

naturalidad, sin embargo la ausencia de fuentes económicamente explotables de arenas para el repoblamiento de playas la han convertido prácticamente en única opción, pese a estos rechazos.

En caso que existiesen arenas naturales de la plataforma continental adyacente, en cantidad y calidad necesaria para el repoblamiento de playas, su obtención implicaría el desarrollo de una actividad extractiva con una complejidad técnica y ambiental que debería desarrollarse en el contexto de las normas mineras, ambientales e hidráulicas de la provincia de Buenos Aires. En el caso de que el material arenoso provenga de zonas sumergidas se suman las complejidades técnicas y logísticas de una explotación minera *off shore*, así como los impactos ambientales que estas actividades producen en el medio marino y litoral. En cualquier caso su desarrollo debe seguir los pasos de una explotación

minera tanto desde la exploración, como la cubrición, la gestión legal, desarrollo, explotación e incluso las Evaluaciones de Impacto Ambiental que tal explotación pueda generar.

Las arenas de trituración por provenir de un proceso unitario y repetitivo presenta una alta uniformidad en calidad mineralógica, una textura angulosa a subangulosa y una granulometría correspondiente a arenas gruesas a muy gruesas-sábulo de tipo polimodal con pobre selección, incluso en casos especiales podría desarrollarse una selección mediante cribado que podría generar playas de arenas unimodales y en rangos acotados de tamaño según necesidad.

Las arenas artificiales provenientes de la actividad minera de áridos presentan a priori volúmenes importantes y características mineralógicas y texturales promisorias.

BIBLIOGRAFÍA CITADA EN EL TEXTO

- Álvarez, J.A. y E.J. Schnack, 1983. «Análisis de las variaciones del nivel medio del mar en el período 1954-1978 según registros de la Estación Mareográfica Mar del Plata, Prov.de Buenos Aires». UNMDP, EUDEM Mar del Plata: 12 pp.
- Bértola, G., 2006. Morfodinámica de playas del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. Vol-13 (1) 2006. 31-57.
- Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore protection manual. Dept. of the Army, Vol. 1, Vicksburg, Miss.
- Cionchi, J.L., Álvarez, J. R., del Río, J. L. y A. Ferrante, 1993. El efecto antrópico en el retroceso de la línea de costa del Partido de General Pueyrredon (Provincia de Buenos Aires). XII Congreso Geológico Argentino, actas Tomo VI: 318-322.
- Dalla Salda, L. y A. M. Iniguez, 1978. La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén Actas, I: 539-550.
- DELFT HIDRAULICS LABORATORY, 1987. Manual on Artificial Beach Nourishment Rijkwaterstaate Delft Hydraulics Laboratory Centre for Civil Engineering Research Codes and Specifications. Report 130. 195pp.
- Ferrante, A. y J.R. Álvarez, 1999. Quantification of the coastal marine erosion, between 1970-1998 on General Pueyrredon County Buenos Aires Province. 4 th Open Science Meeting, Loicz, Bahía Blanca, Argentina, acts.
- Isla, F. I. y Schnack, E. J., 1986. Repoblamiento artificial de playas. Sus posibilidades de aplicación en la costa marplatense. IX Congr. Geol. Arg., Bariloche, Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería., III, 202-217.
- Isla, F.I. 2003. Disponibilidad de arena para el refulado de las playas de Miramar y Chapadmalal, Argentina. *Rev.Asoc.Geol.Argent.* v 58 n3.
- James, 1975. En Delft Hydraulics Laboratory (1987) Manual on Artificial Beach Nourishment Rijkwaterstaate Delft Hydraulics Laboratory Centre for Civil Engineering Research Codes and Specifications. Report 130. 195pp.
- Lanfredi, N.W., J.L. Pousa, C.A. Mazio y W.C. Dragani. 1992. Wave-power potential along the coast of the Buenos Aires Province, Argentina. *Energy* 17 (11): 997-1006.
- Ortolano, L. 1984. Environmental planning and decision making. Edit. John Wiley and Son, New York. 431.
- Schnack, E. J., Álvarez, J. R. y J. L. Cionchi, 1983. El Carácter Erosivo De La Línea De Costa Entre Mar Chiquita Y Miramar, Provincia De Buenos Aires. Simposio Oscilaciones del Nivel del Mar Durante el Último Ciclo Deglaciar en la Argentina, Actas, 118-130 Mar del Plata (UGS-UNESCO).
- SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL (SHN), 1998. Tablas de Marea 1998. H-610. Armada Argentina.
- Waterman, R. 1994. Transferencia de arena en Mar del Plata: Una solución para el puerto y sus costas. Informe Técnico. Mar del Plata.

MINERALES ASBESTIFORMES EN CANTERAS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Leticia Lescano^{1,2}, Silvina Marfil^{1,2}, Pedro Maiza², Jorge Sfragulla³ y Aldo Bonalumi³

Palabras claves:

asbestos, rocas de aplicación, serpentinita, Córdoba.

Resumen

Numerosas canteras de la provincia de Córdoba han sido abiertas y explotadas por rocas serpentiniticas, relacionadas con minera-

lizaciones de talco y vermiculita, a las que se asocian silicatos asbestiformes. Con el objeto de identificar estos minerales, considerados potencialmente nocivos para la salud, se realizaron estudios petrográficos macro y microscópicos, mineralógicos, por difracción de rayos X, y morfológicos con microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se identificaron crisotilo y anfíboles (tremolita-actinolita y antofilita). El crisotilo se observó en vetillas "cross y slip fiber", presenta un desarrollo cristalino variable, es incoloro, tiene extinción recta y baja birrefringencia. Con MEB se observaron fibras muy extensas, poco densas y flexibles. El proceso de separación manual, permitió obtener fibras individuales de pocos micrones de largo, con una relación largo/ancho superior a 100. La tremolita-actinolita presenta hábito prismático, es muy frágil, con fractura según clivaje, extinción oblicua, birrefringencia alta y marcado pleocroismo. La antofilita tiene hábito fibroso y asbestiforme, fractura astillosa, gran desarrollo cristalino, extinción recta, birrefringencia moderada y está débilmente coloreada. Se presenta asociada con talco, clorita, vermiculita, flogopita, cromita y dolomita.

La presencia de estos minerales asbestiformes es un alerta para intensificar los controles ambientales relacionados a la actividad minera actual. Su degradación es inexorable y alcanzado el tamaño óptimo, se podrían incorporar al material particulado de la atmósfera.

¹ Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As. Calle 526 e/10 y 11. La Plata.

² UNS. Dpto. de Geología, San Juan 670, Bahía Blanca. Tel: 291-4595101 int. 3021.

³ Fac. de Cs. Ex. Físicas y Nat. UNC. Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Tel: 0351-5353800.

leticia.lescano@uns.edu.ar,
sfragulla@hotmail.com,
sfragulla@gmail.com,
smafil@uns.edu.ar, pmaiza@uns.edu.ar,
bonalumi.aldo@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Córdoba, la industria minera es una actividad económica muy importante, destacándose los minerales y rocas industriales, entre los que pueden mencionarse granitos, mármoles, arcillas, calizas, dolomías, serpentinitas, vermiculita, fluorita, arenas, gravas y canto rodado (Bonalumi *et al.* 2014).

La serpentinita que se explota en la provincia, se formó por metamorfismo regional de rocas ultramáficas tales como peridotitas, dunitas, piroxenitas y anfíbolitas. Está constituida por anfíboles, piroxenos, minerales opacos (magnetita o cromita), talco, carbonatos ricos en magnesio y minerales del grupo de la serpentina: lizardita, antigorita y crisotilo. Los tres presentan una estructura laminar tipo 1:1 compuesta por una capa tetraédrica y una octaédrica. A partir de la diferencia de las dimensiones entre estas capas, se genera un desajuste geométrico cuya compensación da como resultado tres morfologías diferentes (Wicks y O'Hanley 1988) con pequeñas variaciones en la estructura.

La serpentinita se emplea como fundente y escorificante en acerías, como reemplazo parcial de calizas y dolomías durante la reducción del óxido de hierro. También tiene aplicación como roca ornamental por sus colores vistosos (Escayola 1994). En Argentina el uso tradicional ha sido la producción de granulados de color negro, usados para fabricar mosaicos del tipo granítico o reconstituido (Sfragulla *et al.* 2009). Otros usos potenciales incluyen la fabricación de refractarios (Antonov *et al.* 1994, Cheng *et al.* 2002), manufactura de óxidos de magnesio (Taubert 2000), preparación de sílice amorfa para usos industriales (Kosuge *et al.* 1997, Cheng y Hsu 2006), fabricación de porcelana (Díaz y Torrecillas 2007), en fertilizantes como fuente de magnesio y tratamiento de drenajes ácidos de mina (Bernier 2005). En el pasado, esta roca ha sido motivo de interés por su contenido de crisotilo, principal mineral industrial del grupo de los asbestos. Sin embargo no todos

los crisotilos son asbestiformes ya que para ello deben presentar características morfológicas especiales. Se desarrolla comúnmente en vetillas tipo cross-fiber dentro de rocas serpentiniticas (Wicks y Whittaker 1977). Dentro de sus propiedades se destacan la resistencia al calor, al desgaste, a los álcalis y ácidos y su flexibilidad, principales características para ser empleado como aislante en numerosas industrias.

En este trabajo, se estudiaron las texturas serpentiniticas basándose en la clasificación de Wicks y Whittaker (1977), quienes las dividen en tres grupos: 1- pseudomórfica, 2- no-pseudomórfica y 3- en venillas. Además se tuvieron en cuenta los conceptos de O'Hanley y Wicks (1995), quienes mencionan que las texturas en venillas de crisotilo se forman a partir del crecimiento del mineral, debido a un metamorfismo de progrado, desde una peridotita primaria y las consideran como no-asbestiformes. Los asbestos pueden cristalizar transversalmente a la fractura generando venillas cross-fiber o en su defecto, subparalelamente, dando lugar a las denominadas slip-fiber.

El término asbesto involucra al crisotilo, mineral del grupo de la serpentina y a los anfíboles crocidolita, amosita, antofilita, actinolita y tremolita. Este grupo de minerales se caracteriza por presentar hábito fibroso, ser ignífugo, flexible, resistente a la tracción, a la flexión, a la degradación química y biológica. Sin embargo, por su morfología y por sus propiedades físicas, son dañinos para la salud ya que si alcanzan el tamaño crítico pueden penetrar en las vías respiratorias y acumularse en los pulmones, desarrollando cáncer o asbestosis (Ross 1981). Por esta razón, en Argentina a partir del año 2000, según resoluciones del Ministerio de Salud, se prohibió toda producción, importación, comercialización y uso de fibras de asbestos de las variedades anfíboles y crisotilo y productos que los contengan (Rodríguez 2004).

La presencia de minerales asbestiformes obliga a intensificar los controles ambientales relacionados a la actividad minera actual. Su desintegración

y natural disminución de tamaño es inexorable, puede ser incorporado al material particulado suspendido en la atmósfera y provocar serios daños en la salud humana.

En trabajos previos, Lescano *et al.* (2011, 2012, 2013), identificaron minerales asbestiformes en las menas de minas de vermiculita de la provincia de Córdoba. El área estudiada está constituida por rocas metamórficas de alto grado dentro de las cuales se encuentran anfíbolitas, piroxenitas y harzburgitas serpentinizadas. Los cuerpos ultramáficos han sido intruidos por pegmatitas ricas en cuarzo y plagioclasa, las que generan un halo de reacción rico en flogopita, en el contacto con la serpentinita. Estas zonas son las que, por alteración posterior, generaron la vermiculita objeto del laboreo minero.

En las rocas serpentiniticas, muchas de las cuales se encuentran actualmente en explotación, también se han identificado minerales asbestiformes. El objetivo del presente trabajo es alertar sobre la presencia de estos minerales, evaluar la forma en que se presentan y tomar los recaudos tendientes a minimizar los riesgos del laboreo minero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron estudios petrográficos macro y microscópicos, por difracción de rayos X y morfológicos con microscopía electrónica de barrido (MEB). Se utilizó estereomicroscopio y microscopio de polarización Olympus, trinocular y microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM 35 CP equipado con sonda EDAX para el análisis químico cualitativo de microáreas (desde B a U), sobre muestras metalizadas con oro. Para la identificación de los minerales se trabajó con un difractómetro Rigaku D-Max III-C con radiación de Cu ($K\alpha$), $\lambda=1,54059 \text{ \AA}$ y monocromador de grafito, a 35 kV y 15 mA, entre 3 y 60° 2 θ .

Se estudiaron seis minas de la provincia de Córdoba, algunas en explotación y otras abandonadas, denominadas La Bélgica, Cantera Vitale, La Adita, La Isla, Mauro y Rosarito (Fig.1).

LA BÉLGICA

Mina La Bélgica fue uno de los yacimientos de asbesto-crisotilo más importantes de Argentina, denunciada por amianto en el año 1947. Su explotación, a cielo abierto, se extendió hasta fines de los años 70. En la actualidad está clausurada, como la mayoría de los yacimientos de asbestos y ha sido dada de baja como mina por la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba. Se ubica en el Departamento Calamuchita, en el sector oriental de las Sierras Grandes en cercanías de la Estancia San Miguel, entre las localidades de Villa Yacanto y Atos Pampa.

El cuerpo de serpentinita pertenece a la denominada Faja Central de rocas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Villar 1975, 1985) posteriormente llamada Faja Ultramáfica Occidental (Kraemer *et al.* 1995), caracterizada como una serie de cuerpos aislados que se extienden al sur del Batolito de Achala, desde Los Permanentes hasta la localidad de Inti Yaco. En el sector estudiado, las rocas ultramáficas se presentan como lentes dentro de las rocas anatócticas que forman el macizo de Atos Pampa-Cerro Pelado (Bonalumi y Gigena 1987). La geología del cuerpo fue estudiada por Escayola (1994, 1997), quien describe serpentinitas derivadas de harzburgitas y websteritas que han sufrido cuatro episodios metamórficos, el último de los cuales es de tipo retrógrado asociado al dominio frágil, con circulación de fluidos en fracturas y que generó rellenos de crisotilo y talco. El crisotilo presenta hábito asbestiforme con fibras que superan los 2 cm de largo (Bonalumi y Gigena 1987) y que crecen perpendicularmente a las paredes de las fracturas (asbestos cross-fiber). En el campo se observó el disgregamiento de las vetillas de crisotilo, una progresiva disminución de tamaño, y la volatilidad y dispersión de las fibras liberadas (Lescano *et al.* 2011) (Fig. 2a).

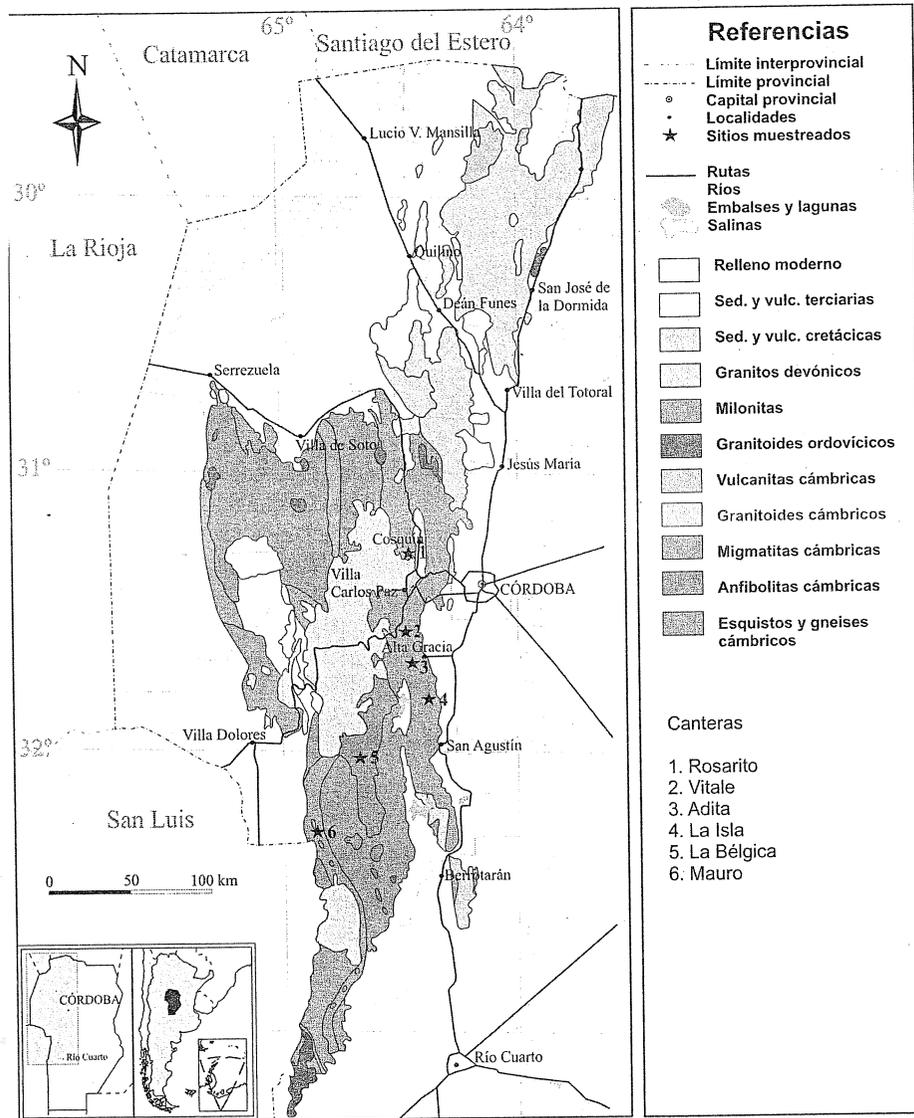


Figura 1: Mapa de ubicación.

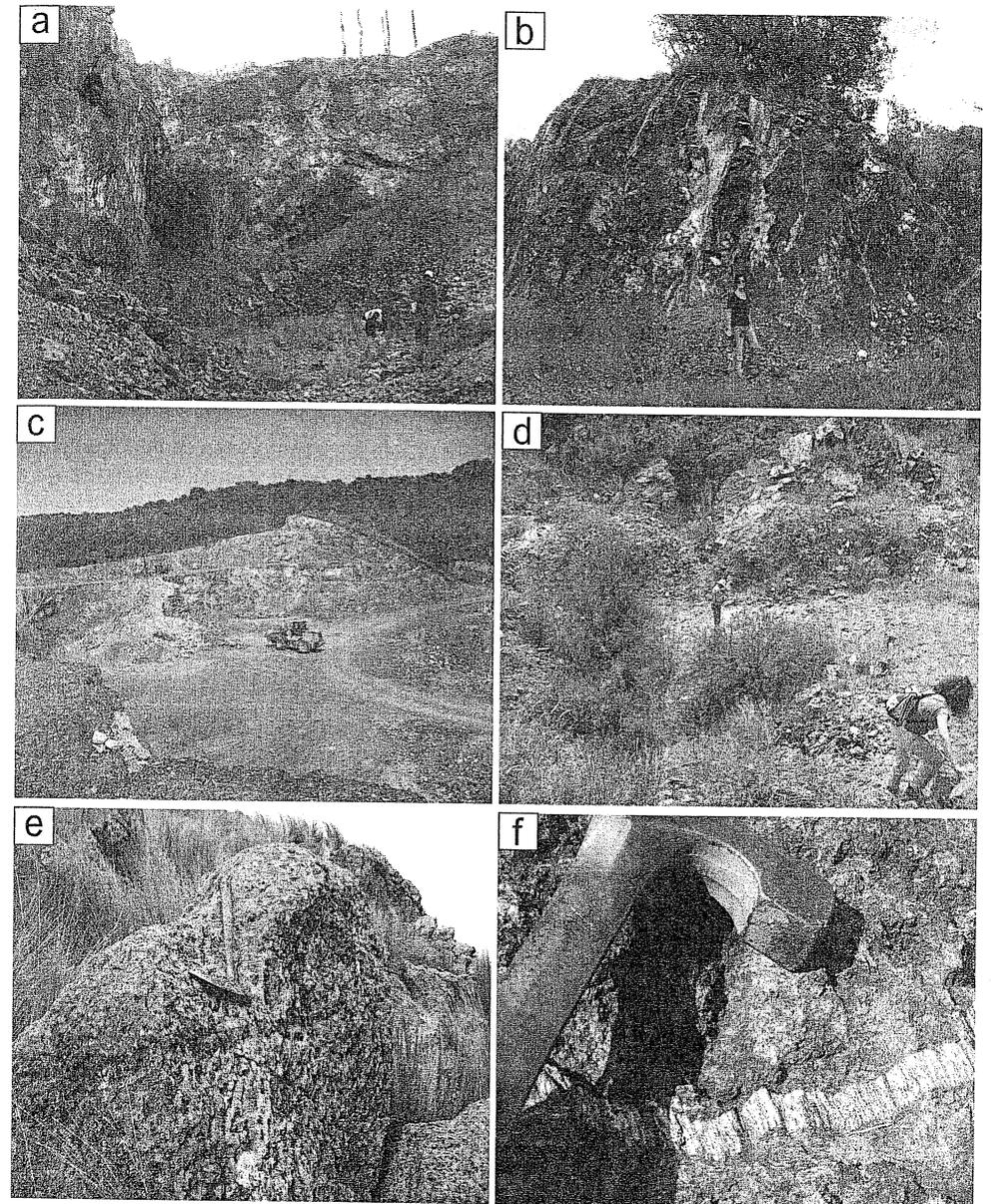


Figura 2: a) Vista de un destape de mina La Bélgica, b) Diques ultrabásicos en la serpentinita en Cantera Vitale, c) Cantera La Adita, d) Destapes en mina La Isla, e) Venillas de minerales fibrosos en la serpentinita de mina Mauro, f) Vetillas transversales de anfíboles en la roca de caja de mina Rosarito.

CANTERA VITALE

En el sector de Bosque Alegre, en cercanías de la Estancia San Bernardo, existen varios laboreos realizados en serpentinitas. La cantera principal del sector se halla inundada, reconociéndose otras labores que presentaban indicios de haber sido trabajadas en forma reciente. La primera se encuentra ubicada unos 150 m al noroeste de la cantera inundada (31°33'01,8" S, 64°34'50,7" O). Se trata de una reactivación de una vieja cantera de serpentinita. La roca extraída es de color negro, cortada por abundantes venillas de carbonato. En el sector este de la labor aparece una fractura de rumbo 315°/80° SE rellena por material molido, que en ambas salbandas presenta desarrollo de vetillas de crisotilo asbestiforme de color verdoso. Estas vetillas tienen un espesor variable entre 0,5 y 2 mm. La segunda cantera se ubica unos 500 m al sureste de la principal (31°33'22,5" S, 64°34'41,2" O). La labor es reciente, se ha extraído serpentinita de color negro. La roca aparece cortada por abundantes vetillas de crisotilo verdoso que se cortan ortogonalmente y de carbonato de calcio. El crisotilo presenta hábito asbestiforme, con cristales que crecen perpendicularmente a las paredes de las fracturas con espesores que varían entre 0,2 y 0,5 mm (Fig. 2b).

LA ADITA

Está localizada en el cerro Santa Cruz, a 4,2 km al SSO de la ciudad de Alta Gracia en el flanco este de las Sierras Chicas de Córdoba (31°40'15" S y 64°28'30" O). Esta cantera se encuentra en explotación extrayéndose rocas carbonáticas y serpentiniticas. El basamento metamórfico está constituido por gneises granatíferos y migmatitas estromatíticas, que incluyen serpentinitas, mármoles dolomíticos y anfíbolitas.

Las serpentinitas explotadas son cuerpos con una orientación NNO-SSE, concordantes con la foliación regional. Son de color negro a verde oscuro y de grano fino. Presentan vetillas de calcita

secundaria (Fig. 2c) y han sido intruídas por cuerpos de pegmatitas, que generan halos de alteración en las serpentinitas.

LA ISLA

Se localiza a 2,5 Km al sur de la localidad de José de la Quintana, en el Departamento Santa María (31°49'30,6" S, 64°24'53" O). La región presenta afloramientos del Complejo Metamórfico La Falda, compuesto por gneises biotíticos muscovíticos bandeados con intercalaciones de ortogneises leucotonalíticos, mármoles dolomíticos, anfíbolitas y rocas calcosilicáticas (Lucero Michaut *et al.* 2000). Este basamento aparece intruído por diques basálticos de edad cretácica similares a los descritos por Gordillo y Lencinas (1969). Los antecedentes sobre este yacimiento son escasos, sólo pueden citarse el trabajo de Viltes (2011) que describe la geología del depósito y los de Lescano *et al.* (2012, 2014).

Las explotaciones realizadas, consistentes en destapes y canteras a cielo abierto (Fig. 2d), han permitido observar cuerpos ultramáficos talquizados asociados a anfíbolitas, intruídos por diques granitoides y pegmatitas. En el contacto entre los intrusivos y el ultramáfico se han generado zonas enriquecidas en vermiculita y anfíboles y en otros casos vetillas ricas en minerales fibrosos.

MAURO

Se encuentra ubicada en el Cerro Negro, flanco oriental de la sierra de Comechingones (32°16'39,6" S, 64°52'15" O), a 60 km al oeste de la localidad de La Cruz, en el Departamento Calamuchita. Este cuerpo fue mapeado por Martínez (1998) como una anfíbolita que forma parte de la faja de cizalla Guacha Corral (Martino 2003), constituida por milonitas, gneises miloníticos y migmatitas. El Cerro Negro está formado, en su sector oeste y central, por serpentinitas con alteración a talco, cortadas por vetillas de minerales asbestiformes (Fig. 2e). En los sectores en que

la serpentinita ha sido intruída por pegmatitas se desarrolla un halo de vermiculita, asociado a minerales fibrosos. El sector este del cuerpo está formado por una anfíbolita de grano grueso, fracturada y alterada hidrotermalmente, con formación de abundante tremolita.

ROSARITO

En la Cuesta de Mataballos, a 10 km al oeste de la localidad de Molinari, afloran cuerpos lentiformes de rocas ultramáficas talquizadas (Bonalmi *et al.* 1999). Estos cuerpos forman una faja de rumbo aproximado N 40°, tienen formas lenticulares a tabulares, rumbo variable N300°-340° y buzamiento aproximado 60° SW. Se encuentran emplazados concordantemente en gneises tonalíticos biotíticos, con frecuentes texturas miloníticas, suelen asociarse a anfíbolitas y han sido intruídos por diques granitoides. La roca ultramáfica es principalmente un esquistotremolítico de grano fino, con foliación bien desarrollada, en la que es posible reconocer a simple vista la presencia de minerales del grupo de la serpentinita, talco, tremolita y piritita (Bonalmi *et al.* 1999). En el contacto con los intrusivos graníticos y en fracturas dentro del talco, aparecen vetas de vermiculita; se observan además vetillas de minerales fibrosos constituidas principalmente por talco y anfíboles, principalmente tremolita-actinolita (Fig. 2f). El acceso a las labores es dificultoso, encontrándose abandonadas y obstruidas por la vegetación local.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

LA BÉLGICA

En secciones delgadas se observan vetillas principales de crisotilo de dimensiones considerables (2000 µm) subparalelas, con bandeamiento (a veces asimétrico), en las que el mineral cristalizó en forma transversal (Fig. 3a). También se destacan otras vetillas de crisotilo transversales a las

anteriores, de menor tamaño, correspondientes a un evento posterior y con características texturales y morfológicas semejantes a las vetillas principales. Estas son tipo cross-fiber, relacionadas con eventos póstumos de la serpentinitización y posteriores a la formación de la lizardita y antigorita de la mesostasis. La extinción de los cristales de crisotilo es paralela. El carbonato se presenta como un último estadio de cristalización en las vetillas de crisotilo. En algunos casos es paralelo a la vetilla principal no-asbestiforme y en otros discordante.

La serpentinita presenta textura no-pseudomórfica entrelazada, compuesta por cristales de antigorita y lizardita, de dimensiones variables e irregulares. En algunos casos los cristales de antigorita se desarrollan como si fueran parches o islotes que crecen y se articulan entre sí por un proceso de recristalización. En menor proporción, se reconocieron texturas pseudomórficas, con bastitas de piroxenos levemente serpentinizados. Son frecuentes los minerales opacos y las vetillas de carbonatos atravesando relictos de piroxenos.

Por difracción de rayos X se determinó que el mineral fibroso de las vetillas es crisotilo.

Para una mejor observación morfológica las fibras se separaron manualmente para ser analizadas con MEB. Son muy extensas, poco densas y flexibles (Fig. 3b). A su vez, durante este proceso, se generó una red de fibras de diferente tamaño donde las más pequeñas miden unos pocos micrones de largo, con una relación largo/ancho superior a 100.

CANTERA VITALE

Se estudiaron muestras de la serpentinita con microscopio óptico, y se observó una masa compuesta por antigorita y lizardita atravesada por vetillas discordantes de crisotilo (Fig. 3c). Este mineral, de hábito fibroso y gran desarrollo cristalino, cristalizó transversalmente a las vetillas tipo cross-fiber, desarrolladas en forma simétrica, rellenando fracturas. Los minerales opacos solo se identificaron en las paredes de las vetillas.

En la masa se observó exsolución de óxidos de hierro y cromo, que forman bandas subparalelas opacas con abundante calcita. En algunos sectores de la serpentinita se conservan aún relictos del anfíbol original y en otros se observa la masa de anfíboles en proceso de serpentización. Dentro de la misma hay varias generaciones de vetillas de calcita, donde las de mayor tamaño y discordantes cortan a otras de menor espesor. Por DRX se determinó que el material fibroso es crisotilo, comparable con la ficha ICDD 22-1162 (ICDD 1986).

LA ADITA

Se analizaron los minerales fibrosos dispuestos en las vetillas y en la serpentinita en secciones delgadas. Los cristales de serpentina tienen baja birrefringencia y hábito planar y están asociados con carbonatos y minerales opacos. Se identificaron dos anfíboles con diferentes propiedades ópticas. Un ortoanfíbol (antofilita) con bajo color de interferencia, extinción recta, leve pleocroísmo y morfología acicular asbestiforme asociado a talco. El otro es un clinanfíbol determinado como tremolita por sus propiedades ópticas (Fig. 3d) y DRX. Sus principales reflexiones aparecen en 8,38 Å y 3,1 Å, con talco y clorita subordinados. Los cristales observados con MEB presentan hábito prismático largo, con un marcado clivaje, y morfología fibrosa acicular. En algunos sectores se observó una desintegración natural de los cristales planares. El análisis químico por EDS permitió identificar Si, O, Mg y, en menor proporción, Fe.

LA ISLA

Se estudiaron muestras de la roca de caja y de vermiculita. Esta última presenta grandes cristales con procesos de esteatización en sus sectores periféricos y cloritas dispuestas en textura lepidoblástica. Se observaron escasos relictos de cromita. Dentro de las láminas de vermiculita se reconocieron vetillas de minerales fibrosos que, al microscopio óptico sobre secciones delgadas, presentan

fractura astillosa, gran desarrollo cristalino, son débilmente coloreados, con extinción recta y birrefringencia moderada ($\approx 0,02$). Por sus características ópticas se determinó como antofilita.

En la roca de caja se identificó tremolita, asociada a la vermiculita. Tiene extinción oblicua ($\approx 15^\circ$), es débilmente coloreada, con bajo pleocroísmo y birrefringencia más alta que la antofilita. Además se reconocieron talco, antigorita y clorita.

Por DRX se confirmó la presencia de antofilita (ICDD 42-544) (ICDD, 1993) y talco en la zona de vetillas (Fig. 3e), y tremolita y clorita en la zona más alejada al cuerpo de vermiculita, en el contacto con la roca de caja. Por MEB se observaron cristales tabulares y prismáticos de excelente desarrollo, que corresponden a tremolita, de la roca de caja.

MAURO

La roca serpentizada, contiene crisotilo en vetillas "cross and slip fiber" y asbestiformes con un desarrollo cristalino variable. Las vetillas de la roca serpentinitica contienen antofilita. Este mineral es de hábito fibroso, acicular, de fractura astillosa, gran desarrollo cristalino y débilmente coloreado, posee extinción recta y birrefringencia moderada. Analizados con MEB, los anfíboles de las vetillas presentan morfología fibrosa, con las fracturas distales mencionadas y fibras dispuestas al azar (Fig. 3f). La relación largo ancho de las fibras supera el valor 100 y sus extremos se desmenuzan en fibras menores. Por EDS se determinó Mg, Si y C, este último contenido en los carbonatos asociados que impurifican las menas. Hacia la roca de caja, especialmente esteatizada, se reconoció tremolita-actinolita de color verdoso, hábito prismático y fractura según clivaje.

ROSARITO

El contacto de la roca talcosa con la vermiculita desarrolla una zona compuesta principalmente por tremolita-actinolita, clorita, cuarzo, escasos

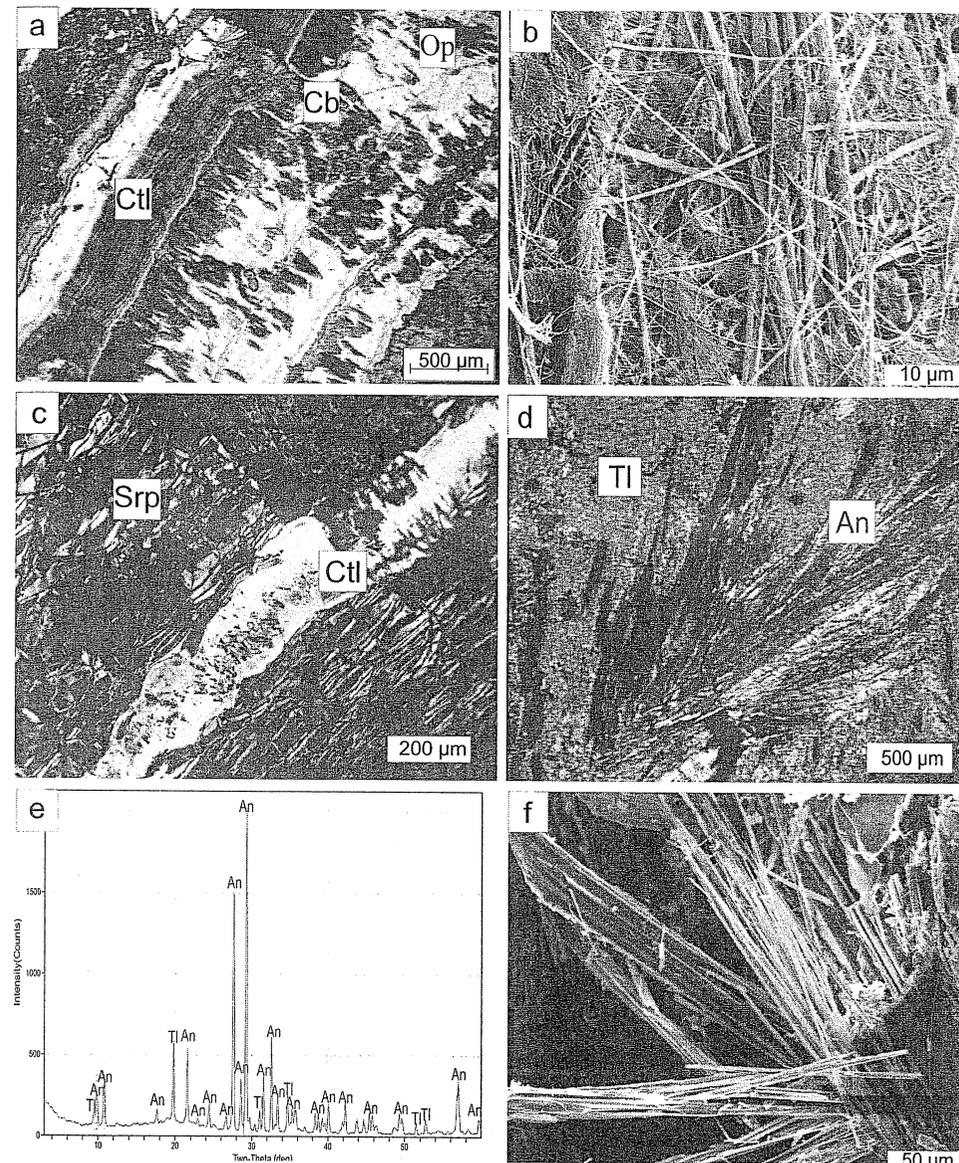


Figura 3: a) Venillas subparalelas con un bandeamiento irregular, donde el crisotilo cristalizó en forma transversa (mina La Bélgica), b) Detalle de las fibras observadas con MEB, c) Antigorita y lizardita atravesada por vetillas discordantes de crisotilo (cantera Vitale), d) Anfíbol con morfología acicular asbestiforme asociado a talco (mina La Adita), e) Difractometría de rayos X de antofilita y talco en la zona de venillas de mina La Isla, f) Morfología fibrosa, acicular de los minerales con un gran desarrollo cristalino (MEB, mina Mauro). An: Anfíbol, Ctl: crisotilo, Tl: talco, Cb: carbonato, Srp: serpentina, Op: opacos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

óxidos de hierro y serpentina, predominando la antigorita. El núcleo de la veta, de poca potencia, está compuesto por talco, clorita, calcita y cuarzo. Esporádicamente se reconocen tablillas de vermiculita y finos cristales aciculares de los anfíboles mencionados. Estos minerales fueron determinados por sus propiedades ópticas y por su estructura cristalina por DRX.

En el cuadro 1 se detallan las características mineralógicas de las canteras estudiadas y los asbestos presentes.

En mina La Bélgica, Mauro y Cantera Vitale se identificó crisotilo en forma de venillas dentro de la serpentinita. Considerando que este mineral es asbestiforme, nocivo para la salud humana, y que desde el año 2001, la Resolución N° 823 del Ministerio de Salud de la Nación estableció la prohibición de la producción, importación, comercialización y uso de fibras de asbesto variedad crisotilo y productos que las contengan, se recomienda que para la reactivación de alguno de estos

Cantera/mina	Roca de caja	Minerales/roca de mena	Minerales accesorios	Tipo de asbestos	Estado de la cantera/mina
La Bélgica	Ultramáficas (harzburgitas y websteritas)	Asbestos y serpentinita	Carbonatos, minerales de hierro, cromita.	Crisotilo en venillas	Abandonada
Vitale	Ultramáficas y anfíbolitas	Serpentinita	Serpentina (antigorita, lizardita, crisotilo), óxidos de hierro y cromo, calcita y anfíboles.	Crisotilo en venillas	Abandonada
La Adita	Ultramáficas y anfíbolitas	Rocas carbonáticas y serpentinita	Minerales opacos, anfíboles (antofilita, tremolita), talco.	Antofilita en venillas	Activa
La Isla	Ultramáficas talquizadas asociadas a anfíbolitas	vermiculita	Talco, antigorita, clorita, anfíboles (antofilita, tremolita), minerales opacos, biotita, flogopita, cromita, calcita.	Antofilita en venillas	Abandonada
Mauro	Anfíbolita, milonitas, gneises miloníticos y migmatitas	vermiculita	Talco, anfíboles (antofilita, tremolita), lizardita, antigorita, carbonatos, minerales opacos.	Crisotilo y anfíboles (tremolita-actinolita y antofilita)	Abandonada
Rosarito	Ultramáfica, esquistos talco-tremolítico	Talco y vermiculita	Tremolita-actinolita, clorita, cuarzo, talco, escasos óxidos de hierro, serpentina, vermiculita, pirita.	Tremolita-actinolita	Abandonada

Cuadro 1: Resumen de las rocas y minerales presentes en las canteras estudiadas.

labores se evalúe fehacientemente la incidencia de la presencia de estos minerales, tanto en las menas como en la roca de caja, para evitar daños en la salud de los operarios.

La composición de las fibras en las vetillas dentro de la vermiculita, serpentinita y/o talco de minas La Adita, La Isla y Rosarito fue estudiada por diferentes métodos analíticos y se determinó que pertenecen a minerales del grupo de los anfíboles. Estudios previos indican que estos minerales presentan un alto grado de nocividad y que los principales efectos sobre la salud, derivados de su exposición son asbestosis, cáncer de pulmón, mesotelioma maligno y placas pleurales (Roggli y Vollmer 2008). El análisis mineralógico de los asbestos es un aspecto esencial para evaluar su riesgo potencial en la salud humana determinado por la morfología de las fibras, y el comportamiento durante los procesos de degradación natural. No todas las formas de asbestos son igualmente cancerígenas o deletéreas para la salud, siendo las más nocivas las fibras de anfíboles (Ross *et al.* 1993). Por sus propiedades ópticas, morfología y estructura cristalina, las más peligrosas son antofilita y tremolita-actinolita.

Teniendo en cuenta los sucesivos tratamientos que sufren estos minerales durante la explotación de la mena (roca serpentinita, vermiculita, talco): transporte, trituración, calcinación, la consecuente fragmentación durante el procesamiento y generación de abundante polvo en las distintas etapas de explotación, sumado a su alta volatilidad a medida que el tamaño de las fibras disminuye, se generarían riesgos para la salud. La sola presencia de minerales anfíboles se considera un alerta para intensificar los controles ambientales tanto en la actividad minera como en las industrias que los utilicen o los hayan utilizado.

Los minerales del grupo de los anfíboles observados en las vetillas de mina La Isla no presentan hábitos aciculares. Los cristales son tabulares y prismáticos con un gran desarrollo longitudinal. La morfología es la característica fundamental para determinar su incidencia en la salud. Cristales con hábito prismático, no generarían efectos nocivos, sin embargo estudios realizados con estos materiales, demuestran que su partición y desmembramiento puede generar roturas y formas aciculares asbestiformes (Oyarzun *et al.* 2009).

En mina La Adita se observaron minerales con hábitos prismáticos, fibrosos y fracturas según clivaje (Fig. 4a y b). Zoltai (1979), define como partícula de hábito asbestiforme a los cristales de asbestos que se presentan como grupo de fibras, elongadas, fuertes, resistentes y flexibles, a menudo en arreglos paralelos, columnares o en masas enmarañadas. Si se considera esta definición, los hábitos observados en las muestras estudiadas no deberían ser considerados como asbestiformes. Sin embargo la evaluación de fibras en este estudio se realizó teniendo en cuenta la definición física de asbestos, dada por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA 1992) y la U.S Environmental Protection Agency (EPA). Estas consideran una partícula como "asbesto" (a los efectos de contar) si su relación largo/radio es 3:1 o mayor, y la longitud mayor a 5 micrones (Ross, 1981).

La presencia de antofilita en minas La Isla y La Adita, la abundancia y morfología de los anfíboles, y su tratamiento indican que deben intensificarse los controles ambientales, en las etapas previas, post molienda y calcinación. La degradación de estos minerales es inevitable y pueden ser incorporados principalmente al material particulado suspendido en la atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional del Promoción Científica y Tecnológica, 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.

BIBLIOGRAFÍA CITADA EN EL TEXTO

Antonov, G.I., Yakobchuk, L.M., Prokudin, V., Yu., Galushka N.V. 1994. Serpentine rocks from the Sokolovskoe deposit. *Refractories and Industrial Ceramics* 35, 11: 376-380.

Bernier, L.R. 2005. The potential use of serpentinite in the passive treatment of acid mine drainage: batch experiments. *Environmental Geology* 47, 5: 670-684.

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., Martino, R., Sfragulla, J.A., Baldo, E., Zarco, J., Carignano, C., Tauber, A., Kraemer, P., Escayola, M., Cabanillas, A., Juri, E., Torres, B. 1999. Hoja Geológica 3166-IV. Villa Dolores. (Memoria y Mapa Geológico). Boletín 250. SEGEMAR. Buenos Aires.

Bonalumi, A., Sfragulla, J., Jerez, D., Bertolino, S., Sánchez Rial, J., Carrizo, E. 2014. Yacimientos de minerales y rocas industriales. En Martino, R. D. y Guereschi, A. B. (eds.) *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y recursos naturales de la Provincia de Córdoba*: 983-1024, Córdoba.

Cheng, T.W., Ding, Y.C., Chiu, J.P. 2002. A study of synthetic forsterite refractory materials using waste serpentinite cutting. *Minerals Engineering* 15(4): 271-275.

Cheng, T.W. y Hsu, C.W. 2006. A study of silicon carbide synthesis from waste serpentinite. *Chemosphere* 64(3): 510-4.

Díaz, I.A. y Torrecillas, R. 2007. Porcelain stoneware obtained from the residual muds of serpentinite raw materials. *Journal of the European Ceramic Society* 27 (5): 2341-2345.

Escayola, M.P. 1994. Faja ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti-Yaco y Ea. San Miguel, Dpto. Calamuchita, Prov. de Córdoba. Tesis Doctoral, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (inédita) 277 pp.

Escayola, M.P. 1997. Evolución metamórfica de la secuencia ofiolítica de la faja ultramáfica occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba entre los 31° 50' y 32°30' de latitud sur. *República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52(3): 322-332.

Gordillo, C. y Lencinas A. 1969. Perfil geológico de la Sierra Chica de Córdoba en la zona del río Los Molinos, con especial referencia a los diques traquibasálticos que la atraviesan. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 47(1): 27-50.

Henning, R. 1994. *Olivine and Dunite*. En Carr, D. (ed.) *Industrial Minerals and Rocks*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 6th Edition. Littleton, Colorado.

International centre for diffraction data (ICDD), 1986. *Mineral powder diffraction file*. Data book. Swarthmore, Pennsylvania. 1391 pp.

Kosuge, K., Simada, K., Tsunahima, A. 1997. Preparation and Utilization of Amorphous Siliceous Materials from Serpentine (Mg₃Si₂O₇(OH)₂) by Acid Treatment. National Institute for Resources and Environment (NIRE), Report Nº 18, Japan.

Kraemer, P., Escayola, M., Martino, R. 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40' - 32°40'LS). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50(1-4): 47-59.

Lescano, L., Marfil, S., Maiza, P., Sfragulla, J., Bonalumi, A. 2011. Presence of asbestiform minerals in vermiculite. Province of Córdoba, Argentina. *Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety International Conference. EngeoPro-2011, Moscú (Rusia)*, 770-774.

Lescano, L., Marfil, S., Maiza, P., Sfragulla, J., Bonalumi, A. 2012. Presencia de Anfíboles en Mina de Vermiculita, Prov. de Córdoba, Argentina. *Caracterización y Composición Mineral*. 1er. Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental y 1er Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental, (AA2012). Mar del Plata 292-297.

Lescano L., Marfil S., Maiza P., Sfragulla J., Bonalumi A. 2013. Presence of amphibole in vermiculite mined in Argentina. *Morphology, quantitative and chemical*

studies on the different phases of production. *Environmental Geology*, Ed. Springer. ISSN 1866-6280. *Environ Earth Sci* 70(4): 1809-1821.

Lescano, L., Sfragulla, J., Maiza, P., Bonalumi, A., Marfil, S. 2014. Presencia de antofilita en la mina de vermiculita "La Isla" (Provincia de Córdoba, Argentina). *XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, Actas*: 242-243.

Lucero Michaut, H.N., Daziano, C.D., Sanabria, J.A., Barbeito, O., Tauber, A., Sapp, M. 2000. Mapa geológico Hoja 3163-III, Córdoba, escala 1:250.000. IGRM-SEGEMAR (inédito).

Martínez, S. 1998. Grupo minero La Ona, Departamento Calamuchita (inédito), 34 p., Córdoba.

Martino, R.D. 2003. Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: una reseña general. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58(4): 549-571.

O'Hanley, D.S. y Wicks F.J. 1995. Conditions of formation of lizardite, chrysotile and antigorite, Cassiar, British Columbia. *Canadian Mineralogist* 33: 753-773.

OSHA, 1992. Occupational exposure to asbestos, tremolite, anthophyllite and actinolite. US. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. *Federal Register* 57: 24310-24331.

Oyarzun, R., Lillo, J., Oyarzun, J., Maturana, H., Canut, C., Andreani, S. 2009. Restrictive definition of asbestos and the assessment of potential health hazards: insights from Northern Chile. *International Geology Review* 1-9.

Rodríguez, E.J. 2004. Asbestos Banned in Argentina. *Int. J. Occup. Environ. Health* 10: 202-208.

Roggli, V.L. y Vollmer, R.T. 2008. Twenty-five years of fiber analysis: what have we learned. *Hum. Pathol* 39: 307-315.

Ross, M. 1981. The geological occurrences and health hazards of amphibole and serpentinite asbestos. En: Ribbe, P.H. (ed.) *Amphiboles and Other Hydrated Pyriboles - Mineralogy*. Mineralogical Society of America 9A: 279-320.

Ross, M., Nolan, R.R., Langer, A.M., Cooper, W.C. 1993. Health effects of mineral dusts other than asbestos. En Guthrie, G.D. y Mossman B.T. (eds.) *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America. Washington DC 28: 361-407.

Sfragulla, J.A., Bonalumi, A.A., Briolini, N.M., Cabrera, J.I. 2009. Prospección de rocas ultramáficas de Córdoba, orientada a su aplicación industrial. *IX Congreso Argentino de Geología Económica, Catamarca, Actas*: 287-292.

Taubert, L. 2000. Hydrochloric attack of serpentinites: Mg²⁺ leaching from serpentinites. *Magnes Research* 13(3):167-73.

Villar, M.L. 1975. Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas de la República Argentina y su significado metalogénico. *2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica*. Buenos Aires 3: 135-156.

Villar, M.L. 1985. Las fajas ultrabásicas argentinas, tipos de ultramáficas y Metalogenia. *4º Congreso Geológico Chileno*. Actas. Antofagasta. Chile 4-44: 610-633.

Viltes, R.N. 2011. Estudio geológico-minero preliminar de la mina de vermiculita "La Isla" Pedanía San Isidro, Dpto. Santa María, Pcia. de Córdoba. Trabajo Final de la Carrera de Geología, Facultad de Cs. Ex., Fis. y Nat., Universidad Nacional de Córdoba (inédito).

Wicks, F. y O'Hanley, D. 1988. Serpentine minerals: structures and petrology. En Bailey, S.W. (ed.) *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America 19: 91-167.

Wicks, F.J. y Whittaker, E.J.W. 1977. Serpentine textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist* 15: 459-488.

Zoltai, T. 1979. Asbestiform and acicular mineral fragments. *Ann N.Y. Academic Science* 330: 621-643.