



Presencia de crisotilo en la mina 25 de Mayo, provincia de Córdoba. Estudios mineralógicos y consideraciones ambientales

Leticia LESCANO^{1,2}, Micaela NAVARRO¹, Constanza BOURNOD^{1,2} y Jorge SFRAGULLA³

¹Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

²CGAMA-Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Bahía Blanca, Argentina.

³Departamento de Geología Básica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

*Email: leticia.lescano@uns.edu.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 28/07/2025

Aceptado: 13/05/2026

RESUMEN

La mina 25 de Mayo, actualmente en situación de abandono, se encuentra ubicada en la porción centro-sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba, dentro del Departamento de Calamuchita en el distrito minero 25 de Mayo. A partir de un muestreo sistemático en frentes de explotación, se realizaron análisis mineralógicos y morfológicos mediante técnicas de microscopía óptica, contraste de fases, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Se identificaron rocas serpentinizadas con venillas compuestas por crisotilo asbestiforme. Las fibras presentan relaciones longitud/diámetro superior a 400 y diámetros inferiores a 3 µm en al menos el 50 % de los casos, por lo que son consideradas nocivas para la salud humana según normativas internacionales. Se observó el reemplazo parcial de crisotilo por carbonatos, aunque este no anula su potencial riesgo. La evolución textural y mineralógica sugiere al menos dos eventos de serpentización, incluyendo un metamorfismo retrógrado. A partir de estos estudios se plantea la importancia de evaluar el impacto ambiental de minerales asbestiformes en minas abandonadas, dada la biopersistencia y la facilidad de disgregación de minerales asbestiformes. Los resultados contribuyen al conocimiento geológico regional y a la gestión ambiental preventiva ante la presencia de minerales nocivos en minas abandonadas a cielo abierto en el pasado minero de la provincia de Córdoba, Argentina.

Palabras clave: serpentina, asbesto, Argentina.

ABSTRACT

Presence of Chrysotile in the 25 de Mayo Mine, Córdoba Province: Mineralogical Studies and Environmental Considerations. The 25 de Mayo mine, currently abandoned, is located in the south-central portion of the Sierras Pampeanas of Córdoba, within the Calamuchita Department in the 25 de Mayo mining district. Based on systematic sampling at open-pit exposures, mineralogical and morphological analyses were carried out using optical microscopy, phase contrast, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Serpentinized rocks containing veinlets of asbestiform chrysotile were identified. The fibers exhibit length-to-width ratios greater than 400 and diameters below 3 µm in at least 50 % of cases, qualifying as hazardous to human health according to international standards. Partial pseudomorphic replacement of chrysotile by carbonates was observed, although this does not eliminate its potential health risk. The mineralogical and textural evolution suggests at least two serpentinization events, including one associated with retrograde metamorphism. These findings highlight the importance of assessing the environmental impact of asbestiform minerals

in abandoned mines, due to their biopersistence and high friability. The results contribute to the regional geological understanding and to preventive environmental management in response to the presence of hazardous minerals in abandoned open-pit mines from Córdoba Province's mining past.

Keywords: serpentine, asbestos, Argentina.

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Córdoba, las rocas ultramáficas se encuentran localmente distribuidas en fajas y en su historia minera han sido explotadas durante décadas. La mina 25 de Mayo, actualmente en situación de abandono, se encuentra ubicada en la porción centro-sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba, dentro del Departamento de Calamuchita en el distrito minero 25 de Mayo. Las rocas aflorantes se encuentran principalmente en el faldeo oriental del Cerro Los Guanacos, en cuerpos de pequeñas dimensiones, correspondientes al cuerpo ultrabásico Árbol Seco. Estos son cuerpos lenticulares serpentiniticos los cuales corresponden al basamento metamórfico plutónico (Neoproterozoico-Paleozoico inferior) de las Sierras de Córdoba (Martino et al. 2020). El protolito de estas rocas fue determinado como harzburgitas o piroxenitas (Bonalmi y Gigena 1987).

Las minas 25 de Mayo, Los Guanacos y Árbol Seco constituyen antiguas explotaciones de cromita, aunque de las últimas dos también se ha extraído vermiculita (Bonalmi et al. 2014). En estas áreas los estudios son escasos, se destacan el informe elaborado por Angelelli et al. (1980) sobre las minas de cromita del Departamento de Calamuchita y el análisis petrológico realizado por Dufilho (1985) en la mina 25 de Mayo. Los procesos de serpentización dan origen a tres polimorfos filosilicáticos trioctaédricos de composición principalmente magnésica, denominados: lizardita, antigorita y crisotilo. Se diferencian por un desajuste estructural, siendo el crisotilo el que compensa ese desajuste con la curvatura de sus capas dando como resultado una estructura cilíndrica concéntrica (Bernstein 2009). Por ello, este mineral es el único del grupo de la serpentina que se encuentra dentro del grupo de los asbestos. Debido a sus propiedades, como la resistencia química y térmica, los asbestos en las últimas décadas estaban presentes en gran variedad de industrias en diferentes proporciones, siendo el crisotilo el que se presenta en mayor diversidad de productos industrializados.

Sin embargo, a su gran utilidad en la industria, hay que añadir su alta peligrosidad, por su alta capacidad para producir enfermedades en forma directa o indirecta, que se le atribuye en las últimas décadas. A su vez, las fibras de asbesto

se consideran biopersistentes, es decir, que permanecen por tiempos prolongados en los organismos de los seres vivos (Abú-Shams y Pascal 2005). En Argentina, los asbestos se encuentran prohibidos (Rodríguez 2004), debido a que pueden producir enfermedades como cáncer, mesoteliomas o asbestosis (Abú-Shams y Pascal 2005). Su efecto en la salud está principalmente relacionado a su morfología y tamaño, ya que estos factores determinan el grado de penetración del asbesto en las vías respiratorias.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones, sumado a que el crisotilo se presenta en fibras que se desprenden con facilidad, tanto de la roca que lo contiene como de los materiales industriales (Sánchez et al. 2009), se efectuaron diferentes estudios en los frentes de explotación a cielo abierto de la mina 25 de Mayo. Los análisis comprenden desde la escala macroscópica hasta la microscópica, así como también estudios detallados de contraste de fase, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), con el propósito de determinar la presencia de crisotilo en los frentes de explotación, caracterizar su morfología y dimensiones de las fibras para estimar si es un riesgo potencial para las localidades cercanas y/o para las personas que trabajan en cercanías a la mina o frente a una reactivación de éstas para la explotación de las rocas serpentiniticas. En este sentido, el estudio de los minerales asbestiformes que se pueden encontrar en minas inactivas o abandonadas es esencial para evaluar el potencial impacto ambiental.

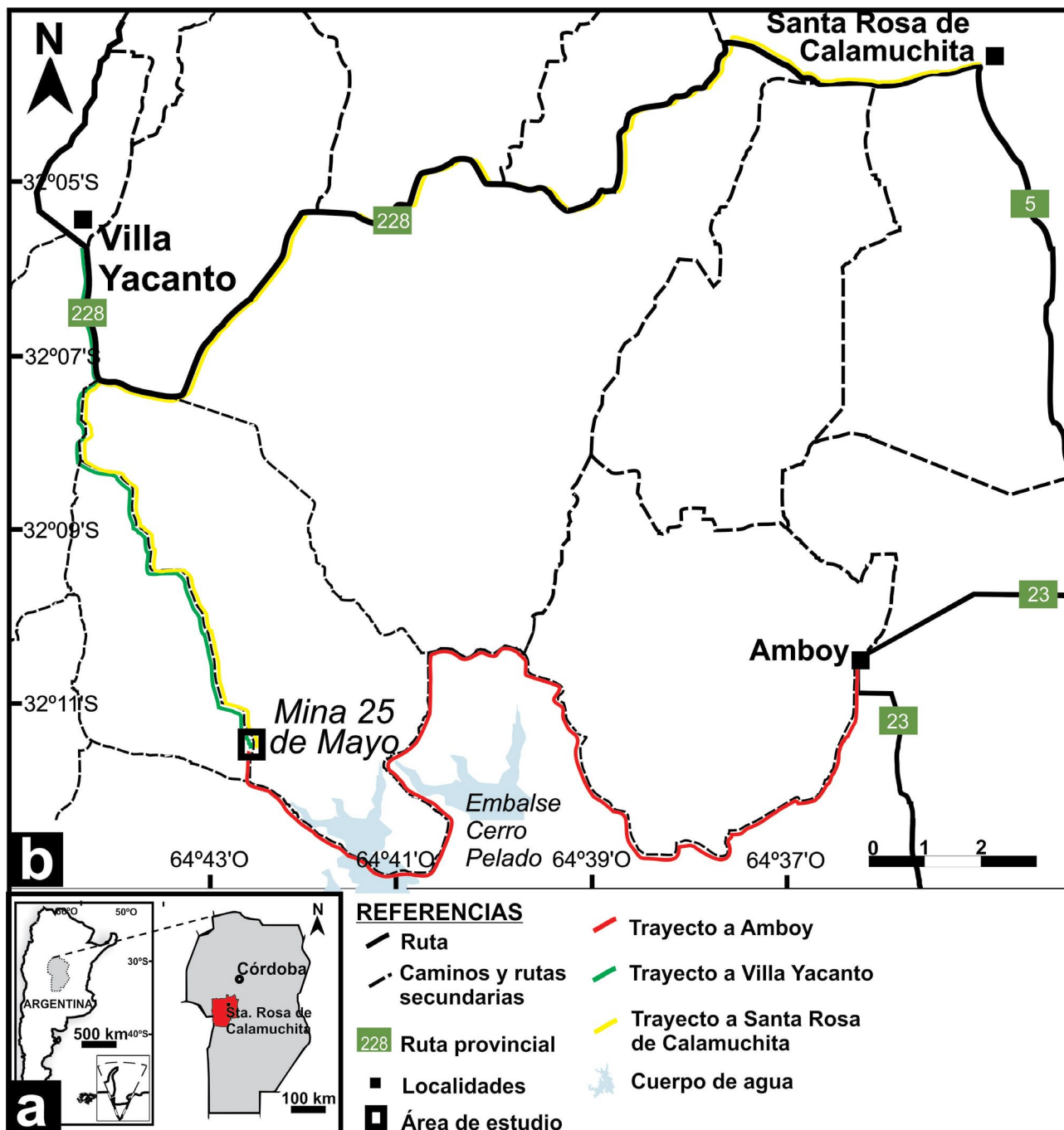
UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra en la porción centro-sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba, dentro del Departamento de Calamuchita limitada por los meridianos 64°42'41" y 64°42'49" de longitud oeste y los paralelos 32°11'37" y 32°11'47" de latitud sur (Fig. 1a). Esta área se incluye dentro del distrito minero 25 de Mayo y su ingreso desde el norte hacia la población más cercana, Villa Yacanto, se realiza principalmente por un camino secundario a lo largo de 10 km (Fig. 1b). Asimismo, accediendo desde el norte y transitando gran parte del trayecto por la Ruta Provincial N° 228 se encuentra

la localidad de Santa Rosa de Calamuchita, la cual dista 40 km. Por otra parte, ingresando desde el sur por rutas y caminos secundarios, la localidad de Amboy se encuentra a 30 km aproximadamente. En la imagen satelital de la mina 25 de Mayo, se reconocen los dos frentes de explotación (T1 y T2) donde se realizó la toma de muestras y la zona de escombre-ra (E), donde fue depositado el material inerte (Fig. 1C).

Las rocas aflorantes que componen la geología local del área de estudio se integran en parte por serpentinitas de edad

neoproterozoica y representan los afloramientos más anti-guos. Estos cuerpos serpentiniticos afloran principalmente en el faldeo oriental del Cerro Los Guanacos y se presentan en pequeñas dimensiones que no superan los 25 metros de lar-go. El protolito de estas rocas fue determinado en diferentes sectores, como en la mina La Bélgica en la cual se identi-ficaron harzburgitas, mientras que en la mina Los Guanacos principalmente se clasificaron como piroxenitas (Bonalumi y Gigena 1987). Según lo establecido por estos autores, es



común que los minerales más abundantes en los afloramientos de esta zona sean crisotilo y antigorita, que pueden estar acompañados por espinelos y corindón. En general, contienen entre 6 % y 8 % de minerales opacos, siendo lo más significativos cromita, magnetita e ilmenita.

Las minas 25 de Mayo, Los Guanacos y Árbol Seco, están localizadas en la faja oriental definida por Villar (1975, 1985). Entre otros autores que estudiaron los cuerpos serpentiniticos explotados en estos distritos mineros se pueden citar algunos de ellos: Aiassa y Ferreira Centeno (1985), Mutti (1994a, b), González Chiozza (2002), Escayola et al. (2004), Cábana (2010), Lescano et al. (2011, 2015).

Otras litologías presentes en este sector, que se mencionan en el trabajo de Bonalumi y Gigena (1987), están representadas por afloramientos pequeños de rocas básicas, predominando gabro norítico y gabro norítico hornblendífero. Además, gran porcentaje del área está comprendida por gneises, subdivididos en tonalítico granatífero y tonalítico común (Pastore 1932) denominado posteriormente como tonalítico-biotítico (Gordillo y Lencinas 1979). En esta zona la variedad más común es el paragneis tonalítico biotítico, cuya edad oscila entre 561 ± 10 Ma y 585 ± 16 Ma (Sims et al. 1998). Aquí, los gneises se encuentran interpuestos entre todas las variedades litológicas, principalmente en migmatitas, mármoles y rocas calcosilicáticas (Martino et al. 2020).

Los afloramientos de las rocas migmatíticas son los más significativos, y comienzan a la altura de la localidad del Alta Vista (17 km al NO de Santa Rosa de Calamuchita) extendiendo hacia el sur hasta la altura de Cañada del Sauce (30 km al SE de Villa Yacanto) (Gordillo 1979), en donde forman un área metatexítica irregular de rumbo submeridional. Como se indicó previamente, se obtuvieron edades cámbricas para estas rocas. En cuanto a las fajas miloníticas, se encuentran restringidas solo en un sector ubicado al NNO del Embalse Cerro Pelado. La cubierta moderna se localiza principalmente en los alrededores del embalse del Río Tercero extendiéndose hasta la localidad de Amboy, como límite occidental, y aproximadamente hasta Santa Rosa de Calamuchita el sector más septentrional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo se realizó en dos frentes de explotación (T1 y T2) descubiertas de la mina 25 de Mayo (Fig. 2). En total se recolectaron 19 muestras: 11 provenientes de la trinchera T1 y 8 de la trinchera T2. Las coordenadas de los sitios muestreados son las siguientes: T1 ($64^{\circ}42'47''$ O; $32^{\circ}11'42''$ S) y T2 ($64^{\circ}42'45,7''$ O; $32^{\circ}11'44''$ S).

El muestreo fue de tipo dirigido, priorizando sectores con presencia visible de venillas fibrosas, variaciones texturales y diferentes grados de serpentización, con el objetivo de documentar la presencia de minerales asbestiformes. (Fig. 2a).

Con el objetivo de realizar estudios mineralógicos y morfológicos de los minerales de las rocas serpentiniticas se realizó un multianálisis de las muestras aplicando diferentes métodos analíticos.

Los cortes delgados se estudiaron mediante un microscopio óptico de polarización Leica DM 750P. Para el estudio específico de minerales asbestiformes se empleó contraste de fases (PCOM) con un objetivo Leica HC PL FLUOTAR y aumento de 20X, adosado al microscopio petrográfico. Es posible diferenciar las fibras de los asbestos en función a la variación del índice de refracción (n) dependiente de la longitud de onda de la luz incidente, siendo este el principio óptico en el que se basa la técnica. El tipo de asbesto se identificó gracias a los efectos cromáticos típicos que producen los líquidos de dispersión de marca "CARGILLE" utilizados para esta metodología. En cuanto a la evaluación del índice de refracción se tienen en cuenta tres parámetros: luminosidad, color y birrefringencia (Niskanen et al. 2013, Baietto y Marini 2018), y se consideraron los índices de refracción $n=1.550$ (crisotilo), $n=1.670$ (amosita), $n=1.606$ (antofilita), $n=1.605$ (tremolita), $n=1.640$ (actinolita) y $n=1.700$ (crocidolita). Estos índices fueron definidos por Health and Safety Executive (HSE 2005) según las propiedades de los distintos tipos de asbesto.

Por otra parte, para la caracterización de la estructura cristalina se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III-C, con radiación de Cu K α y monocromador de grafito, operado con 35 Kv y 15 mA, con un paso de 0.04° con un tiempo de conteo de 1 segundo por paso, de 3° a 60° (2 θ). Sobre las muestras, se analizaron minerales específicos separados manualmente, parte del relleno de venillas, y fragmentos de roca total. Estas fracciones fueron reducidas y molidas manualmente con un mortero de ágata hasta el tamaño requerido.

Asimismo, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB), JEOL JSM 35 CP equipado con un detector de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (ED) a fin de analizar las morfologías y dimensiones de los minerales. En adición, se adquirieron análisis semi-cuantitativos de la composición química de los minerales examinados con un detector EDS "Oxford", modelo x-act. Las dimensiones de las fibras se obtuvieron mediante mediciones directas sobre microfotografías de MEB utilizando la escala de cada imagen y el programa Leica Suite V4.12. Se midieron fibras individuales claramente identificables y con terminaciones definidas, evitando haces compactos o agregados. Las mediciones se realizaron con el objetivo de caracterizar rangos dimensionales

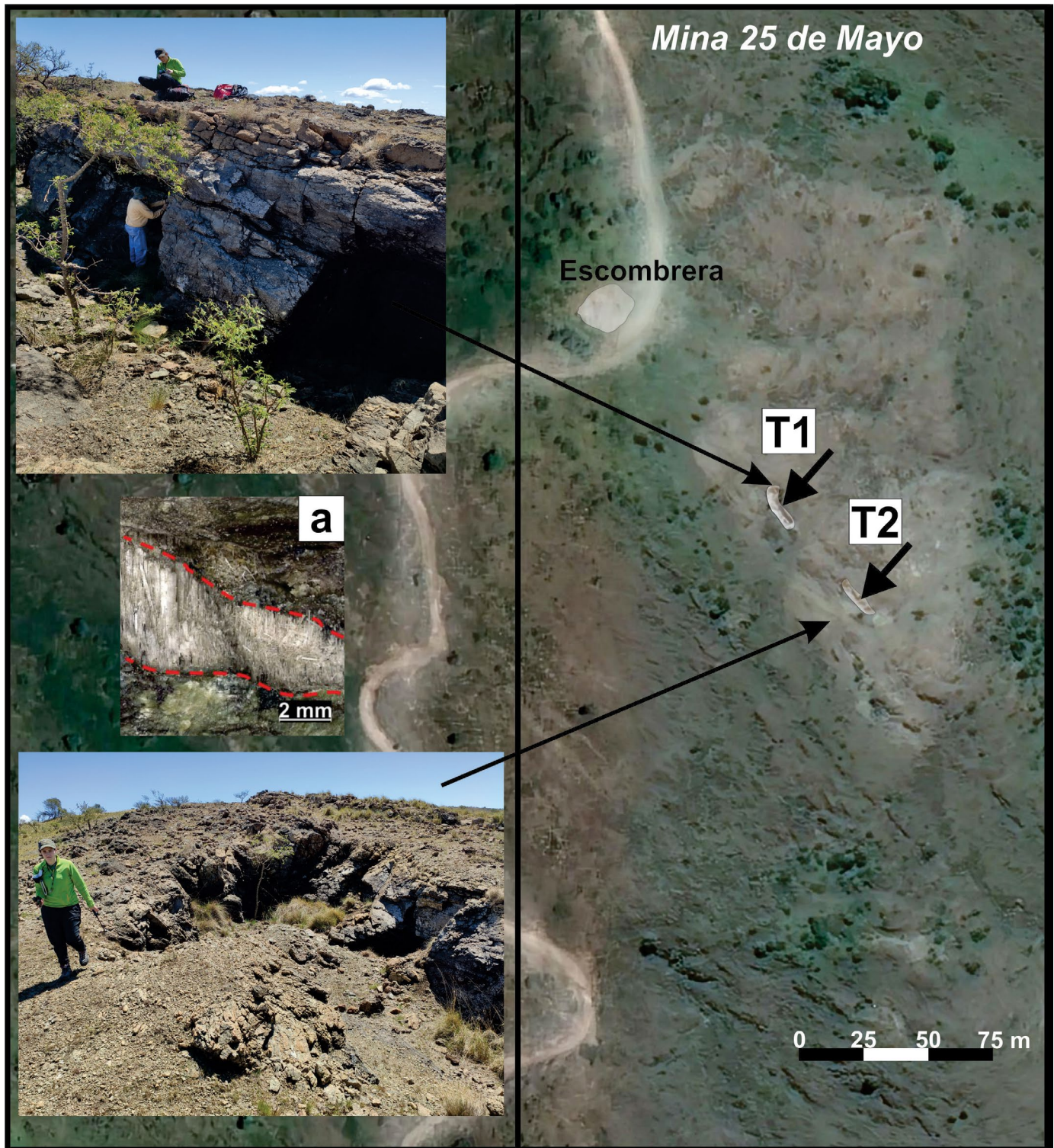


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo: Trinchera 1 (T1), Trinchera 2 (T2). a: venillas con minerales fibrosos.

de las fibras presentes. Dado que el número de mediciones es limitado, los valores obtenidos deben considerarse indicativos y no representativos desde el punto de vista estadístico poblacional.

RESULTADOS

Estudios macroscópicos

En las trincheras se tomaron muestras de los frentes expuestos, de las cuales sólo una, está compuesta en su mayo-

ría por minerales opacos que, por su brillo metálico intenso, gris plomo con tonos azulados se lo define como molibdenita (Fig. 3a), mientras que el resto se conforman principalmente por minerales de coloración verde con tonos que varían entre claro a muy oscuro. Estas rocas presentan tanto texturas masivas, así como también texturas con una foliación grosera, en donde los cristales se desarrollan ocasionalmente como fibras o tablillas dispuestas subparalelas entre sí (Fig. 3b). Las mismas se clasifican como serpentinitas considerando la petrografía, morfología y condiciones del área de estudio.

En cuanto a las estructuras, las rocas habitualmente son atravesadas por venillas compuestas por minerales fibrosos, en donde las fibras se disponen con su eje mayor perpendicular a las paredes de las venillas y poseen un brillo sedoso. Por lo general, el ancho no supera el centímetro y exhiben una morfología recta, aunque en algunos sitios se ramifican. Estas características permitirían, en primera instancia, adjudicar este mineral al crisotilo.

Además, se reconocen venillas menos frecuentes integradas por minerales opacos con una morfología más irregular donde el ancho no supera el milímetro. Cabe destacar, que estos minerales se han identificado también formando cúmulos y como cristales diseminados en las rocas. Con respecto a los minerales de formación más tardía, se identifica la presencia de calcita reemplazando en gran parte a los minerales del grupo de la serpentina, tanto en la roca como en los que conforman las venillas, y también sectores afectados por óxidos/hidróxidos de hierro con coloraciones amarillentas a anaranjadas (Fig. 3c, d).

Microscopía óptica

La descripción de las serpentinas se basa en la clasificación de texturas de Wicks y Whitaker (1977).

Bajo microscopio óptico en secciones delgadas, se pudo determinar que, las fases minerales que predominan se corresponden con minerales del grupo de la serpentina. Sin embargo, el porcentaje del contenido de minerales primarios

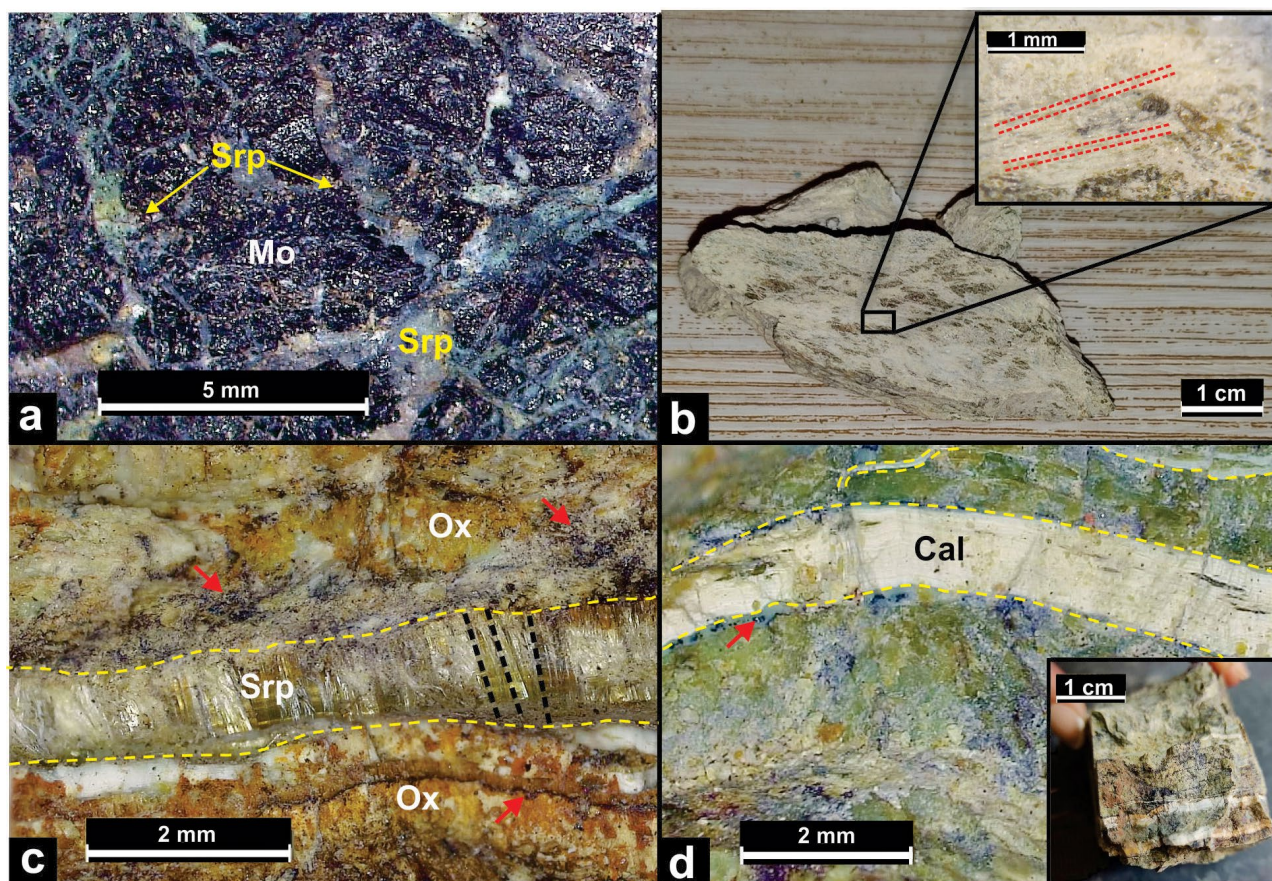


Figura 3. a) Mineralización compuesta por minerales opacos (Mo) atravesada por venillas de serpentinita (Srp). b) Serpentinita conformada principalmente por fibras micrométricas de serpentinita dispuestas subparalelas entre sí (líneas discontinuas sobre el margen superior derecho de la figura que muestra la orientación de las mismas). c) Venilla compuesta por fibras de serpentinita (Srp) (delimitada por líneas discontinuas amarillas) y minerales opacos (flechas rojas) diseminados en la roca y conformando venillas menores. Los óxidos/hidróxidos de hierro (Ox) se encuentran enmascarando gran parte de la roca, otorgándole una coloración anaranjado. d) Venilla de calcita (Cal) con textura bandeada que atraviesa a la serpentinita (imagen inferior izquierda). Con la flecha roja se indican los minerales opacos. Las imágenes de las figuras son tomadas con estereomicroscopio.

en algunas muestras, es mayor a la serpentización, alcanzando en algunos casos el 10 % de la superficie analizada en sección delgada. Generalmente, se identifican anfíboles, piroxenos y olivinos subordinados, los cuales se encuentran fracturados y presentan una serpentización local incipiente. En el caso de los anfíboles, se reconoce tremolita-actinolita, identificada en base a su ángulo de extinción característico de $\approx 11^\circ$ y a las propiedades ópticas que los definen como es el caso de un pleocroísmo que varía del verde pálido a verde más oscuro.

Con respecto a las texturas no pseudomórficas, se identifican de tipo entrelazadas caracterizadas por blastos anhedrales y relativamente equidimensionales, posiblemente integradas por lizardita, así como también de tipo interpenetrativas en las cuales se destacan sectores donde la serpentina presenta aspecto plumoso, y se podría corresponder con antigorita según lo expuesto por Wicks y Whitaker (1977). Es importante mencionar que en ambos casos es difícil identificar los minerales originales debido al grado avanzado de serpentización.

En la figura 4a se observa una fábrica constituida por tablillas dispuestas a 90 grados o en algunos casos conformando morfologías del tipo “estrella” con mayor birrefringencia que podrían indicar procesos de recristalización. Además, se reconoce un desarrollo inicial de la textura pseudomórfica en malla o “mesh texture” posiblemente constituida por lizardita, en donde se observan tablillas dispuestas en los planos de clivajes, fracturas y/o límites de granos de los minerales preexistentes (Fig. 4b). Conjuntamente, en esta figura se destaca la preservación de anfíbol y olivino primarios, que han sido parcialmente serpentizados afectando sólo a sus planos de clivaje y a las fracturas que presenta el olivino principalmente.

En cuanto a las texturas de relleno en venillas, se componen por minerales asbestiformes y no asbestiformes. En el primer caso se caracterizan por desarrollar la textura “cross fiber veins” con anchos que varían entre 50 μm y 700 μm , y están conformadas por crisotilo con su eje mayor transversal a las paredes de la venilla. La morfología de la venilla es irregular, suelen ramificarse y no son continuas (Fig. 4c). En el caso de las texturas en venilla rellenas por serpentina con una textura no asbestiforme, se reconocen atravesando aleatoriamente las zonas integradas mayoritariamente minerales opacos. Principalmente, se destacan por presentar textura entrelazada cuyos cristales exhiben un aspecto escamoso, la cual podría estar constituida por el polimorfo antigorita. En algunos sitios la serpentina se encuentra parcialmente alterada a clorita (Fig. 4d).

Asimismo, se reconocen cristales anhedrales a subhedrales de minerales opacos no diferenciados diseminados en las

rocas, así como también suelen encontrarse alineados entre los planos de clivaje de los minerales primarios (Fig. 4a-f). En relación a los minerales carbonáticos, afectando a la roca serpentínica se identifica calcita, conformando venillas de hasta 2 mm de ancho con texturas granulares (Fig. 4e), aunque también desarrollan texturas fibrosas por reemplazo pseudomórfico parcial de las serpentinas y se encuentran entre los planos de clivaje de minerales primarios (Fig. 4f). En esta última figura se reconoce, además, la presencia local de cristales euhedrales romboédricos e incoloros de carbonatos afectando a minerales primarios. Por estas propiedades ópticas se podría clasificar como dolomita. En cuanto a otros minerales de alteración asociados a este entorno geológico, se reconoce brucita, tanto en las venillas constituidas por crisotilo o antigorita, como en la matriz de la roca, caracterizada por su ligera coloración parda y extinción recta. Este mineral se presenta en agregados laminares o de aspecto micáceo y se identifica tanto en la matriz de la roca serpentínica, como en las venillas (Figura 4g, f).

Microscopía por contraste de fase

Bajo contraste de fase se estudiaron las fibras minerales contenidas en las venillas que atraviesan la roca serpentínica con el objetivo de observar la respuesta colorimétrica de las mismas. Se utilizó el líquido de dispersión con un índice de refracción (IR) $n=1.550$. Con este valor la respuesta colorimétrica del crisotilo varía de azul/azul pálido con un halo levemente anaranjado al encontrarse en la posición de máxima elongación de las fibras (Fig. 5a).

Sin embargo, como se puede observar en la figura 5b, en algunos casos se puede destacar que estos minerales presentan cambios en su colorimetría a lo largo de la fibra, presentando colores que varían entre rosa, anaranjado y amarillo. Considerando lo expuesto en el análisis microscópico, este comportamiento diferente podría evidenciar un reemplazo pseudomórfico carbonático, que afecta localmente a algunas de las fibras analizadas.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se prepararon fragmentos de minerales con hábito fibroso a tabular constituyentes de la roca. Si bien, el estudio de la muestra con lupa mostraba un hábito relativamente fibroso, mediante esta técnica pudo identificarse un hábito más bien tabular (Fig. 6a). El largo máximo de los cristales ronda los 5 mm, y en general las terminaciones de los cristales presentan caras relativamente planas y bien definidas, compatibles con formas simples de hábito tabular. En algunos casos se observa una terminación más aguzada, donde el ancho puede ser inferior a 7 μm . Los análisis EDS permitieron identificar picos

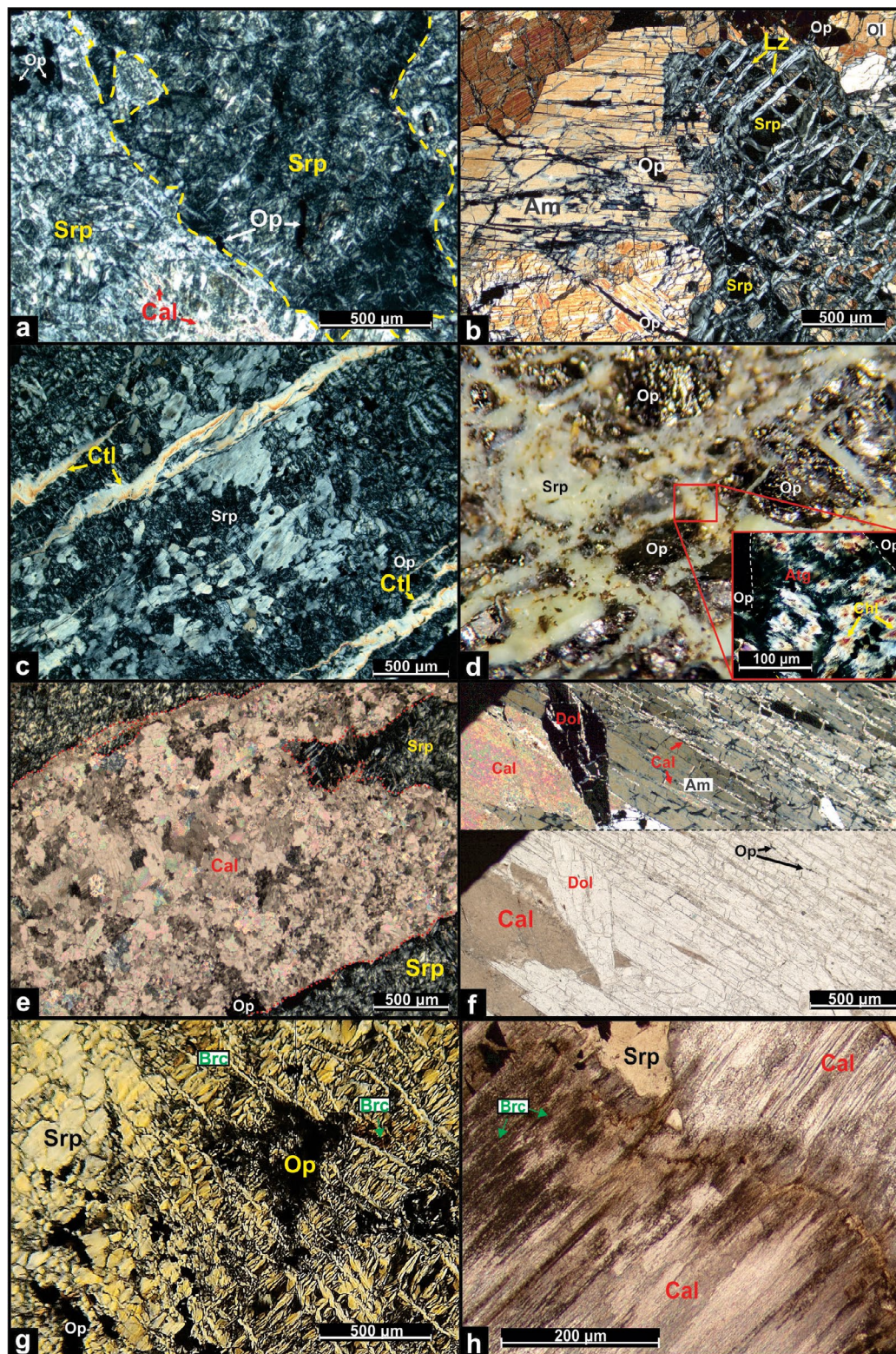


Figura 4. a) Textura pseudomórfica tipo bastita conformada por serpentina (Srp) de grano muy fino. Se reconoce calcita (Cal) reemplazando a la Srp y entre los cristales de esta última se observan minerales opacos (Op). b) Srp desarrollándose en las fracturas y planos de clivaje de anfíbol (Am) y olivino (Ol). Sobre el sector derecho de la imagen se identifica un grado de serpentinización mayor y se identifican tablillas de lizardita (Lz) en los planos de clivaje del mineral preexistente. c) Textura “cross fiber veins” compuesta por venillas de crisotilo (Ctl) que atraviesan la serpentinita que presenta textura no pseudomórfica. d) Venillas compuestas de Srp que atraviesan minerales opacos (Op). En la ampliación inferior derecha se identifica la textura de relleno de venilla conformada por cristales de antigorita (Atg) que simulan aparentar escamas. Algunos cristales se encuentran alterados a clorita (Chl). e) Venilla de calcita (Cal) desarrollando textura granular, que atraviesa serpentinita con textura no pseudomórfica de grano fino. f) Cristales euhedrales de dolomita (Dol) desarrollados sobre anfíboles primarios. La calcita se desarrolla en los planos de clivaje de los anfíboles. g) Entre la serpentinita (Srp) se observan cristales de minerales opacos (Op) y brucita (Brc). h) Brucita (Brc) como agregados en láminas o aspecto micáceo con tonalidades marrones, se encuentran en venilla de calcita (Cal). Figuras a-b-c-d-e-g fueron tomadas con nicols cruzado; imagen inferior de Figura f y h tomada con nicols paralelos.

de mayor intensidad de Si, Mg y O, y picos de baja intensidad correspondientes a Ca, C, Fe, Mn y Al (Fig.6b).

Difracción de rayos X

En la mayoría de los difractogramas se observan reflexiones que se atribuyen a minerales del grupo de la ser-

pentinita y se corresponden principalmente al polimorfo lizardita. Las reflexiones de este mineral usualmente se presentan en muestras integradas por la matriz de la roca serpentinitica (Fig. 7a), y presenta sus máximas intensidades en 7.24 Å, 2.50 Å y 3.63 Å equiparables con la ficha ICDD 084-1390 (ICDD 1993) (Fig. 7b).

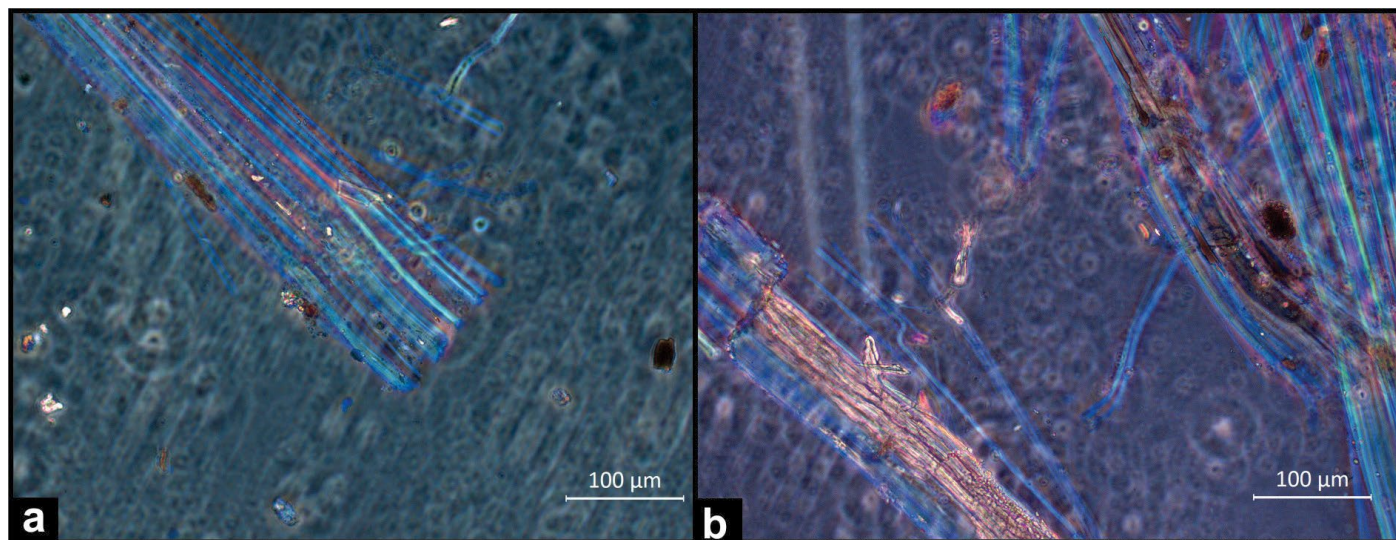


Figura 5. a) Imagen de mineral fibroso bajo contraste de fase con IR 1,55. Se puede observar un color azul pálido y un halo con leves destellos anaranjados. b) Imagen de fibras minerales bajo contraste de fase con IR 1,55. Se destaca el cambio en la colorimetría en la fibra situada en el margen inferior izquierdo. Ambas imágenes fueron tomadas con nicols paralelos.

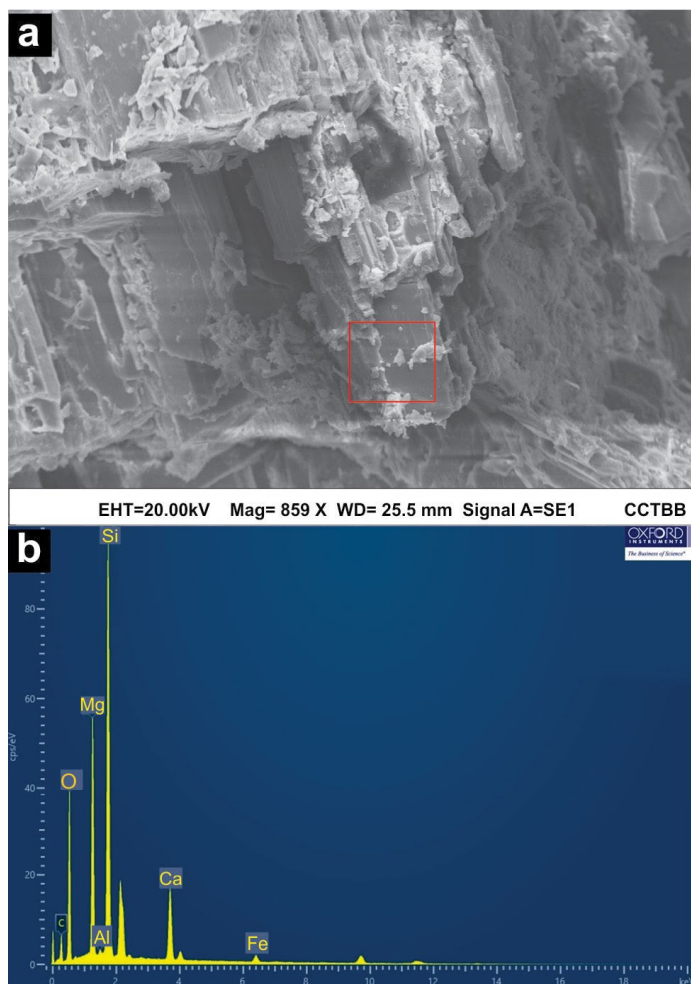


Figura 6. a) Mineral con hábito tabular bajo MEB. El recuadro rojo indica el sitio donde se realizó EDS. b) Resultado del análisis EDS realizado en el recuadro rojo.

Adicionalmente, otro constituyente de la roca que acompaña a la lizardita es enstatita. Este mineral es identificado en varios difractogramas que corresponden a muestras de roca total. Las principales reflexiones que definen su estructura son 3.16 Å, 2.86 Å y 4.39 Å, comparables con la ficha ICDD 019-0768 (ICDD 1993). Conjuntamente, en aquellos sectores donde la roca presenta cierto grado de alteración, es posible detectar la presencia de clorita-serpentina y talco (Fig. 7b). Se distinguen reflexiones con intensidades máximas en 9.25 Å, 4.54 Å y 3.10 Å equiparables con la ficha ICDD 029-1493 (ICDD 1993) y se corresponden con la estructura del talco. Por su parte, la clorita-serpentina presenta sus principales reflexiones en 7.06 Å, 3.54 Å y 4.73 Å comparables con la ficha ICDD 052-1044 (ICDD 1993).

Con respecto a la composición de los minerales fibrosos que integran venillas que atraviesan las rocas serpentínicas (Fig. 8a), se identifican reflexiones atribuibles al crisotilo, cuyos picos presentan sus máximas intensidades en 7.27 Å, 3.64 Å y 2.65 Å comparables con la ficha ICDD 021-1262 (ICDD 1993). A su vez, se reconoce calcita como uno de los constituyentes de estas venillas (Fig. 8b).

Por otra parte, se reconoce cromita en los difractogramas que corresponden a las muestras conformadas casi en su totalidad por minerales de brillo metálico y coloración negra. Sus máximas reflexiones están en 2.49 Å, 1.59 Å y 2.92 Å (Fig. 9), comparables con la ficha ICDD 073-1962 (ICDD 1993). Cabe destacar, que la presencia de clorita y lizardita en el difractograma observado en esta figura se atribuye a venillas de coloración verdosa que se encuentran entre los minerales metálicos (Fig.9b).

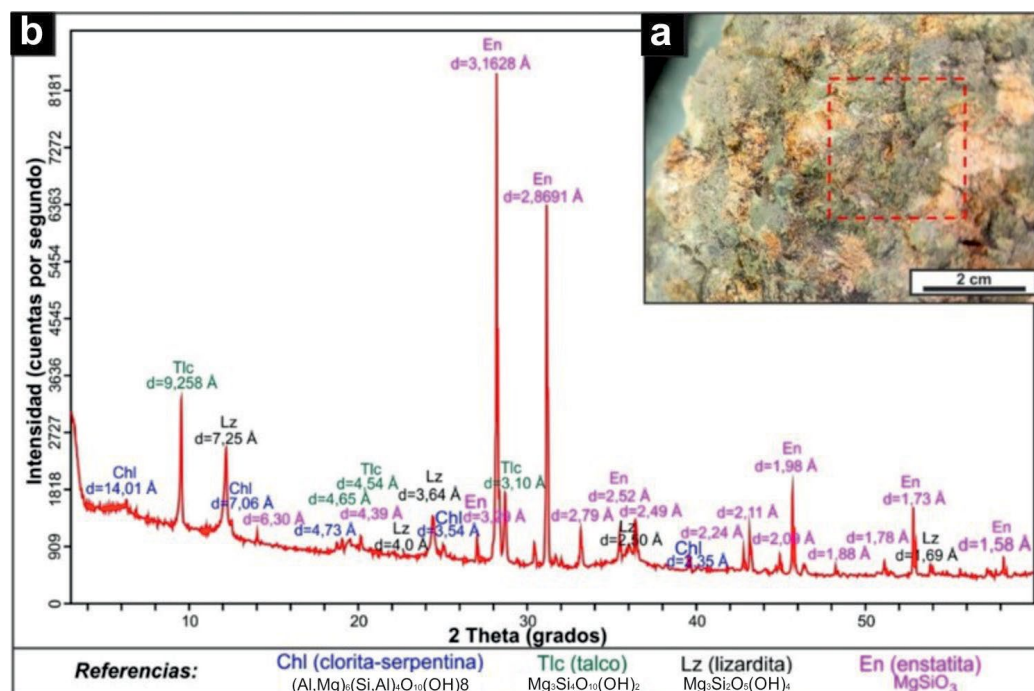


Figura 7. a) Difractograma correspondiente a roca total, en el cual se identifican las fases minerales clorita (Chl), talco (Tlc), lizardita (Lz) y enstatita (En). b) Fotografía en donde se delimita (línea punteada roja) la ubicación de las fibras extraídas cuyo análisis se corresponde con el difractograma de esta figura.

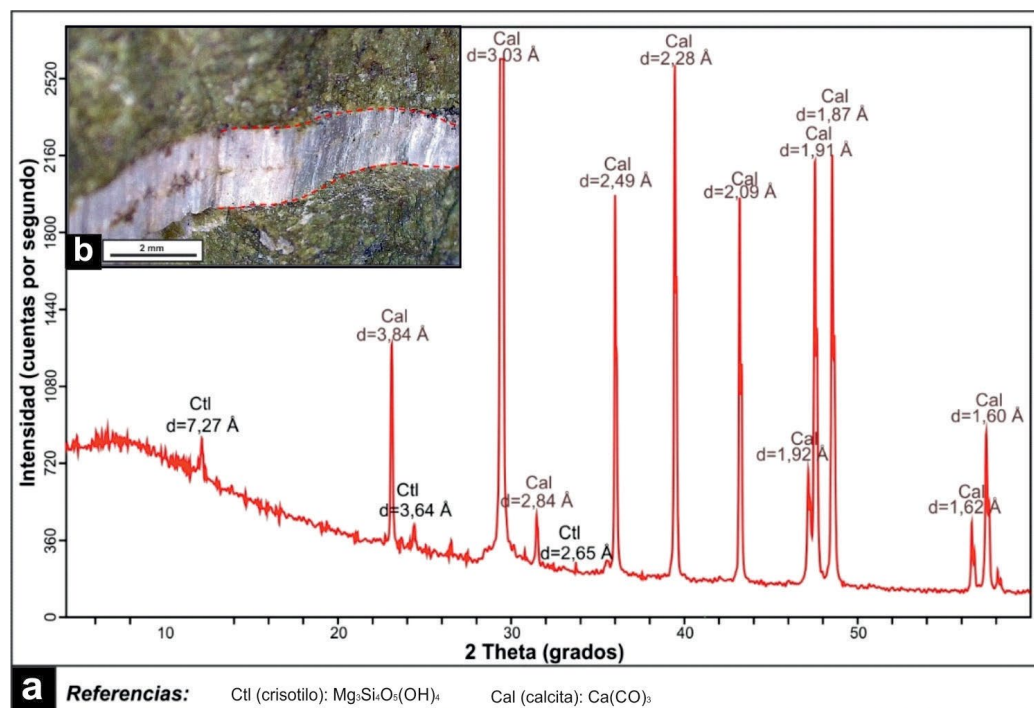


Figura 8. a) Difractograma correspondiente a mineral fibroso extraído de una venilla, en el cual se identifica crisotilo (Ctl) y calcita (Cal). b) Fotografía en donde se delimita (línea punteada roja) la ubicación de las fibras extraídas cuyo análisis se corresponde con el difractograma de la Figura a.

DISCUSIONES

Los procesos de serpentinización son analizados por Wicks y Whitaker (1977), quienes definen un modelo de procesos considerando ocho regímenes basados en las posibles combinaciones de tres parámetros: temperatura constante/ descendente o incremento de temperatura; presencia o no de cizallamiento sustancial; nucleación o no de antigorita. En las rocas de la mina 25 de Mayo, se puede determinar que al

menos ocurrieron dos eventos de serpentinización evidenciados por las venillas compuestas por minerales del grupo de la serpentina que se encuentran en relación de corte con la roca serpentinitica.

Se identifican texturas intermedias y relación de corte entre ellas, los procesos de formación no se incluyen sólo en un tipo de combinación propuesta por Wicks y Whitaker (1977), sino que puede abarcar más de una. Considerando estos modelos, para la formación de texturas pseudomórficas com-

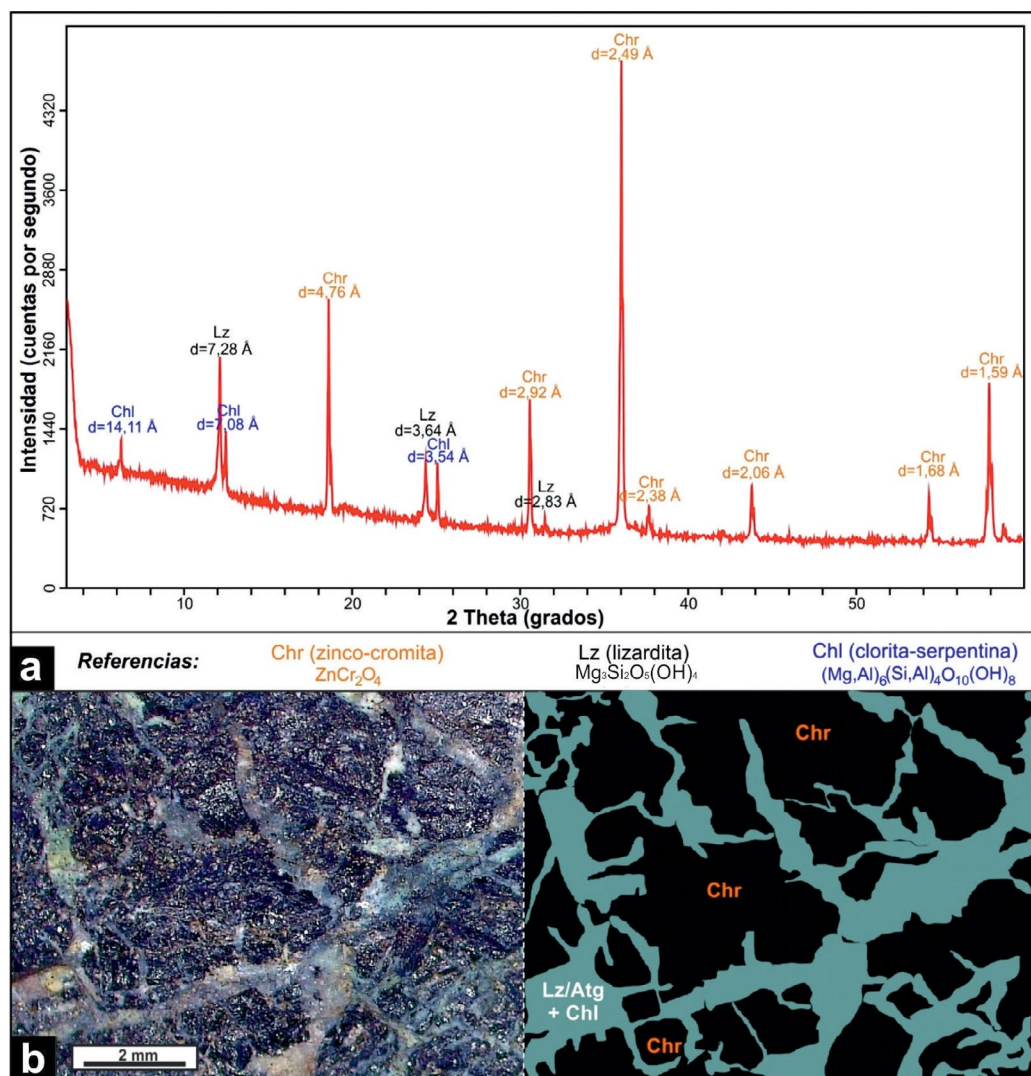


Figura 9. a) Difractograma correspondiente a una zona integrada principalmente por minerales metálicos, en el cual se identifican las fases minerales cromita (Chr), lizardita (Lz) y clorita (Chl). b) Fotografía (izquierda) y su interpretación (derecha) en donde se diferencia el mineral metálico (Chr) de las venillas compuestas por silicatos lizardita (Lz)/antigorita (Atg) y clorita (Chl).

puestas por lizardita $\pm$ brucita, la temperatura fue constante, sin cizallamiento sustancial y sin nucleación de antigorita (tipo de proceso 3, Wicks y Whitaker 1977). Sin embargo, el desarrollo de texturas no pseudomórficas generalmente requiere que no haya cizallamiento sustancial y un aumento de temperatura para que se formen a partir de la recrystalización de las texturas pseudomórficas desarrolladas con anterioridad, o para que su desarrollo sea a partir de minerales primarios relictos. Considerando lo analizado en el presente trabajo, donde se expone que las texturas no pseudomórficas podrían estar constituidas tanto por lizardita como antigorita $\pm$ brucita, por lo tanto, se infiere que están relacionados al tipo de proceso 5 (sin nucleación de antigorita) y 7 (con nucleación de antigorita), respectivamente (Wicks y Whitaker 1977).

Con respecto a la presencia de crisotilo en venillas, estos autores lo atribuyen comúnmente a la asociación del tipo de proceso 5 y/o 7, este último considerando un amplio rango de temperaturas. Por su parte, Rost (1949, 1959) menciona la importancia del cizallamiento para su desarrollo, es decir que

en estas rocas existe una condición estructural para que las fibras de este mineral crezcan en ese espacio generado por el cizallamiento.

Los cambios mineralógicos y texturales reconocidos en la mina 25 de Mayo resultan consistentes con los trabajos realizados en otros cuerpos ultramáficos de las Sierras de Córdoba. En particular, estudios previos en serpentinitas de la región (Bonalmi y Gigena 1987, Aiassa y Ferreira Centeno 1985, Sfragulla et al. 2009) describen asociaciones minerales y transiciones texturales comparables, vinculadas a múltiples episodios de serpentización y a eventos de circulación de fluidos durante el metamorfismo retrógrado. En este marco regional, el desarrollo de venillas de crisotilo asbestiforme puede interpretarse como parte de los estadios tardíos de evolución de estos cuerpos ultramáficos.

Diversos investigadores han realizado aportes en lo que concierne a las estabildades de fase entre los minerales serpentiniticos. Sin embargo, para los fines de este trabajo se tienen en cuenta principalmente las estabildades de fase pro-

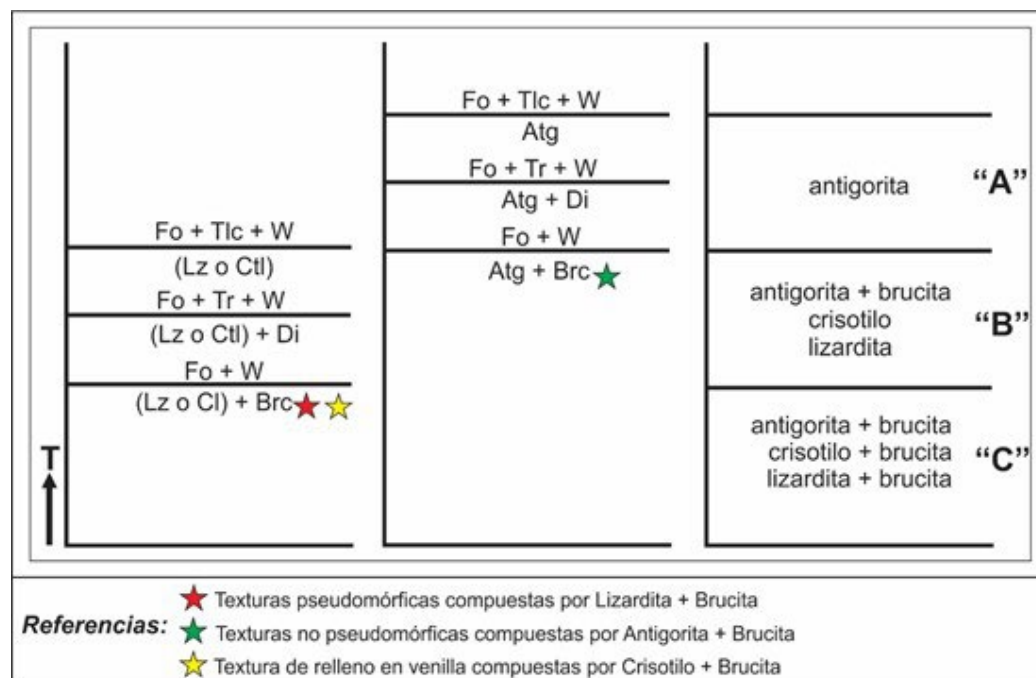


Figura 10. Diagrama esquemático de los regímenes de temperatura de las reacciones observadas, en donde se sitúan las muestras estudiadas. Referencias: Atg= antigorita; Brc= brucita; Ctl= crisotilo; Di= diópsido; Fo= forsterita; Lz= lizardita; Tlc= talco; Tr= tremolita; W= agua; "A", "B" y "C" = los tres regímenes de temperatura. Modificado de Wicks y Whitaker (1977).

puestas por Wicks y Whitaker (1977). Estos autores determinan de manera simplificada y esquemática que hay al menos tres rangos de temperaturas máximas ("A", "B" y "C") para las reacciones expuestas en la figura 10, para lo cual se basaron en estudios experimentales y expusieron que no se tiene en cuenta la relación entre las escalas de temperatura, así como tampoco el efecto de la presión.

Estudios isotópicos posteriores (Evans y Trommsdorff 1970, Trommsdorff y Evans 1972, Evans 1976) determina que la serpentinización ocurre a una temperatura sustancialmente constante, acorde a lo observado en la figura 10, donde el factor limitante para la velocidad de serpentinización es la disponibilidad de agua (Wicks y Whitaker 1977). Si se consideran tanto las asociaciones minerales como las texturas estudiadas en conjunto con los procesos previamente descritos, se podría estimar su rango cualitativo de temperatura considerando lo expuesto en la figura 10. La presencia de lizardita ± brucita en texturas pseudomórficas implica un desarrollo posible en el rango de temperatura "C" a partir de la reacción (1) forsterita (Fo) + agua (W) = lizardita (Lz) o crisotilo (Ctl) + brucita (Brc).

Por otro lado, para que se desarrollen las texturas no pseudomórficas conformadas por antigorita en conjunto con brucita implican que su formación haya sido en temperaturas mayores con respecto a la anterior ya que, como se indicó previamente, Wicks y Whitaker (1977) determinan que un aumento continuo de la temperatura podría generar la textura no pseudomórfica a partir de la recristalización de texturas pseudomórficas. Por lo tanto, se estima su formación en el

rango de temperatura "B" a partir de la reacción (2) forsterita (Fo) + agua (W) = antigorita (Atg) + brucita (Brc).

En cuanto a las venillas conformadas por crisotilo, se puede inferir el mismo rango de temperatura que para la lizardita ± brucita, debido a que en estas estructuras también se ha identificado brucita. Es decir que se atribuye el rango de temperatura "C" a partir de la reacción (2) forsterita (Fo) + agua (W) = lizardita (Lz) o crisotilo (Ctl) + brucita (Brc). Adicionalmente, los autores previamente referidos establecen que la presencia de crisotilo implica que la temperatura debería encontrarse por debajo del régimen "A". De lo contrario, se imposibilitaría su formación al cristalizar en condiciones de bajas presiones y temperaturas. Cabe destacar que para la reacción general: forsterita + agua = serpentina + brucita, Johannes (1968) ha demostrado que se produce a 2 kbars de presión y 380°C. No obstante, se debe considerar a ésta sólo como una temperatura máxima de serpentinización, debido a que el término serpentina que utilizan estos autores en la reacción incluye a los tres polimorfos: antigorita, lizardita y crisotilo.

Con el fin de aproximar la temperatura para la formación de lizardita y crisotilo en la mina 25 de Mayo, se tiene en cuenta lo establecido por Evans (1976), quien atribuye su desarrollo cerca de los 200° C, por estudios de isótopos de oxígeno. Es importante señalar que, análisis posteriores determinaron que el crisotilo no se forma directamente a partir de asociaciones peridotíticas tempranas, sino que cristaliza a partir de la desestabilización previa de la antigorita (Vignaroli et al. 2011). Por ende, estos autores determinan que la nucleación

de serpentina asbestiforme requiere un enfriamiento durante la descompresión en condiciones metamórficas de alto grado hacia condiciones más superficiales de P-T (metamorfismo retrógrado). Por su parte, Wenner y Taylor (1971) establecen que la temperatura asociada a la presencia de antigorita se encuentra en un rango amplio que incluye de 220 °C a 460 °C aproximadamente. No obstante, se debe hacer énfasis que, dentro de las asociaciones minerales, en el presente trabajo se reconoce brucita, siendo este un mineral que define condiciones de cristalización de menor temperatura (Modoy 1976), por lo tanto, se puede estimar que la antigorita se desarrolla más próxima al límite inferior del rango de temperatura establecido por Wenner y Taylor (1971).

Asimismo, es importante señalar que las determinaciones que realizaron Wicks y Whitaker (1977) son idealizadas, en donde las fases primarias son silicatos de magnesio ($\pm$ calcio). No obstante, se deben considerar las cantidades sustanciales de hierro que no es adquirido por los minerales serpentiniticos, ya que la preferencia de este elemento es baja, por lo tanto, aquí se observa que el hierro podría formar parte de magnetita, la cual no se había diferenciado dentro de los minerales opacos, identificados en el presente trabajo.

Inicialmente la magnetita se forma como pequeños cristales, pero a medida que avanza la serpentización aumentan su tamaño y llega a formar venillas (Wicks y Whitaker 1977). Para el caso estudiado, si se evidenciara que las venillas están compuestas por magnetita, y considerando el tamaño de los cristales y la coloración de las rocas, podría estimarse que la serpentización ha sido avanzada.

Por otra parte, en las rocas en estudio, se identifica localmente tremolita y talco. Estos minerales necesitan para su formación la incorporación de magnesio al sistema, atribuida a la presencia de forsterita en la roca ultrabásica (Wicks y Whitaker 1977). Según lo estudiado por Gargiulo et al. (2011) en el complejo ultramáfico Las Tunas, quienes tuvieron en cuenta las reacciones para sistemas ultramáficos afectados por carbonatización propuestas por Bucher y Frey (1994), Spear (1995) y Winter (2001), pudieron determinar que ante la presencia de una pequeña proporción de CO₂, la serpentina se vuelve inestable y reacciona para formar talco y carbonatos. Conjuntamente, Naldrett (1966) estableció que los minerales serpentiniticos se vuelven inestables y son reemplazados por talco y carbonatos, principalmente calcita y/o dolomita.

En adición, consideran que las reacciones de cristalización de talco y carbonatos pueden desarrollarse dentro de un intervalo entre 300 °C y 675 °C aproximadamente, aunque cabe destacar que en la mina 25 de Mayo el talco se encuentra en bajas proporciones. En la mina 25 de Mayo, se reconoce que la carbonatización es tanto penetrativa, afectando a

fracturas minerales y planos de clivaje, así como también se reconoce carbonatos en venillas. Bajo microscopía óptica, en las rocas estudiadas se observa el reemplazo pseudomórfico parcial de crisotilo por calcita, así como también se detecta en el cambio en la colorimetría de las fibras bajo contraste de fase (Fig. 5B). Asimismo, en los análisis EDS se reconocen picos de alta intensidad de los elementos Ca, C y O en el centro de las venillas (Fig. 6), sumado a que en los difractogramas de rayos X, tanto en las muestras de roca serpentinitica como en las venillas (Fig. 8), se observa la presencia de minerales del grupo de la serpentina en conjunto con calcita. Toda esta información evidencia que las rocas de estudio han sufrido procesos de carbonatización parcial.

El cuerpo de roca estudiado, denominado Árbol Seco, corresponde a las rocas ultramáficas neoproterozoicas que constituyen el Basamento Metamórfico Plutónico. Los lentes de rocas ultramáficas están serpentinizados y se encuentran constituyendo fajas de deformación dúctil que atraviesan tectónicamente el complejo metamórfico de grado medio a alto (Bonalmi y Gigena 1987). Estos autores determinan que las rocas ultramáficas han sufrido cuatro episodios metamórficos donde el último es retrógrado y está asociado a la circulación de fluidos en fracturas, lo que generó el relleno de talco y crisotilo.

Numerosos autores han identificado la presencia de crisotilo en distintos sectores de las fajas ultramáficas en las Sierras de Córdoba, como por ejemplo en las minas Los Guanacos (Pages y Ré 1953), Los Congos (Escayola 1994), 25 de Mayo (Dufilho 1985), La Bélgica (Angelelli et al. 1980, Lescano et al. 2015), Árbol Seco (Aiassa y Ferreira Centeno 1985). Asimismo, en estas últimas dos Sfragulla et al. (2009) indican la presencia de crisotilo asbestiforme. Para el caso de la mina 25 de Mayo, en este trabajo se registra en las serpentinitas la presencia de venillas compuestas por un mineral fibroso, el cual podría estar asociado al episodio de metamorfismo retrógrado (Bonalmi y Gigena 1987), como se mencionó anteriormente. Desde el punto de vista macroscópico este mineral tiene hábito fibroso, una coloración blanquecina a incolora y brillo sedoso, donde la longitud mayor de las fibras es perpendicular a las paredes de las venillas. Conjuntamente, con el análisis microscópico de las venillas se reconoce que este mineral presenta extinción paralela y desarrolla la textura "*cross-fiber*", la cual fue descripta por Wicks y Whitaker (1977) quienes adjudican que esta textura se compone por fibras de crisotilo asbestiforme dispuestas de manera transversal a las paredes de las fracturas. Además, estos autores determinan que se desarrollan en fracturas donde no hubo cizalla y que las fibras de crisotilo se caracterizan por tener extinción paralela. De igual forma, Bonalmi y Gigena (1987)

reconocen el crisotilo con hábito asbestiforme en la mina La Bélgica y el desarrollo de la textura cross-fiber, al igual que lo descrito por Lescano et al. (2011) en esta misma mina también localizada en las Sierras de Córdoba. Cabe destacar que en menor proporción se han reconocido, tanto en la mina La Bélgica como en 25 de Mayo, venillas conformando una textura no asbestiforme.

En la figura 11 se pueden comparar las venillas de crisotilo en sección delgada de la mina La Bélgica (A) con respecto a la mina 25 de Mayo objeto de este trabajo (B). Se pueden observar varias similitudes en ambas minas, tales como, la morfología de la venilla teniendo pequeñas ramificaciones que atraviesan la roca serpentinitica, así como también el espesor de la estructura que no supera los 200 μm . Además, el bajo color de interferencia con nicoles cruzados es una de las propiedades ópticas que caracteriza este mineral.

Por su parte, es posible reconocer las fibras de crisotilo en las venillas estudiadas con el método de contraste de fase, el cual se basa en la variación del índice de refracción que depende de la longitud de onda incidente. Desde el punto de vista de los tres parámetros en que se fundamenta la evaluación del índice de refracción (Niskanen et al. 2013), el efecto cromático que exhiben las fibras analizadas de la mina 25 de Mayo es el esperado para crisotilo, donde el color de la partícula es azul-celeste y el halo circundante es anaranjado al encontrarse en la máxima elongación de las mismas.

Estas propiedades ópticas observadas son comparadas con las propiedades definidas por HSE (2005), determinadas para los diferentes tipos de asbestos según el correcto valor de los líquidos con índice de refracción conocido a utilizar. Para el tipo de asbestos crisotilo se puede destacar que utilizando un líquido con un índice de refracción 1.550, gran parte

de las propiedades observadas en las fibras de este trabajo son coincidentes, ya sea desde la morfología hasta la birrefringencia, así como también la extinción y colores detectados.

Determinar la relación (longitud/anchura) de las fibras de asbestos es fundamental para definir la partícula asbestiforme ya que, la Conferencia General de la Organización Internacional del Trabajo establece en 1986 una recomendación sobre el asbestos (núm. 172), en la cual utilizan la expresión “fibras de asbestos respirables” a aquellas fibras de asbestos cuyo diámetro sea inferior a tres micrones, y que la relación entre longitud y diámetro sea superior a 3/1, considerando en la medición exclusivamente las fibras de longitud superior a cinco micrones. Asimismo, el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de la República Argentina determina esta misma definición dentro de las normas para el uso, manipuleo y disposición del amianto y sus desechos en la Resolución 577/91 (Buenos Aires, 1991). En este trabajo, las fibras analizadas bajo MEB se destacan por presentar extremos fracturados y, en ocasiones, presentan una leve curvatura a lo largo de su eje de mayor longitud. En cuanto al tamaño de las mismas, todas ellas tienen una relación longitud/anchura que oscila entre en promedio 400/1 y 170/1.

Giacomini et al. (2010) utilizan el término “peligrosas” basados en estudios y normas médicas, a todas estas fibras que pueden ser aerotransportadas y que reúnen las características de dimensiones previamente mencionadas. Considerando estas definiciones y las mediciones realizadas en la mina 25 de Mayo, se observa que una proporción significativa de las fibras presenta anchos menores o cercanos a 3 μm y relaciones longitud/anchura muy superiores a 3/1, y en muchos casos superiores a 100/1. Si bien el número de mediciones

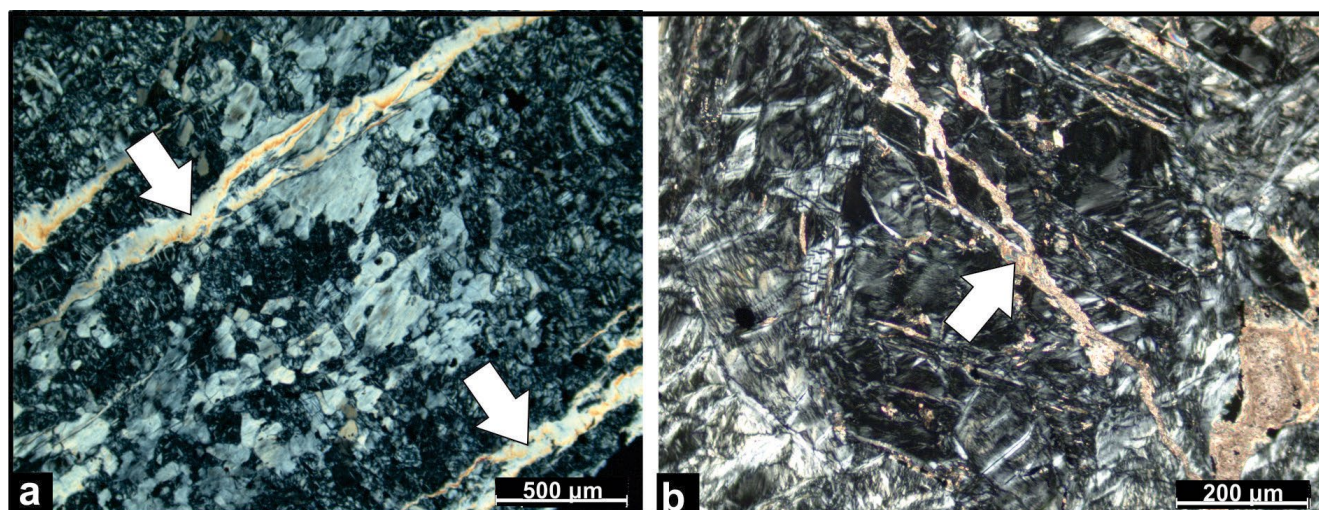


Figura 11. a) Venilla con textura “cross fiber” presente en mina 25 de Mayo. b) Venilla con textura “cross fiber” presente en mina La Bélgica (CtIC-F: crisotilo cross-fiber). Modificado de Lescano et al. (2015).

es limitado y no permite un análisis estadístico poblacional, estos resultados indican la presencia de fibras con dimensiones compatibles con la definición de fibra respirable. Estas características sugieren un potencial riesgo para la salud humana, particularmente en contextos donde las fibras puedan ser liberadas al ambiente.

Si bien algunas fibras presentan un diámetro mayor a tres micrones, es relevante destacar que la facilidad de disgregamiento y la alta movilidad que presenta al ser incorporado al polvo atmosférico son motivos suficientes que pueden llevar a que también sean potencialmente riesgosas. Esto se debe a que numerosos estudios con enfoque en la salud humana, como se mencionan en el apartado de antecedentes, han demostrado que los minerales asbestiformes son peligrosos si sus fibras ingresan a los pulmones y dañan células, provocando enfermedades como asbestosis, mesoteliomas o cáncer (Cardile et al. 2007).

En adición, considerando que las fibras pueden incorporarse al aire o al agua desde depósitos naturales, se tiene en cuenta el trabajo realizado por Lescano et al. (2011) donde analizan la degradación del crisotilo simulando condiciones naturales en diversas muestras de la mina La Bélgica. Como se mencionó con anterioridad, este yacimiento se encuentra cerca de la mina 25 de Mayo y tiene características geológicas similares. En este trabajo se concluyó que, si bien no fue posible estimar un período en el que se puedan producir cambios en las fibras, se determina que la dispersión en aire cambia la morfología y disminuye su tamaño (aproximadamente un 52 % en longitud y un 16 % su diámetro), pudiendo alcanzar tamaños críticos para la salud humana.

Además, la simulación en condiciones ácuas determina que en un corto lapso de tiempo hay cambios en la morfología, pérdida de rigidez y reducción de tamaño (aproximadamente un 83 % en longitud y un 95 % su diámetro). A continuación, se exhibe una comparación entre las dimensiones de las fibras medidas en este trabajo con respecto a las dimensiones estimadas teniendo en cuenta los porcentajes de reducción considerados por Lescano et al. (2011) (Cuadro 1). En la misma se destaca que las fibras que no eran consideradas como peligrosas por su longitud mayor a tres micrones, luego de tener en cuenta la reducción por dispersión y por disgregación, sí lo serían principalmente por la reducción del último ensayo. Esto es muy relevante debido a que la población más cercana a la mina 25 de Mayo se encuentra a 10 km, y el cauce del Río Grande que desemboca en el Embalse Cerro Pelado dista sólo 1 km, lo que la degradación natural podría implicar potenciales riesgos para la salud humana, tanto para las personas que residen en cercanías como para las que trabajan en los alrededores.

Por su parte, es de suma importancia mencionar que, si bien se reconoce que las rocas han sufrido procesos de carbonatación en donde las fibras de crisotilo presentan un reemplazo pseudomórfico por minerales carbonáticos, se comprueba que la sustitución es parcial. Sumado a ello, Valeyre y Letourneaux (1999) mencionan que entre los factores que influyen en la peligrosidad de los asbestos tienen más importancia la durabilidad de las fibras y la persistencias en el organismo (biopersistencia), es decir que los asbestos son más peligrosos por su morfología que por su química. En conjunto, esto quiere decir que por más que haya reemplazo parcial, de igual forma el asbesto se considera riesgoso.

Cuadro 1. Comparación entre las dimensiones de las fibras naturales y la estimación de reducción tamaño si fueran afectadas por dispersión en el aire y/o disgregación en medio acuoso

Dimensiones (en μm) de fibras naturales mina 25 de Mayo			Dimensiones (en μm) estimadas según dispersión por aire (Lescano et al. 2011)			Dimensiones (en μm) estimadas según disgregación en medio acuoso (Lescano et al. 2011)		
Longitud fibra	Ancho fibra	Longitud/ancho	Longitud fibra (52% menos)	Ancho fibra (16% menos)	Longitud/ancho	Longitud fibra (83% menos)	Ancho fibra (95% menos)	Longitud/ancho
950	2	476/1	456	1.68	271.4/1	161.5	0.1	161615/1
900	2	450/1	396	1.68	235.7/1	153	0.1	1530/1
700	2	350/1	336	1.68	200/1	119	0.1	1190/1
930	3	310/1	446.4	2.52	177.14/1	158.1	0.15	1054/1
1000	4	250/1	480	3.36	142.8/1	170	0.2	850/1
980	4	245/1	470.4	3.36	140/1	166.6	0.2	833/1
740	2.5	296/1	355.2	2.1	169.1/1	125.8	0.125	1006.4/1
1075	6	179/1	516	5.04	102.4/1	182.75	0.3	609.2/1
800	2	400/1	384	1.68	228.6/1	136	0.1	1360/1
760	2.5	304/1	364.8	2.1	173.7/1	129.2	0.125	1033.6/1

Anchos < 3 μm , fibras de asbesto respirables (potencialmente peligrosas)

Estudios recientes como los de Wylie et al. (2020) y Van Gosen et al. (2007) destacan la necesidad de implementar protocolos de vigilancia ambiental en zonas con presencia natural de minerales asbestiformes, incluso en ausencia de explotación activa. La incorporación de estas herramientas contribuiría a una gestión ambiental más eficaz y a la prevención de efectos en la salud pública.

CONCLUSIONES

A partir de los estudios mineralógicos, texturales y morfológicos realizados en las serpentinitas de la mina 25 de Mayo, se confirmó la presencia de crisotilo asbestiforme rellenando venillas de tipo “cross-fiber”, así como un reemplazo parcial por minerales carbonáticos.

El análisis conjunto de las asociaciones minerales y las texturas reconocidas permitió inferir al menos dos eventos de serpentinitización y una evolución vinculada a metamorfismo retrógrado. La presencia de lizardita, crisotilo y posiblemente antigorita indica condiciones variables de temperatura durante la evolución del sistema, asociadas a circulación de fluidos y cambios en las condiciones físico-químicas.

Las fibras de crisotilo presentan relaciones longitud/ancho elevadas y, en numerosos casos, dimensiones compatibles con la definición de fibras respirables. Si bien las mediciones realizadas tienen carácter indicativo, los resultados sugieren un potencial riesgo ambiental y sanitario asociado a la posible liberación y dispersión natural de fibras desde los frentes de explotación abandonados.

Considerando la proximidad de poblaciones y cursos de agua, así como la biopersistencia y facilidad de disgregación de los minerales asbestiformes, resulta necesario implementar estudios de monitoreo ambiental y medidas preventivas orientadas a reducir la exposición y los potenciales efectos sobre la salud pública.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur, a la Universidad Nacional de Córdoba, a la Secretaría de Minería de Córdoba y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires por el apoyo brindado. Asimismo, agradecen a la Editora Asociada Laura Maydagan y a Pablo Leal y otro revisor anónimo por sus valiosos comentarios y sugerencias, que contribuyeron significativamente a mejorar la calidad del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abú-Shams, K., y Pascal, I. 2005. Características, propiedades, patogenicidad y fuentes de exposición del asbesto. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra* 28(Supl. 1): 7-11.
- Aiassa, D.J., y Ferreira Centeno, J.P. 1985. Estudio petrológico de la serpentinita de Árbol Seco. Trabajo final de licenciatura, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 60 p., Córdoba.
- Angelelli, V., Schalamuk, I., y Fernández, R. 1980. Los yacimientos no metalíferos y rocas de aplicación de la región Centro-Cuyo. *Secretaría de Estado de Minería, Anales* 19, 261 p., Buenos Aires.
- Baietto, O., y Marini, P. 2018. Naturally occurring asbestos: Validation of PCOM quantitative determination. *Resources Policy* 59: 44-49.
- Bernstein, D.M. 2009. Reseña respecto a la diferencia entre el crisotilo y los asbestos anfíboles. *Boletín del Instituto del Crisotilo*, 4 p.
- Bonalumi, A.A., y Gigena, A.A. 1987. Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas del Departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 42(1-2): 73-81.
- Bonalumi, A.A., Sfragulla, J.A., Jerez, D., Bertolino, S., Sánchez Rial, J., y Carrizo, E. 2014. Yacimientos de minerales y rocas industriales. En: Martino, R., y Guerreschi, A. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba*: 983-1024, Córdoba.
- Bucher, K., y Frey, M. 1994. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, 318 p., Berlin-Heidelberg.
- Cábana, M.C. 2010. Estudio geológico-estructural-metalogenético de los cuerpos máficos y ultramáficos de la mina Los Guanacos, distrito minero Los Guanacos, Sierras Pampeanas Orientales, provincia de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata (inédita), 119 p., La Plata.
- Cardile, V., Lombardo, L., Belluso, E., Panico, A., Capella, S., y Balazy, M. 2007. Toxicity and carcinogenicity mechanisms of fibrous antigorite. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 4(1): 1-9.
- Duflho, A.C. 1985. Estudio petro-estructural de la serpentinita 25 de Mayo. Trabajo final de licenciatura, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 70 p., Córdoba.
- Escayola, M.P. 1994. Faja ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti-Yaco y Ea. San Miguel, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 277 p., Córdoba.
- Escayola, M., Proenza, J., Schalamuk, A., y Cábana, C. 2004. La secuencia ofiolítica de la Faja ultramáfica de Sierras Pampeanas, Argentina. En: Pereira, E., Castroviejo, R., y Ortiz, F. (eds.), *Complejos ofiolíticos de Iberoamérica, guías de prospección para metales preciosos*: 133-156.
- Evans, B.W. 1976. Stability of chrysotile and antigorite in the serpentine multisystem. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 56: 79-93.

- Evans, B.W., y Trommsdorff, V. 1970. Regional metamorphism of ultramafic rocks in the Central Alps: parageneses in the system CaO-MgO-SiO₂-H₂O. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 50: 481-492.
- Gargiulo, M.F., Bjerg, E.A., y Mogessie, A. 2011. Caracterización y evolución metamórfica de las rocas ultramáficas de la Faja del Río de Las Tunas, Cordillera Frontal de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68(4): 571-593.
- Giacomini, F., Boerio, V., Polattini, S., Tiepolo, M., Tribuzio, R., y Zanetti, A. 2010. Evaluating asbestos fibre concentration in metaophiolites: a case study from the Voltri Massif and Sestri-Voltaggio Zone (Liguria, NW Italy). *Environmental Earth Sciences* 61: 1621-1639.
- González Chiozza, S. 2002. Geología del área del cerro Los Guanacos, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 55-68.
- Gordillo, C., y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En: Turner, J.C.M. (ed.), 2° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias 1: 577-650, Córdoba.
- Health and Safety Executive. 2005. Asbestos: The Analysts' Guide for Sampling, Analysis and Clearance Procedures. HSE Books, Norwich.
- International Centre for Diffraction Data (ICDD). 1993. Mineral Powder Diffraction File. Databook, Park Lane, Swarthmore, Pennsylvania, 2389 p.
- Johannes, W. 1968. Experimental investigation of the reaction forsterite + H₂O = serpentine + brucite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 19: 309-315.
- Lescano, L., Marfil, S., Maiza, P., Sfragulla, J., y Bonalumi, A. 2011. Evaluación de los cambios en la morfología y tamaño de fibras de crisotilo de mina La Bélgica (Calamuchita, provincia de Córdoba, Argentina) simulado en ensayos de laboratorio. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 27: 73-83.
- Lescano, L., Marfil, S., Sfragulla, J., Bonalumi, A., y Maiza, P. 2015. Crisotilo en serpentinitas de mina La Bélgica, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72(4): 542-550.
- Martino, R.D., Guerreschi, A.B., Carignano, C.A., Sfragulla, J.A., y Bonalumi, A.A. 2020. Mapa Geológico de la Provincia de Córdoba. Escala 1:750.000. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Serie Publicación 176, Buenos Aires.
- Moody, J.B. 1976. Serpentinization: a review. *Lithos* 9: 125-138.
- Mutti, D.L. 1994a. Los cromoespinelos del centro sur de las Sierras de Córdoba: metalogénesis e implicancias geotécnicas. *Publicación del Instituto de Recursos Minerales* 3: 545-570.
- Mutti, D.L. 1994b. Exoluciones en cromitas metamórficas de Córdoba, Argentina. 2° Jornadas de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas. Publicación del Instituto de Recursos Minerales 3: 571-581, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- Naldrett, A.J. 1966. Talc-carbonate alteration of some serpentinized ultramafic rocks south of Timmins, Ontario. *Journal of Petrology* 7(3): 489-499.
- Niskanen, L., Rätty, J., y Peiponen, K.E. 2013. Determination of the refractive index of microparticles by utilizing light dispersion properties of the particle and an immersion liquid. *Talanta* 115: 68-73.
- Pages, C., y Re, N. 1953. Estudio geológico-minero de las minas de cromita "Los Guanacos", "El Rodeo", "Ume Pay" y "Árbol Seco", departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Dirección General de Fabricaciones Militares, Informe inédito, Buenos Aires.
- Pastore, F. 1932. Hoja Geológica 201-Córdoba del Mapa Geológico de la Argentina, región oriental y media de la Sierra de Córdoba. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 36, 67 p., Buenos Aires.
- Rodríguez, E.J. 2004. Asbestos banned in Argentina. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 10: 202-208.
- Rost, F. 1949. Das Serpentin-Gabbro-Vorkommen von Wurlitz und seine Mineralien. *Heidelberger Beiträge* 1: 626-688.
- Rost, F. 1959. Problem ultrabasischer Gesteine und ihrer Lagerstätten. *Freiberger Forschungshefte* C58: 26-65.
- Sánchez, V.C., Pietruska, J.R., Miselis, N.R., Hurt, R.H., y Kane, A.B. 2009. Biopersistence and potential adverse health impacts of fibrous nanomaterials: what have we learned from asbestos? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology* 1: 511-529.
- Sfragulla, J., Bonalumi, A., Briolini, N., y Cabrera, J. 2009. Prospección de rocas ultramáficas de Córdoba, orientada a su aplicación industrial. 9° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas 1: 287-292, Catamarca.
- Sims, J.P., Ireland, T.R., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P.E., Skirrow, R.G., Stuart-Smith, P.G., y Miró, R. 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. En: Pankhurst, R.J., y Rapela, C.W. (eds.), *The proto-Andean margin of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications 142: 259-281.
- Spear, F.S. 1995. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineralogical Society of America*, 799 p., Washington D.C.
- Trommsdorff, V., y Evans, B.W. 1972. Progressive metamorphism of antigorite schist in the Bergell tonalite aureole (Italy). *American Journal of Science* 272(5): 423-437.
- Valeyre, D., y Letourneaux, M. 1999. Asbestose. *Revue des Maladies Respiratoires* 16: 1294-1307.
- Van Gosen, B.S. 2007. The geology of asbestos in the United States and its practical applications. *Environmental & Engineering Geoscience* 13(1): 55-68.
- Vignaroli, G., Rossetti, F., Belardi, G., y Billi, A. 2011. Linking rock fabric to fibrous mineralisation: a basic tool for the asbestos hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(5): 1267-1280.
- Villar, M.L. 1975. Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas de la República Argentina y su significado metalogénico. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 3: 135-156, Buenos Aires.

- Villar, M.L. 1985. Las fajas ultrabásicas argentinas, tipos de ultramáficas y metalogenia. 4° Congreso Geológico Chileno, Actas 4: 610-633, Antofagasta, Chile.
- Wenner, D.B., y Taylor, H.P. 1971. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on O18/O16 fractionation between coexisting serpentine and magnetite. Contributions to Mineralogy and Petrology 32(3): 165-185.
- Wicks, F.J., y Whitaker, E.J.W. 1977. Serpentinite textures and serpentinization. The Canadian Mineralogist 15: 459-488.
- Winter, J.D. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall, 796 p., Upper Saddle River, New Jersey.
- Wylie, A.G., Korchevskiy, A., Segrave, A.M., y Duane, A. 2020. Modeling mesothelioma risk factors from amphibole fiber dimensionality: mineralogical and epidemiological perspective. Journal of Applied Toxicology 40(4): 515-524.