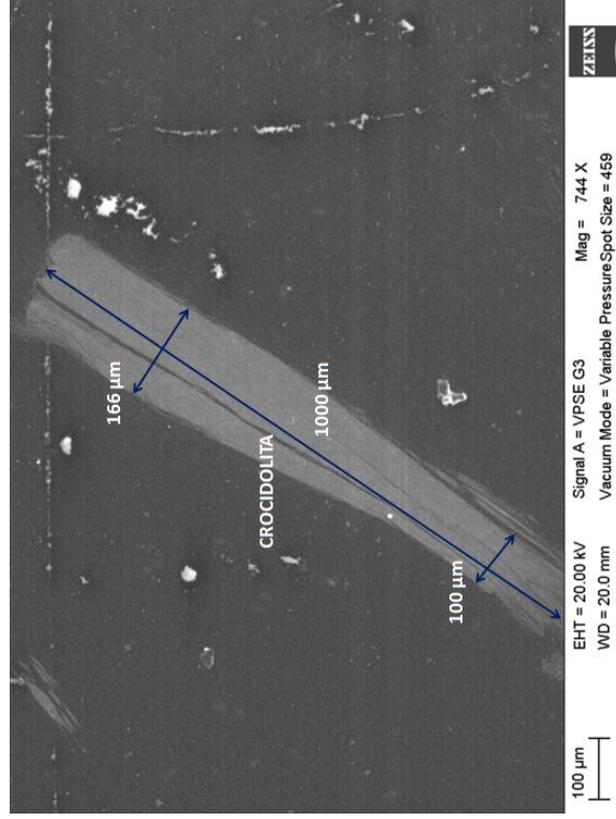


Figura 4.71. Fibra de crocidolita en la muestra de suelo *Barrientos S17*, a una escala de 100 µm, tiene una longitud promedio de 1000 µm, y su diámetro varía de 100 a 166 µm.

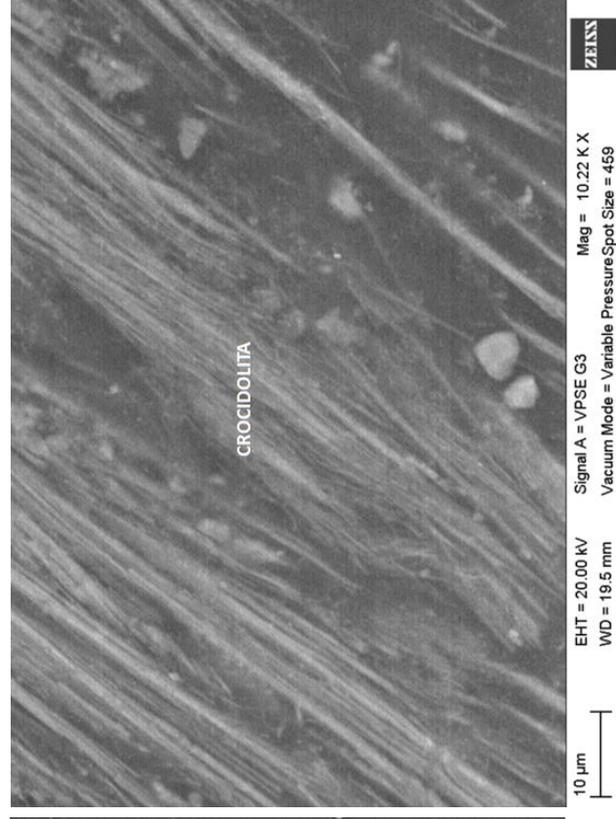


Figura 4.72. Fibra de crocidolita en la muestra de suelo *Barrientos S17*, vista a una escala de 10 µm. Se observa la separación de la fibra unidad en fibrillas de distintas dimensiones.

Área 3: Barrientos S17

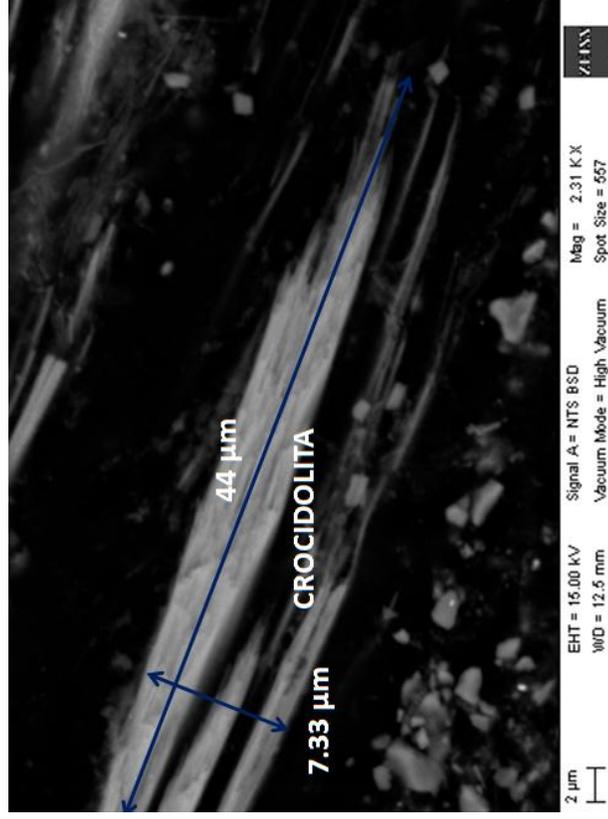


Figura 4.73.A. Fibra de crocidolita en la muestra *Barrientos S17*, con 44 μm de longitud y 7.33 μm de diámetro.

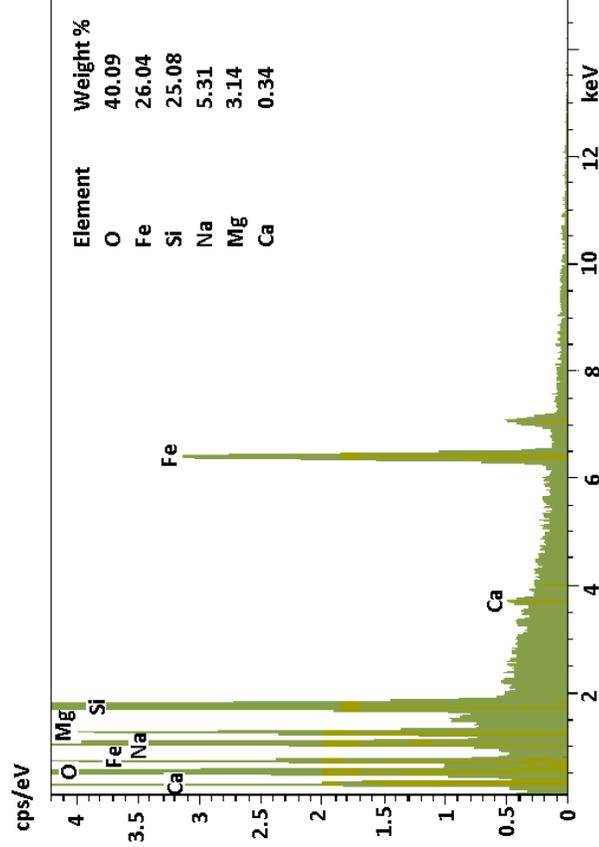


Figura 4.73.B. Gráfico del análisis EDS, correspondiente a la fibra de crocidolita que se observa en la *Figura 4.73.A*. La composición elemental indica presencia de 26.04% de Fe en la misma.

Área 3: Barrientos S17

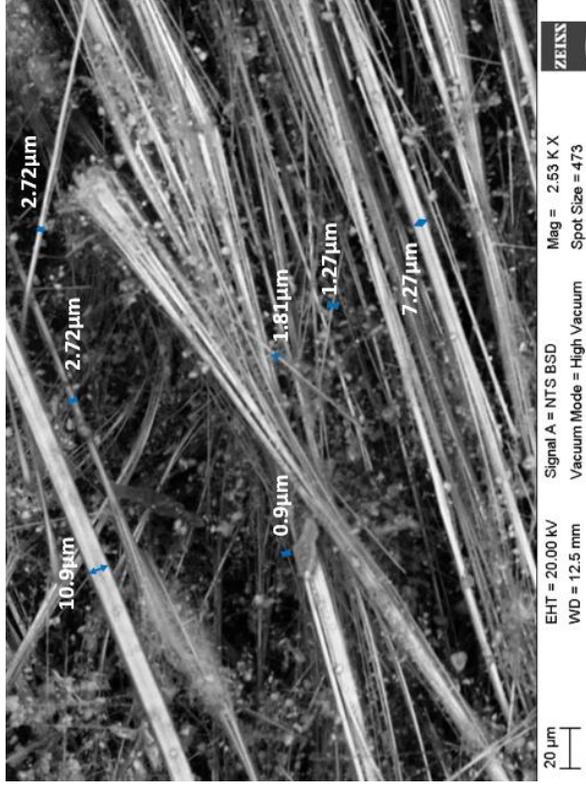


Figura 4.74. Fibras de crocidolita de la muestra *Barrientos S17*, vistas a 20 μm.

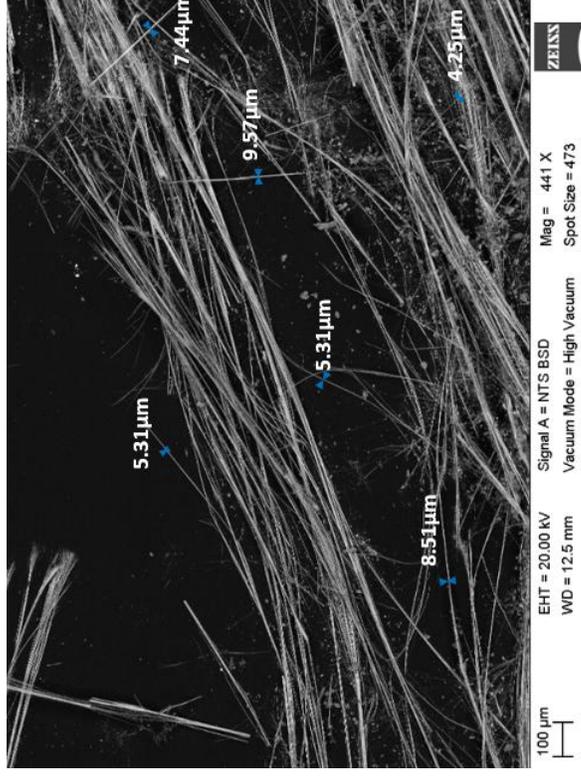


Figura 4.75. Fibras de crocidolita de la muestra *Barrientos S17*, vistas a 100 μm.

Tabla 4.15. Resumen de los resultados para los suelos de San Pedro Barrientos

Nombre	% Ctl	% Rbk	Longitud, µm	Diámetro, µm	Color	Normativa	Conclusión
Barrientos S1	3	4	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo	<p><i>NOM-052-ECOL-1993:</i> Considera como residuos peligrosos a las fibras de asbesto puro. Todos los residuos que contengan asbesto el cual no esté sumergido o fijo en un aglutinante natural o artificial.</p> <p><i>NOM-010-STPS-2014:</i> Clasifica al asbesto (todas sus formas, incluyendo al crisotilo) como un contaminante potencialmente cancerígeno.</p>	<p>Todos los suelos circundantes al área donde se encontraba la fábrica Asbestos de México, son suelos altamente peligrosos por contener fibras de asbesto puro (crisotilo y crocidolita), las cuales son consideradas como potencialmente cancerígenas</p>
Barrientos S2	3	5	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S3	3	5	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S4	2	5	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S5	1	9	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S6	3	10	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S7	5	6	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S8a	3	5	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S8b	2	3	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S9a	3	6	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S9b	1	3	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S10	2	5	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S11	1	2	480	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		
Barrientos S12	1	1	-	-	Ctl: Blanco verduzco Rbk: Azul grisáceo		

Tabla 4.15. (Cont.) Resumen de los resultados para los suelos de San Pedro Barrientos

Nombre	% Ctl	% Rbk	Longitud, μm	Diámetro, μm	Color	Normativa	Conclusión
Barrientos S13	13	17			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo	<p>NOM-052-ECOL-1993: Considera como residuos peligrosos a las fibras de asbesto puro. Todos los residuos que contengan asbesto el cual no esté sumergido o fijo en un aglutinante natural o artificial. NOM-010-STPS-2014: Clasifica al asbesto (todas sus formas, incluyendo al crisotilo) como un contaminante potencialmente cancerígeno.</p>	<p>Todos los suelos circundantes al área donde se encontraba la fábrica Asbestos de México, son suelos altamente peligrosos por contener fibras de asbesto puro (crisotilo y crocidolita), las cuales son consideradas como potencialmente cancerígenas cuales son consideradas como potencialmente cancerígenas</p>
Barrientos S14a	2	4			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S14b	3	6			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S15a	-	3			<i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S15b	-	3			<i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S16	2	3			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S17	15	11	44 a 1000	166 a 0.5	<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S18	-	6			<i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S19a	5	5			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S19b	4	16			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S20a	7	7			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S20b	3	4			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		
Barrientos S21	4	4			<i>Ctl:</i> Blanco verduzco <i>Rbk:</i> Azul grisáceo		

4.2.1.3. Resultados por DRX para las láminas tomadas en San Pedro Barrientos

Resultados sin tratamiento con ácido acético

Se analizaron dos muestras de lámina, recolectadas en San Pedro Barrientos, tales muestras pertenecen a uno de los tantos productos que producía la fábrica Asbestos de México, antes de someterlas a la técnica de Difracción de Rayos X, se observaron en el microscopio estereoscópico, a través de esta observación (20x) se pudieron identificar las fibras de crisotilo (*Figura 4.76*).



Figura 4.76. Conjunto de fibras de crisotilo presentes en la lámina 6 B.

Los resultados por DRX indican también la presencia de crocidolita, y de otras fases que no son asbestiformes como la calcita y el cuarzo.

Tabla 4.16. Análisis de roca total de láminas (*Barrientos*) sin tratarlas con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Lámina 5 B	Calcita [CaCO ₃] Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] Riebeckita [Na₂[(Fe²⁺)₃(Fe³⁺)₂]Si₈O₂₂(OH)₂]	50 39 8 3	98-004-0112 98-015-4289 98-010-9355 98-020-0423	14
2	Lámina 6 B	Calcita [CaCO ₃] Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] Riebeckita [Na₂[(Fe²⁺)₃(Fe³⁺)₂]Si₈O₂₂(OH)₂]	51 31 11 7	98-004-0112 98-009-0145 98-04103633 98-003-8218	10

Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita). En negritas se indican las fases asbestiformes. SM = Semicuantificación mineralógica. CM = Cristalinidad del material.

Resultados para después del tratamiento con ácido acético

Como en este caso el porcentaje en el que se presentaba la calcita era también elevado, se realizó el proceso de eliminación de carbonatos explicado en la metodología. Una vez anulada la calcita las dos muestras se observaron nuevamente en el microscopio estereoscópico, esta vez se pudieron distinguir las dos especies minerales (*Figura 4.77*) reportadas en los análisis por DRX antes de haberlas tratado con ácido acético.

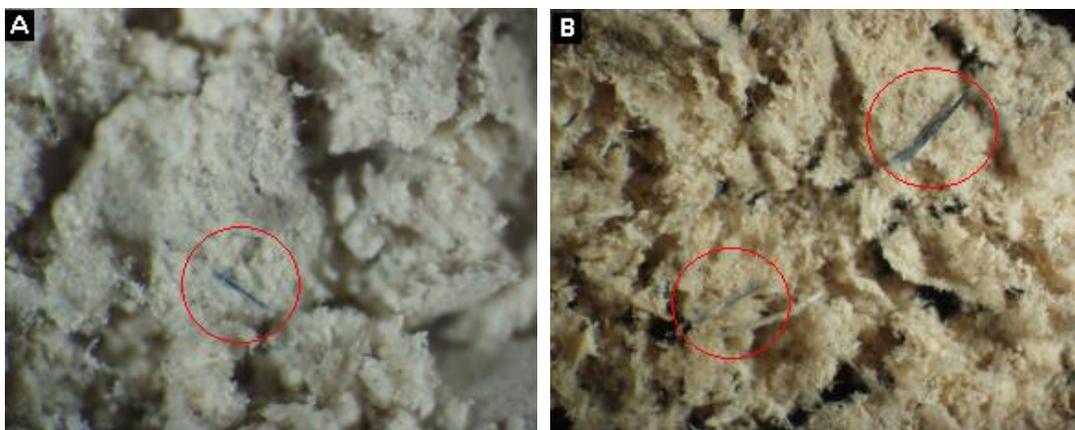


Figura 4.77. Muestra de la *lámina 5 B* (A) y de la *lámina 6 B* (B) después de haberlas tratado con ácido acético. En los círculos rojos se encierran las fibras de crocidolita, el resto de fibras corresponde a crisotilo.

Tabla 4.17. Análisis de roca total de *láminas (Barrientos)* después de haberlas tratado con ácido acético

N°	MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	SM (%)	FICHAS PDF	CM
1	Lámina 5 B Ac	Cuarzo [SiO ₂] Crisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂]	83 12 5	98-008-3849 98-041-3633 98-033-8218	14
2	Lámina 6 B Ac	Cuarzo [SiO ₂] Ortocrisotilo [Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄] Riebeckita [Na ₂ [(Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺) ₂]Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂]	59 31 9	98-020-1353 98-041-3633 98-033-8218	12

Riebeckita = Crocidolita (variedad fibrosa de la Riebeckita).
En negritas se indican las fases asbestiformes.
SM = Semicuantificación mineralógica.
CM = Cristalinidad del material.

Gráficos

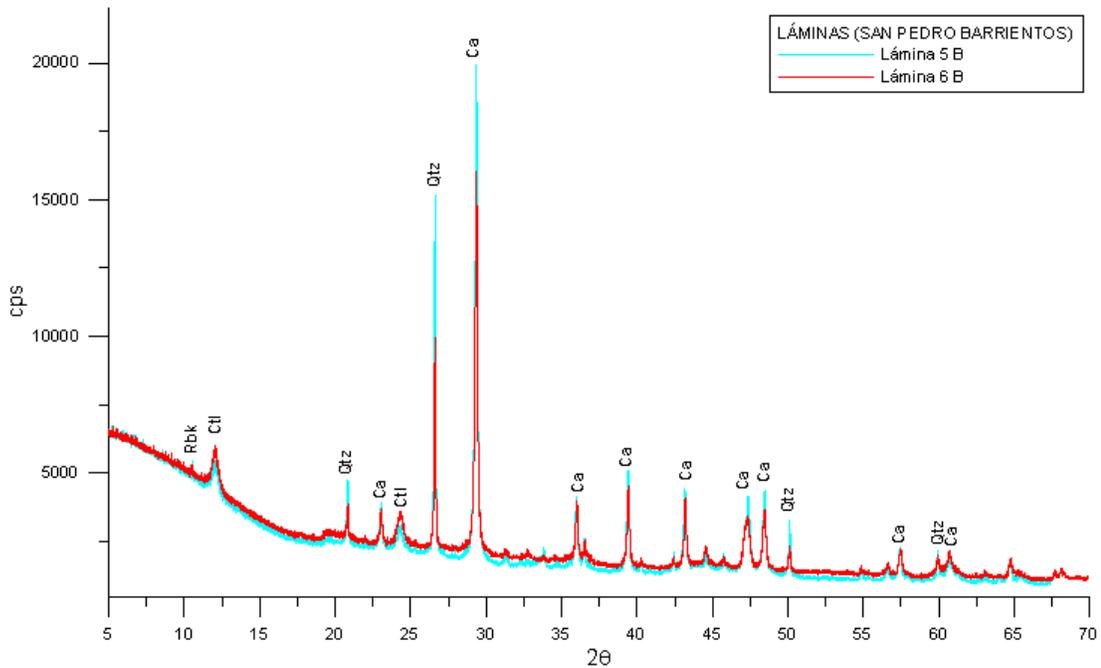


Figura 4.78. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de *lámina* tomadas en San Pedro Barrientos en donde se indican las fases identificadas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.

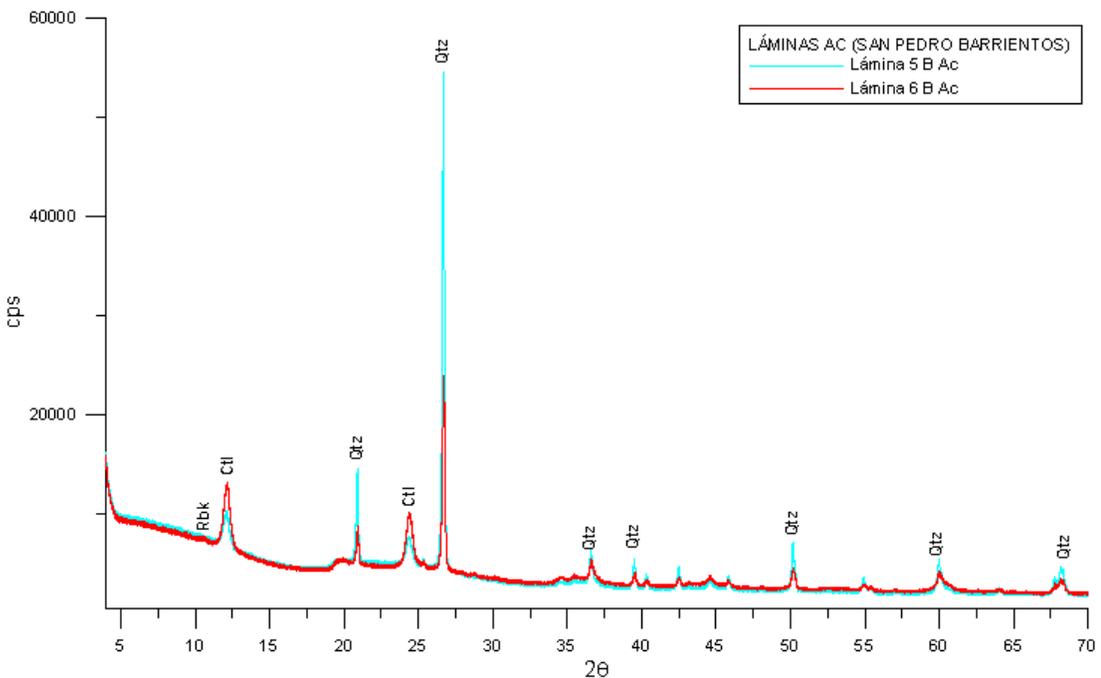


Figura 4.79. Difractogramas sobrepuestos de las muestras de *lámina* tomadas en San Pedro Barrientos después de haberlas tratado con ácido acético, en donde se indican las fases identificadas. La simbología utilizada es la propuesta por Kretz, 1983.



CAPÍTULO 5.
DISCUSIÓN

Capítulo 5. DISCUSIÓN

5.1 Herramientas para la caracterización mineralógica de los asbestos

Un mineral es por definición (IMA) un sólido cristalino natural con estructura cristalina y composición definida. Es con base en dicha definición que para determinar la identidad de una fase mineral, debemos caracterizar su estructura mediante difracción de rayos X y su composición química mediante microsonda electrónica o MEB.

Los asbestos son minerales fibrosos que pertenecen al grupo de los anfíboles (inosilicatos de doble cadena) y al grupo de la serpentina (filosilicatos 1:1 o T:O). La composición de los anfíboles puede describirse mediante la fórmula $A_{01}B_2C_5T_8O_{22}(OH,O,F,Cl)_2$ y en el caso del crisotilo por la fórmula $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$.

Dado que los efectos sobre la salud de estos minerales depende en gran medida de la morfología y tamaño de sus fibras, el estudio mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido nos permite completar la información relevante de la caracterización de dichos minerales.

El principal problema que nos encontramos en los temas de salud relacionados con los minerales del asbesto es que en ninguna parte del proceso de fabricación de productos de asbestos existe una etapa de control mineralógico que defina el tipo (anfíbol o serpentina), tamaño, grosor y abundancia de las fibras de asbesto.

En el transcurso de este trabajo hemos desarrollado una metodología que puede implementarse en la caracterización de materiales industriales fabricados con asbesto y la caracterización de suelos contaminados con estos minerales y que incluye la utilización de dos herramientas básicas:

1. Caracterización mineralógica y semicuantificación de las fibras de asbesto mediante DRX.
2. Estudio textural mediante microscopía óptica y/o de barrido para definir el tamaño y grosor de las fibras.

Así mismo, en este estudio he podido comprobar que para muestras con proporciones de carbonato superiores al 50% la determinación del tipo de asbesto se puede dificultar por lo que se recomienda eliminación del carbonato mediante incorporación repetida de ácido acético al 25%. En ese tratamiento, es fundamental asegurarse de que el lavado de las muestras después de su exposición al ácido sea el correcto, pues de no ser así, es posible la formación de nuevas fases.

5.2 Resultados mineralógicos

5.2.1 Asbestos en los materiales industriales

A través de las técnicas de caracterización utilizadas fue posible afirmar que la composición principal de las láminas (tejas) de asbesto está constituida por cuarzo y calcita como minerales principales, y por crisotilo y anfíboles (a menudo crocidolita), estos últimos ocupando entre el 13 y 17%, los datos nos indican que si bien, el porcentaje que ocupan los minerales asbestiformes no es tan predominante, y que de alguna forma México está cumpliendo con el dictamen establecido por la EPA (Environmental Protection Agency; 1985, 1988), en cuanto a que el contenido de asbesto para las láminas debe ser de 20% a 50%; el país no tiene control, ni selección sobre la naturaleza y las dimensiones de las fibras que se utilizan, ya que observando las muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido nos pudimos percatar de que el tamaño y composición mineralógica de éstas es muy variado incluyendo tanto variedades serpentiniticas como anfíbolíticas.

Además, es importante mencionar que difícilmente se puede controlar el tamaño de las fibras, ya que debido a su naturaleza mineralógica tienden a romperse en fibrillas, por ejemplo, el crisotilo tiene una dureza de 2.5-3, propiedad que lo hace fácilmente quebradizo, y también cuenta con una exfoliación basal perfecta, lo que provocará que inevitablemente se rompa repetidas veces en el mismo plano formando nuevas fibras. Con respecto a los anfíboles, aunque su dureza es mayor a la del crisotilo, siendo de 5 a 6 en la escala de Mohs, tienden también a romperse en fibrillas porque cuentan con una exfoliación perfecta.

Por su parte, las muestras de tinacos estudiadas tienen del 8 al 18% de crisotilo; la fase principal en estas muestras es la calcita; en este sentido se podría pensar que los tinacos son en principio menos peligrosos que las láminas, ya que éstos no tienen un porcentaje relevante de fibras de anfíbol.

Dentro de todos los grupos estudiados en este trabajo, los materiales pertenecientes al grupo de *otros asbestos*, son los más peligrosos, por sus altas concentraciones de asbesto y algunos de ellos por no tener una matriz que aglutine las fibras.

En cuanto al mortero y al concreto sellador, se pueden clasificar como los materiales “menos peligrosos”, ya que su contenido de asbesto (crisotilo) es menor del 5%.

No obstante, ninguno de los materiales industriales es completamente inofensivo por contener crisotilo, el cual ha sido encontrado en muestras de pulmones de personas que trabajaban con estas fibras (Adib, *et. al.*, 2013).

5.2.2. Asbestos en suelos del barrio de San Pedro Barrientos

En la zona 1, todos los suelos contienen tanto crisotilo como crocidolita, al sumar ambos tipos, los asbestos comprenden entre el 7% y el 13%;

Otras fases comunes son las plagioclasas, que representan más del 50% de la composición de los suelos; el cuarzo, la calcita, la tridimita y las micas.

En la zona 2 (zona paralela a la Avenida Gustavo Baz, ver *Figura 4.64*), al igual que en la zona 1, todos los suelos contienen asbesto blanco y asbesto azul; en esta área se encuentra una de las muestras que registraron mayor contenido de amianto, se trata de la muestra *Barrientos S13*, la cual tiene 17% de crocidolita y 13% de crisotilo.

La zona 3 (zona paralela a la vía férrea, ver *Figura 4.64*) se caracteriza y se diferencia de las dos zonas anteriores, porque tres de las muestras analizadas no contienen fibras de crisotilo, siendo así las muestras que presentan menos asbesto en su composición.

Todos estos suelos son considerados como residuos peligrosos según la Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993) por contener fibras de asbesto, esencialmente crisotilo y crocidolita, la que se asocia con muy elevada frecuencia a mesoteliomas pleurales y peritoneales en mineros y personas que viven cerca de las minas.

5.3 Aspecto médico-salud

En 1986, el asbesto fue declarado cancerígeno humano por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer de la Organización Mundial de la Salud (Aguilar, 2003).

No obstante, existen organizaciones que están a favor del empleo del asbesto en varias aplicaciones industriales, y que argumentan que es indispensable subrayar la diferencia entre las fibras de crisotilo y las de anfíboles, ya que el potencial de efectos de peligrosidad es extremadamente diferente, siendo los anfíboles mucho más peligrosos por su estructura. Ciertamente la morfología de las dos familias minerales es diferente; sin embargo los estudios médicos especifican que los dos tipos de asbesto son dañinos para la salud humana; pues al ser el asbesto un mineral resistente a los elementos más corrosivos y al calor, no puede ser destruido por las defensas de los órganos que afectan; es así como para la asbestosis y el mesotelioma se señala como agente etiopatogénico (que causa o contribuye a generar una determinada patología), al asbesto (crisotilo y/o anfíbol).

Hay varias teorías que tratan de explicar el carácter tóxico de las fibras de asbesto, la cantidad de información epidemiológica que se ha acumulado a lo largo de los años lleva a concluir, que el riesgo de enfermedades relacionadas con el amianto está vinculado esencialmente a tres factores, que son:

1. la dosis (cantidad de polvo inhalada),
2. la dimensión de las fibras

DISCUSIÓN

3. la durabilidad (biopersistencia de ese polvo en los pulmones)

Sin embargo esto no quiere decir que existe un umbral de exposición por debajo del cual no hay riesgo de la enfermedad, la Organización Mundial de la Salud (OMS) advirtió en 1998 que los efectos crónicos por contacto al asbesto son independientes de la dosis de exposición, siendo por lo tanto imposible establecer niveles seguros, por lo que la solución de la OMS para evitar el daño que produce el asbesto en la salud es la prohibición de su uso.

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) definió como fibras de asbesto aquellas que tienen una longitud igual o mayor a $5\mu\text{m}$, un diámetro menor a $3\mu\text{m}$ y una relación entre longitud y diámetro igual o superior a 3:1 (Virta, 2002; Van Gosen et al., 2005). Las fibras que cumplen con tales características son consideradas las más peligrosas para el sistema respiratorio humano (Virta, 2002; Van Gosen et al., 2005).

Todas las fibras analizadas en las láminas y tinacos tienen longitudes superiores a $5\mu\text{m}$ y diámetros menores a $3\mu\text{m}$, lo que sugiere que en el país no existe un control sobre el tamaño de las fibras que se utilizan en la fabricación de láminas y tinacos, suponiendo estos productos un peligro para la población que los consume, siendo generalmente sectores que muchas veces carecen de recursos económicos, por lo que probablemente sea este sector uno de los más afectados.

Las dimensiones de las fibras del resto de los materiales estudiados (asbesto comprimido, cartón de asbesto, tela de asbesto, polvo de asbesto, cuerda de asbesto y protector de asbesto), suponen también peligro para las personas que los manipulan, pues se encontraron fibras con diámetros menores a $0.12\mu\text{m}$ y longitudes mayores a $5\mu\text{m}$, valores muy similares a las dimensiones de las fibras encontradas en las muestras de pulmones de trabajadores que fabricaban mascarás de gas con filtros que contenían 20% de asbesto, tales fibras tenían longitudes mayores a $0.125\mu\text{m}$ y diámetros mayores a $6\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$ (Berry, *et. al.*, 2008).

Otra de las características de las fibras que denotan su peligrosidad es su contenido de Fe, el cual induce en las células un daño mediado por reacciones oxidativas relacionadas con el hierro, que provocan daño en el ácido desoxiribonucleico (DNA) y rupturas de su cadena (Echegoyen y Rivera, 2013). En las muestras de suelo de San Pedro Barrientos la variedad de asbesto más común es la crocidolita, la cual es una de las especies asbestíferas más ricas en Fe, seguida por la amosita. Siendo así que los habitantes que viven cerca del lugar donde se encontraba la fábrica, están expuestos ante uno de los minerales considerados más peligrosos.

5.4 Revisión de la legislación mexicana en relación al uso de los asbestos

El asbesto, clasificado comercialmente como producto químico y mineralógicamente como mineral industrial, ha sido discutido para su inclusión en el Anexo III de la Convención de Rotterdam (la convención de Rotterdam es una organización internacional que intenta regular el trato mundial de los químicos peligrosos, que han sido restringidos severamente por su peligrosidad para la salud humana y el ambiente). Pero varios países entre ellos México se han opuesto a tal inclusión, a pesar de que el asbesto ha sido definido como cancerígeno por la Agencia Internacional por la Investigación sobre el Cáncer (IARC) y reconocido como tal por la Organización Mundial de la Salud y por la Organización Internacional del Trabajo en el año 2006 (LaDou, 2010).

Puesto que México se ha negado a prohibir el uso del amianto, se ha visto también en la necesidad de implementar normas para la “protección” de los trabajadores mexicanos. Fue así como en 1994 creó la norma oficial mexicana 125 con respecto a los requisitos sanitarios para el proceso y uso del asbesto, la cual tomó como referencia a otras normas mexicanas, siendo una de las más importantes la NOM-010-STPS-1994, ya que en ésta se establece el valor límite permisible de las fibras de asbesto en el ambiente laboral.

Tal norma fijó como valor límite la cantidad de 2 fibras por centímetro cubico (f/cm^3), para todas las formas de asbesto; se resalta que para la elaboración de esta norma participaron algunas instituciones del sector salud y que para ese entonces ya era bien conocido que cualquier variedad de asbesto daña el sistema respiratorio humano. También participaron empresas como Eureka, S.A. de C.V., Mexalit Industrial, S.A. de C.V., y el Instituto Mexicano de Fibro-industrias, A.C. (IMFI), las dos primeras son empresas que utilizaban y que siguen utilizando fibras de amianto para la manufactura de sus productos; por su parte el IMFI es una asociación fundada en 1989 que promueve el uso seguro del crisotilo.

En 1999 se expidió la NOM-010-STPS-1999, que sustituyó a la NOM-010-STPS-1994, en esta nueva norma se realizaron algunas modificaciones, en principio se diferencio entre el crisotilo y los anfíboles amosita y crocidolita, marcando como valor límite permisible en el ambiente laboral la cantidad de $1 f/cm^3$ para el crisotilo, $0.5 f/cm^3$ para la amosita y $0.2 f/cm^3$ para la crocidolita; mientras que para las variedades restantes (actinolita, antofilita y tremolita), el valor establecido fue de $2 f/cm^3$.

Es importante señalar que desde 1994 la OSHA (Occupational Safety and Health Administration) dictaminó como límite posible de exposición al amianto a $0.1 f/cm^3$, sin embargo, para que tal dictamen se llevara a cabo en México, tuvieron que pasar 10 años; pues fue en el 2014, cuando entró la norma oficial mexicana NOM-010-

DISCUSIÓN

STPS-2014, que sustituyó a la norma NOM-010-STPS-1999, y en la que se estableció como nivel máximo permisible 0.1 fibras por centímetro cúbico para todas las formas de asbesto.

Debemos tomar en cuenta que si se considera este valor tan solo para 1 metro cúbico, el número de fibras en el ambiente es igual a 100, 000.

En México no existen organizaciones sanitarias que se encarguen de verificar el cumplimiento de las normas señaladas, esto se puede comprobar al visitar los establecimientos que operan con productos de asbesto, donde por un lado, los trabajadores no cuentan con equipos de protección personal especializados, y por otro, ponen a la venta sin restricción alguna, materiales que de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993) son altamente peligrosos, varios de esos materiales fueron estudiados aquí, por ejemplo, el polvo de asbesto, la cuerda y tela de asbesto, que como se comprobó con los análisis (DRX; SEM) realizados su composición mineralógica es básicamente de asbesto, la NOM-052-ECOL-1993, establece que las fibras de asbesto puro, incluyendo polvo y productos fácilmente desmenuzables con la presión de la mano, son residuos peligrosos; de esta manera se puede decir que en el país se están comerciando residuos peligrosos.

México sigue la política de Canadá con respecto al uso seguro del asbesto (crisotilo), entendiéndose así, que nuestro país al seguir esta política solamente está utilizando fibras de crisotilo para manufacturar sus productos, sin embargo, algunas de las láminas (*lámina 2 y 4*) y tinacos (*tinaco 1*) analizados en este trabajo presentan variedades de anfíbol asbestiforme.

La Norma Oficial Mexicana 125 (NOM-125-SSA1-1994), establece que para prevenir daños a la salud de la población circunvecina, las empresas que procesan fibras de asbesto deben notificarlo a la Dirección General de Salud Ambiental y/o a las Delegaciones de Regulación Sanitaria de los Servicios de Salud Estatales de la Secretaría de Salud, no obstante esto no ocurrió en el pueblo de San Pedro Barrientos, ya que es uno de los lugares que tiene mayor índice de enfermedades respiratorias relacionadas con la inhalación de las fibras; y que actualmente, sus suelos están contaminados con amianto (crocidolita y crisotilo) y la población no ha recibido información que les pueda ayudar a mitigar el riesgo que supone la presencia de asbesto puro (clasificado en la NOM-052-ECOL-1993 como residuo peligroso). Es por ello, que se recomienda el uso de herramientas mineralógicas para demostrar, caracterizar y semicuantificar la presencia de fibras de asbestos en los suelos y ofrecer esta información a la población y proveer cuando sea necesario procesos de remediación, de prevención y control, para garantizar la seguridad de las personas expuestas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-125-SSA1-1994, menciona “es conveniente especificar que el 95% de asbesto que se utiliza en México es el crisotilo y el 5% restante pertenece a las fibras de anfíboles las cuales tienden a reducir aún más su participación en este mercado”. Ahora bien, en este estudio se analizaron muestras de láminas (tejas) recientes, las cuales contienen fibras de crocidolita en porcentajes del 7 al 11%; así mismo se analizaron dos muestras de láminas antiguas, producidas en la fábrica Asbestos de México, éstas también con crocidolita, la cual se presenta en porcentajes del 3 a 7%. Al comparar tales valores se encuentra que el porcentaje de anfíbol utilizado en la fabricación de láminas en lugar de disminuir ha incrementado contradiciéndose de esta forma la política mexicana del uso seguro del crisotilo.

REFERENCIAS

Adib G., Labreche F., De Guire L., Dion C y Dufresne A. (2013). *Short, Fine and WHO Asbestos Fibers in the Lungs of Quebec Workers With an Asbestos-Related Disease*. American Journal of Industrial Medicine.

Aguilar G. M., Juárez C. A. P., Markowitz S., Hernández M. A., Sánchez F. R. R. y Vázquez H. G. (2003). *Globalization and the Transfer of Hazardous Industry: Asbestos in Mexico, 1979-2000*. Volume 9, N° 3.

Berry G., Pooley F., Gibbs A., Harris J. M. y McDonald J. C. (2009). Lung Fiber Burden in the Nottingham Gas Mask Cohort.

Echegoyen C. R. y Rivera R. R. M. (2013). *Asbestosis y mesotelioma pleural maligno*. Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM, Vol. 56. N° 2.

LaDou, J.; Castleman, B.; Frank, A.; Gochfeld, M.; Greenberg, M.; Huff, J.; Kant, T. J.; Landrigan, P. J.; Lemen, R.; Myers, J.; Soffritti, M.; Soskolne, C. L.; Takahashi, K.; Teitelbaum, D.; Terracini, B. y Watterson A. (2010). *The Case for a Global Ban Asbestos*. Environmental Health Perspectives, Volume 118, N° 7.

Van Gosen B. S., Lowers H. A., Bush A. L., Meeker G. P., Plumlee G. S., Brownfield I. K. y Sutley S. J. (2005). *Reconnaissance Study of the Geology of U.S. Vermiculite Deposits—Are Asbestos Minerals Common Constituents?*. U.S. Geological Survey Bulletin 2192

Virta R. L. (2002). *Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses*. Open File Report 02-149. Reston, VA: USGS.



CAPÍTULO 6.
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- ✓ Todos los materiales industriales contienen asbesto blanco; los cuales generalmente están dirigidos a un sector de la población que carece de recursos económicos, por lo tanto es este sector probablemente el más propenso a contraer enfermedades relacionadas con la inhalación de fibras asbestíferas.
- ✓ Todos los suelos estudiados presentan un tipo o ambos tipos de asbesto (crisotilo y/o anfíbol).
- ✓ La variedad de anfíbol más común es la crocidolita (asbesto azul), clasificado como uno de los más peligrosos por su contenido de Fe.
- ✓ Debido a que las fibras de asbesto se encuentran en proporción variable, y que no existe nivel seguro de exposición se debe informar a la población, para que tomen medidas de prevención.
- ✓ De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana 52 (NOM-052-ECOL-1993), los suelos circundantes a la fábrica Asbestos de México, por contener fibras de asbesto puro (clasificadas como contaminantes potencialmente cancerígenos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-010-STPS-2014)), se catalogan como residuos peligrosos.
- ✓ Este trabajo es importante en el estudio desde el punto de vista mineralógico de materiales fabricados con asbestos y de suelos contaminados con los mismos, ya que ofrece una forma de caracterizar e identificar la naturaleza de las fibras, mediante la aplicación de técnicas como la Difracción de Rayos X y la Microscopia Electrónica de Barrido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la observación en un microscopio estereoscópico de los materiales y suelos a estudiar como primer paso en la metodología, ya que de esta manera se puede verificar la presencia de las fibras de asbesto y relacionar las características observadas como el color y la morfología con la literatura, para tratar de establecer la variedad de asbesto.
- ✓ Se recomienda el empleo de la Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido, durante el estudio de casos de enfermedades relacionadas con la exposición al asbesto, para poder determinar y documentar con exactitud las características morfológicas y composicionales de las fibras.
- ✓ Para estudios posteriores se recomienda realizar un monitoreo del aire, mediante la colocación de filtros en el área contaminada para determinar la cantidad de fibras en el ambiente.
- ✓ Realizar estudios del mismo tipo en diferentes lugares que presenten problemas de contaminación por asbestos y contrastarlos para establecer relaciones y diferencias en cuanto al tipo y proporción de asbestos, así como en la incidencia de casos de enfermedades por inhalación de amianto.
- ✓ Organizar campañas de información para hacer saber a las personas sobre los peligros y los daños que pueden causar las fibras de asbesto.



ANEXOS

ANEXOS

Anexo A. Fichas mineralógicas de los asbestos

Cuadro 1.1. Crisotilo

Crisotilo. $Mg_6[(OH)_8Si_4O_{10}]$. El crisotilo o asbesto blanco es un silicato magnésico del subgrupo de los filosilicatos que pertenece a las serpentinitas. Es una serpentina trioctaédrica que puede presentarse en los siguientes politipos estructurales: clinocrisotilo, ortocrisotilo y paracrisotilo (una variedad cultivada de ortocrisotilo). A menudo crece perpendicularmente a las fisuras de la roca, en finas fibras o agregados masivos. El clinocrisotilo crece en el sistema monoclinico, mientras que el ortocrisotilo lo hace en el sistema ortorrómbico. Presenta los colores blanco, gris, verde y muestra un lustre sedoso. Bajo el microscopio electrónico se observa como fibras flexibles y fácilmente separables. Tiene dureza de 2.5 a 3 y densidad de $2.55 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$. En lámina delgada es incoloro, aparece en venitas de fibras transversales. Tiene relieve bajo, birrefringencia moderada ($n_\gamma - n_\alpha = 0.011$ a 0.014) y una extinción paralela (*Figura 1.1.1*).

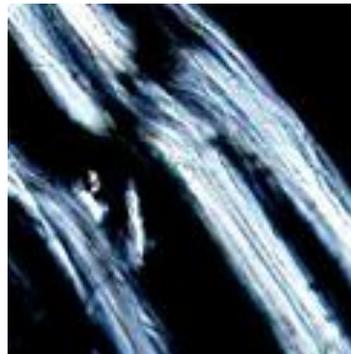


Figura 1.1.1. Crisotilo bajo el microscopio óptico, con polarizadores cruzados muestra colores de interferencia de bajo orden (Imagen tomada de <https://www.microscopyu.com/articles/polarized/polarizedintro.html>)

Los minerales de serpentina principalmente se forman después de la alteración hidrotermal retrógrada de rocas ultrabásicas, por ejemplo, dunitas, peridotitas o piroxenitas, o por metamorfismo progrado de serpentinita preexistente. Una reacción prograda a una temperatura inferior a los 500°C comúnmente da como resultado una mezcla de crisotilo y lizardita. Estas últimas condiciones se asocian por lo general con la formación de asbesto. En un depósito típico de asbesto, por ejemplo en Cassiar, British Columbia, las variedades de serpentina ocurren siguiendo la secuencia: lizardita pseudomórfica retrógrada \rightarrow lizardita + crisotilo \rightarrow crisotilo + antigorita \rightarrow antigorita.

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Cuadro 1.2. Actinolita

Actinolita. $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5[(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$. La actinolita es un inosilicato del grupo de los anfíboles. Se desarrolla en el sistema monoclinico. Usualmente es de color verde, verde negruzco, gris verdoso o negro, con un lustre vítreo o perlado y de raya blanca. Se presenta en laminillas largas, cristales columnares cortos, en forma granular, radial, en agregados fibrosos y en forma masiva. Tiene dureza de 5 a 6 y densidad de 3.05 a 3.25 $\left[\frac{g}{\text{cm}^3}\right]$.

En lámina delgada, es incolora o verde pálido, las variedades verdes presentan un débil pleocroísmo, la forma en la que se encuentra es en cristales prismáticos largos y en agregados columnares a fibrosos (*Figura 1.2.1.A*). Tiene exfoliación en [110] en dos direcciones formando ángulos de aproximadamente 56° y 124° y su relieve es moderadamente alto al igual que su birrefringencia ($n_\gamma - n_\alpha = 0.022$ a 0.027) (*Figura 1.2.1.B*). La máxima extinción de las secciones longitudinales varía de 10° a 20° , algunas secciones longitudinales tienen una extinción paralela o casi paralela, las secciones transversales tienen extinción simétrica. Es frecuente encontrar maclas cuyo plano es [100]. Su figura de interferencia es biáxica negativa con un ángulo axial muy grande ($2V = 79^\circ$ a 85°).

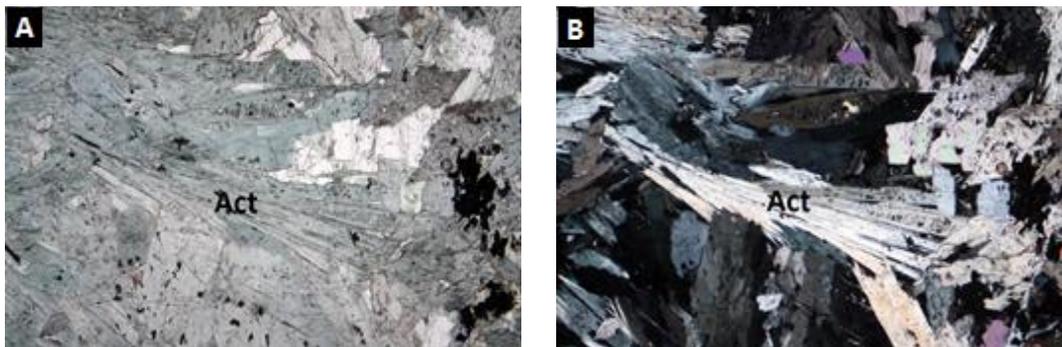


Figura 1.2.1. Actinolita bajo el microscopio óptico, en A sin nicoles cruzados y en B con nicoles cruzados mostrando colores de interferencia de bajo orden (Imágenes tomadas de <http://www.alexstrekeisen.it/english/meta/actinolite.php>.)

La actinolita es un mineral característico de rocas ultrabásicas con metamorfismo regional de bajo grado.

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Cuadro 1.3. Amosita

Amosita (Grunerita). $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_7[(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$. La amosita o grunerita es un inosilicato del grupo de los anfíboles. Crece en el sistema monoclinico, en forma acicular o en agregados radiales. Los colores que presenta son grises y verde oscuro, con un lustre vítreo a sedoso. Tiene dureza de 5 a 6 y densidad de 3.46 a 3.68.

En sección delgada es incolora y débilmente pleocroica (*Figura 1.3.1*). Normalmente aparece en agregados fibrosos a columnares. Tiene exfoliación en dos direcciones que forman ángulos de aproximadamente 56° y 124° . Su relieve es moderadamente alto, así como su birrefringencia ($n_\gamma - n_\alpha = 0.042$ a 0.054). En secciones longitudinales el máximo ángulo de extinción varía de 10° hasta aproximadamente 15° .

Característica de la grunerita es la macla polisintética cuyo plano es $[100]$. Las figuras de interferencia son difíciles de obtener, pero cuando se consiguen son biáxicas negativas de ángulo axial grande ($2V = 79^\circ$ a 86°).

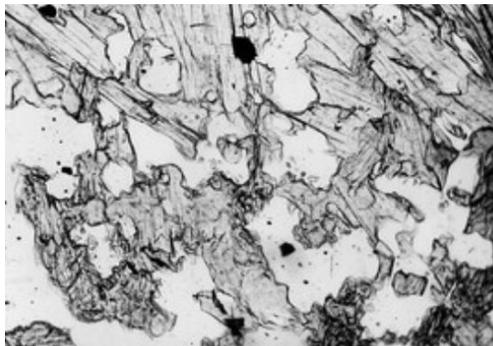


Figura 1.3.1. Grunerita bajo el microscopio óptico (Imagen tomada de https://www.flickr.com/photos/nmu_archives/5862928349/)

La grunerita es un mineral común de formaciones de hierro moderadamente metamorfoseadas. Cuando el metamorfismo ha sido predominantemente de carácter regional el conjunto característico es la magnetita-grunerita-cuarzo; en las rocas que han sido sometidas al contacto con metamorfismo regional se asocian comúnmente con fayalita, hedenbergita y almandino.

La grunerita es relativamente rara en el medio ambiente ígneo pero ocurren en algunas rocas volcánicas silíceas y también, junto con hornblenda, en algunas dioritas.

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Cuadro 1.4. Antofilita

Antofilita. $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_7[(\text{OH})(\text{Si}_4\text{O}_{11})]_2$. La antofilita es un inosilicato del grupo de los anfíboles se desarrolla en el sistema ortorrómbico. Raramente se presenta en cristales prismáticos largos, usualmente es acicular, columnar paralelo o radial y en agregados fibrosos. Tiene colores blanco, gris verdoso, verde, marrón y marrón amarillento, principalmente es translúcido a opaco, con lustre vítreo a sedoso. Su dureza es de 5.5 a 6 y su densidad de 3.16 a 3.57.

En lámina delgada es incolora o ligeramente coloreada, fuertemente pleocroica: de rosa pálido a marrón dorado, verde o incoloro. A veces se muestra de color blanco a rosa fosforescente bajo luz UV. Los aspectos característicos de la antofilita son los cristales prismáticos largos y los agregados columnares a fibrosos (*Figura 1.4.1.A*). Tiene exfoliación en dos direcciones [110] formando ángulos de 54° y 126° . Su relieve es alto y su birrefringencia moderada ($n_\gamma - n_\alpha = 0.016$ a 0.025) (*Figura 1.4.1.B*). La extinción que presenta en secciones longitudinales es paralela, en las transversales es simétrica al contorno o exfoliación. No existen maclas. Su figura de interferencia es biáxica positiva de ángulo grande o neutro ($2V=90^\circ$).

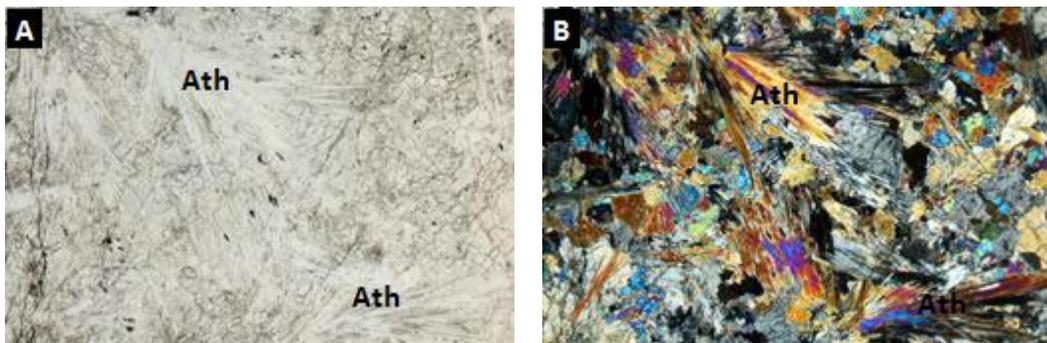


Figura 1.4.1. Antofilita bajo el microscopio óptico, en A incolora y en B, muestra moderados colores de interferencia (Imágenes tomadas de <http://www.alexstrekeisen.it/english/meta/anthophyllite.php>).

Los anfíboles ortorrómbicos son desconocidos en rocas ígneas, sin embargo, la antofilita se presenta en una amplia gama de rocas de origen metamórfico y metasomático. Es un producto común en las zonas de reacción entre los cuerpos ultramáficos (por ejemplo peridotitas serpentinizadas) y rocas ígneas más ácidas o pegmatitas. En metamorfismo regional los ortoanfíboles generalmente no aparecerán en facies de esquisto verde, pero lo harán en facies de anfíbolita.

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Cuadro 1.5. Crocidolita

Crocidolita (Riebeckita). $[\text{Na}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_3\text{Fe}_2^{3+}[(\text{OH})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}]]$. La crocidolita es un inosilicato del grupo de los anfíboles, crece en el sistema monoclinico como cristales prismáticos largos o agregados fibrosos, verticalmente estriados; en los colores azul-gris, azul-negro, gris y marrón, tiene una raya gris pálido azulado, y es translúcido a opaco. Muestra un lustre vítreo a mate. Tiene dureza de 5.5 y densidad de 2.94 a 3.46.

En sección delgada es azul oscuro, presenta fuerte pleocroísmo; α , azul oscuro, β , azul más brillante y γ , verdoso (*Figura 1.5.1.*). La riebeckita se encuentra en cristales prismáticos subhédricos y agregados fibrosos. Tiene exfoliación perfecta en [110] en dos direcciones, formando ángulos de 56° y 124° . Su relieve es alto y su birrefringencia muy débil ($n_\gamma - n_\alpha = 0.004$). Presenta extinción paralela. La figura de interferencia es biáxica negativa de ángulo grande.

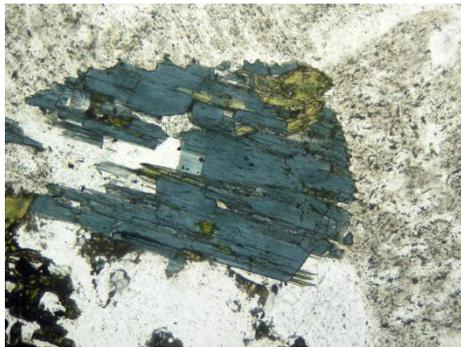


Figura 1.5.1. Riebeckita bajo el microscopio óptico sin nicoles cruzados (Tomado de <http://www.alexstrekeisen.it/pluto/anfiboli.php>)

La riebeckita se encuentra en algunos esquistos con metamorfismo regional de bajo grado y también puede ocurrir en ambientes autigénicos. La crocidolita fibrosa puede resultar de la inestabilidad de la riebeckita masiva durante el período en que las formaciones de hierro fueron sometidas a tensión de cizallamiento.

La riebeckita se encuentra en granitos y sienitas, en microgranitos y en rocas volcánicas ácidas. Ahora se reconoce que, al menos en algunos granitos de riebeckita, ésta se forma en la etapa subsólida probablemente a través de la acción de fluidos oxidantes, no en la etapa magmática de cristalización.

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Cuadro 1.6. Tremolita

Tremolita. $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ La tremolita es un inosilicato del grupo de los anfíboles, se desarrolla en el sistema monoclinico. Generalmente se presenta en láminas alargadas, fibroso, columnar o masivo, en los colores pardo, incoloro, gris, verde claro o blanco. Muestra un lustre vítreo a nacarado y raya blanca. Tiene dureza de 5 a 6 y densidad de 3. En lámina delgada la tremolita es incolora a verde pálido (*Figura 1.6.1.A*). Las variedades verdes presentan un débil pleocroísmo. Tiene exfoliación en [110] en dos direcciones formando ángulos de aproximadamente 56° y 124° . Las secciones longitudinales presentan huellas de exfoliación paralelas a la longitud. Hay particiones paralelas a (100). Su relieve es moderadamente alto al igual que su birrefringencia ($n_\gamma - n_\alpha = 0.022$ a 0.027) (*Figura 1.6.1.B*). La máxima extinción de las secciones longitudinales varía de 10° a 20° , algunas secciones longitudinales tienen una extinción paralela o casi paralela, las secciones transversales tienen extinción simétrica. Es frecuente encontrar maclas cuyo plano es [100]. Su figura de interferencia es biáxica negativa con un ángulo axial muy grande ($2V = 79^\circ$ a 85°).

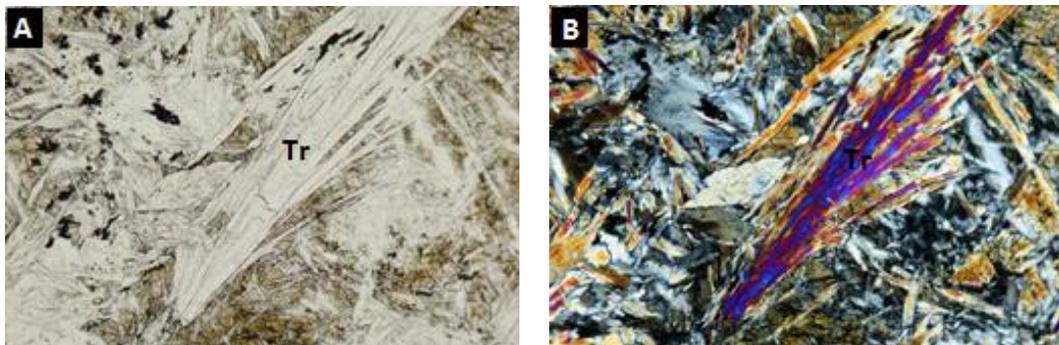
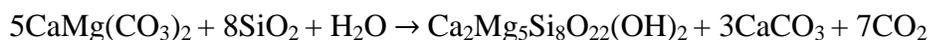


Figura 1.6.1. Tremolita bajo el microscopio óptico, en A incolora y en B mostrando colores de interferencia de alto orden (Imágenes tomadas de <http://www.alexstrekeisen.it/english/meta/tremolite.php>).

La tremolita es esencialmente un mineral metamórfico que ocurre en el contacto de rocas con metamorfismo regional. En dolomías impuras térmicamente metamorfoseadas, la tremolita se forma por reacción entre la dolomita y el cuarzo:



Dolomita Cuarzo Tremolita Calcita

Tomado y modificado de Kerr (1965); Deer, Howie y Zussman (1992); Gaines, et al. (1997); Jan y Jaroslav (2004).

Anexo B. Otras propiedades de los asbestos

Propiedad	Actinolita	Amosita	Antofilita	Crisotilo	Crocidolita	Tremolita
Longitud	De pequeña a grande	De 51 a 280 [mm], aunque puede variar	Corta	De pequeña a grande	De pequeña a grande	De pequeña a grande
Textura	Áspera	Áspera pero flexible	Áspera	Suave o áspera	De suave a áspera	Generalmente áspera, aunque en ocasiones puede ser suave
Calor específico [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	505 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	449 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	488 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	468 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	468 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]	493 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]
Resistencia a la tracción	6895 [$\frac{kN}{m^2}$] o menor	110,316-620,528 [$\frac{kN}{m^2}$]	27,579 [$\frac{kN}{m^2}$] o menor	551, 581-689,476 [$\frac{kN}{m^2}$]	689,476-2,068,427 [$\frac{kN}{m^2}$]	6,895-55,158 [$\frac{kN}{m^2}$]
Temperatura de ignición	-	871 [°C] a 982 [°C]	982 [°C]	982 [°C]	648 [°C]	982[°C]
Filtración	Moderada	Rápida	Moderada	Baja	Rápida	Moderada
Carga eléctrica	Negativa	Negativa	Negativa	Positiva	Negativa	Negativa
Punto de fusión	1393 [°C]	1399 [°C]	1468 [°C]	1521 [°C]	1229 [°C]	1,316 [°C]
Flexibilidad	Pobre y por lo tanto pobre capacidad de hilado	Buena, por lo que su capacidad de hilado es regular	Pobre, por lo que su capacidad de hilado es pobre también	Alta, por la cual tiene muy buena capacidad de hilado	Buena y capacidad de hilado regular	Pobre y por lo tanto pobre capacidad de hilado
Resistencia a los ácidos y alcalinos	Buena	Buena	Muy buena	Pobre	Buena	Buena
Impurezas minerales	Hierro y óxido de calcio	Hierro	Frecuentemente hierro	Hierro, cromo y níquel	Frecuentemente hierro	Usualmente óxido de calcio
Resistencia al calor	-	Buena, sin embargo a alta temperatura suele ser quebradiza	Muy buena	Buena, sin embargo a alta temperatura suele ser quebradizo	Pobre	De regular a buena

**(Tomado y modificado de Virta, 2005)