

Estudio y caracterización de turmalina de Suaqui Grande, Sonora México

Chávez Martínez Margarita^{1*}, Salcedo Luna María Cecilia², Naranjo Castañeda Felix Antonio¹
Hernández Martínez Leonardo¹, Cruz Colín María del Rocío¹, Ávila Jiménez Miguel¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Área de Química Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamps., Ciudad de México, C.P.02200, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, USAI, Laboratorio de Rayos-X, Cd. Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

*Autor para correspondencia: cmm@correo.azc.uam.mx.

Recibido:

17/Mayo/2016

Aceptado:

17/Julio/2016

Palabras clave

Turmalina, Suaqui Grande, Veróica II

Keywords

Tourmaline, Suaqui Grande, Veróica II

RESUMEN

Se realizó un estudio y caracterización, mineralógica y química de Turmalina proveniente de la mina Veróica II, localizada en el Municipio de Suaqui Grande, del Estado de Sonora, México. Por Difracción de Rayos-X de Polvos (DRX), se determinó que se trata de turmalina con fórmula química de $\text{Na}_{0.66}\text{Al}_{7.66}\text{Mn}_{1.23}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{F}_{0.57}\text{O}_{0.43}$, del grupo de ciclosilicatos. Las principales distancias interplanares fueron 2.56, 2.93, 3.96 con intensidades de 100%, 70%, 90% respectivamente. Se encontró mica Muscovita con fórmula química de $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, es una mica perteneciente a los filosilicatos. Por Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTR), permitió observar la influencia de las sustituciones catiónicas en los enlaces químicos. La morfología de los cristallitos fue determinada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), con forma de prismas romboedrales con tamaño de cristallito de $24.31\mu\text{m}$. Por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS), se realizó el microanálisis de elementos químicos Na, Mg, Ca, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe y Ni.

ABSTRACT

A study and characterization, mineralogical and chemical tourmaline was performed from the Veróica II mine, located in the municipality of Suaqui Grande State of Sonora, Mexico. Through Powder Diffraction X-Ray (XRD), it was found that it is Tourmaline with chemical formula of $\text{Na}_{0.66}\text{Al}_{7.66}\text{Mn}_{1.23}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{F}_{0.57}\text{O}_{0.43}$ belonging to the group of ciclosilicatos. The main interplanar spacings were 2.56, 2.93, 3.96 whose intensities were 100%, 70%, 90% respectively. Muscovite was found with chemical formula of $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ which is a mica belonging to phyllosilicates. The study by Infrared Spectroscopy Fourier Transform (FTIR), it allowed to observe the influence of the cationic substitutions in chemical bonds. The morphology of the crystallites was determined by Scanning Electron Microscopy (SEM), in the form of rhombohedral prisms and crystallite size of $24.31\mu\text{m}$. By using Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) It was performed microanalysis of chemical elements Na, Mg, Ca, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe y Ni.

Introducción

Uno de los yacimientos de turmalina en México se encuentra en el Estado de Sonora. Se localiza aproximadamente a 6.5 kilómetros al sur del Rancho Los Gachupines, en el Municipio de Suaqui Grande. Algunas de las minas en esa región son la Veróica, Veróica I, Veróica II, La Tortuga, Los Tajos y Golden Gate (McDowell et al. 2007). En la mina Veróica II se encuentran lotes de Cuarzo-turmalina. Suaqui Grande es el municipio No. 62 del estado de Sonora. Los municipios con los que colinda son: al norte se encuentra La Colorada, al noreste San Javier, al este Ónavas, al sur Cajeme, al oeste Guaymas. Suaqui Grande se localiza en el paralelo 28° 24' de latitud norte y a los 109° 52' de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 271 metros sobre el nivel del mar (SG-CNEMGES, 2010). La figura 1 muestra el mapa del Estado de Sonora.



Figura. 1 Estado de Sonora y sus 72 Municipios. La mina Veróica II, se encuentra en el municipio 62 Suaqui Grande. (Tomado de economía.gob.mx, 2006).

En esta zona se encuentran rocas volcánicas de Andesita formadas en el Territorio Tarahumara, intrusionadas por rocas plutónicas granodioríticas de la Era del Cretácico Tardío o Terciario temprano (Henry, 1985). Estas rocas intrusivas son las generadoras de la mineralización en esa área. También se observaron rocas volcánicas de composición félsica ricas en sílice amorfa o Calcedonia atribuida a la Era del Mesozoico (Calmus et al. 2010).

Estas rocas están en contacto por falla con un conglomerado que se correlaciona con la formación Baúcarit, restringida a la región central y Sierra Madre Occidental (McDowell et al. 1997). Además, se observan tobas Félsicas posiblemente del Mioceno, así como diques y sills. Se observa una tendencia estructural dominante rumbo NW-SE y en las vetas la tendencia es N-S.

Las vetas en la zona de Veróica I y Veróica II son fisuras rellenas de cuarzo en las rocas volcánicas basálticas de composición andesítica y altos contenidos de oro. En promedio se obtienen 6.85 gramos de oro por tonelada. En tanto de la Veróica II se extraen 100 kilogramos de turmalina por tonelada, con espesores que van de 2 a 6 metros, con una longitud de 180 metros (economía.gob.mx, 2006).

En 2003 la Veróica II fue explorada y muestreada. En ese estudio se determinó su extensión; para el oro fue de 300 metros de longitud y 2.5 metros de espesor; y para la brecha de cuarzo-turmalina fue de 180 metros de longitud por 6 metros de espesor y profundidad de 90 metros. El potencial promedio es de 81000 toneladas, lo que totalizaría 249 750 toneladas posibles de mineral (Paz Moreno et al. 2003).

En 2013, nuestro equipo de investigación realizó una expedición a las minas de la Veróica II para muestrear y extraer rocas que contenían turmalina. La figura 2 muestra (a) la vista hacia el lugar de la mina Veróica II y (b) las rocas que contienen el mineral de Turmalina.



Figura 2. (a) En las faldas del cerro Pilares se encuentra la mina Veróica II, Suaqui Grande, Sonora, México.



Figura 2. (b) Turmalina natural encontrada en la mina Veróica II.

En el presente trabajo se realizó un estudio y caracterización, mineralógica y química de turmalina provenientes de la mina Veróica II, utilizando las técnicas de Difracción de Rayos -X de Polvos (DRX), Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTR), y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS).

Metodología

En la expedición a la mina de Veróica II, se observó y se estudió el lugar, en el que se encontró turmalina a cielo abierto cerca de las faldas de Cerro Pilaes en Suaqui Grande. La limpieza de la turmalina se realizó con una fresadora marca DREMEL modelo MM30. Se analizó el mineral que cubría la turmalina. Aunque existe diversidad de turmalinas coloridas, y una sola especie de turmalina puede poseer hasta 7 coloraciones y tonalidades diferentes (Sasaki, 2013); la turmalina estudiada aquí fue de color negro con brillos dorados, tal como se muestra en la figura 3. El depósito natural estaba constituido parcialmente de pórfidos principalmente constituidos de feldespato y cuarzo en rocas compactas y muy duras en las que la turmalina se hallaba incrustada.



Figura 3. Turmalina, proveniente de la mina Veróica II.

Una vez extraída y separada la turmalina de las rocas, ésta se trituro con martillo. Todas estas operaciones se realizaron con mucho cuidado, ya que estas muestras serían las estudiadas y analizadas.

Posteriormente las Muestras de turmalina se molieron en un micromolino bullet marca BEL ART CIENCIAWARE, durante 1 minuto. Se realizó una granulometría para evaluar la proporción de los tamaños de partículas, de tal manera que la muestra obtenida de la molienda se pasó por tamices marca FIICSA por las mallas # 30, 50, 100, 325 y 400. Las muestras separadas fueron pesadas en una balanza analítica OHAUS PIONEER con 0.0001 g de precisión y capacidad máxima de 200 g.

Las muestras elegidas para todos los análisis fueron de la malla 325, cuyo tamaño de partícula corresponde a 45µm. Todas las muestras fueron analizadas por Difracción de Rayos - X de Polvos, (DR-X Polvos) para su

caracterización. Se utilizó un Difractómetro marca BRUKER modelo D8 Advance con diseño DaVinci con tubo de cobre configurado para polvos, con detector Lynx Eye de alta velocidad. La radiación empleada fue $\text{CuK}\alpha_1$ con $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$.

Los estudios por Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), se realizaron para obtener un interferograma satisfactorio que revelara las señales de las transiciones entre niveles de energía vibracional, correspondientes al intervalo de frecuencias de 400 a 4000 cm^{-1} . Se utilizó un espectrómetro FTIR, BRUKER Equinox 55, utilizando la técnica de pastilla de KBr.

Los estudios de morfología y análisis elemental cualitativo y semicuantitativo, por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) a superficies de una muestra sólida de Turmalina, y determinación de tamaño de cristalito, se realizaron con un Microscopio Electrónico de Barrido SUPRA 55 PV, CARL ZEISS. La resolución fue de 1000 y 5000X aumentos o de magnificación. Para acelerar los electrones se utilizaron diferencias de potencial de voltajes bajos y altos de 2 kV y 15 kV para aprovechar las mejores longitudes de onda y así obtener una mejor resolución de las imágenes o micrografías.

Resultados y Discusión

Difracción de Rayos - X de Polvos

Cristaloquímica

El análisis del mineral de las rocas que cubrían la turmalina, resultó pertenecer al grupo de los inosilicatos, de rocas ígneas metamórficas, cuya composición fue de feldespato, cuarzo, mica y plagioclasa. Las rocas más cercanas fueron de granito que a su vez contenía zircón y apatito. En tanto, la turmalina resulto ser un ciclosilicato, más un pequeño contenido de muscovita. La tabla 1 muestra la composición química de cada uno de estos minerales. Los resultados fueron analizados y comparados con la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD), utilizando el Powder Diffraction File (PDF), (1997 - 2013).

La figura 4 muestra el espectro de Difracción de Rayos-X de Polvos (DRX Polvos) de la turmalina. Los datos de las distancias interplanares e intensidades se presentan en la tabla 2 (a); en 2 (b) únicamente las señales de Difracción de Rayos-X de la Muscovita en traslape con las señales de la turmalina.

Tabla 1 (a) Rocas encontradas en la mina Verónica II, (b) Minerales que cubrían a la turmalina, (c) Composición mineralógica de la turmalina.

(a) Rocas y minerales encontrados en la mina	
Granito Roca ígnea plutónica	Constituyentes principales Cuarzo Feldespatos Micas
Zircón	ZrSiO ₄ PDF 00-006-0266
Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH) PDF 00-025-0166
(b) Minerales que cubrían a la turmalina	
Feldespato Plagioclasa (Albita) PDF 00-020-0554	NaAlSi ₃ O ₈ ó Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂ 68.5% de Sílice 19.7% de Na ₂ O 11.9% de sesquióxido de aluminio
Feldespato Plagioclasa (Anortita) PDF 00-012-0301	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ó CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ 43.4% de SiO ₂ 36.6% de sesquióxido de aluminio 20.3% de CaO
Cuarzo PDF 00-045-1045	α-SiO ₂
Muscovita 2M1 PDF 00-006-0263	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
(c) Composición mineralógica de la turmalina	
Turmalina (Inosilicato/Ciclosilicato) Na _{0.66} Al _{7.66} Mn _{1.23} (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₃ F _{0.57} O _{0.43} PDF 01-081-8765	
Moscovita (Filosilicato) KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ PDF 00-006-0263	

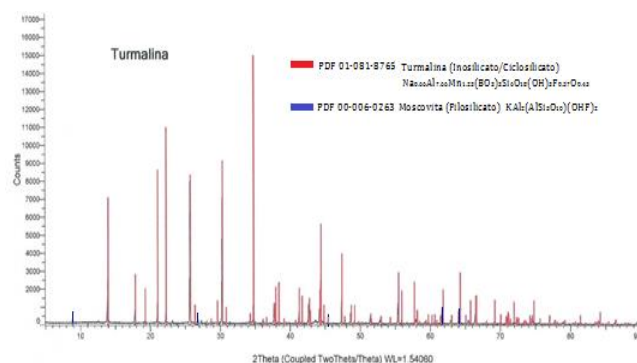


Figura 4. Difractograma de turmalina proveniente de la mina Verónica II, Suaqui Grande, Sonora, México. Las señales de difracción en rojo muestran la abundancia de la turmalina; en tanto, las azules pertenecen a la moscovita la cual se observa muy poca abundancia, con algunas señales traslapadas.

Los datos cristalográficos de la turmalina obtenidos a partir del número del número de cuentas (17000) del difractograma, con número de líneas leídas/utilizadas 30/30 y utilizando el método de indexación ITO se exhiben en la tabla 3.

Tabla 2. (a) Datos de Difracción de Rayos-X para turmalina.				(b) Señales de Difracción de Rayos-X de la moscovita en traslape con las señales de la turmalina			
2θ(°)	d (Å)	I/I ₀	hkl	2θ(°)	d (Å)	I/I ₀	hkl
13.953	6.341	45	101	17.832	4.970	60	004
17.855	4.963	18	021	19.845	4.470	90	110
19.259	4.604	13	300				
21.063	4.214	55	211				
22.274	3.987	90	220				
25.760	3.455	50	012	25.57	3.480	50	114
26.379	3.375	7	131				
29.609	3.014	8	410				
30.309	2.946	70	122				
30.845	2.896	6	321				
34.310	2.611	4	312				
34.790	2.576	100	051	34.74	2.580	40	200
37.937	2.369	14	232	37.76	2.380	60	133
38.377	2.343	15	511				
41.290	2.184	13	502	42.40	2.130	60	135
42.741	2.113	9	303				
44.433	2.037	35	357				
47.409	1.916	25	342				
48.715	1.867	7	143				
49.205	1.850	7	621				
55.492	1.654	18	063				
55.938	1.642	12	271				
57.750	1.595	15	550	57.557	1.600	40	228
61.842	1.499	12	054				
64.241	1.448	18	514				
65.743	1.419	8	651				
66.592	1.403	10	434				
69.215	1.356	8	100				
72.323	1.305	2	832				
74.794	1.268	8	505				

Tabla 3. Datos cristalográficos de la turmalina.

d	2.5765	3.9877	2.9464
I	100%	90%	70%
Sistema: Romboédrico	a = 15.951 Å, c = 7.138 Å		
SG: R3m (160)	α = β = 90°, γ = 120°		
Hábito: Cristales prismáticos piramidales, estriados en la dirección del eje cristalográfico c	Z: 3; M = 994.27 g/mol Vol.: 1572.83 Å ³ ; D _x : 3.149 g/cm ³ Color: Negro		

Las formas estructurales en las que la turmalina puede presentarse son: la elbaíta, en la que el anillo Si₆O₁₈ es hexagonal; en tanto, en la dravita es ditrigonal; y en el chorlo ó schorl, las características son intermedias entre ambas; tal es el caso particular de la turmalina del

presente trabajo. En este caso el arreglo ditrigonal consiste en un anillo formado por tetraedros, en los que dos vértices de cada tetraedro son compartidos entre sí. Estos anillos a su vez se encuentran en estratos sucesivos formando canales paralelos a lo largo del eje *c*. En el centro de cada uno de ellos están ordenados alternadamente los cationes Na^{+2} y OH^{-1} .

La disposición orientada de los tetraedros y grupos triangulares es la causa de la piezoelectricidad y la piroelectricidad, propiedades presentes en la turmalina (Gardiner, 2012). En la figura 5 se puede apreciar la estructura en planta 2D, en donde los parámetros *a* y *b* están en el mismo plano y la vista hacia arriba es sobre el eje *c*.

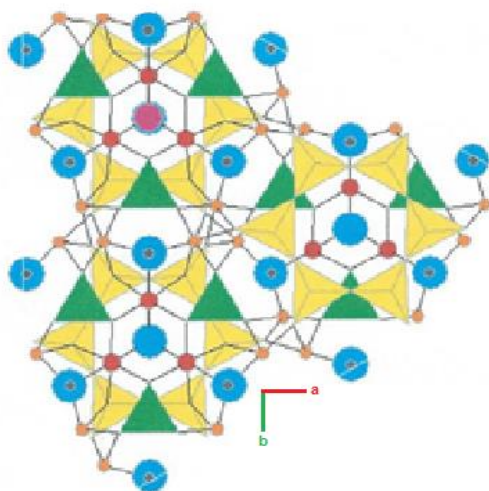


Figura 5. Estructura cristalina de la turmalina, descrita por Garnier en 2012. Proyección de los ejes *a* y *b*; visto en planta desde el eje de celda *c*.

En la figura 6 se puede observar un anillo de seis tetraedros en color azul. La capa siguiente es de tres octaedros los cuales comparten oxígenos con vértices de los tetraedros T. Enseguida se intercalan tres grupos triangulares planos de BO_3 , los cuales no están conectados entre sí, pero ocupan parte del canal constituyendo tres salientes que definen un eje ternario. El acomodo de los octaedros tiene un vértice central común para los tres octaedros y se disponen rodeando el eje ternario. Así mismo, puede apreciarse que los seis anillos Si_6O_{18} y los tres grupos de BO_3 están unidos a través de octaedros de $\text{MnO}_4(\text{OH})_2$ y $\text{AlO}_5(\text{OH})$ paralelamente al eje *c*. Los átomos de Al^{3+} se encuentran alojados en otros octaedros periféricos que se forman inminentemente. En total son 9 octaedros: 3 centrales y 6 externos distorsionados. En el centro de los anillos de 6 tetraedros SiO_4 , se encuentra un átomo grande de

Mn^{2+} en rojo. En los huecos externos entre los tetraedros que forman el anillo, se encuentran los grupos OH^{-1} .

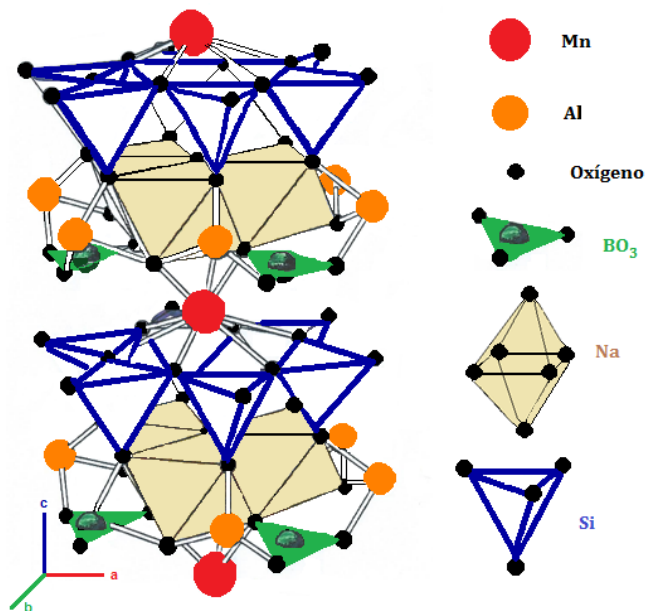


Figura 6. Estructura cristalina de la Turmalina con fórmula $\text{Na}_{0.66}\text{Al}_{7.66}\text{Mn}_{1.23}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{F}_{0.57}\text{O}_{0.43}$.

Estabilidad de fases

Las estructuras tipo de la turmalina son:

Dravita: Turmalinas magnésicas, esencialmente con magnesio, Mg^{2+} de color marrón

Chorlo: Turmalinas ricas en Hierro (Fe^{2+} mayoritario, Mn^{2+}) de color negro.

Elbaita: Turmalinas alcalinas, contienen Li^{+} ; Al^{3+} de colores: rojo, verde, azul, amarillo.

Termodinámicamente, existe una serie continua entre dravita y chorlo; y entre chorlo y elbaita. Pero hay una laguna de miscibilidad entre dravita y elbaita en su diagrama de fases como el exhibido en la Figura 7. (Henry y Guidotti, 1985). Este diagrama es una clasificación de Henry Guidotti realizada en 1985. Las regiones o fases de la 1 a la 8 son: fase 1 es de granitoides, aplitas y pegmatitas ricas en litio. La fase 2 es de granitoides, aplitas y pegmatitas pobres en litio. Fase 3 es de rocas de cuarzo-turmalínicas ricas en Fe^{3+} . Fase 4 metapsamitas y metapelitas saturadas en Al^{3+} . Fase 5 metapsamitas y metapelitas no saturadas en Al^{3+} . Fase 6 metapelitas, rocas calcosilicadas y cuarzo-turmalínicas ricas en Fe^{3+} . Fase 7 metaultraramafititas ricas en calcio. Fase 8 metacarbonatos. ♦ Composición de la turmalina estudiada aquí.

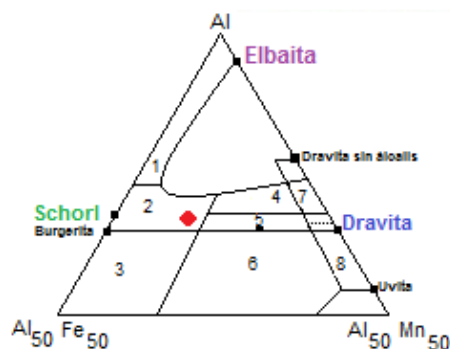


Figura 7. Diagramas de fases, clasificada por Henry Guidotti en 1985. ♦ Composición de la turmalina estudiada en el presente trabajo.

La composición determinada para este tipo particular de turmalina, es diferente a las 14 fases de turmalina reportadas (Darrell et al 2011). Pero es coincidente a la fase Tsilaisite, por la composición de cationes: Na^{1+} alojado en los octaedros internos; Al^{3+} y Mn^{2+} alojados en los octaedros externos. Por el contenido de manganeso, la turmalina proveniente de la mina Verónica II es del tipo cchorl (negro) o chorlo.

Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier

Los resultados de este estudio se muestran en la figura 8, las señales de las transiciones entre niveles de energía vibracionales correspondientes al intervalo de frecuencias de 400 a 4000 cm^{-1} . Se logró asignar las bandas débiles en 3650-3745 cm^{-1} , asignadas a vibraciones del agua; otra banda en 3430 cm^{-1} pertenece a los grupos OH y puentes de hidrógeno de agua. La señal en 1617 cm^{-1} corresponde a la deformación angular del agua. Las tres bandas en 1400 cm^{-1} , la primera en 1374 cm^{-1} determina a los boratos (BO_3)₃, cuyos estiramientos B-O se localizan a 1240-1350 cm^{-1} . En la región de 1000-1200 cm^{-1} se encuentran las señales de estiramientos de los enlaces Si-O de los grupos (SiO_4)⁻⁴. Otra señal en forma de hombro en 1077 cm^{-1} con un máximo en 985 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de Al-O en coordinación tetraédrica para el reemplazo de Si por Al (Pemble and Gardner, 2009). La región de 500 a 800 cm^{-1} están las señales de deformaciones angulares del Silicio y los estiramientos de los enlaces M-O; M: cationes bivalentes en coordinación octaédrica. La banda intensa de 470 – 550 cm^{-1} se puede atribuir a los iones trivalentes en posiciones octaédricas, las cuales pueden asignarse a la vibración del aluminio (Honigs et al. 1995; Skoog et al, 2015).

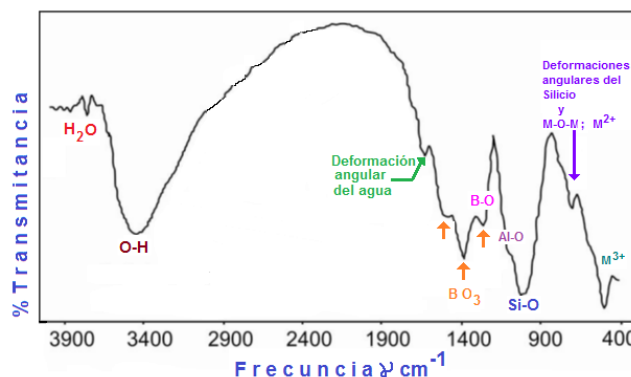


Figura 8. Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier de la turmalina.

Microscopía Electrónica de Barrido

Antes de realizar los estudios por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se realizó una gráfica del porcentaje de peso retenido en los tamices, con el fin de observar primero con el microscopio óptico, los diferentes tamaños de partícula y elegir los granos más pequeños y llevarlos a analizar y estudiar MEB. La figura 9 muestra la gráfica granulométrica, en la que no fueron tomados en cuenta los tamaños de partícula más pequeños obtenidos de las mallas 325 y 400, debido a que se obtuvieron porcentajes de peso menores, ya que se partió de una molienda y quedarían fuera del gráfico.

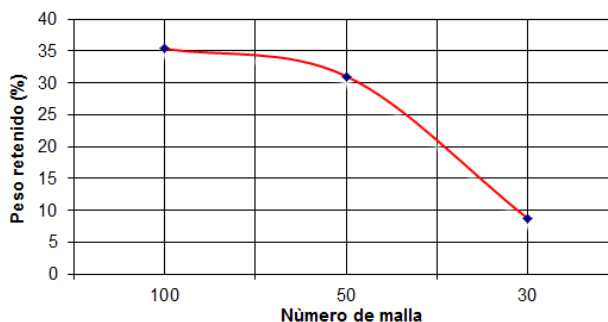


Figura 9. Granulometría de turmalina.

La figura 10 muestra la micrografía de la turmalina. En (a) se puede observar muchos granos oscuros de turmalina, pero también varios granos brillantes que pertenecen a la muscovita, lo cual fue posible apreciar cuando el voltaje fue de 15kV; en (b) el voltaje es de 2kV y no es posible apreciar los granos de muscovita, solo se logran ver los cristallitos de turmalina. En (a) y (b) la magnificación o aumento fue de 1000X, ambas en el orden de los 100 μm . En (a) WD es de 4.1mm y en (b) WD es de 3.9mm. En tanto, para (c) y (d) el aumento fue de 5000X, en un intervalo de 20 μm y voltaje aplicado de 15kV. En ambas se aprecia una morfología más cercana, con secciones romboedrales, triangulares planas y

esquinas redondeadas y algunas con fracturas semiconcoidales; solo que en (c) la WD es de 4.1mm y en (d) la WD es de 8.5mm por eso se aprecian superficies más lisas. Para (e) el voltaje aplicado fue de 2kV, el aumento es de 5000X, y el segmento del orden de los $10\mu\text{m}$, con WD de 4.1mm. La anchura del cursor es de $27.54\mu\text{m}$ y un tamaño de cristalito de $24.31\mu\text{m}$.

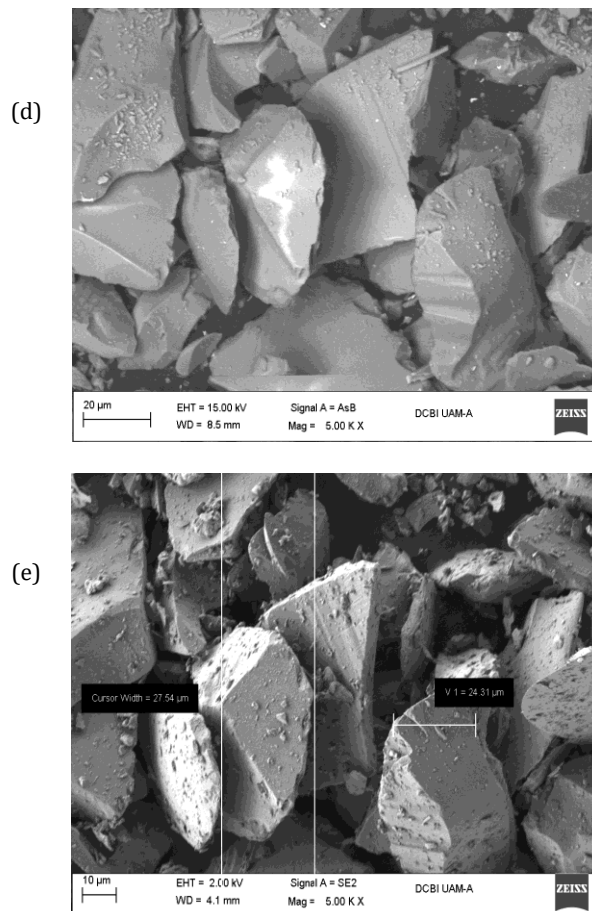
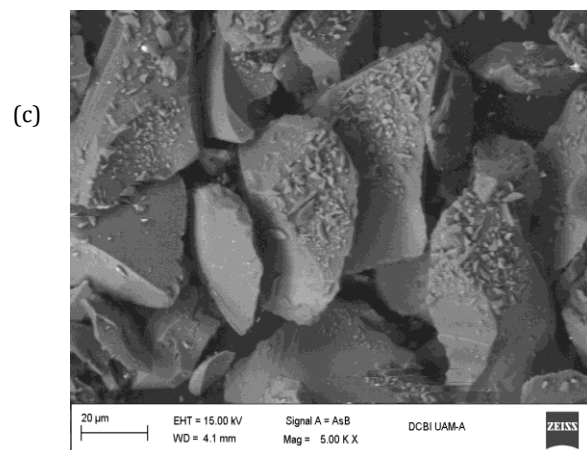
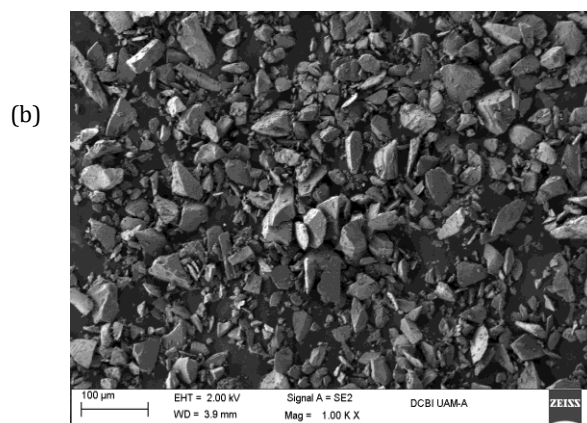
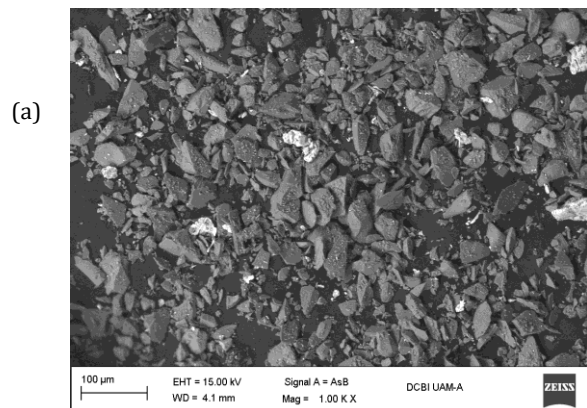


Figura 10. Micrografías de turmalina obtenida por MEB.

Los mapas de Rayos-X en imagen de electrones secundarios o retrodispersados mostrados en las figuras 10, 11, 12 y 13, permitieron conocer la distribución de elementos químicos presentes en la turmalina. Las sustancias estándares utilizadas para el análisis de elementos químicos fueron: CaCO_3 , SiO_2 , Albita de sodio, MgO , Al_2O_3 , Cr, Ni y Fe.

En este estudio, durante las colisiones inelásticas, los electrones incidentes pueden arrancar electrones de las capas o niveles de energía más profundos de los átomos; siempre y cuando la energía del electrón incidente sea superior al umbral de la ionización del nivel atómico en cuestión. Cuando un átomo tiene una vacante en un nivel interno, se produce un salto de un electrón de un nivel superior para llenar dicha vacante, que dejara otra vacante en el nivel superior. Este se llenará a su vez mediante un salto electrónico de un nivel superior y así sucesivamente. Así durante cada salto, el átomo puede emitir Rayos-X característicos, es decir, energía característica de cada elemento químico, siendo la energía de un Rayo-X igual a la diferencia de energías de

los niveles de energía atómicos involucrados. Así el Microscopio Electrónico de Barrido con un detector de Rayos-X del tipo dispersivo en energía integrado, EDS, permitió identificar cuáles son las energías de los Rayos-X emitidos por la muestra, y por lo tanto, saber que elementos químicos existen en la muestra. En la figura 11 se puede observar el espectro 1, en escala completa de 19387 cuentas y cursor 4.364 (109 cuentas), con la tabla 4 relacionada al contenido de elementos químicos.

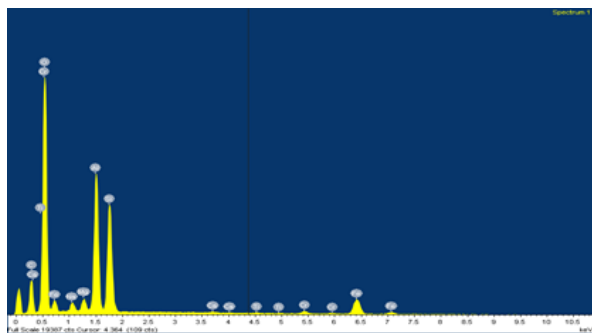


Figura 11. Espectro de EDS para la turmalina.

Tabla 4. Porcentaje en peso de los elementos encontrados en el espectro 1.

E	Principal	Media	$S \text{ ó } \sigma$	Max .	Min.
C	17.60	17.60	0.00	17.60	17.60
O	48.53	48.53	0.00	48.53	48.53
Na	0.95	0.95	0.00	0.95	0.95
Mg	1.01	1.01	0.00	1.01	1.01
Al	10.82	10.82	0.00	10.82	10.82
Si	10.01	10.01	0.00	10.01	10.01
Ca	0.15	0.15	0.00	0.15	0.15
Ti	0.18	0.18	0.00	0.18	0.18
Cr	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
Fe	9.74	9.74	0.00	9.74	9.74
Total	100.00	100.00			

En la figura 12 se observa el espectro 2, en escala completa de 19387 cuentas, la micrografía asociada al espectro, muestra la región de incidencia electrónica y en la tabla 5 se indica el % en peso y % atómico de los elementos químicos determinados específicamente en esa región.

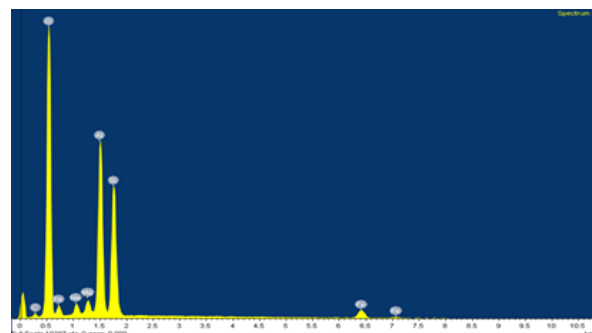


Figura 12. (a) Espectro de EDS para un cristal de turmalina.

Se indica que se trata de las líneas de emisión K, correspondientes a las transiciones electrónicas de las capas de energía de L→K, para cada uno de los elementos químicos encontrados en un cristalito de turmalina.

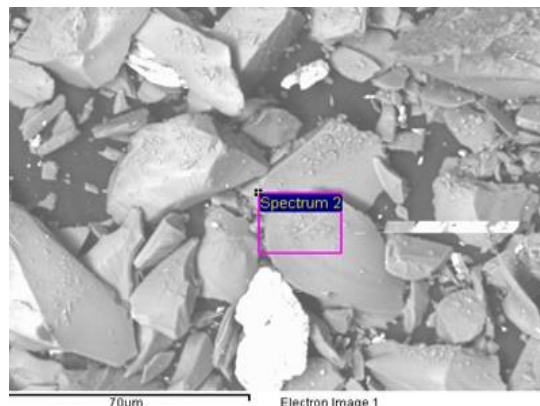


Figura 12 (b) Micrografía que muestra la región de incidencia electrónica asociado al espectro 2 de turmalina.

Tabla 5. Porcentaje en peso y % atómico de los elementos químicos encontrados en el espectro 2.

E	% en peso	% atómico
C K	2.51	4.05
O K	57.53	69.67
Na K	1.39	1.17
Mg K	1025	1.00
Al K	16.26	11.68
Si K	14.95	10.32
Fe K	6.10	2.12
Totales	100	100

De igual manera para el espectro 3 de la figura 13, solo que el cristalito corresponde a muscovita.

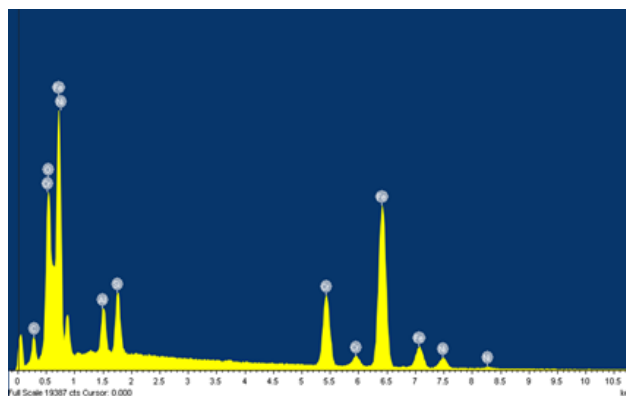


Figura 13. (a) Espectro de EDS para un cristal de muscovita.

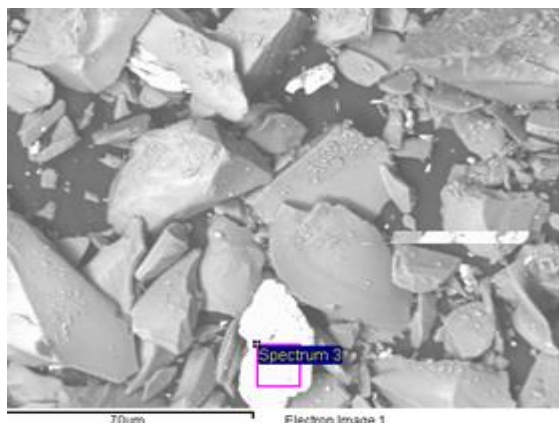


Figura 13. (b) Micrografía que muestra la región de incidencia electrónica asociado al espectro 3 de muscovita.

Tabla 6. Porcentaje en peso y % atómico de los elementos químicos encontrados en el espectro 3.

E	% en peso	% atómico
C K	7.32	20.77
O K	12.12	25.80
Al K	2.64	3.33
Si K	3.53	4.28
Cr K	13.77	9.02
Fe K	54.53	33.26
Ni K	6.09	3.53
Totales	100	99.99

En la figura 14, el cristalito corresponde prácticamente a muscovita, con lo que se reafirma que en las micrografías los cristalitos blancos brillantes corresponden a muscovita, en tanto los cristalitos negros son de turmalina.

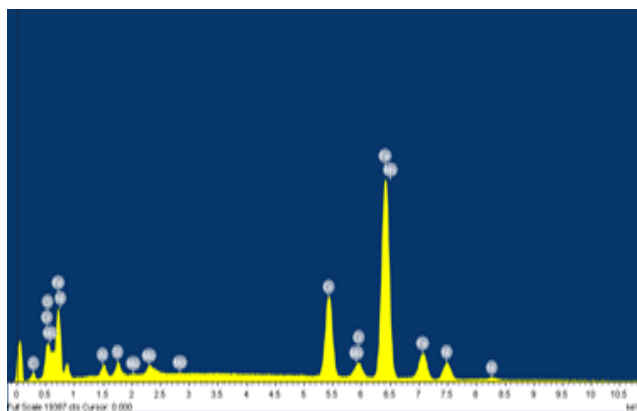


Figura 14 (a) Espectro de EDS para otro cristal de Muscovita.

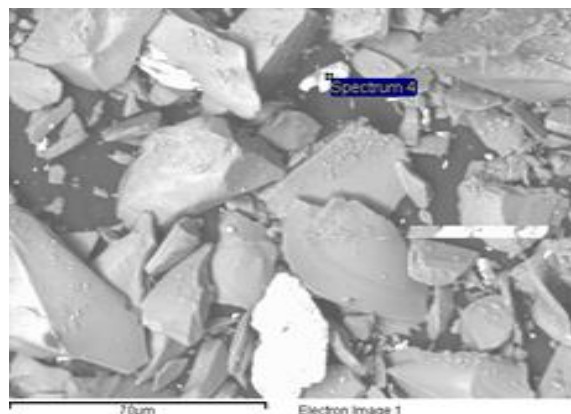


Figura 14. (b) Micrografía que muestra la región de incidencia electrónica asociado al espectro 4 de muscovita.

Tabla 7. Porcentaje en peso y % atómico de los elementos químicos encontrados en el espectro 4.

E	% en peso	% atómico
C K	2.41	9.64
O K	2.26	6.81
Al K	0.69	1.23
Si K	0.74	1.27
Cr K	15.37	14.23
Mn K	1.33	1.17
Fe K	66.15	57.03
Ni K	9.68	7.94
Mo L	1.36	0.68
Totales	100	100

Conclusiones

De los estudios de DRX de Polvos fue posible determinar que la turmalina estudiada aquí corresponde al tipo de choro o schorl, que significa negro, altamente identificada a la fase Tsilaisite, por la composición de cationes: Na^{1+} alojado en los octaedros internos; Al^{3+} y Mn^{2+} alojados en los octaedros externos. Por lo que la turmalina proveniente de la mina Verónica II, de Suaqui Grande logro ser así caracterizada. Así mismo se logró determinar el Grupo Espacial R3m, identificado para un sistema cristalino Romboédrico. Los parámetros de red de la turmalina de la mina Verónica II fueron $a = 15.95 \text{ \AA}$, $c = 7.24 \text{ \AA}$, con $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$. La estructura cristalina determinada para la turmalina resultó estar formada específicamente por cuatro capas; que a su vez resultó estar formada por anillos de seis tetraedros, en cada tetraedro se aloja un átomo de Silicio. En el centro y cúspide de los anillos T^- se forma un octaedro el cual contiene un átomo de calcio. Después del anillo de T^- se encontraron tres octaedros unidos por las aristas; en cada uno de los octaedros se aloja un átomo de sodio. La capa siguiente está formada

por tres triángulos de BO_3 unidos a los octaedros por uno de sus vértices. En tanto el Mn se encontró dentro de otros octaedros periféricos; por último, los oxígenos se encontraron en todos los vértices de los tetraedros y octaedros.

Mediante el estudio de Espectroscopía de Infrarrojo se confirmaron las señales de los grupos OH^{-1} , BO_3 , SiO_2 , así como las deformaciones angulares del H_2O , Si, M^{2+} y M^{3+} en el intervalo de frecuencias de 400 a 400cm^{-1} .

La morfología de los cristalitos de turmalina presentó secciones romboedrales, triangulares planas y esquinas redondeadas y algunas con fracturas semiconcoidales. El tamaño de un cristalito determinado fue de $24.31\mu\text{m}$.

Por Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS), se realizó el microanálisis de elementos químicos. El contenido promedio de elementos químicos en la turmalina se expresó en % en peso en forma de óxidos fue: Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , NiO y FeO .

Referencias

Calmus T., Amaya-Martínez R., Roldan-Quintana J. (2010). La orogenia Laramide del SW de Norte América: Análisis de la deformación, magnetismo y metalogénesis. Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noreste, Instituto de Geología, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 1-4, 15-17.

Darrell J., Henry D.C., Novák M., Hawthorne F.C. Ertl A., Dutrow B.L. Uher P., Pezzotta F. (2011). Nomenclature of the Tourmaline super group minerals. *American Mineralogist*, 96: 895-913.

Gardiner R.L. (2012). Piezoelectricity and piroelectricity, properties present in the Tourmaline. *Trans. Am. Inst. Min. Engrs.* 42, 251.

Henry, D.J. y Guidotti, C.V. (1985). Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, 70: 1-15.

Honigs D.E., Hieftje G. M., Marl H.L., Hirschfeld, (2005). Infrared Spectroscopy Fourier Transform in ceramic materials, *Anal. Chem.* 57: 2299-2305.

International Centre for Diffraction Data (ICDD), with Powder Diffraction File (PDF). (1997 – 2013). 12 Campus Blvd., Newton Square, P. A. 19073-3273, USA.

McDowell F.W., Roldan-Quintan J., Amaya-Martínez R. (2007). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, México, *Geological Society American Bulletin*, 109: No. 10, 1349-1360.

McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., (2001). Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society American Bulletin*, 113, 4: 521-531.

Paz-Moreno F.A. (2003). Le volcanisme mio-plio-quaternaire de état du Sonora (nord-ouest du Mexique): Evolution Spatiale et Chronologique; implications petrogenetiques; Marseille, Franca, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'AixMarseille, Faculte des Sciences et Techniques de St-Jerome, 82.

Pemble M.E. and Gardner P., (2009). Vibrational Spectroscopy forms surfaces, Surface Analysis, The principal Techniques, John Wiley & Sons, Ltd, U. K., 2a. Edición, 333-390.

Sasaki, Departamento de Divulgación Científica de Sasaki international, (2013). La turmalina, productora de iones negativos, 14-15.

Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Estudios Municipales, Gobierno del Estado de Sonora, Talleres Gráficos de la Nación, México, D. F. (2010).

Skoog Douglas A., West Donald M., Holler F. James and Crouch Stanley R. (2014). Fundamentos de Química Analítica, 9a. Edición, Cengage Learning, p. 1043-1045.

www. economía, (2006). Mapas de los estados de la República Mexicana.