



Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

# **CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y PETROGRÁFICA DEL YACIMIENTO DE FLUORITA DE MINA VILLABONA, DISTRITO MINERO DE VILLABONA- ARLÓS (ASTURIAS)**

ALEXIA SETIÉN CUEVA

JULIO - 2016



## Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



Dña. Alexia Setién Cueva, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización Geoquímica y Petrográfica del yacimiento de fluorita de Mina Villabona, distrito minero de Villabona-Arlós (Asturias)”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 11 de Julio de 2016

Fdo. Alexia Setién Cueva

El Dr. Luis Villa Iglesias, director del Departamento de Geología y Recursos Minerales de MINERSA, y la Dra. Mercedes Fuertes Fuente, profesora titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirman que han tutelado el trabajo “Caracterización Geoquímica y Petrográfica del yacimiento de fluorita de Mina Villabona, distrito minero de Villabona-Arlós (Asturias)”, realizado por Dña. Alexia Setién Cueva, y autorizan su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 11 de Julio de 2016

Fdo. Luis Villa Iglesias

Fdo. Mercedes Fuertes Fuente

# AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estas líneas me gustaría agradecer la ayuda prestada en este último año, gracias a la cual ha sido posible el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, quiero agradecer a la empresa MINERSA la oportunidad de poder realizar este trabajo, mediante la financiación de una beca, así como los gastos de investigación generados. Agradecer a mi tutor, el doctor Luis Villa, la dedicación prestada, enseñándome y guiándome a lo largo de este trabajo. Al doctor José Marín, por el apoyo recibido, y por su disponibilidad a la hora de resolver mis dudas. Gracias a Modesto, por estar siempre disponible para acompañarme a la mina, a la planta de tratamiento mineral y a los sondeos. Agradecer también la colaboración de Ramón cuando de informática se trataba. Gracias al doctor Daniel Arias, de la Universidad de Oviedo, por ponerme en contacto con la empresa.

Me gustaría dar las gracias también a la doctora Mercedes Fuertes, cotutora de este trabajo, por toda la ayuda prestada y por el apoyo recibido. Y, no menos importante, por su infinita paciencia.

Deseo agradecer especialmente a los doctores Lope Calleja, Ángel Rodríguez y Vicente Gómez, profesores de la Universidad de Oviedo, ya que sin su ayuda este proyecto no habría sido posible. Gracias por iniciarme en la carrera investigadora, y por ser siempre un apoyo, tanto en el ámbito académico como en el personal.

Agradecer también a los doctores Andrés Cuesta y Álvaro Rubio por la resolución de mis dudas en la preparación de muestras.

A mis compañeros de grado y máster Maxi, Iván y Antonio, a los cuales me une una gran amistad. Gracias por estos años. Y en especial, a Iván, por discutir conmigo la posible casualidad o causalidad de los resultados obtenidos.

Por último, agradecer a mi familia todo el apoyo y la paciencia que han tenido conmigo. Gracias a Dani, por leer y opinar sobre cada apartado, pero sobretodo, por hacerme el mejor regalo.

Y en especial, a ti, estés donde estés.

# CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
1.1. FLUORITA .....	7
1.2. PANORAMA MINERO .....	8
1.2.1. Panorama mundial .....	8
1.2.2. Panorama nacional .....	9
1.2.3. Reservas nacionales .....	9
1.3. ANTECEDENTES .....	11
1.4. OBJETIVOS .....	12
<b>2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO</b> .....	13
2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....	13
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	13
2.2.1. Tectónica .....	15
2.2.2. Estratigrafía .....	15
2.3. TIPOLOGÍA DE YACIMIENTO .....	17
2.5. MODELO GENÉTICO .....	18
2.6. HISTORIA MINERA .....	18
2.5.1. Historia del yacimiento de Mina de Villabona .....	18
2.5.2. Método de explotación .....	19
2.5.3. Método de concentración mineral .....	19
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	21
3.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS .....	21
3.2. PETROGRAFÍA .....	21
3.2.1. Instrumentación .....	21
3.2.2. Caracterización petrográfica .....	22

3.3. GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL .....	29
3.3.1. Preparación de las muestras .....	29
3.3.2. Técnicas analíticas .....	30
3.3.3. Análisis estadístico de los resultados .....	31
3.3.4. Distribución espacial de los elementos .....	35
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>36</b>
4.1. PETROGRAFÍA .....	36
4.1.1. Componentes principales .....	36
4.1.2. Accesorios .....	54
4.1.3. Traza .....	55
4.2. GEOQUÍMICA .....	57
4.2.1. Estadística descriptiva .....	57
4.2.2. Inferencia estadística .....	65
4.2.2. Distribución espacial de los elementos .....	74
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO I – RESULTADOS PETROGRAFÍA</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO II – RESULTADOS GEOQUÍMICA</b>	<b>98</b>

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$\bar{x}$	Media aritmética
$\mu\text{m}$	Micrómetro
A	Área
AR	Relación de aspecto
BGS	<i>British Geological Survey</i>
C	Circularidad
Cal	Calcita
Cal1	Calcita tipo 1
Cal1-a	Calcita tipo 1-a
Cal1-b	Calcita tipo 1-b
Cal2	Calcita tipo 2
cv	Coefficiente de variación
D	Diámetro feret
FI	Factor de indentación
Fig.	Figura
Fl	Fluorita
Fl1	Fluorita tipo 1
Fl1-a & Qtz1	Asociación fluorita tipo 1-a y cuarzo tipo 1
Fl1-a	Fluorita tipo 1-a
Fl1-b	Fluorita tipo 1-b
Fl2	Fluorita tipo 2
Fm.	Formación
FUS	<i>Fusion</i>
g1	Coefficiente de asimetría de Fisher
g2	Coefficiente de apuntamiento o Curtosis
H	Altura ( <i>Smallest bounding box</i> )
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i>
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
ISE	<i>Ion selective electrode</i>
LOI	<i>Loss on ignition</i>
LPA	Luz polarizada analizada
LPP	Luz polarizada plana
Ma	Millones de años
Max	Máximo
Me	Mediana
Min	Mínimo
Mj	Eje mayor ( <i>fit ellipse</i> )
mm	Milímetro

mn	Eje menor ( <i>fit ellipse</i> )
Mo	Moda
MVT	<i>Mississippi Valley Type</i>
N	Número de muestras
P	Perímetro
ppm	Partes por millón
p-valor	Nivel de significación
Qtz	Cuarzo
Qtz1	Cuarzo tipo 1
Qtz2	Cuarzo tipo 2
Qtz2-a	Cuarzo tipo 2-a
Qtz2-b	Cuarzo tipo 2-b
Qtz2-c	Cuarzo tipo 2-c
Qtz3	Cuarzo tipo 3
Qtz4	Cuarzo tipo 4
r	Coefficiente de correlación de Pearson
R	Redondeamiento
RI	Recorrido intercuartílico
S.D.	Desviación estándar
s <sup>2</sup>	Varianza
t	Toneladas
W	Anchura (Smallest bounding box)

# RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster se realiza la caracterización petrográfica y geoquímica del yacimiento de fluorita de Mina Villabona, perteneciente al distrito minero Villabona-Arlós (Asturias). El distrito se sitúa en la cobertera mesoterciaria de la terminación nororiental de la Región de Pliegues y Mantos de la Zona Cantábrica. Concretamente, el yacimiento se dispone sobre sedimentos permotriásicos que se depositan discordantemente sobre el zócalo paleozoico. Puesto que la cobertera mesoterciaria no se encuentra afectada por la deformación varisca, estos materiales tienden a aparecer con buzamientos bajos o en capas subhorizontales. La mineralización se encaja en una caliza micrítica, que puede aparecer fuertemente silicificada, pudiendo encontrarse también mineralizados los niveles calcáreo-detriticos suprayacentes. El yacimiento se clasifica como *Mississippi Valley Type*, subtipo rico en fluorita.

En la etapa de caracterización petrográfica, se realiza la caracterización mineral y textural de 5 láminas delgadas. En la etapa de caracterización mineral, se identifican las especies minerales existentes y se realiza el análisis modal. En la etapa de caracterización textural, se lleva a cabo el análisis granulométrico (determinándose el área, perímetro, diámetro feret, *smallest bounding box* y *fit ellipse* de las secciones minerales), el análisis morfológico (mediante los parámetros de circularidad, relación de aspecto y redondeamiento, además de la discriminación en partículas regulares e irregulares mediante el factor de indentación), el estudio de la irregularidad de los bordes de contacto entre las diferentes especies minerales y el análisis de las relaciones texturales y minerales. La integración de todas las características descritas permite identificar diferentes tipologías minerales según su posible comportamiento en la etapa de concentración mineral, distinguiéndose, como componentes principales, tres tipos de fluorita, seis de cuarzo y tres de calcita. Como accesorios (menos del 5%) se encuentran los minerales opacos, y como traza (menos del 1%), aparece moscovita, el grupo de los feldespatos, rutilo, turmalina y circones. Respecto al mineral explotable, se prevé, en general, una buena liberación mineral, con excepción de las ocasiones en las que la fluorita aparece plagada de inclusiones de carbonato, debido a que el reemplazamiento mineral no ha sido completo.

La etapa de caracterización geoquímica se divide en las fases de estadística descriptiva, estudio de la inferencia estadística y análisis de la distribución espacial de los elementos, para las cuales se estudian 139 muestras de roca. En la fase de estadística descriptiva, a partir de la determinación de los estadísticos descriptivos típicos (de posición, dispersión y forma), se analiza cómo se distribuyen los óxidos mayores que componen la roca. Posteriormente, se realiza la etapa de inferencia

estadística, en la que se analizan las posibles relaciones lineales existentes entre los óxidos mayoritarios. Por último, se realiza el mapeo de la distribución de dichos óxidos. Los componentes principales son  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$ . La concordancia entre los componentes mayoritarios según la petrografía y la geoquímica permite caracterizar las rocas que forman el yacimiento, estableciendo los posibles extremos composicionales (protolito, roca con fluoritización intensa y roca con silicificación intensa). En el caso de los óxidos menores,  $\text{MnO}$  y  $\text{MgO}$  se encuentran relacionados principalmente con el  $\text{CaO}$  que pertenece al protolito; la distribución espacial de ambos óxidos permite discriminar las zonas mineralizadas (con un contenido en fluorita superior al 10%) de las zonas consideradas no mineralizadas (donde el contenido en fluorita es inferior al 10%).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ , se encuentran relacionados, por una parte, con los componentes siliciclásticos del calcáreo detrítico (por la presencia de los minerales considerados traza), y, además, con otras posibles alteraciones diferentes a la silicificación y/o fluoritización en las zonas relacionadas con fallas.

# ABSTRACT

This Master's Thesis deals with the petrographic and geochemical characterization of the Mina Villabona fluorite deposit from the Villabona-Arlos mining district (Asturias). The district is located in the Cantabrian zone and occurs within the Meso-Tertiary cover that outcrops in the north-eastern end of the Pliegues y Mantos domain. The ore bodies are hosted by Permo-Triassic sedimentary rocks that lie unconformably over the paleozoic basement. Since the Mesozoic cover is not affected by the Variscan deformation, the sedimentary rock beds have low-angle dip or are horizontal. More precisely, the host rocks of the mineralization are a micritic limestone that can be strongly silicified and, sometimes, a more clastic level of the upper part. This deposit can be classified as fluorite-rich subtype of Mississippi Valley-type.

The petrographic characterization involved a mineralogical and textural study of five petrographic thin sections. In the mineralogical study, the mineral identification and the modal analysis were done. In the textural study, detailed morphological granulometric analyses of the mineral sections were done. The granulometric analysis comprised measurements of area, perimeter, the feret diameter, the smallest bounding box and the fit ellipse. The morphological analyses included the estimation of the circularity parameters, the grain shape and roundness relationship, and the indentation factor to discriminate between regular and irregular grains. The study of the grain border irregularity at the contact between the different minerals and a classic study of the textural relationships between minerals were also done. The compilation of all these data and features allowed us to identify diverse mineral typologies regarding their behaviour in the separation process of concentrate mineral ore. According to this, as main minerals, three fluorites types, six quartz types and three calcite types were distinguished. Moreover, opaque minerals were classified as accessory minerals (less than 5%), and muscovite, feldspars, rutile, tourmaline and zircon were categorized as trace minerals (less than 1%). Regarding the ore mineral, it is expected a good recovery with the exceptions of some fluorite grains with abundant carbonate inclusions. This abundance is due to an incomplete replacement of the carbonate by the fluorite.

The geochemical characterization using the whole-rock analyses of 139 rock samples from the deposit encompassed a descriptive statistical study, an inferential statistical study, and a study of the spatial distribution of major element concentrations in the deposit. In the descriptive statistical study, the classic statistical measures (i.e. of central tendency, of dispersion and of shape) were calculated in order to know the differences in major elements contents among the different sampled lithologies of the deposit. Subsequently, in the inferential statistical study, correlations between the

major elements were calculated to measure the strength of the relationship between them in the different lithologies. Finally, mappings of the major element concentrations in the deposit were done. The compounds with the higher concentrations are  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{CaO}$ . The relationships between the concentrations of these compounds and the identified/quantified main minerals allowed us to characterize the lithologies of the studied deposit, and to define the probable compositional end members (i.e. protolith, strongly fluoritized rock and strongly silicified rock). As regards oxides in lower concentrations, the spatial distribution of  $\text{MnO}$  and  $\text{MgO}$  concentrations discriminate the mineralized areas (with fluorite content higher than 10%) and their concentrations are mainly related to the primary  $\text{CaO}$  content of the protolith. The variation in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{TiO}_2$  concentrations could be related to both the abundance of some grains (i.e. the previously mentioned trace minerals) in the more clastic lithologies and the development of other alterations apart from silicification and/or fluoritization around faults.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. FLUORITA

El flúor es un elemento relativamente abundante en la naturaleza, con un contenido medio de 400-500 ppm en basaltos y gabros, 400-500 ppm en andesitas, 600 ppm en granodioritas, 800 ppm en riolitas y granitos, pudiendo alcanzar las 2600 ppm en rocas alcalinas. Las rocas metamórficas y sedimentarias tienen contenidos en flúor similares a las rocas ígneas. El flúor es un elemento litófilo, es decir, tiene afinidad por el oxígeno, tiende a concentrarse en la corteza y el manto y es compatible con los silicatos. Además, el flúor muestra una fuerte afinidad geoquímica con elementos tales como el berilio, litio, manganeso, niobio, estaño, wolframio, uranio, itrio, plomo y el cinc, siendo común que el flúor se encuentre junto a estos elementos en una gran variedad de ambientes geológicos (Shawe, 1976). Los principales minerales que contienen flúor son la fluorita, criolita, sellaíta, topacio, villiaumita, bastnasita y el fluorapatito.

La fluorita, o espato flúor en la terminología minera (debido a la traducción del término inglés *fluorspar*), es el mineral dominante en el comercio del flúor. Contiene, teóricamente, un 51,3% de calcio y 48,7% de flúor. Algunas tierras raras, en especial itrio y cerio, pueden sustituir al calcio en la fluorita. Se presenta generalmente en forma cúbica perfecta; suele aparecer con frecuencia como individuos maclados, en forma de maclas de penetración (Hurlbut y Klein, 1996) (fig. 1A). En lo referente a su estructura cristalográfica, cada ion calcio está en el centro de un poliedro de coordinación 8 con respecto al flúor; cada ion flúor tiene como vecinos más próximos a cuatro iones calcio, estando en coordinación 4 con respecto al calcio (fig. 1B).

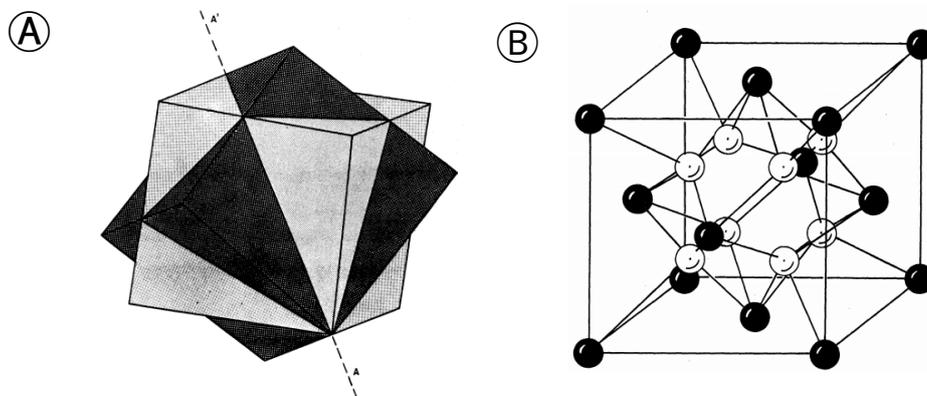


Figura 1. A) Macla de penetración de la fluorita. B) Estructura cristalográfica de la fluorita. IGME, 1976.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fluorita se comercializa en diferentes “grados” o especificaciones técnicas, que pueden variar según el país o según el comerciante; estas especificaciones están basadas en el contenido en fluorita y las impurezas que la acompañan (calcita, cuarzo, sulfuros, arsénico y plomo, entre otros). La fluorita se encuentra comúnmente asociada con otros minerales como cuarzo, barita, calcita, galena, siderita, esfalerita y calcopirita. El grado de la fluorita determina el uso final de la misma; se utiliza fundamentalmente en el sector químico y metalúrgico, para la obtención de ácido fluorhídrico y como fundente, respectivamente. Cabe destacar la importancia de la fluorita en estos sectores debido a que no se han encontrado sustitutos para muchas de sus aplicaciones.

Según el *British Geological Survey (BGS)*, los grados de comercialización son:

- Grado ácido (*acidspar*): mínimo un 97% de  $\text{CaF}_2$ , con cantidades máximas del 1,5% de  $\text{CaCO}_3$ , 1% de  $\text{SiO}_2$ , 0,03 – 0.1% de S, 10-12 ppm de As, 100-550 ppm Pb. Se usa en la producción de ácido fluorhídrico y como materia prima para productos químicos de flúor.

-Grado metalúrgico (*metspar*): mínimo un 80% de  $\text{CaF}_2$ , con cantidades máximas del 15% de  $\text{SiO}_2$ , 0,3% S, 0,5% Pb. Se usa en la industria del acero para mejorar las propiedades de las escorias.

-Grado cerámico: entre el 80 y 96% de  $\text{CaF}_2$ , admite hasta el 3% de  $\text{SiO}_2$ . Se utiliza como opacificador y clarificador de ópalo, cristal y esmaltes.

## 1.2. PANORAMA MINERO

Con el fin de enfatizar la importancia de la investigación y caracterización de los yacimientos de fluorita asturianos, a continuación se realiza un análisis sobre la participación de los yacimientos en la producción de fluorita tanto a nivel mundial como nacional.

### 1.2.1. PANORAMA MUNDIAL

A partir de los datos facilitados por el BGS (tabla I), se elabora la figura 2, en la que se muestran los principales países productores de fluorita (en toneladas) en los últimos cinco años de los que se disponen datos (periodo 2010-2014). El principal productor mundial es China (26.480.000 t), que destaca sobre el resto de países, seguido por México (5.831.582 t), Mongolia (1.875.700 t), Sudáfrica (1.030.000 t) y España (626.779 t).

## 1. INTRODUCCIÓN

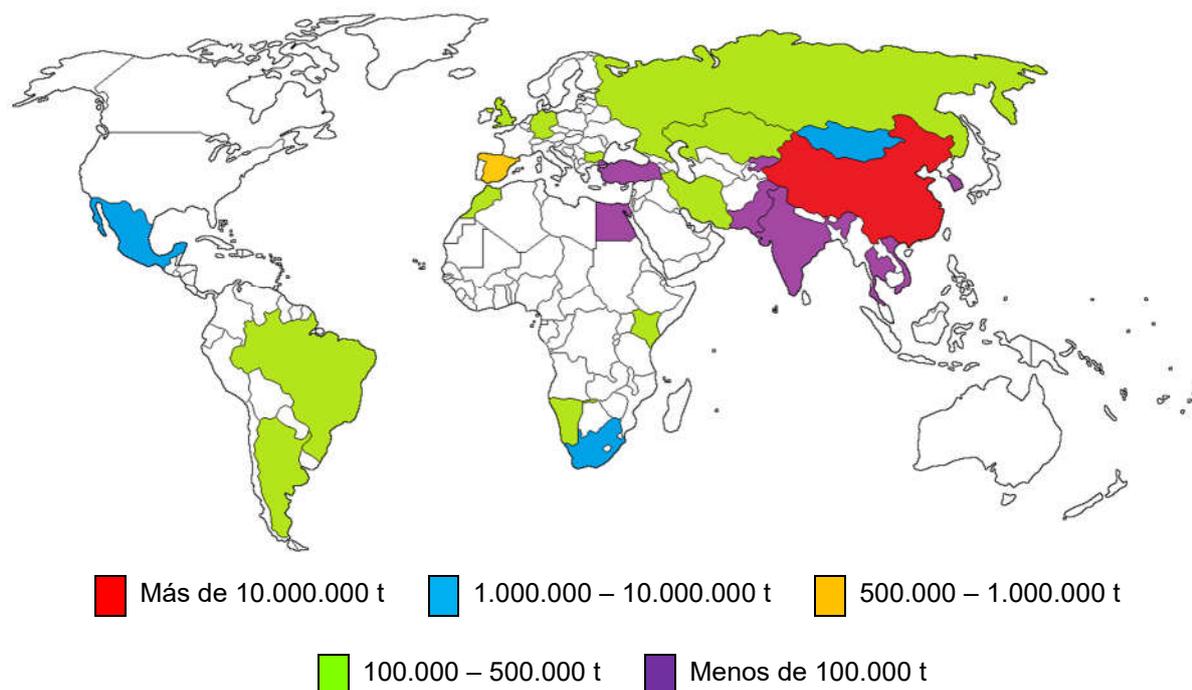


Figura 2. Principales países productores de fluorita en el periodo 2010-2014. Datos proporcionados por el BGS.

### 1.2.2. PANORAMA NACIONAL

Como se vio en el apartado anterior, España es el principal productor europeo de fluorita. Puesto que el IGME no dispone de datos del 2014, se estudia la producción nacional para el periodo 2010-2013, siendo los únicos productores Asturias y Granada (tabla II y figura 3). Tal y como se observa, más del 90% de la producción nacional se concentra en Asturias. En dicha comunidad, la mayoría de la fluorita explotada corresponde al grado ácido; en Granada, la producción se divide entre el grado cerámico y el metalúrgico. Las minas asturianas son explotadas por Minerales y Productos Derivados, S.A. (MINERSA). MINERSA, principal productora europea de espato flúor, tiene una capacidad de producción en sus minas asturianas de 440.000 toneladas al año, que se traduce en un concentrado de espato ácido de aproximadamente 140.000 toneladas al año. La combinación de las producciones de España y Sudáfrica (en la mina de Vergenoeg) la convierten en la tercera productora mundial.

### 1.2.3. RESERVAS NACIONALES

En el año 1982 el IGME realizó el Inventario Nacional de Recursos de fluorita, estableciendo los recursos nacionales en Asturias (71,4%) y la región Bética (23,5%) principalmente, con reservas menores en Cataluña (9,4%), Córdoba-Sevilla (4,6%) y Pirineos (0,1%).

## 1. INTRODUCCIÓN

	2010	2011	2012	2013	2014	Total
Bulgaria	10	31800	69700	82500	82500*	266510
Alemania	59086	65619	54202	48744	35270	262921
Rusia	67000	120000	130000	56200	56000*	429200
España	132341	117063	113570	128512	135293	626779
Turquía	25159	4524	5197	3874	3800*	42554
Reino Unido	26420			30000	77000	133420
Subtotal Europa	310016	339006	372669	349830	389863	1761384
Egipto			7665*	850	800*	9315
Kenia	40800	95100	91000	71987	97156	396043
Marruecos	89680	79207	79300*	81200*	79840	409227
Namibia	104494	94032	90834	63470*	57908*	410738
Sudáfrica	160000*	240000*	225000*	175000*	230000*	1030000
Subtotal África	394974	508339	493799	392507	465704	2255323
México	1067386	1206907	1237091	1210477	1109721	5831582
Argentina	17657	25099	35874	35000*	35000*	148630
Brasil	24447	25040	24148	27712	25000*	126347
Sub. Sudamérica	42104	50139	60022	62712	60000	274977
China	4780000	6550000	6550000*	5000000*	3600000*	26480000
India	7544	5010	3092	2486	1000*	19132
Irán	70000*	55976	60000*	70000	70000*	325976
Kazajistán	66000*	66000*	66000*	66000*	66000*	330000
Rep. de Corea	12500*	12500*	12500*	12500*	12500*	62500
Kirguistán	4000*	4000*	4000*	4000*	4000*	20000
Mongolia	367000	404000	428900	337800	338000*	1875700
Pakistán	222	4756	6866	7000*	7000*	25844
Tailandia	30487	5093	9602	9600*	9600*	64382
Vietnam	4000*	4000*	4000*	4000*	37000*	53000
Subtotal Asia	5341753	7111335	7144960	5513386	4145100	29256534
Total mundial	7156233	9215726	9308541	7528912	6170388	39379800

Tabla I. Principales países productores de espato ácido y/o metalúrgico en el periodo 2010-2014 (en t). La anotación \* indica que el dato ha sido estimado.

	2010	2011	2012	2013	Total
Asturias					
Grado ácido	126730	109284	101000	96810	433824
Grado cerámico	1824	2639	2570	1702	8735
Grado metalúrgico	3462				3462
Subtotal Asturias	132016	111923	103570	98512	446021
Granada					
Grado cerámico			7000	24600	31600
Grado metalúrgico	325	5410	3000	5400	14135
Subtotal Granada	325	5410	10000	30000	45735
TOTAL	132341	117333	113570	128512	491756

Tabla II. Producción española de fluorita (en t) en el periodo 2010-2013

## 1. INTRODUCCIÓN

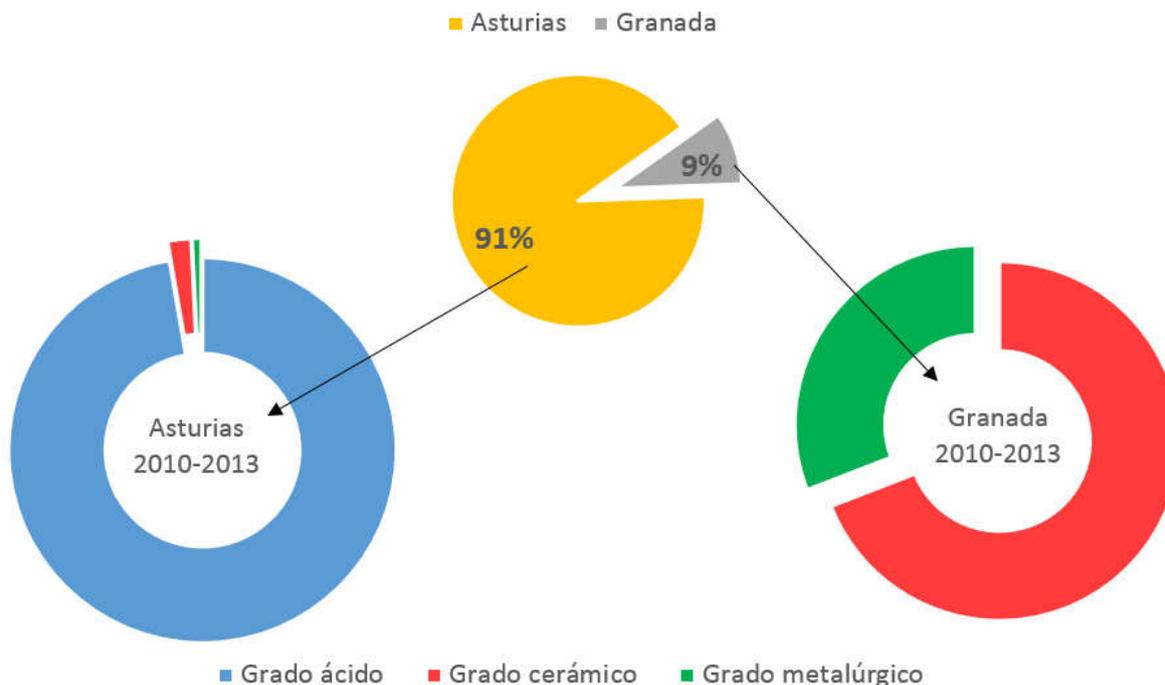


Figura 3. Producción nacional de fluorita en el periodo 2010-2013

### 1.3. ANTECEDENTES

La investigación geológico-minera de los yacimientos de fluorita asturiana comienza coetáneamente con la explotación de dichos yacimientos, siendo realizados por las empresas propietarias de las concesiones. Es a partir de la década de los 70 cuando investigadores ajenos a estas empresas comienzan sus trabajos, versando éstos sobre diversas temáticas. Varios de los trabajos tratan sobre geología general, ya sea como descripciones o como una revisión de las características geológico-mineras más relevantes, a nivel de yacimiento, de distrito o de comunidad autónoma (García Iglesias, 1972; Julien, 1974; Díaz González, 1978; Ferrand, 1978; Ferrand et al., 1978; Tejerina Lobo y Vargas Alonso, 1980; Tejerina Lobo y Zorrilla Bringas, 1980; García Iglesias y Loredo, 1992; Paniagua Condado, 1998). Otros trabajos se centran en analizar las características tectonoestratigráficas de los tres distritos mineros de fluorita existentes en Asturias (Cabal et al., 2010) o del distrito de Villabona-Arlós (Vázquez Soto, 2013). Algunos estudios abordan la temática mineralógica, ya sea estudiando la paragénesis mineralógica existente en la roca que contiene la mineralización o el quimismo de las fluoritas (Millán Chagoyen et al., 1990; García Iglesias y Loredo, 1994; García García y Calvo Rebollar, 1998; Gálvez Montaña, 2014; Vega García, 2015). Dentro de los estudios mineralógicos, existen varios trabajos sobre el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas o geoquímica isotópica (García Iglesias y Touray, 1977; García Iglesias, 1978; Loredo, 1981; Loredo y García Iglesias, 1984; González Laguna et al., 1996; Sánchez et al., 2006; Sánchez, 2009;

## 1. INTRODUCCIÓN

Sánchez et al., 2010). El libro “La fluorita, Un siglo de minería en Asturias” (Gutiérrez Claverol et al., 2009) realiza una recopilación muy extensa sobre la geología minera de la región y las empresas beneficiarias del mineral.

En el año 1995, el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), actualmente el IGME, publicó varios trabajos dentro de la serie “Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto. Mina de Villabona”, cuyo objetivo fue estudiar diferentes parámetros de la mina para evaluar la posibilidad de utilizar las cavidades generadas por la minería en el subsuelo como espacios para el almacenamiento de residuos o de sustancias susceptibles de ser usadas posteriormente. Dentro de esta serie, aparecen los siguientes informes: geológico, geotécnico y de subsidencia, hidrogeológico, hidroquímico, informe de convergencia y extensión, de procesos activos, informe estructural, ambiental, y un estudio geomorfológico, neotectónico y sismotécnico (IGME, 1995, a-i)

Por último, cabe mencionar la tesis doctoral desarrollada por Fernández Suarez (2013), en el que realiza una revisión sobre las características mineras, ambientales y sociales de los recursos de rocas y minerales de la zona Central de Asturias, dedicándole un capítulo a la fluorita.

### 1.4. OBJETIVOS

Aunque existen diversos estudios previos sobre los yacimientos de fluorita asturianos, ninguno aborda una combinación de la caracterización geoquímica de estas mineralizaciones con un estudio petrográfico de las mismas desde el punto de vista de la mejora de concentrados en planta. En este sentido, el objetivo final de este trabajo es diseñar y aplicar una metodología de trabajo que combina los dos aspectos antes mencionados en una de estas mineralizaciones de fluorita, las de Mina de Villabona. El fin último sería evaluar su validez para una mayor eficiencia en la explotación de estos yacimientos. Este objetivo general se puede desglosar en los siguientes objetivos específicos:

- Una caracterización petrográfica de muestras representativas del yacimiento basada en la clasificación de la fluorita y de los minerales acompañantes en diferentes tipologías. Dichas tipologías serán definidas en base de a su posible comportamiento en la planta de concentración mineral. Para ello se medirán en las muestras los parámetros que controlan dicho comportamiento.

- Una caracterización litogeoquímica del yacimiento mediante el análisis cuantitativo de elementos mayores procedentes de un muestreo representativo del yacimiento. Elaboración de mapas de la distribución espacial de las concentraciones de elementos mayores en el área de estudio.

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

Las explotaciones de fluorita asturiana se concentran en tres distritos mineros: Villabona-Arlós, La Collada y Caravia-Berbes (fig. 4). El yacimiento que se explota en las minas de Villabona y Moscona, como su propio nombre indica, pertenece al distrito minero de Villabona-Arlós.

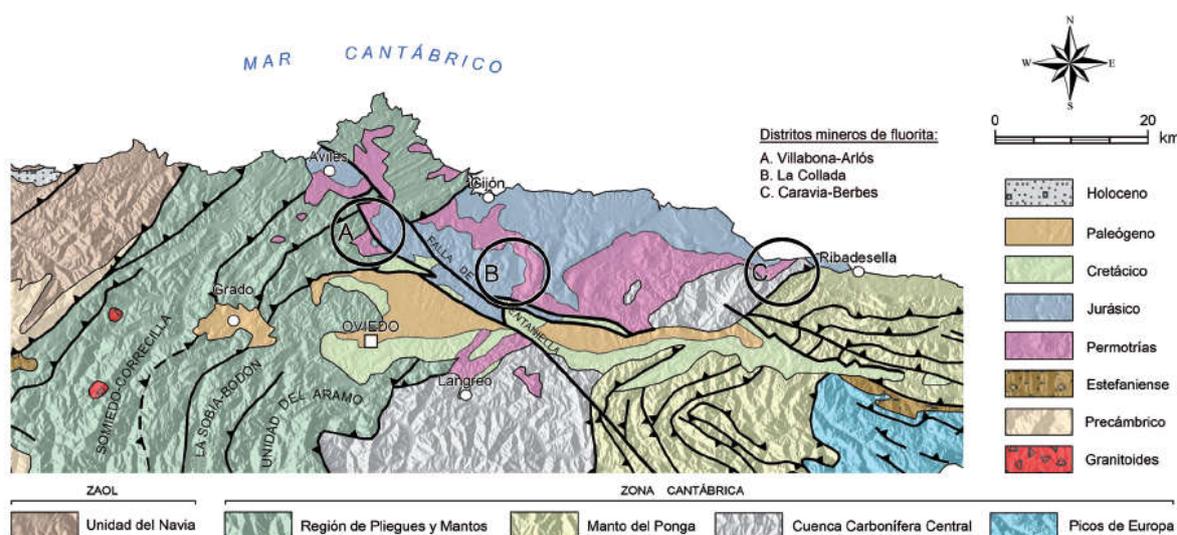


Figura 4. Distritos mineros de fluorita de Asturias. Tomado de Cabal et al., 2010.

### 2.1. LOCALIZACION GEOGRÁFICA

El distrito minero de Villabona-Arlós se encuentra entre las ciudades de Avilés, Gijón y Oviedo (fig. 4) dentro de los términos municipales de Llanera y Corvera. En este distrito las principales minas de fluorita son Mina de Villabona y Mina Moscona (en activo), y Mina Margarita, Mina Gloria, Minas de Arlós y Mina Cucona (abandonadas), tal y como se muestra en la figura 5. El yacimiento de Villabona se ubica en el sector sureste del distrito minero, reduciéndose la zona de estudio a la comprendida entre las localidades de La Miranda y Villabona.

### 2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

El distrito minero de Villabona-Arlós se sitúa en la cobertera mesoterciaria, que en esta zona se dispone discordantemente sobre rocas paleozoicas pertenecientes a la terminación nororiental de la Región de Pliegues y Mantos (Julivert, 1967) de la Zona

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

Cantábrica (Lotze, 1945). Así pues, en el distrito se diferencian dos grandes conjuntos tectonoestratigráficos: por una parte, el zócalo Paleozoico, constituido por materiales del Ordovícico, Silúrico, Devónico y Carbonífero, afectados por la orogenia Varisca, y, por otra parte, una cobertera mesoterciaria discordante sobre el Paleozoico, formada por materiales permotriásicos (donde encaja la mineralización), jurásicos y cretácicos (fig. 5). Puesto que la cobertera mesoterciaria no se encuentra afectada por la deformación varisca, estos materiales tienden a aparecer con buzamientos bajos o incluso, en capas subhorizontales. Manjón et al., (1992), a partir de un sondeo realizado por la empresa Minas de Villabona S.A, exponen que en la secuencia permotriásica son frecuentes las manifestaciones volcánicas en la mitad inferior de la serie. Sin embargo, en los sondeos realizados por la empresa MINERSA S.A. no se han encontrado dichas manifestaciones volcánicas.

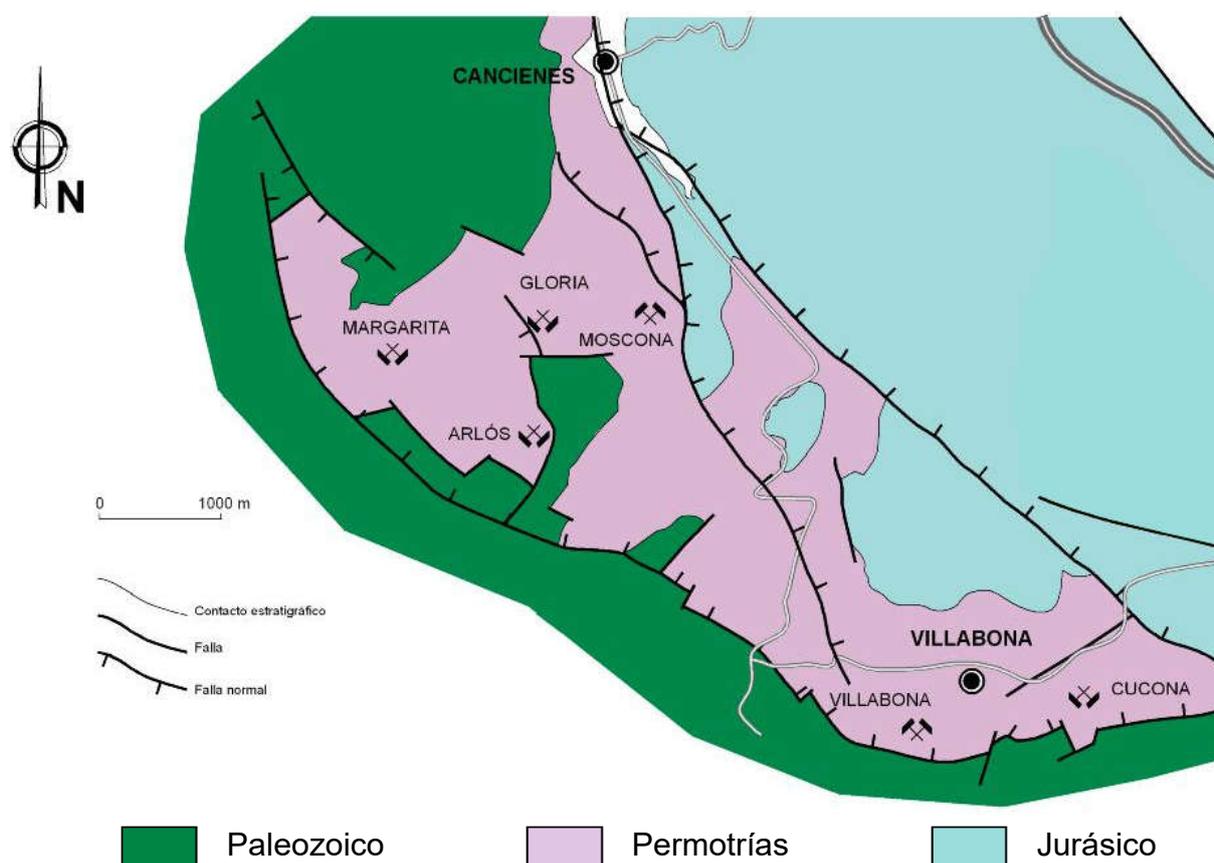


Figura 5. Localización geográfica y contexto geológico del distrito minero de Villabona-Arlós, así como las minas (en activo y abandonadas) existentes en el distrito. Modificado del Proyecto de investigación “Prospección mediante sondeos mecánicos del área comprendida entre mina Moscona y minas de Villabona” (MINERSA Group, MPD Fluorspar, S.L.U., 2014)

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

### 2.2.1. TECTÓNICA

El yacimiento de Villabona se sitúa en la Cordillera Cantábrica, en la cual basamento varisco y cobertera mesozoica se deformaron solidariamente durante la deformación alpina (Pulgar et al., 1999). Tras la orogenia varisca, el primer periodo extensional se produce entre el Pérmico Superior y el Jurásico Medio, formándose cuencas intraplaca continentales que se van rellenando de sedimentos. Puesto que los sedimentos pérmicos se encuentran íntimamente relacionados con los sedimentos triásicos, para referirnos a estos materiales en el apartado de estratigrafía hablaremos de materiales permotriásicos. Durante el Triásico se formaron sistemas de rift, en los que durante la transgresión del Jurásico inferior se instalan plataformas carbonatadas (Gallastegui, 2000). El segundo periodo extensional tras la orogenia varisca sucede entre el Jurásico superior y el Cretácico inferior, cuando se produce la apertura del Golfo de Vizcaya, generándose las principales cuencas mesozoicas, estables desde el Albense hasta la inversión tectónica del Terciario (Pulgar et al., 1999). En la zona de estudio, las estructuras principales son fallas normales desarrolladas durante la etapa de extensión mesozoica, no encontrándose apenas indicios del ciclo compresivo alpino.

### 2.2.2. ESTRATIGRAFÍA

#### 2.2.2.1. Paleozoico

En el yacimiento de Villabona, el zócalo aparece representando por rocas de edad Carbonífero, y más concretamente del Westfaliense, compuesto principalmente por materiales detríticos. Sobre estos aparecen de manera discordante las unidades litoestratigráficas que conforman la cobertera mesoterciaria. En la figura 6 se muestra una columna estratigráfica general del yacimiento de Mina de Villabona, realizada a partir de un sondeo facilitado por Minersa S.A.

#### 2.2.2.2. Permotriás

Estos materiales, que se disponen de manera discordante sobre el zócalo Paleozoico, se asemejan a la Formación Caravia descrita por Martínez García (1991) como una sucesión de conglomerados silíceos, areniscas, margas, limolitas y arcillitas. La Fm. Caravia, de edad Saxoniense, está constituida por sedimentos detríticos de origen fluvial y lagunar, con intercalaciones del llamado Conglomerado de La Riera. En los distritos de Caravia-Berbes y La Collada, este conglomerado es la roca encajante de la mineralización, mientras que en el distrito de Villabona-Arlós, la mineralización está asociada a niveles calcáreos que corresponden a la parte inferior de la Fm. Caravia.

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

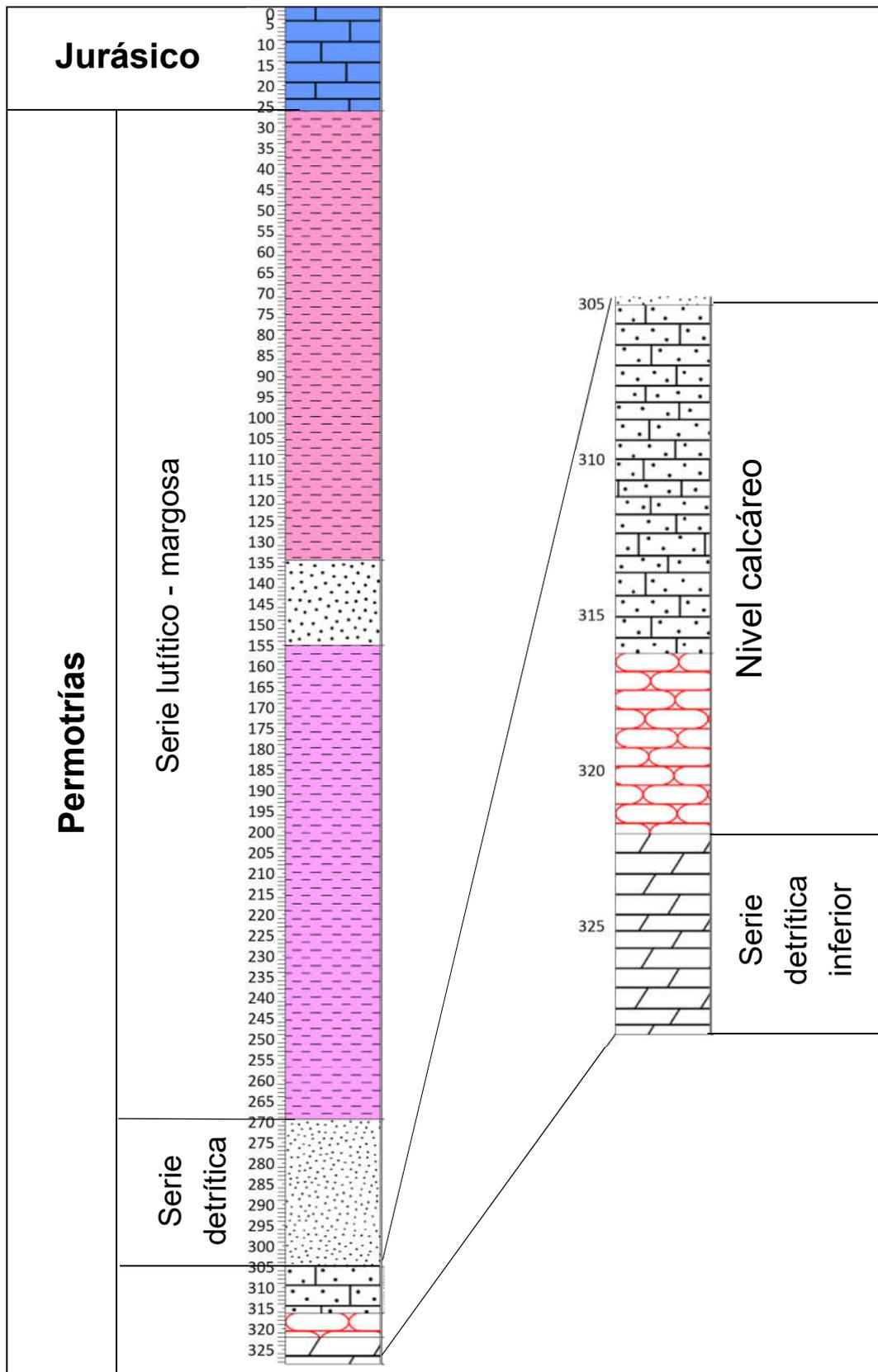


Figura 6. Columna estratigráfica simplificada realizada a partir de uno de los sondeos proporcionados por MINERSA S.A..

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

En el distrito de Villabona-Arlós el Permotriás aparece con una potencia media de 400 metros, y puede dividirse en cuatro subniveles, que de muro a techo son:

-Serie detrítica inferior: formada por margocalizas verde rojizas más o menos arenosas y conglomerados de cemento calcáreo con cantos silíceos. La potencia de esta serie en el depocentro de la cuenca es de 100 metros, disminuyendo hacia las zonas proximales, donde las capas onlapan con el paleorelieve de la cuenca.

-Nivel calcáreo: comienza con una caliza micrítica de 3-5 m de potencia, que en el entorno del yacimiento presenta una fuerte alteración silícea y aspecto brechoide. Constituye el soporte de la mineralización de fluorita. Sobre esta caliza, aparece un tramo calcáreo detrítico de 11 m de potencia media, que a techo pasa a conglomerado silíceo de matriz calcárea, que puede contener  $\text{CaF}_2$ .

-Serie detrítica superior: con un tránsito gradual sobre el nivel calcáreo y con una potencia media de 33 m aparecen areniscas y areniscas margosas de varias tonalidades y calcarenitas, con pasadas conglomeráticas.

-Serie lutítico-margosa: sucesión de lutitas y margas rojas con yesos, con una potencia media de 230-250 m. En la parte media de este nivel aparecen intercalaciones de capas centimétricas de areniscas grises, con una potencia media total de 20 m. Se trata de un nivel correlacionable a lo largo de toda la cuenca. Esta serie, de edad Triásico Superior, suele atribuirse al Keuper.

### 2.2.3.3. Jurásico

El tránsito entre el Triásico y el Jurásico en el distrito de Villabona-Arlós aparece representado por la Formación Fuentes (Suarez Rodríguez, 1988), constituida por margas y/o lutitas negras con yesos, con una potencia variable de 5 a 20 m, de edad Retiense (Triásico Inferior) a Hettangiense (Jurásico Inferior). El Jurásico está dividido en un conjunto carbonatado que constituye la Formación Gijón (Valenzuela et al., 1986), de edad Jurásico Inferior, y en otro silíceo denominado Formación La Ñora (Valenzuela et al., 1986), de edad Jurásico Superior.

## 2.3. TIPOLOGÍA DE YACIMIENTO

Los yacimientos de fluorita asturianos aparecen relacionados con la discordancia entre el zócalo Paleozoico y la cobertera Permotriásica, o como yacimientos filonianos en estructuras paleozoicas que no presentan una relación aparente con dicha discordancia (García Iglesias y Loredo, 1992). La mineralización puede aparecer estratoligada (también llamada en capas y mantos, se encuentra formando capas

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

subhorizontales) o filoniana (rellenando fracturas), si bien el mayor número de yacimientos y, por lo tanto, los de mayor importancia económica, son de morfología estratoligada. Según la bibliografía existente la mineralización se encaja en rocas carbonatadas que previamente han sido afectadas por un proceso de silicificación; estando la paragénesis constituida por fluorita y cuarzo, además de calcita, barita y sulfuros de plomo, zinc y cobre. Sin embargo, tal y como se detalla en el apartado de petrografía, según las observaciones realizadas en las muestras estudiadas no es necesario un proceso de silicificación para que la roca se encuentre mineralizada.

Numerosos autores (Gutiérrez Claverol et al., 2009 o Sánchez, 2009, entre otros) clasifican este yacimiento como afín a los yacimientos Mississippi Valley Type (MVT). La clasificación de los depósitos MVT (Leach y Sangster, 1993), incluye, el subtipo rico en plomo (como el distrito de Ozark, donde la relación Zn/Pb varía entre 0,25 y 0,8), el subtipo rico en cinc (como el distrito Tri-State, con una relación Zn/Pb de 16), y el subtipo rico en fluorita (como el distrito de Illinois-Kentucky). Otros depósitos clasificados como *fluoritic subtype* son los Peninos, en Inglaterra (Dunham, 1983) o las mineralizaciones P-Zn, F de Arufu y Akwana, en Nigeria (Akande et al, 1988).

### 2.4. MODELO GENÉTICO

Sánchez (2009) realizó una datación mediante Sm-Nd en las fluoritas asturianas, estableciendo la edad de formación en  $185 \pm 29$  Ma (Triásico superior- Jurásico superior). Según Sánchez un factor determinante en la precipitación de fluorita es la mezcla de fluidos, donde salmueras enriquecidas en flúor y metales se mezclan con fluidos superficiales de baja salinidad. Como fuente de flúor, García Iglesias y Loredo (1994) sugieren los materiales traquiandesíticos del Permotriás. La circulación de esta mezcla de fluidos hidrotermales a lo largo de las fallas extensionales mesozoicas produce mineralizaciones tanto en el horizonte carbonatado (caliza micrítica del nivel calcáreo) como en los planos de falla. Cuando estos fluidos llegan a estos materiales, reaccionan con el calcio, produciéndose la precipitación de fluorita. En los lugares donde el aporte de fluidos es muy elevado, también se mineralizan los niveles calcáreo-detriticos suprayacentes.

### 2.5. HISTORIA MINERA

#### 2.5.1. HISTORIA DEL YACIMIENTO DE MINA DE VILLABONA

Hasta el año 1915, varias explotaciones artesanales extraen carbón en ambos flancos del Sinclinal de Santo Firme. Es en este año cuando se funda Orueta e Ibrán S.R.C, unificando todas las explotaciones de carbón existentes hasta el momento. En el año

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

1935 se constituye Minas de Villabona S.A., que continua con los trabajos de explotación de carbón hasta el año 1967. Simultáneamente a la extracción de carbón, en el año 1957 se comienza con el beneficio de la fluorita, aprovechando las estructuras con las que ya contaban. En el año 1977 Hullas del Coto Cortés S.A. adquiere toda la propiedad minera y además de continuar con la explotación de fluorita, reanuda la extracción de carbón. Sin embargo, en el año 1982 los beneficios de carbón y fluorita se separan, creándose la filial Espato de Villabona. Las actividades mineras cesan en el año 1990 en el caso del carbón, y en 1991 para la fluorita. En el año 2001 Preminor (Preparación Minera del Norte), adquiere los activos mineros de Espato de Villabona y reanuda la explotación de fluorita (IGME, 1995c). En 2010 MINERSA compra la concesión y la estructura minera a Preminor. Tras una fase de investigación geológico-minera y preparación de galerías, que pone de manifiesto nuevas reservas, la mina se encuentra actualmente en fase de explotación.

### 2.5.2. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

Tras el abandono de la explotación de carbón, las instalaciones de la Mina de Villabona son aprovechadas para la extracción de fluorita. En un principio, y puesto que no se conocía la existencia de la mineralización estratoligada, se explota solo el filón que se encuentra en el contacto Carbonífero-Triásico. La estructura minera consta de tres plantas, con sus correspondientes galerías de arrastre y explotación, además de un pozo con castillete metálico y una rampa de acceso para los camiones. El sistema de laboreo es por cámaras y pilares, donde se avanza en superficies horizontales o con pequeño gradiente, abriendo cámaras pero dejando zonas intactas que actúen como pilares cuya función es sostener la carga vertical. Debido a la existencia de fracturas, el avance de las galerías es irregular y, por lo tanto, la posición de las cámaras y pilares no sigue una pauta regular (fig. 7). En las galerías se avanza mediante perforación y voladura, utilizando jumbos o perforación manual con martillos neumáticos y voladura en avances de dos a dos metros y medio. Una vez explotado, el estéril se utiliza para el relleno de antiguas labores agotadas, mientras que el mineral es cargado en camiones para su extracción y acopio a pie de bocamina (IGME, 2013).

### 2.5.3. MÉTODO DE CONCENTRACIÓN MINERAL

El material extraído en mina contiene generalmente entre el 20% y el 40% de fluorita, con cantidades variables de cuarzo o calcita, entre otros minerales. Puesto que el espato flúor de grado ácido debe de contener como mínimo el 97% de  $\text{CaF}_2$ , es necesario someter el material a procesos de concentración que aumenten la ley y eliminen impurezas.

## 2. CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO Y MINERO

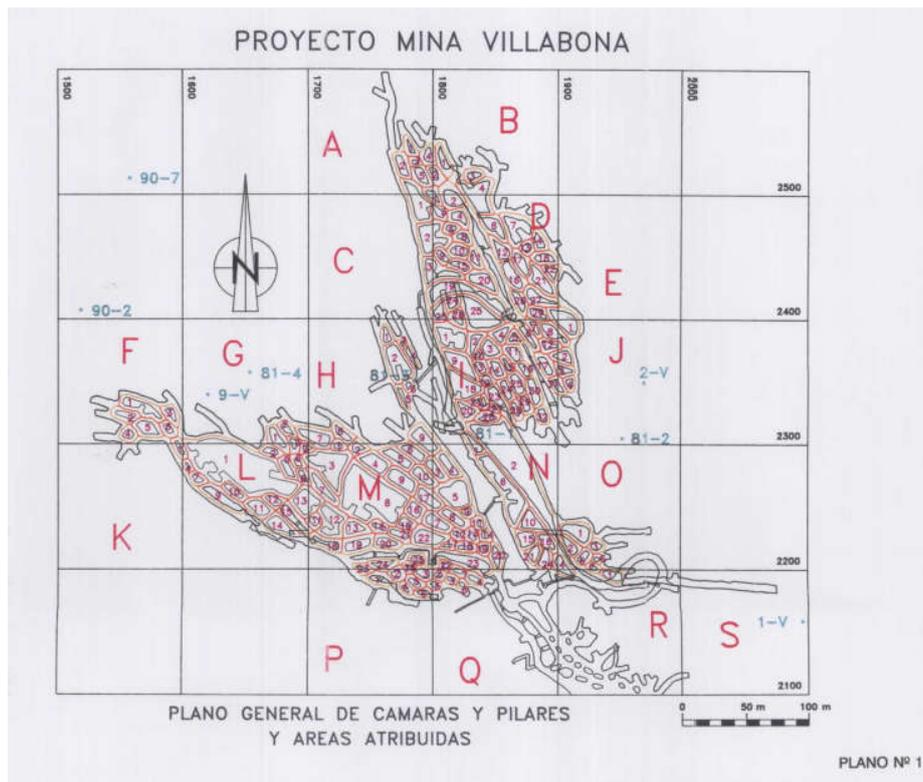


Figura 7. Plano general de cámaras y pilares. Informe geotécnico y de subsidencia (IGME, 1995h).

La concentración mineral se lleva a cabo en la planta de procesamiento situada en la localidad de Torre, municipio de Ribadesella. El material es sometido a procesos de molienda que reducen el tamaño de grano, tras lo cual, en líneas generales, se produce la separación de mena y ganga por flotación. Como se verá en el apartado de metodología, tanto el proceso de molienda como la separación por flotación están condicionados, en parte, por la especie mineral constituyente y por sus características petrográficas. Por lo tanto, una adecuada caracterización de estos componentes permite diseñar circuitos más productivos, con el consecuente ahorro en los costes de producción del concentrado.

## 3. METODOLOGÍA

Para obtener los objetivos previstos, se han seleccionado muestras de diferentes partes del yacimiento, correspondientes tanto a sondeos de exterior como a muestras del interior de la mina. Sobre estas muestras se realizaron una serie de análisis químicos y petrográficos.

### 3.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS

Para este trabajo se partió del análisis químico y las láminas delgadas de 5 muestras de un estudio anterior; para completar esta información se han preparado otras 143 muestras para su análisis geoquímico. Las muestras objeto de estudio han sido seleccionadas de tal manera que la información muestral pueda ser considerada como información poblacional. No se tiene información sobre el protolito, debido a que todo el entorno del yacimiento se encuentra mineralizado. En consecuencia, se considerarán muestras no mineralizadas aquellas que tengan un contenido en fluorita inferior al 10%, y muestras mineralizadas las que tengan un contenido superior. Téngase en cuenta que los términos mineralizado y no mineralizado hacen referencia siempre al contenido en fluorita. En función de la ley en fluorita y el nivel estratigráfico en el que se sitúan las muestras, éstas se dividen en cuatro categorías: capa no mineralizada, detrítico, capa y filón. La categoría capa no mineralizada incluye aquellas muestras tomadas en el primer tramo del nivel calcáreo (caliza micrítica silicificada) con un contenido en fluorita inferior al 10%. En la categoría detrítico se incluyen aquellas muestras tomadas en el nivel estratigráfico suprayacente, el calcáreo-detrítico. La categoría capa está formada por aquellas muestras del nivel calcáreo (caliza micrítica silicificada) que tienen un contenido en fluorita superior al 10%. En la categoría filón se incluyen las muestras tomadas en el entorno de las fallas, donde la mineralización de fluorita afecta distintos niveles estratigráficos y no tiene un carácter claramente estratoligado, como en el caso de la categoría capa.

### 3.2. PETROGRAFÍA

Para realizar la caracterización petrográfica, se han estudiado 5 láminas delgadas, de las cuales una corresponde a la categoría no mineralizado, dos a la categoría capa, una a detrítico, y otra al contacto entre las categorías detrítico y filón.

#### 3.2.1. INSTRUMENTACIÓN

Para el estudio petrográfico se ha utilizado la microscopía óptica de transmisión apoyada por software de análisis de imagen. Se ha utilizado el microscopio Zeiss Axio

### 3. METODOLOGÍA

Scope A1 Pol y el estereomicroscopio Leica Wild M10 del área de Petrología y Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo.

#### 3.2.2. CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA

Puesto que uno de los objetivos del trabajo es realizar la caracterización petrográfica orientada a la separación mineral en la planta de concentración, se parte de la secuencia de trabajo (fig. 8) utilizada por Pérez Barnuevo (2014).

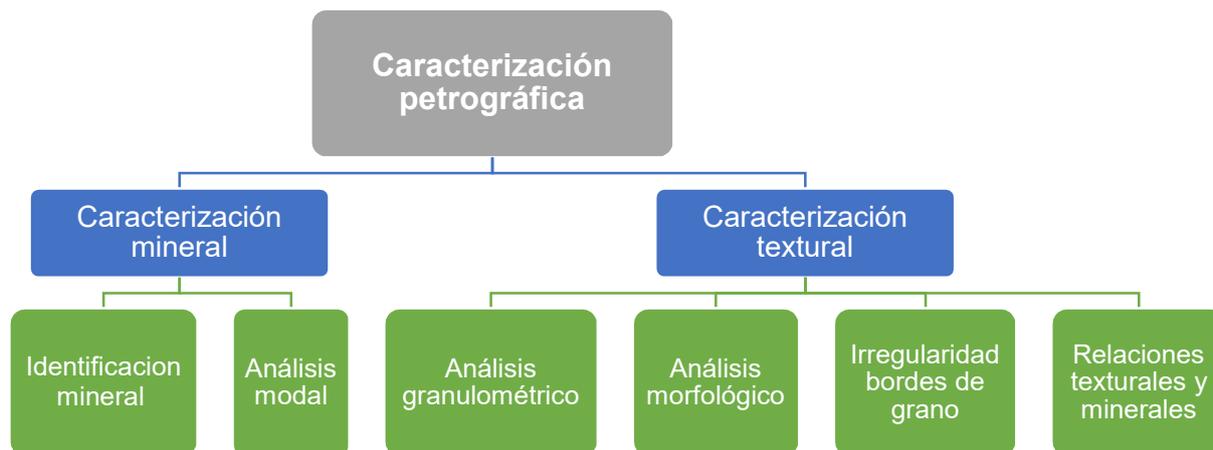


Figura 8. Esquema de trabajo seguido en la etapa de caracterización petrográfica.

##### 3.2.2.1. Caracterización mineral

El objetivo principal de la caracterización mineral en lámina delgada es obtener la información necesaria para desarrollar y optimizar los procesos de concentración mineral (Henley, 1983). Para ello, se realiza tanto la identificación de los minerales presentes como su cuantificación.

-Identificación mineral. La caracterización mineral comienza con la identificación de las especies presentes en las muestras estudiadas. En esta etapa es imprescindible determinar que minerales forman la mena y cuales la ganga, además de identificar aquellos minerales que puedan ser susceptibles de interferir en el proceso de concentración mineral en la planta de tratamiento o de generar problemas de contaminación medioambiental.

-Análisis modal. En esta etapa se determina la proporción de cada una de las fases minerales presentes en la muestra analizada, siendo ésta una información valiosa tanto para conocer el valor de la mena como para diseñar el circuito de concentración mineral. Se determina de una manera manual (con el contador de puntos acoplado al microscopio óptico) y mediante el análisis digital de imágenes. Se

### 3. METODOLOGÍA

consideran minerales principales aquellos que están en una proporción superior al 5%, accesorios si aparecen entre el 1 y 5%, y minerales traza si es inferior al 1%.

#### 3.2.2.2. Caracterización textural

El comportamiento de la mena en el proceso de separación mineral en la planta de tratamiento está íntimamente relacionado con sus características texturales (King, 1982, Petruk, 1995 en Pérez Barnuevo 2014). Por lo tanto, se procede a determinar los parámetros texturales más relevantes para varios autores: tamaño de grano, su morfología, la irregularidad del borde de unión entre minerales adyacentes y el tipo de intercrecimiento mineral (Gaudin, 1939; Amstutz, 1962; Ramdohr, 1980; Petruk, 2000; Butcher, 2010).

- Análisis granulométrico. Según Merkus (2009), únicamente en el caso de esferas el tamaño de grano queda definido por un único parámetro, como por ejemplo, el diámetro. Si la partícula estudiada tiene alguna otra forma se requieren más parámetros para definir correctamente el tamaño de grano. Las medidas realizadas en este trabajo se refieren a las secciones observadas en lámina delgada, utilizando el software de análisis de imagen *ImageJ*. Los parámetros estudiados son los siguientes.

- Área ( $\text{mm}^2$ ). Superficie comprendida dentro de un perímetro. El área de la partícula se calcula como la suma de las áreas de cada pixel que se encuentra dentro de la sección (fig. 9A). Las medidas se obtienen en pixeles, pero con el calibrado, se convierten en  $\text{mm}^2$ .

- Perímetro (mm). Medida del contorno de una partícula (fig. 9B).

- Diámetro *feret* (mm): distancia más larga entre dos puntos cualesquiera a lo largo del límite de la sección (fig. 9C).

- *Smallest bounding box* (mm): rectángulo más pequeño que encierra a la sección (fig. 9D). Se dan las medidas de anchura (W) y altura (H) de dicho rectángulo.

- *Fit ellipse* (mm): elipse más pequeña cuyos ejes se adaptan a la sección (fig. 9E). Se dan las medidas del eje mayor (Mj) y del menor (mn).

-Análisis morfológico. La morfología de los minerales influye en el comportamiento durante los procesos de concentración; por ejemplo, las partículas más angulosas flotan más rápidamente y de una forma más eficiente que aquellas redondeadas (Vizcarra et al., 2011). Los parámetros morfológicos estudiados son adimensionales. Para este trabajo se han estudiado los siguientes parámetros:

### 3. METODOLOGÍA

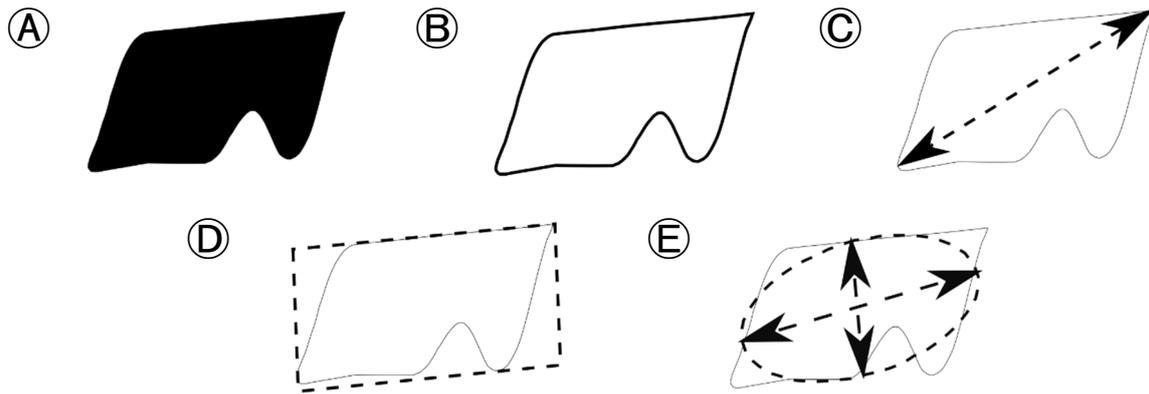


Figura 9. A) Área; B) Perímetro; C) Diámetro feret; D) *Smallest bounding box*; E) *Fit ellipse*. Modificado de Higgins (2006)

- Circularidad (C): el índice de circularidad de Schwarz (1980) permite medir el parecido de una sección con un círculo perfecto. Se calcula a partir de la siguiente formula:

$$C = 4\pi \cdot \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (1)$$

Se obtienen valores comprendidos entre 0 y 1, siendo 1 el valor para un círculo perfecto y 0 para una superficie muy elongada con un perímetro que tiende al infinito y un área que tiende a cero.

- Relación de aspecto (AR): proporción entre altura y anchura, referido a una elipse, se calcula dividiendo el eje mayor de la elipse entre el eje menor. Se consideran partículas muy elongadas las que tienen AR mayores de 2.

- Redondeamiento (R): se calcula a partir de la ecuación 2, toma valores entre 0 y 1, indicando una alta redondez los valores superiores a 0,6, redondez media los comprendidos entre 0,4 y 0,6, y una redondez baja los inferiores a 0,4.

$$R = 4 \cdot \frac{\text{Área}}{\pi \cdot \text{Eje mayor}^2} \quad (2)$$

Una vez descritos los parámetros morfológicos de las partículas, se realiza su clasificación en partículas generalmente regulares o irregulares. Para ello, se utiliza el factor de indentación (*FI*) propuesto por Calleja (1981) y Suárez del Río (1982). A partir de la ecuación 3, estos autores desarrollan una gráfica (fig. 10), en la que se parte de un mineral circular y sin irregularidades; este mineral puede ir aumentando su irregularidad (curva de color negro) hasta llegar a ser completamente irregular, o aumentar su relación de aspecto hasta alcanzar una elongación infinita (curva roja).

$$FI = \pi \frac{\text{Diámetro}}{\text{Perímetro}} \quad (3)$$

### 3. METODOLOGÍA

En este trabajo, y a partir de la modelización de diferentes minerales, se delimitan tres campos (fig. 10): en el campo A (en color gris) se encontrarían los minerales que no presentan irregularidades o éstas son leves y/o ocasionales, y que, además, son equidimensionales o ligeramente elongados. En el campo B (color azul), aparecen los minerales que siguen sin presentar excesiva irregularidad, pero una alta elongación. En el campo C (color violeta) se encontrarían todos los minerales que presentan una clara irregularidad en los bordes del cristal. En la figura 11 se muestran los descriptivos de forma que se obtienen en cristales con diferentes morfologías; el color indica el campo que ocuparían en la figura 10.

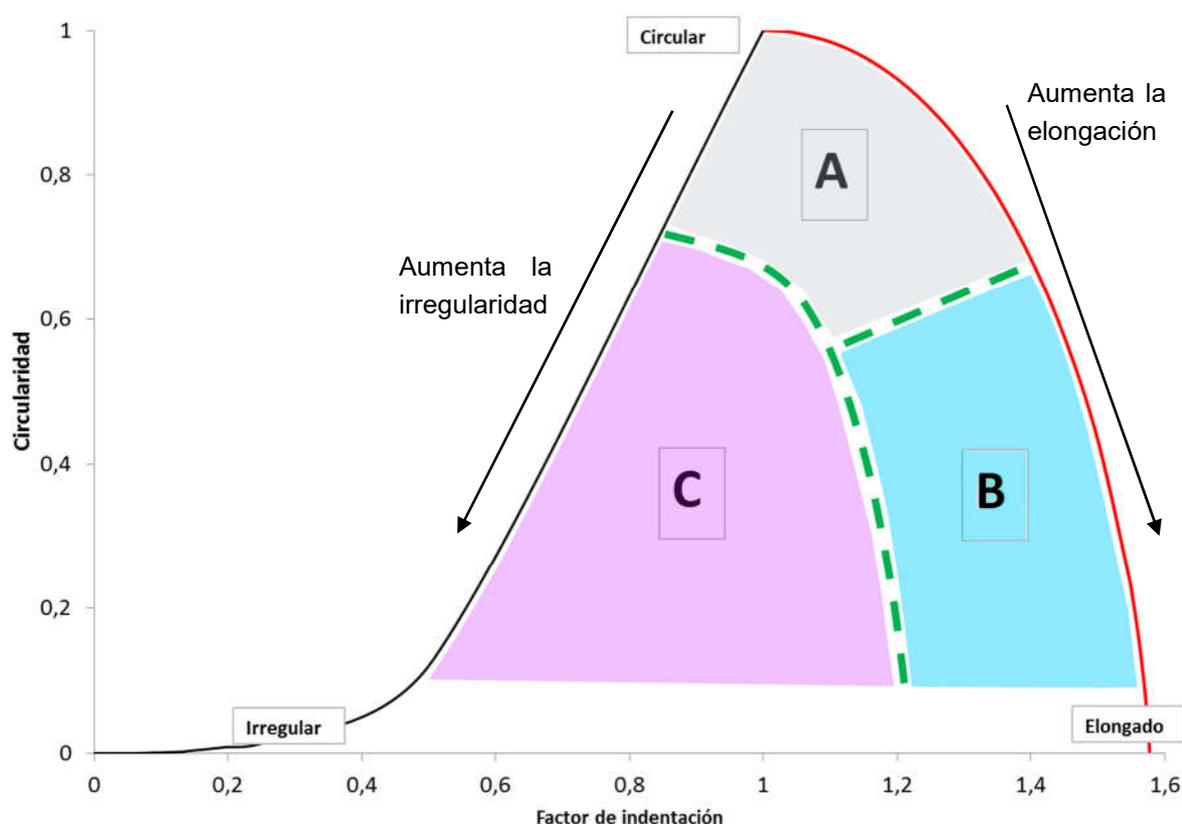


Figura 10. Gráfico circularidad-factor de indentación, junto con la delimitación de tres campos según la irregularidad y elongación de los minerales.

-Irregularidad de los bordes de contacto entre las diferentes tipologías de minerales. La sinuosidad del borde de unión entre minerales adyacentes condiciona la resistencia que un agregado de minerales opone a su disgregación en los diferentes minerales que lo constituyen (Petruk, 1995). Así, los minerales que se encuentren unidos por bordes rectos serán liberados fácilmente mediante trituración y molienda, mientras que en los casos donde los bordes de contacto se encuentren interdigitados, conseguir la liberación completa será muy difícil y la aparición de partículas mixtas será inevitable (Petruk, 2000). Existen algunas excepciones en las que la fracturación de los minerales no depende de la irregularidad de los bordes de grano, sino de la exfoliación de uno de los minerales asociados. La descripción de la morfología de los

### 3. METODOLOGÍA

bordes de contacto entre las distintas fases minerales que componen la ganga y la mena se hace de una manera cualitativa, clasificando los bordes en rectos, sinuosos, lobulados o interdigitados (fig. 12).

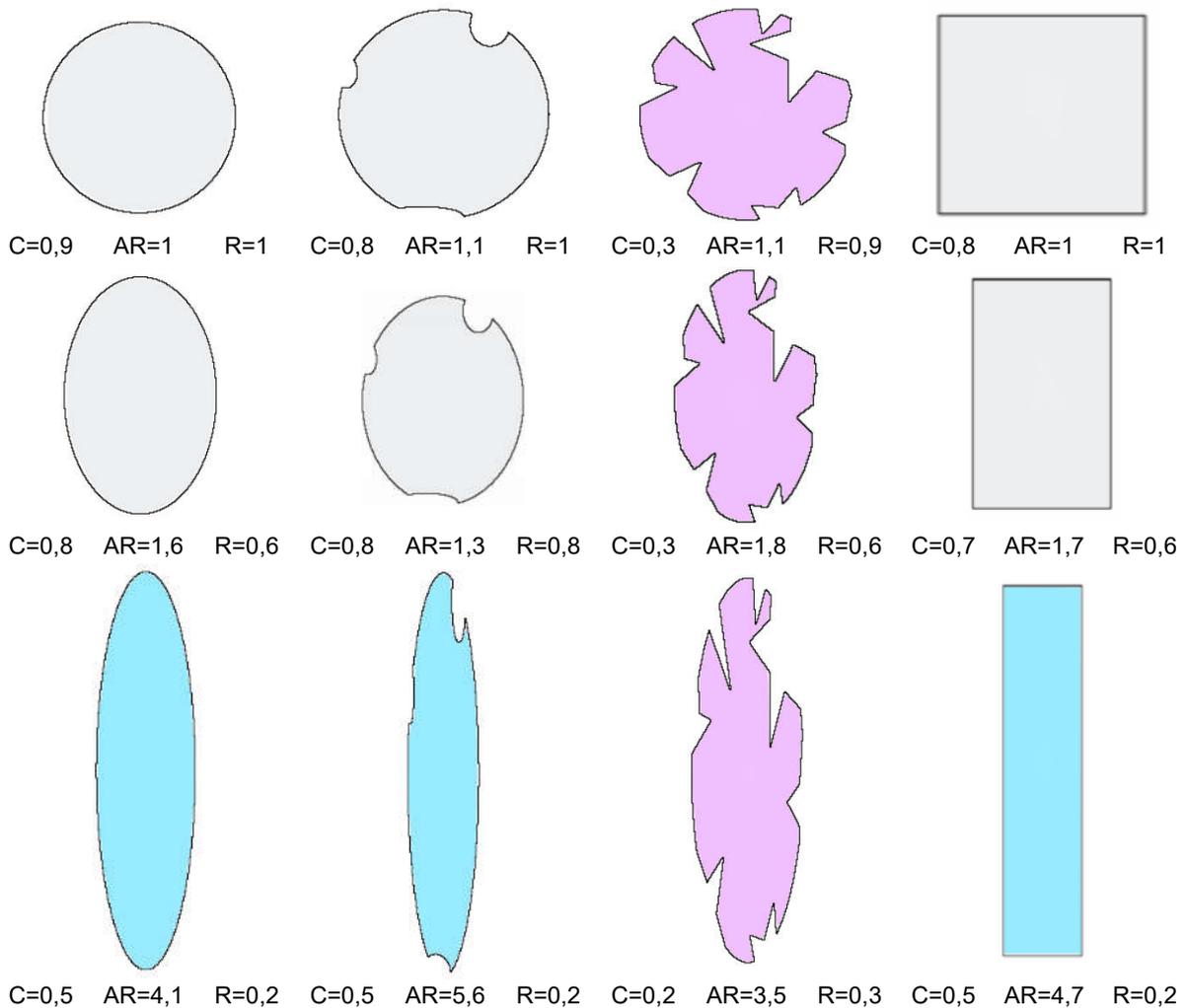


Figura 11. Parámetros de forma obtenidos en cristales con diferente morfología. C= circularidad, AR= relación de aspecto, R= redondeamiento. El color indica en que campo de la gráfica circularidad-*FI* se sitúan.

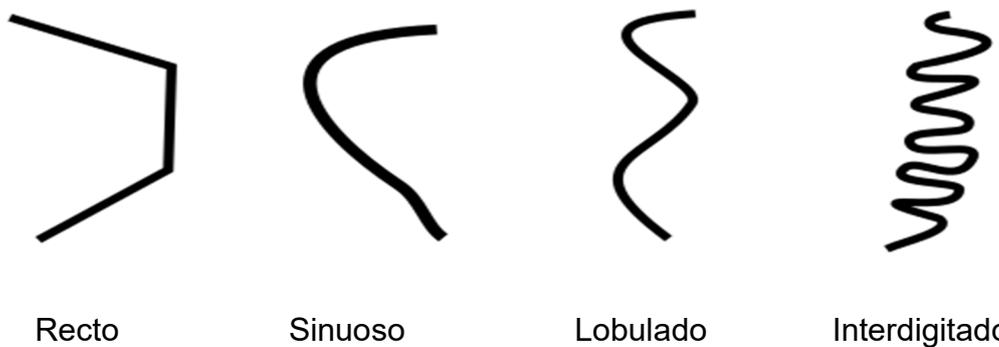


Figura 12. Parámetros descriptivos cualitativos para los bordes de los cristales.

### 3. METODOLOGÍA

-Relaciones texturales y minerales. Como ya se dijo anteriormente, en el proceso de concentración mineral el primer paso a realizar es la molienda del material. Debido a este proceso, aparecerán tanto partículas liberadas (constituidas por un único mineral) como partículas mixtas (formadas por dos o más minerales). La flotabilidad de cada partícula mixta dependerá, entre otros factores, de la proporción del mineral más flotable y de la flotabilidad del resto de minerales existentes en dicha partícula, y de la superficie expuesta a los reactivos de flotación (Steiner, 1973, Sutherland, 1989 y Welsby, 2010, en Pérez Barnuevo, 2014). En la figura 13 se muestra, de manera simplificada, la formación de partículas libres y mixtas a partir de un agregado (compuesto por A y B), simplemente variado el plano de fractura. Partiendo de la situación (a), el agregado se fractura a través del contacto recto entre los dos minerales (b), generándose partículas totalmente libres. En (c), el agregado se fractura por un plano no preferente, que podría ser, por ejemplo, un plano de exfoliación. En este caso se generan partículas mixtas.

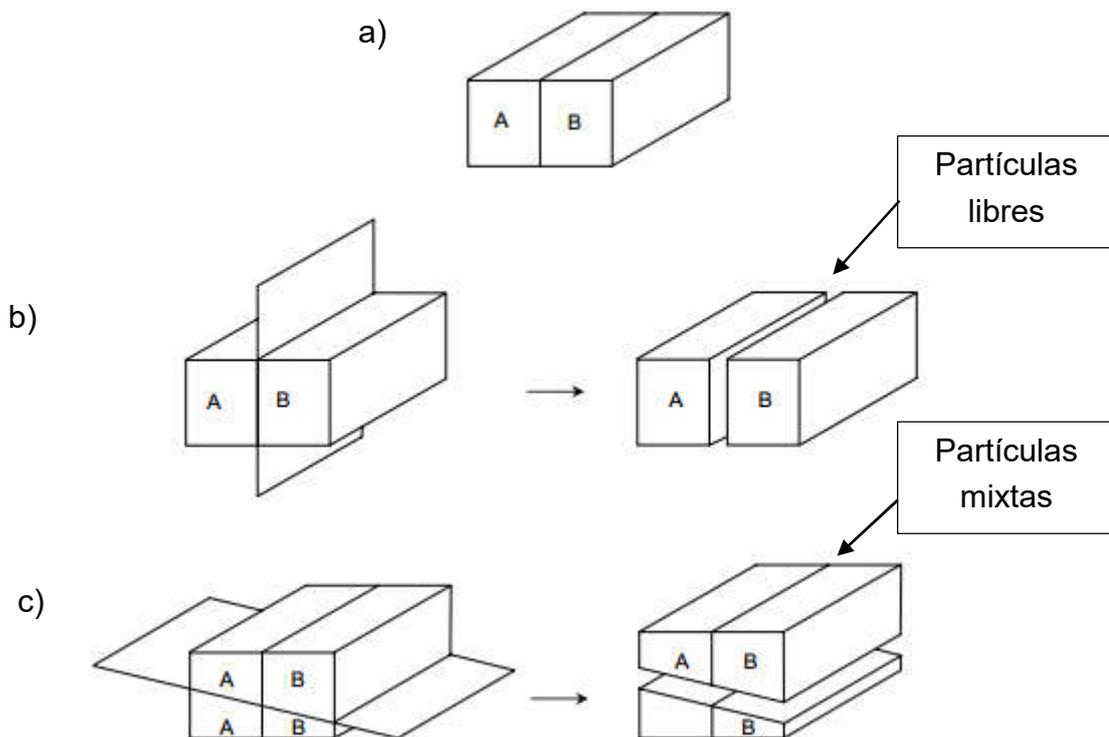


Figura 13. Esquema del posible comportamiento de un agregado compuesto por dos fases (A y B) según diferentes planos de fractura. Modificado de Jones (1987).

Con el interés de predecir la posible formación de mixtos, y a partir de la integración de todos los datos obtenidos en el análisis petrográfico, se realiza una descripción de las relaciones existentes entre los diferentes minerales que componen las láminas delgadas estudiadas, ya que las partículas mixtas (en el supuesto caso de que las

### 3. METODOLOGÍA

haya) presentarán esas mismas relaciones. En la figura 14 se muestran diferentes relaciones minerales y su comportamiento en la etapa de liberación.

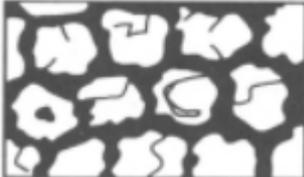
Bordes de grano rectilíneos		Liberación fácil
Bordes de grano sinuosos o lobulados sin interpenetración		Liberación sencilla
Fuerte micropenetración entre las fases		Liberación completa difícil
Fases finamente diseminadas		Liberación completa difícil
En coronas		Liberación completa difícil
Capas coliformes		Liberación bastante difícil
En planos de exfoliación o de macla		Liberación variable

Figura 14. Relaciones minerales y su comportamiento en la etapa de liberación mineral. Modificado de Craig y Vaughan (1994).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.3. GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL

Para el estudio geoquímico se han preparado un total de 143 muestras de las cuales 128 corresponden a sondeos y 10 a muestras tomadas en el interior de la mina. Por requerimientos del laboratorio, se necesitan muestras de 10 gramos en las que más del 95% ha de pasar por el tamiz N200. En los siguientes apartados se muestra el proceso de preparación de las muestras, así como los análisis químicos realizados y su posterior tratamiento estadístico.

##### 3.3.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

En este apartado se detalla la secuencia completa de preparación de las muestras para su posterior análisis geoquímico. El proceso comienza seleccionando el testigo de sondeo (figura 15A), el cual se corta a la mitad (mitad para seguir con la secuencia de preparación, mitad para guardar) (figuras 15B y 15C).



Figura 15. A) Testigo extraído en un sondeo. B) Cortadora. C) Testigo cortado a la mitad.

Se realiza una trituración primaria mediante una machacadora de mandíbulas, (fig. 16A) alcanzando granulometrías de 15 mm de tamaño máximo. Posteriormente, se procede al molido de la muestra mediante un molino de rodillos (fig. 16B) hasta obtener granulometrías del orden de 2 mm (fig. 16C). Para cumplir el requerimiento del tamaño de grano impuesto por el laboratorio, la muestra ha de ser micronizada. Para ello, se realiza una molienda mediante un molino de discos hasta obtener el molido final.

### 3. METODOLOGÍA

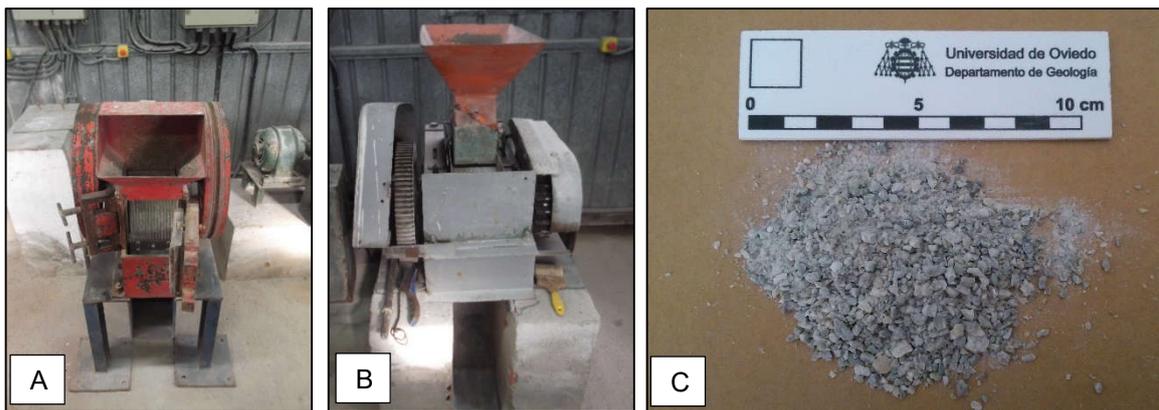


Figura 16. A) Machacadora de mandíbulas. B) Molino de rodillos. C) Muestra obtenida en el molino de rodillos.

Una vez que tenemos las muestras pulverizadas, en el caso de que la muestra sea heterogénea segmentada, donde grandes zonas tengan composiciones diferentes (dos litologías o dos categorías diferentes, o diferencias en la ley a simple vista), se ha de preparar una muestra compuesta (composite). Por ejemplo, en un sondeo se observa que la parte superior tiene más fluorita que la parte inferior, segmentando esa muestra en dos tramos (fig. 17A). Para que la muestra sea representativa, se prepara un composite ponderando la cantidad de cada tramo. Una vez conocida la cantidad que hemos de tomar de cada tramo, preparamos muestras de 10 gramos para su envío al laboratorio (fig. 17B).

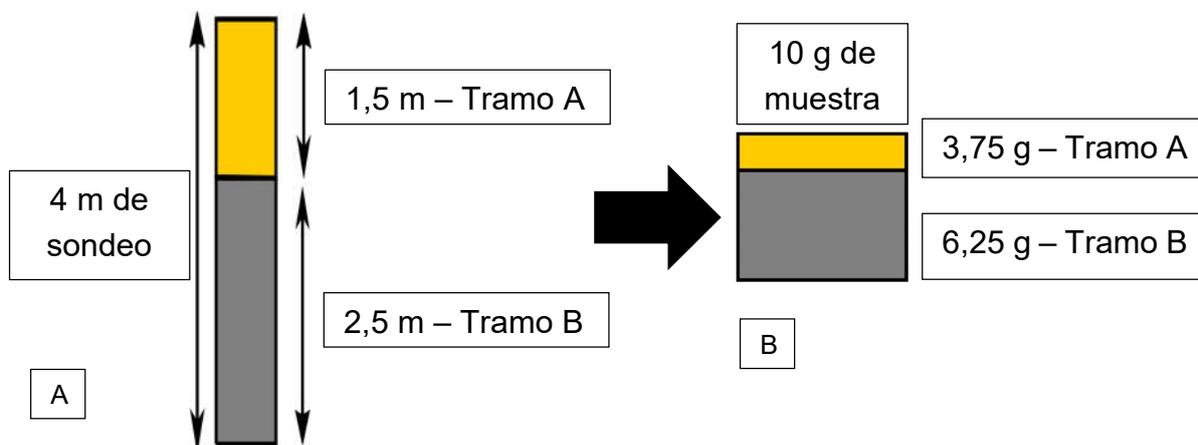


Figura 17. A) Esquema de un sondeo de 4 metros que presenta dos litologías diferenciadas. B) Esquema que representa la preparación de una bolsa de 10 gramos del composite preparado a partir del sondeo anterior.

#### 3.3.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS

Los análisis se realizaron en el laboratorio comercial ActLabs (Canadá). Los elementos analizados, así como las técnicas empleadas y su límite de detección se muestran en la tabla III. Todos los óxidos se analizan mediante la técnica *Fusion ICP*

### 3. METODOLOGÍA

(*lithium metaborate/tetraborate fusion – Inductively Coupled Plasma*), siendo el equipo utilizado un espectrómetro ICP Varian Vista 735. El flúor se analiza mediante la técnica FUS (*fusion*) – ISE (*ion selective electrode*). En este caso el ácido empleado para la digestión es ácido nítrico diluido.

Elemento	Límite de detección	Técnica analítica
F	0,01%	FUS-ISE
SiO <sub>2</sub>	0,01%	Fusion ICP
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%	Fusion ICP
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%	Fusion ICP
MnO	0,001%	Fusion ICP
MgO	0,01%	Fusion ICP
CaO	0,01%	Fusion ICP
Na <sub>2</sub> O	0,01%	Fusion ICP
K <sub>2</sub> O	0,01%	Fusion ICP
TiO <sub>2</sub>	0,001%	Fusion ICP
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01%	Fusion ICP
LOI		Fusion ICP

Tabla III. Elementos analizados, su límite de detección y la técnica de análisis empleada.

Para calcular el porcentaje en fluorita a partir de los análisis de flúor, se asume que todo este elemento pertenece a la fluorita, y según coeficientes estequiométricos y pesos moleculares, se calcula el coeficiente que relaciona el F y el CaF<sub>2</sub> (ecuación 4). Aplicando el coeficiente a los resultados obtenidos en el elemento flúor se calcula el porcentaje en fluorita. Posteriormente, este dato será contrastado con el valor en fluorita proporcionado por MINERSA, obtenido en los controles internos que lleva a cabo la empresa de forma rutinaria.

$$2F + Ca \rightarrow CaF_2$$
$$\frac{18,9984 \text{ g F}}{1 \text{ mol F}} \cdot \frac{2 \text{ mol F}}{1 \text{ mol CaF}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol CaF}_2}{78,0748 \text{ g CaF}_2} = 0,4867 \frac{\text{g F}}{\text{g CaF}_2} \quad (4)$$

#### 3.3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

A partir de los análisis realizados, se busca caracterizar e interpretar el yacimiento mineral. Por lo tanto, la etapa de análisis estadístico ha de realizarse de manera que los datos muestrales puedan extrapolarse a poblacionales. Este análisis consta de dos grandes etapas: estadística descriptiva e inferencia estadística.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.3.3.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva consiste en obtener resultados numéricos que resuman la información extraída al estudiar las muestras. Tras la representación de los datos gráficamente y en forma de tabla, se procede a la detección de valores atípicos o datos discordantes, siendo éstos valores de la variable estudiada que se diferencian mucho del resto de los valores. Es importante determinar si se trata de un error en la medida o si es un valor real, ya que pueden distorsionar los resultados. Por último, se procede a la determinación de los estadísticos muestrales según las cuatro categorías existentes en el yacimiento (capa no mineralizada, capa, detrítico y filón). En este trabajo se ha utilizado el software *IBM SPSS Statistics* para determinar los estadísticos muestrales señalados en la figura 18.

-Histogramas de frecuencias. La representación gráfica de los datos se realiza mediante histogramas de frecuencias, que permiten observar fácilmente las tres propiedades posteriormente estudiadas (posición, dispersión y forma). Puesto que los datos son numerosos, estos se presentarán ordenados en clases.

- Estadísticos de posición. Los estadísticos de tendencia central miden en torno a que valores se distribuyen los datos y como se reparten en la distribución. En este trabajo se han utilizado los siguientes estadísticos de posición:



Figura 18. Estadísticos descriptivos determinados en los elementos analizados.

-Media aritmética ( $\bar{x}$ ). Es la suma de los valores observados en la muestra dividida por el tamaño muestral.

-Mediana ( $Me$ ). Es el valor de la variable que, una vez ordenados todos los valores de la muestra de menor a mayor, deja el mismo número de valores tanto por encima como por debajo de él.

### 3. METODOLOGÍA

-Moda ( $M_o$ ). Es el valor de la variable más frecuente.

-Estadísticos de dispersión. Informan sobre la heterogeneidad de los datos. En este trabajo se han utilizado los siguientes estadísticos de dispersión.

-Varianza y desviación típica ( $s^2$  y  $S.D.$ ). La varianza se define como el promedio del cuadrado de las desviaciones de los valores de la muestra respecto a la media muestral. Puesto que tiene las unidades de la variable al cuadrado, para facilitar su interpretación en este trabajo solo se refleja la desviación típica, siendo esta la raíz cuadrada positiva de la varianza. Este estadístico informa sobre la dispersión de los datos en torno a la media.

-Coeficiente de variación ( $cv$ ). Puesto que la desviación típica tiene unidades, para facilitar su interpretación y comparación, en este trabajo se utiliza el coeficiente de variación, ya que es adimensional. El coeficiente de variación se define como el cociente entre la desviación típica y el valor absoluto de la media muestral. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la dispersión de los datos y por lo tanto, menos representativa será la media.

-Recorrido intercuartílico ( $RI$ ). Se define como la diferencia entre el tercer y el primer cuartil. Este estadístico informa sobre la dispersión de los datos en torno a la mediana.

-Estadísticos de forma. Permiten determinar aspectos de la forma de la distribución de la muestra, como la simetría y el apuntamiento. Los estadísticos utilizados en este trabajo son los siguientes.

-Coeficiente de Asimetría de Fisher ( $g_1$ ). Definido en la ecuación 5, este parámetro informa sobre el grado de simetría que presentan los valores respecto a la media muestral. Si se obtiene un valor igual a cero, significa que la distribución es simétrica, si son negativos es asimétrica a la izquierda y si es positivo es asimétrica a la derecha. Así, cuanto más nos alejemos del valor cero más asimétrica será la distribución.

$$g_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^3 n_i}{ns^3} \quad (5)$$

-Coeficiente de Apuntamiento o Curtosis ( $g_2$ ). Definido en la ecuación 6, informa sobre el grado de apuntamiento de los valores de la muestra respecto a una distribución normal de referencia. Si se obtiene el valor cero, significa que la distribución tiene un apuntamiento normal (distribución mesocúrtica); si el valor es negativo significa que la distribución tiene menos apuntamiento de lo normal (platicúrtica) y si es positivo significa que la distribución tiene más apuntamiento de lo normal (leptocúrtica).

### 3. METODOLOGÍA

$$g_2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4 n_i}{ns^4} - 3 \quad (6)$$

Los estadísticos de forma tienen mucha importancia en la etapa de inferencia estadística, ya que muchas de las pruebas estadísticas solo pueden aplicarse a distribuciones normales. Estas se caracterizan por ser simétricas y mesocúrticas. Generalmente, y siempre que el histograma lo apoye, se acepta la hipótesis de normalidad cuando el valor de  $g$  esté dentro del intervalo  $[-2, 2]$ .

-Gráficos de presentación de los resultados. Una vez realizada toda la fase de estudio descriptivo de las variables, se utiliza el diagrama de puntos como gráfico para presentar los resultados. Se representa, en un eje de coordenadas cartesianas, en el eje de abscisas las categorías estudiadas (no mineralizado, detrítico, capa y filón), y en el eje de ordenadas, el valor medio obtenido en la variable estudiada. Las barras que acompañan a los puntos medios pueden representar la desviación estándar o el rango de valores que toma dicha variable, mediante la representación de los valores mínimo y máximo.

#### 3.3.3.2. Inferencia estadística

Una vez analizado el comportamiento de cada variable, en esta etapa se estudia cómo interactúan y qué relación tienen las variables entre sí, en el caso de que exista tal relación. En este trabajo se estudian únicamente relaciones lineales simples, es decir, se consideran simultáneamente los pares de valores generados al estudiar dos variables, y siempre considerando una relación lineal entre ambos. Para estudiar las posibles relaciones entre variables bidimensionales, se recurre conjuntamente al uso de la matriz de correlación y diagramas de dispersión.

-Matriz de correlación. Consiste en una tabla de doble entrada en la que se representa, para cada par de variables, el coeficiente de correlación de Pearson y el nivel de significación de este coeficiente.

-Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Cuantifica el grado de relación lineal existente entre dos variables, tomando valores entre  $-1$  y  $1$ . El valor  $1$  indica una relación lineal perfecta positiva,  $-1$  relación lineal perfecta negativa, mientras que el valor  $0$  indica que no existe relación lineal (sin que ello implique que no exista ninguna relación).

-Nivel de significación ( $p$ -valor): permite cuantificar la bondad de ajuste del coeficiente de correlación, ya que nos permite contrastar la hipótesis nula de que el valor poblacional del coeficiente es cero. En este trabajo se toma como nivel de significación  $0,05$ , rechazando la hipótesis nula de independencia (y por lo tanto,

### 3. METODOLOGÍA

concluyendo que existe relación lineal significativa), cuando este parámetro toma valores inferiores a 0,05.

-Diagramas de dispersión. En estos diagramas se representa, en un eje de coordenadas cartesianas, los valores  $(x_i, y_i)$  de la variable bidimensional, obteniendo así una nube de puntos. La morfología que adopta la gráfica nos informa sobre el tipo de relación entre las dos variables (fig. 19).

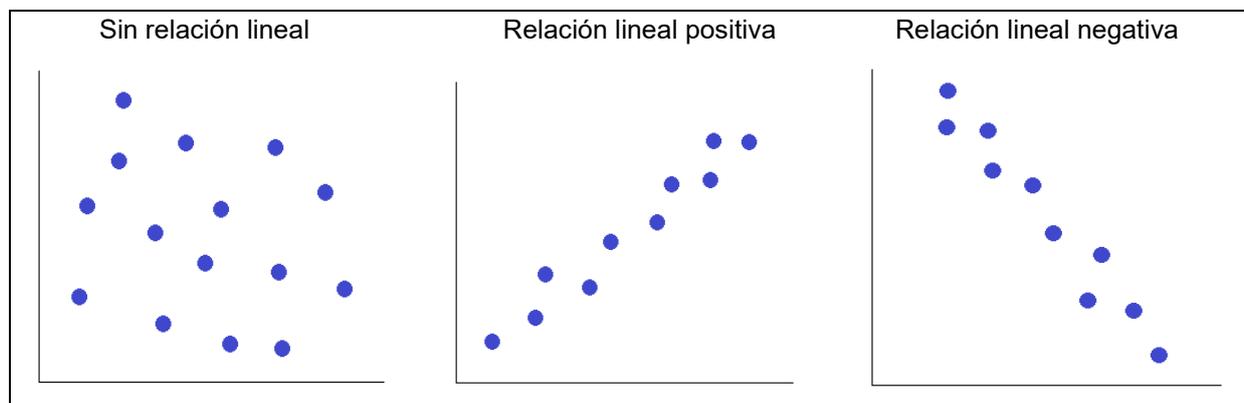


Figura 19. Algunos tipos de relaciones según la morfología de la nube de puntos obtenida en los diagramas de dispersión.

#### 3.3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS

Una vez realizado el tratamiento estadístico, se realiza la representación espacial de los elementos, utilizando el software *Surfer*. En esta etapa, se unifican los datos geográficos y geoquímicos, mediante la elaboración de mapas que reflejan la distribución espacial de los elementos analizados. En los mapas, la información ofrecida no se distribuye según categorías, sino a nivel de yacimiento. Puede ocurrir que en un mismo punto geográfico existan varios puntos de información, debido a que de un mismo sondeo se hayan preparado muestras a diferentes profundidades. En estos casos, para la elaboración de los mapas se ha utilizado la información obtenida a mayor profundidad.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. PETROGRAFÍA

El yacimiento presenta una mineralogía muy sencilla; está constituido principalmente por fluorita, cuarzo y calcita con cantidades menores de opacos. En el anexo I se muestran los esquemas de las muestras estudiadas, así como los resultados obtenidos en su caracterización mineral y textural.

#### 4.1.1. COMPONENTES PRINCIPALES

Como componentes principales se incluyen fluorita, cuarzo y calcita, ya que aparecen en todas las muestras, y en general, en un porcentaje superior al 5%. Según su textura, que condicionará su comportamiento en la etapa de liberación mineral en la planta de tratamiento, se realiza una diferenciación en tipologías, distinguiéndose en total tres tipos de fluorita, seis de cuarzo y tres de calcita, tal y como se detalla a continuación (fig. 20). En lo referente a los tamaños de grano, se utiliza el feret como parámetro descriptivo. En las microfotografías, LPP se refiere a luz polarizada plana y LPA a luz polarizada analizada.

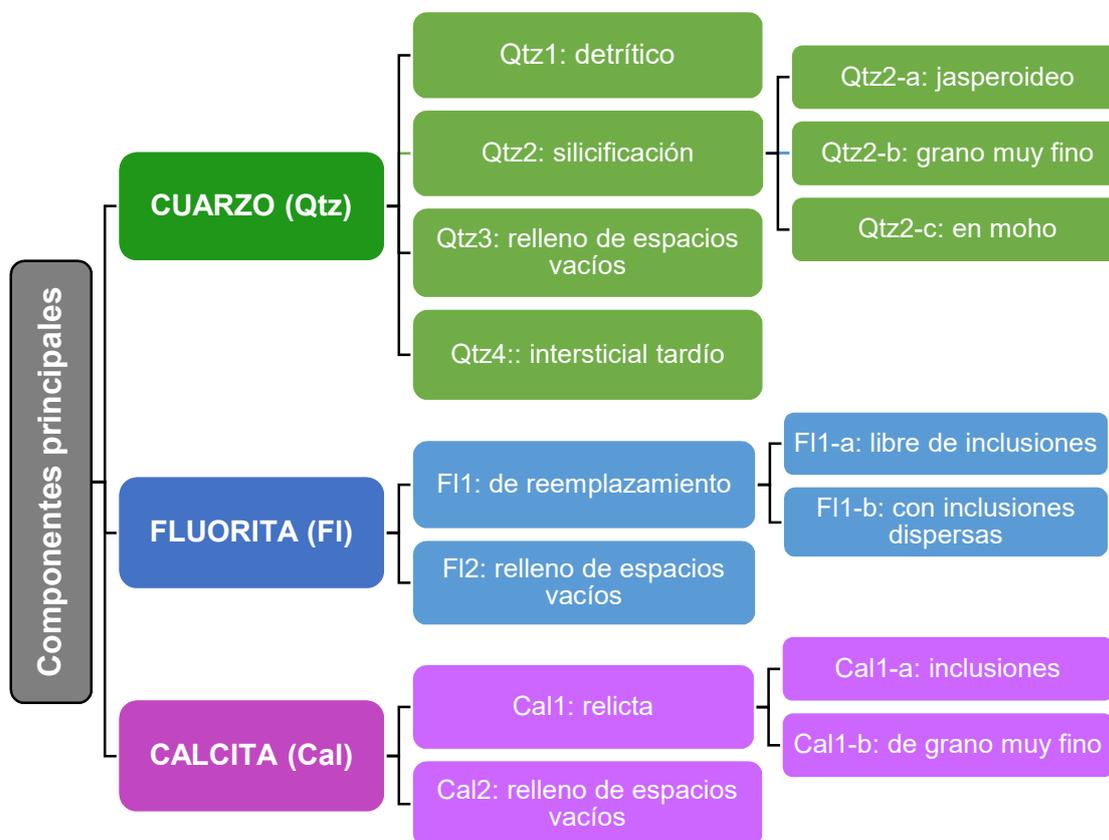


Figura 20. Tipos de minerales (componentes principales) identificados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.1.1. Cuarzo

Se diferencian los siguientes tipos de cuarzo: cuarzo detrítico (Qtz1), cuarzo de silicificación (Qtz2), del que a su vez se diferencian tres subtipos (Qtz2-a a Qtz2-c), cuarzo de relleno de espacios vacíos (Qtz3) y cuarzo intersticial tardío (Qtz4). En la tabla IV se muestra un resumen de las características de los granos de cuarzo en cada tipología.

-Cuarzo detrítico (Cuarzo tipo 1, Qtz1). Granos de cuarzo detrítico constituyentes del protolito. Aparece en la categoría capa y en detrítico. En la categoría capa su presencia es escasa; puede aparecer como granos individuales esporádicos constituyentes primarios de la brecha calcárea (fig. 21) o como una asociación con la fluorita tipo 1 y opacos (fig. 22). Cuando se presenta como granos individuales (fig. 21) el tamaño medio es de  $0,19 \pm 0,15$  mm. En el caso de la asociación con fluorita tipo 1 (fig. 22), el tamaño medio es de  $0,26 \pm 0,15$  mm. La presencia de esta asociación en la categoría capa puede deberse a niveles detríticos de escasa entidad dentro del nivel calcáreo que constituía el protolito.

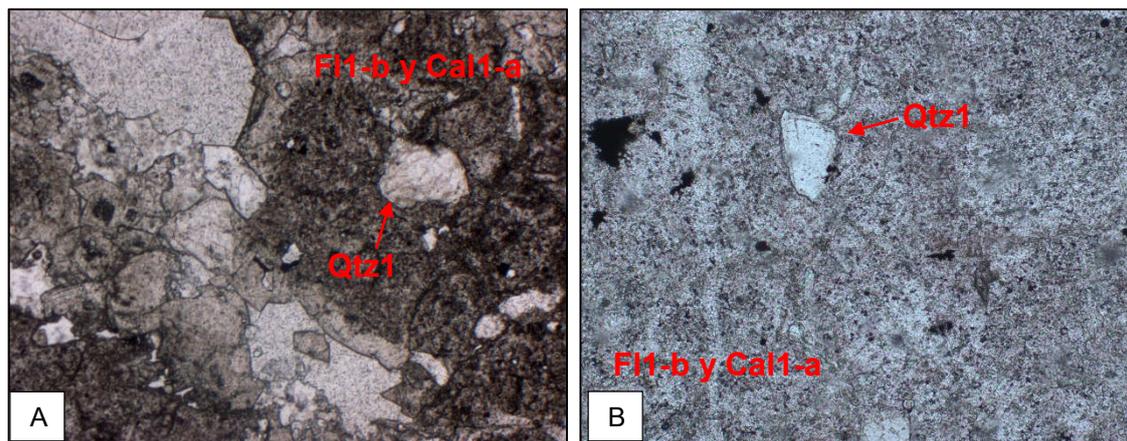


Figura 21. Granos individuales de Qtz1 en la categoría capa. LPP. A) Ancho de la imagen 2,7 mm. B) Ancho de la imagen 1,25 mm.

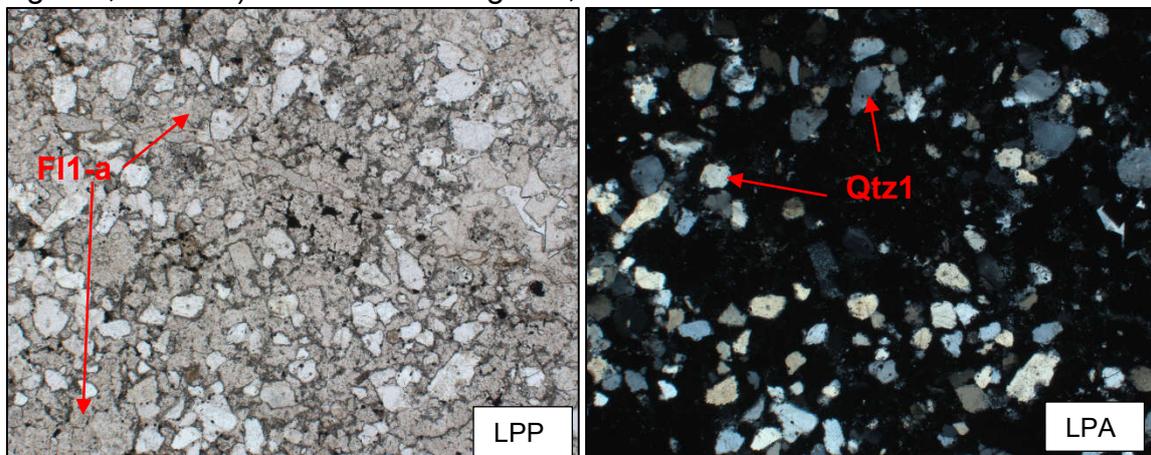


Figura 22. Fluorita tipo 1-a (FI1-a) como cemento de Qtz1, debido al remplazamiento de la matriz carbonatada en la categoría capa. Ancho de la imagen 5 mm.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

	Categoría	Forma de presentación	Fración sup.	Feret (mm)	Bordes	Morfología	Asociado con
Qtz1	Capa	Clastos individuales	< 1%	x = 0,19 ± 0,15 Min = 0,03 Max = 0,64	Rectos, sinuosos, lobulados	A	F11-b y Cal-1a
		Clastos en asociación Qtz1 & F11-a	4% 23%*	x = 0,26 ± 0,15 Min = 0,01 Max = 1,30	Rectos, sinuosos, lobulados	A	F11-a y OP F12
	Detritico	Clastos en asociación Qtz1 & F11-a	59%*	x = 0,13 ± 0,05 Min = 0,04 Max = 0,31	Rectos, sinuosos, lobulados	A	F11-a y OP F12
Qtz2-a	Capa no mineralizada	Jasperoideo	45%	Microcristalino, bimodal	Lobulados, interdigitados	Irregular	Qtz2 Qtz3 F11-a
Qtz2-b	Capa no mineralizada	Grano muy fino	2%	x = 0,19 ± 0,16 Min = 0,06 Max = 0,90	Lobulados, interdigitados	C	Qtz2 Cal1-a
Qtz2-c	Capa no mineralizada	En moho	2%	Radio min. = 0,02 Radio max. = 0,20	Sinuosos, lobulados	-	Qtz2
Qtz3	Capa no mineralizada	Relleno de espacios vacíos	46%	x = 0,19 ± 0,17 Min = 0,02 Max = 1,23	Rectos sinuosos	A	Qtz2 F11-a
Qtz4	Capa	Intersticial tardío	14%	x = 0,04 ± 0,05 Distribución bimodal: x = 0,03 ± 0,01 x = 0,25 ± 0,10	Sinuosos	A	F11-b

Tabla IV. Tabla resumen de las características del cuarzo en cada tipología. En fracción superficial se indica el porcentaje que ocupa dentro de la muestra estudiada; el \* se refiere a la fracción superficial que ocupa dentro de la asociación Qtz1-F11-a. En morfología, la letra hace referencia a los campos definidos mediante el factor de indentación (A: minerales con pocas irregularidades y equidimensionales o ligeramente elongados; C: minerales irregulares).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la categoría detrítico (fig. 23), aparece siempre asociado a la fluorita tipo 1 y a opacos; el tamaño medio es de  $0,13 \pm 0,05$  mm. Los granos de cuarzo, que ocupan el 59% de la fracción superficial de esta asociación, se encuentran inmersos en un cemento compuesto por fluorita (37%) y opacos (4%).

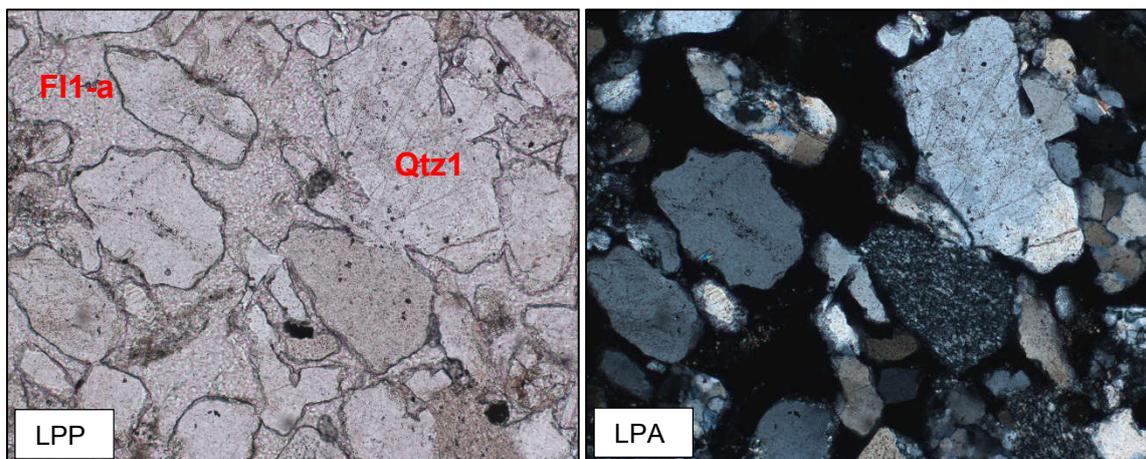


Figura 23. Asociación fluorita tipo 1-a (F11-a), cuarzo tipo 1 (Qtz1) y opacos de la categoría detrítico. Ancho de la imagen 1,25 mm.

Los bordes de grano, independientemente de la categoría en la que aparezcan, varían desde rectos, en el caso de partículas angulosas; sinuosos, en la mayoría de los casos; hasta bastante lobulados, en el caso de las partículas en las que la fluorita genera golfos de corrosión. Respecto a su morfología, no presentan excesivas irregularidades y son ligeramente elongados (campo A de la gráfica circularidad-*FI*).

A efectos de análisis modal y textural, en la categoría Qtz1 se incluyen, además de los granos de cuarzo detrítico, los fragmentos de roca siliciclásticos y los minerales que aparecen en el subapartado traza (moscovita, turmalina, plagioclasa, feldespato potásico, rutilo y turmalina), dado que todos ellos forman parte del protolito sedimentario.

-Cuarzo de silicificación (Cuarzo tipo 2, Qtz2). En esta tipología se agrupan los diferentes tipos de cuarzo que son producto de la silicificación de la roca original. Aparecen únicamente en la muestra de la categoría no mineralizado, ocupando el 49% de la lámina. Se diferencian tres subtipos:

-Cuarzo jasperoideo (Cuarzo tipo 2-a, Qtz2-a). Cuarzo microcristalino, si bien se observa una distribución de tamaños bimodal (fig. 24A). Ocupa el 45% de la lámina estudiada. Se presenta anhedral y con bordes de grano lobulados e interdigitados (fig. 24B). Textura *jigsaw* (Lovering, 1972) o textura en puzzle (Demoustier et al., 1998). Según Lovering, la textura *jigsaw* es una de las microtexturas más comunes en jasperoides.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

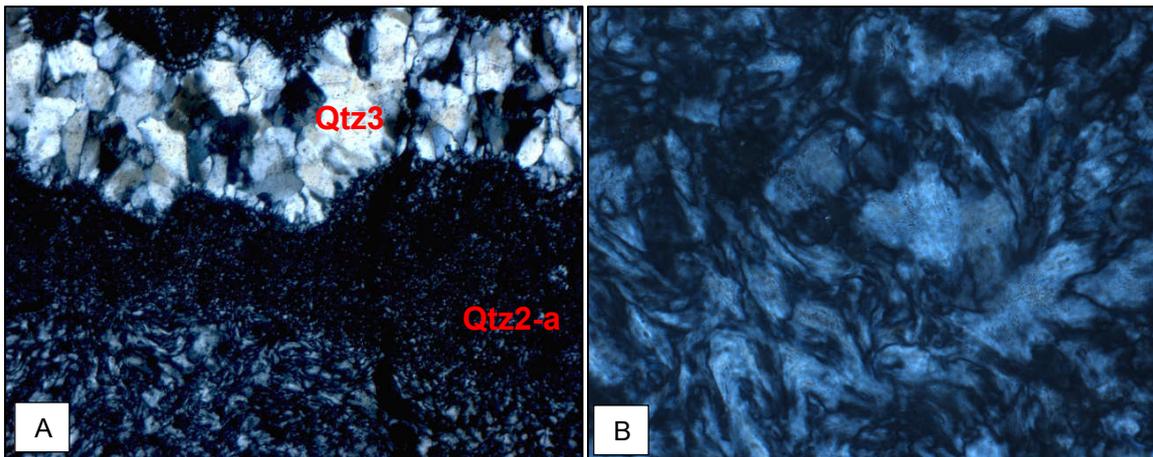


Figura 24. A) Distribución bimodal de Qtz2-a y comparativa con Qtz3. LPA. Ancho de la imagen 1,07 mm. B) Textura *jigsaw* de Qtz2-a. LPA. Ancho de la imagen 321  $\mu\text{m}$ .

-Cuarzo de grano muy fino (Cuarzo tipo 2-b, Qtz2-b). Cristales generalmente alotriomórficos, su presencia es escasa (1% en la lámina delgada estudiada). Presenta abundantes inclusiones de calcita tipo 1-a (calcita relictas), debido a que la silicificación no ha sido completa (fig. 25). El tamaño medio es de  $0,19 \pm 0,16$  mm, con una variación entre 0,06 y 1 mm. Los bordes de grano son generalmente bastante lobulados, clasificándose como minerales irregulares (campo C de la gráfica circularidad-*F*).

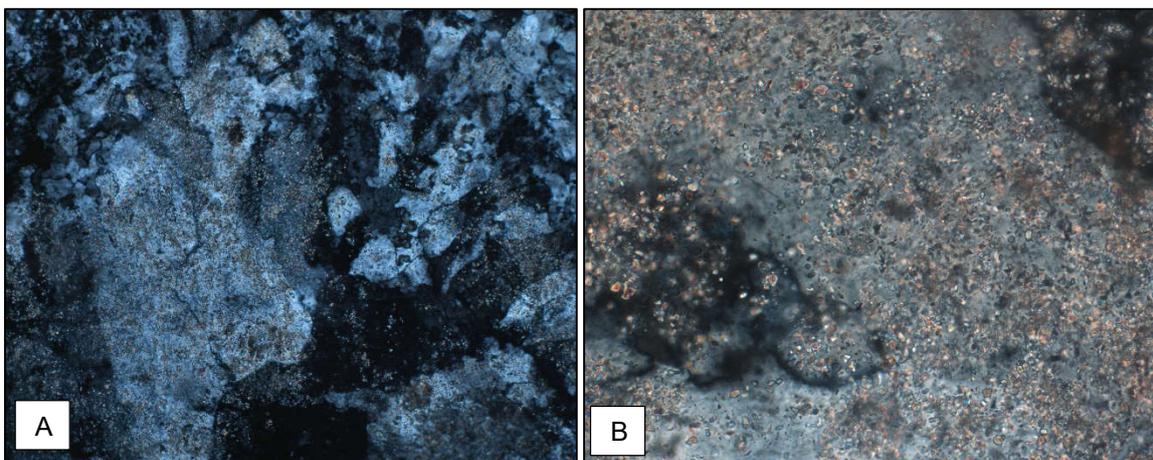


Figura 25. Qtz2-b plagado de inclusiones de calcita. A) LPA. Ancho de la imagen 1,25 mm. B) LPA. Ancho de la imagen 312  $\mu\text{m}$ .

-Cuarzo en moho (Cuarzo tipo 2-c, Qtz2-c). La textura coliforme (Rogers, 1917, en Dong et al, 1995) se caracteriza por la presencia de bandas de granulometría muy fina, con formas esféricas o botroidales (Demoustier et al., 1998). Dentro de esta textura, Adams (1920) define la textura en moho como aquella en la que se observan agregados de globulillos diminutos, rodeados de bandas

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

concéntricas llenas de impurezas y/o inclusiones de diferente color y/o composición. Ocupa el 1% de la muestra estudiada. Se observa como a partir de un núcleo central, el cuarzo crece en bandas concéntricas; en algunos casos el centro de la esfera está ocupado por un opaco. En el crecimiento esferoidal del cuarzo, aparecen también bandas plagadas de opacos. Se presenta la problemática de cómo cuantificar el tamaño de grano de este cuarzo, debido a que puede presentarse como esferas individualizadas (fig. 26) o como esferas mayores que gradan a textura coloforme (fig. 27). Por esta razón, y para obtener un rango de tamaños, se mide el radio de las esferas más pequeñas (aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ ), y el radio de la mayor esfera cuya textura pasa coloforme (224  $\mu\text{m}$ ).

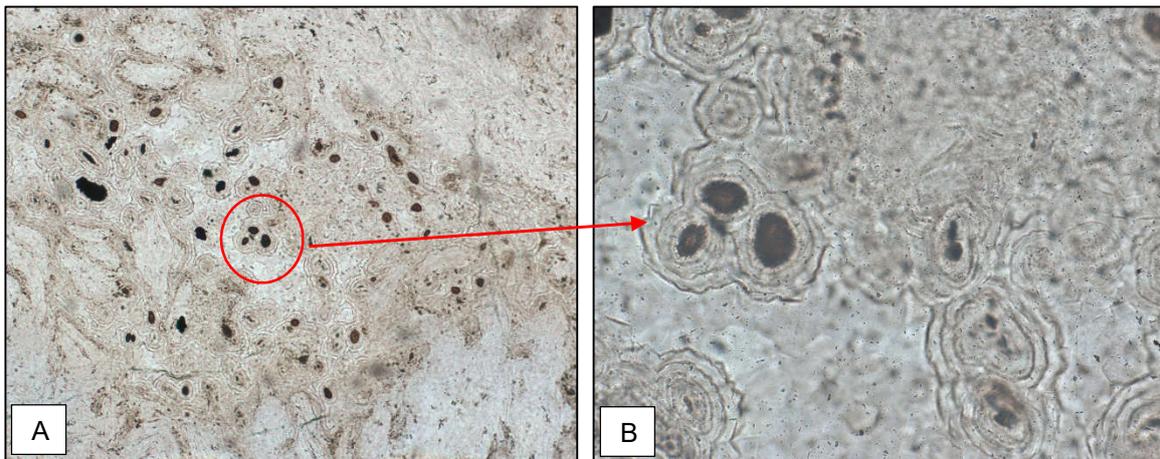


Figura 26. A) Cuarzos en moho, los de menor tamaño encontrados. LPP. Ancho de la imagen 1,25 mm. B) Detalle de la imagen A. Ancho de la imagen 312  $\mu\text{m}$

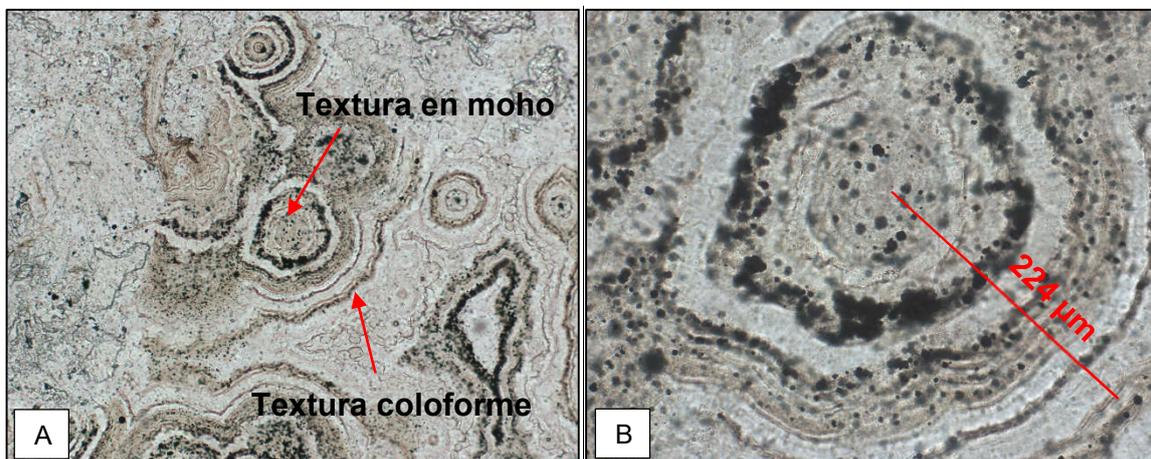


Figura 27. A) Cuarzo en moho que pasa a coloforme, el de mayor tamaño, en el que se observa como en las bandas de crecimiento hay acumulación de opacos y/o impurezas no identificadas en microscopía de transmisión. LPA. Ancho de la imagen 1,25 mm. B) Detalle de la imagen A. Ancho de la imagen 312  $\mu\text{m}$ .

-Cuarzo de relleno de espacios vacíos (Cuarto tipo 3, Qtz3). Cuarzo de relleno de espacios vacíos, aparece únicamente en la lámina delgada de no mineralizado,

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

con un porcentaje del 46%. El tamaño medio de grano es de  $0,19 \pm 0,17$  mm. Presenta textura en cresta (Dong et al., 1995) o en peine (Demoustier et al., 1998). Los cristales de cuarzo, de hábito prismático, crecen de subparalelos a paralelos entre sí y orientados perpendicularmente a la cavidad que están rellenando, utilizando generalmente como sustrato cristalino para su crecimiento los agregados de Qtz2-a. Puesto que crecen en un espacio libre, los cristales se desarrollan con caras cristalinas bien definidas, aumentando su tamaño según se va reduciendo el espacio vacío, hacia el centro de la cavidad (fig. 28 y 29). La mayoría de los cristales presentan valores de diámetro feret entre 0,02 y 0,16 mm. Los bordes de los cristales son generalmente rectos y sinuosos, aunque pueden aparecer ocasionalmente bordes interdigitados. Respecto a su morfología, no presentan excesivas irregularidades y son ligeramente elongados (campo A de la gráfica circularidad-*F1*).

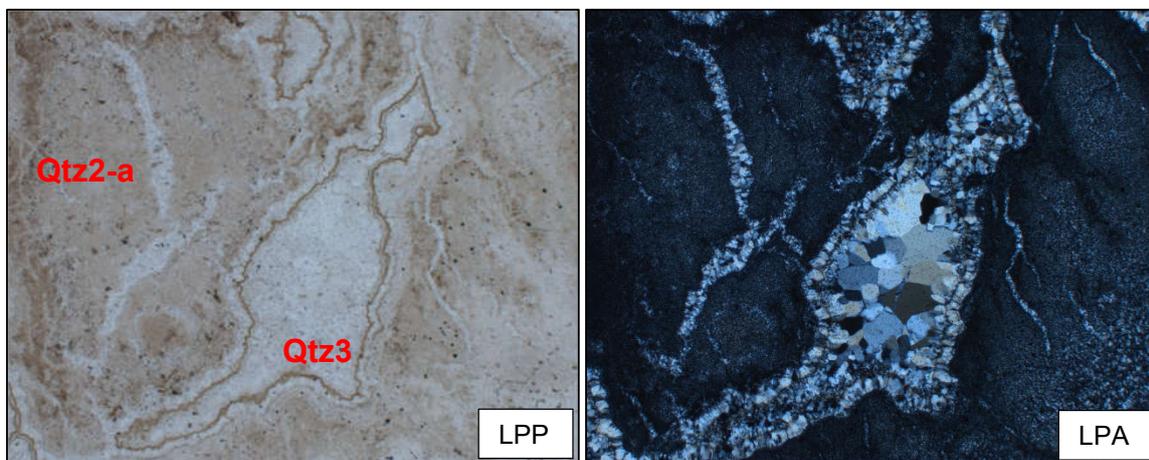


Figura 28. Qtz3 sobre Qtz2-a. Ancho de la imagen 5 mm

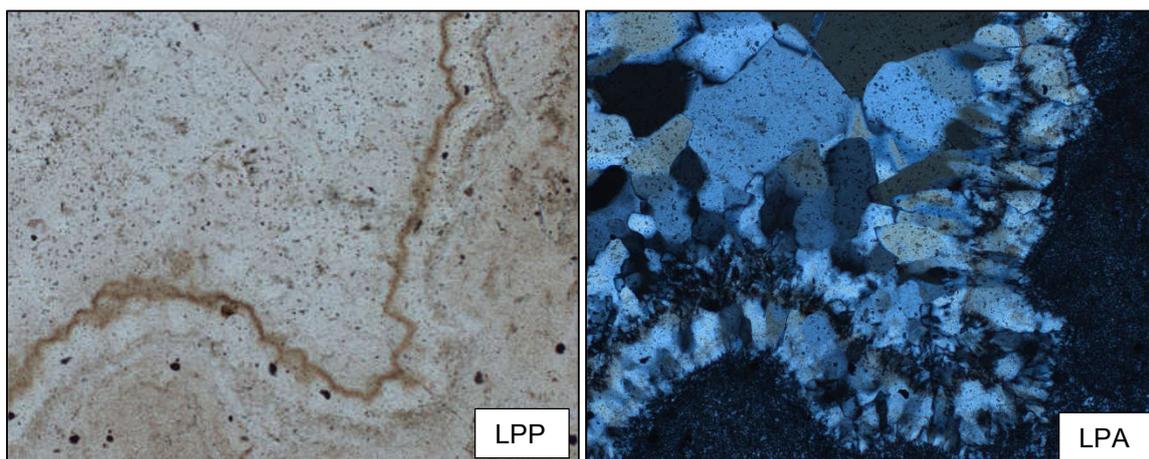


Figura 29. Detalle de la figura 28, donde se observa el crecimiento perpendicular a la cavidad y el aumento del tamaño de grano hacia el centro, así como la acumulación de impurezas en las zonas externas. Ancho de la imagen 1,25 mm

-Cuarzo hidrotermal tardío (Cuarzo tipo 4, Qtz4). Cuarzo hidrotermal tardío, aparece únicamente en una lámina delgada de la categoría capa, ocupando el 14%

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de la fracción superficial. Se presenta como agregados de cuarzo policristalino que rellenan los intersticios existentes entre los cristales idiomórficos a subidiomórficos de la fluorita tipo 1-b (fig. 30). El tamaño medio es de  $0,04 \pm 0,05$  mm; presentan una distribución bimodal muy marcada, con muchos cristales pequeños (tamaño medio  $0,03 \pm 0,01$  mm), acompañados de algunos cristales grandes (tamaño medio  $0,25 \pm 0,10$  mm). Los bordes de grano son, generalmente, sinuosos, y en menor medida, ligeramente lobulados.

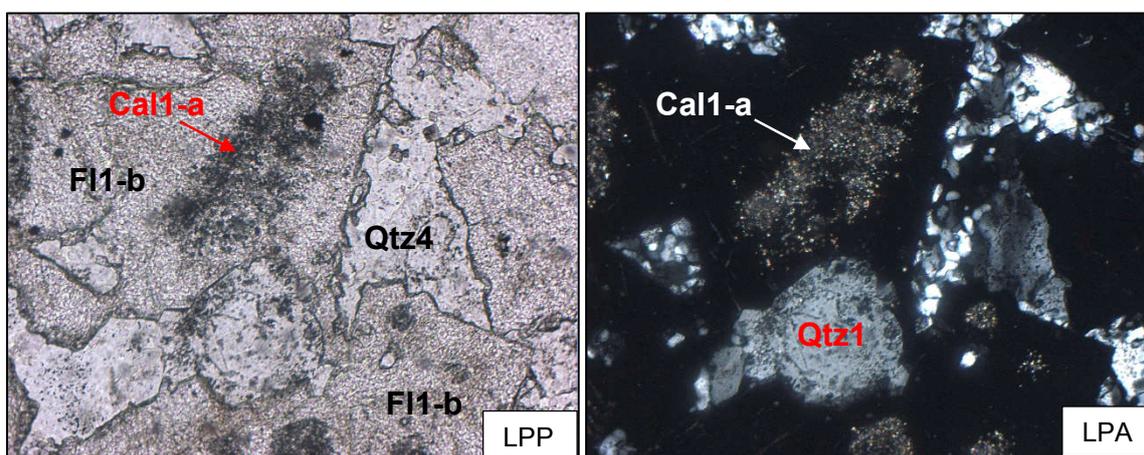


Figura 30. Cuarzo tipo 4 (Qtz4) dispuesto en los intersticios de fluorita tipo 1-b. También aparece un clasto individual de Qtz1, y calcita tipo 1-a como inclusiones en la fluorita tipo 1-b. Ancho de la imagen 1,07 mm.

##### 4.1.1.2. Fluorita

Pensando en el posible comportamiento durante el proceso de liberación mineral, se diferencian las siguientes categorías: fluorita de reemplazamiento (FI1), en la que se diferencian dos subtipos (FI1-a y FI1-b) y fluorita de relleno de espacios vacíos (FI2). En la tabla V se muestra un resumen de las características de las tipologías de fluorita definidas.

-Fluorita de reemplazamiento (Fluorita tipo 1, FI1). En esta tipología se incluye la fluorita que claramente se debe a un proceso de reemplazamiento del material preexistente en la roca. Esta división no se realiza por motivos genéticos, sino porque las texturas debidas a reemplazamiento suelen presentar mayores problemas de liberación mineral en la planta de tratamiento que las texturas de relleno de espacios vacíos. Se definen dos subtipos: fluorita tipo 1-a (sin inclusiones) y fluorita tipo 1-b (con inclusiones de calcita tipo 1-a diseminadas).

-Fluorita de reemplazamiento libre de inclusiones (Fluorita tipo 1-a, FI1-a). Pese a ser una fluorita de reemplazamiento, generalmente no presenta inclusiones del

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

	Categoría	Forma de presentación	Fracción sup.	Feret (mm)	Bordes	Morfología	Asociado con
F11-a	Capa no mineralizada	Cristales subidiomórficos, muy fracturados. Asociada a la silificación	4%	Min = 0,17	Rectos Sinuosos Lobulados	A	Qtz2-a Qtz3
	Capa	Cemento en asociación Qtz1 & F11-a	69%*	-	Función de Qtz1	-	Qtz1 y OP Cal2
	Detritico	Cemento en asociación Qtz1 & F11-a	37%*	-	Función de Qtz1	-	Qtz1 y OP
F11-b	Capa	Asociaciones de cristales con inclusiones de calcita tipo 1-a finamente diseminadas	29%**	$x = 0,47 \pm 0,13$	Rectos Sinuosos Lobulados	-	Qtz1 Qtz4 Cal1-a
		Cristales individuales con inclusiones de calcita tipo 1-a localizadas en el núcleo.	44% 57%***	$x = 0,39 \pm 0,27$ Min = 0,03 Max = 1,40	Rectos Sinuosos Lobulados	A	Qtz1 Qtz4 Cal1-a
F12	Capa Detritico	Relleno de espacios vacíos, idiomórfica de grano grueso	Variable	$x = 1,28 \pm 0,73$ Min = 0,37 Max = 3,11	Rectos Sinuosos	A	F11-a & Qtz1 Cal2
Cal1-a	Capa no mineralizada y capa	Inclusiones criptocristalinas	22%***	-	-	-	Qtz2b F11-b
Cal1-b	Capa no mineralizada	Grano fino, en "parche"	2%	$x = 0,17 \pm 0,10$ Min = Max =	Rectos Sinuosos	A	Qtz2
Cal2	Capa	Relleno de espacios vacíos	31%	$x = 1,42 \pm 2$ mm Min = 0,01 Max = 18	Rectos Sinuosos	A	F11-a & Qtz1 F12 OP

Tabla V. Tabla resumen de las características de la fluorita y calcita en cada tipología. En fracción superficial se indica el porcentaje que ocupa dentro de la muestra estudiada; el \* se refiere a la fracción superficial que ocupa dentro de la asociación Qtz1-F11-a; \*\* indica el porcentaje de F11-b + Cal1a; \*\*\* indica el porcentaje de Cal1-a como núcleos en F11b. En morfología, la letra hace referencia a los campos definidos mediante el factor de indentación (A: minerales con pocas irregularidades y equidimensionales o ligeramente elongados; C: minerales irregulares).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

mineral que reemplaza. Aparece asociada al cuarzo de silicificación previo o cogenético al depósito de fluorita de la categoría no mineralizado o reemplazando a la matriz carbonatada de la categoría detrítico.

Cuando aparece asociada al cuarzo de silicificación en la categoría no mineralizado, se presenta como una asociación de cristales subidiomórficos, ocupando el 4% de la superficie de la muestra. La fluorita se encuentra muy fracturada (fig. 31A), fracturación posiblemente favorecida durante la fabricación de la lámina y por la exfoliación octaédrica perfecta del mineral. Se sitúa alrededor de espacios vacíos; otros minerales que se disponen en las inmediaciones de dichos espacios vacíos presentan la misma fracturación (fig. 31B).

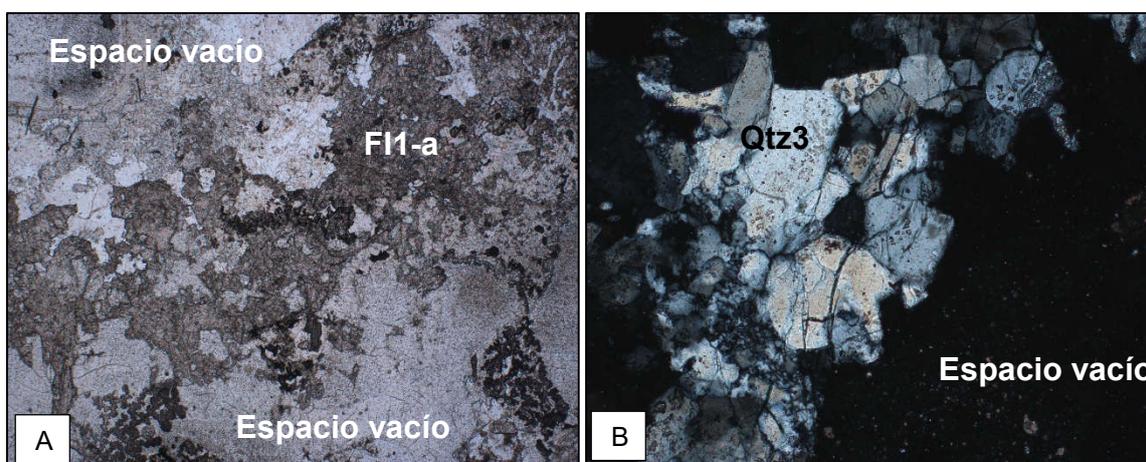


Figura 31. A) F11-a entre dos huecos existentes en la lámina delgada de la categoría no mineralizado. LPP. Ancho de la imagen 5 mm. B) Fracturación del cuarzo cercano a un hueco de la lámina delgada de la categoría no mineralizado. LPA. Ancho de la imagen 1,25 mm.

Debido al carácter isótropo de la fluorita y a su fracturación, resulta difícil cuantificar el tamaño de grano original del cristal, no pudiendo determinar con seguridad si las trazas visibles delimitan un único cristal o bien fragmentos de exfoliación y/o fractura del mismo cristal. Sin embargo, y puesto que la fluorita es el mineral explotable y dicha fracturación facilita la liberación, se mide el tamaño mínimo de los cristales individualizados, independientemente de si son cristales únicos o fragmentos de otro cristal mayor, siendo este de 0,17mm. La fluorita tipo 1-a aparece relacionada con el cuarzo de silicificación Qtz2-a y Qtz3 (fig. 32 y 33). Los contactos F11-a con Qtz2-a son, en general, bastante irregulares, debido tanto a la textura del cuarzo (*jigsaw*) como a la corrosión que se produce en ocasiones en el contacto entre las dos tipologías; en consecuencia, en el proceso de molienda en la planta de tratamiento podrán generarse partículas mixtas en los contactos entre ambas fases. Los contactos F11-a con Qtz3, varían desde rectos (cuando la fluorita desarrolla caras cristalinas), hasta muy lobulados (si no se produce dicho desarrollo) (fig. 34).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

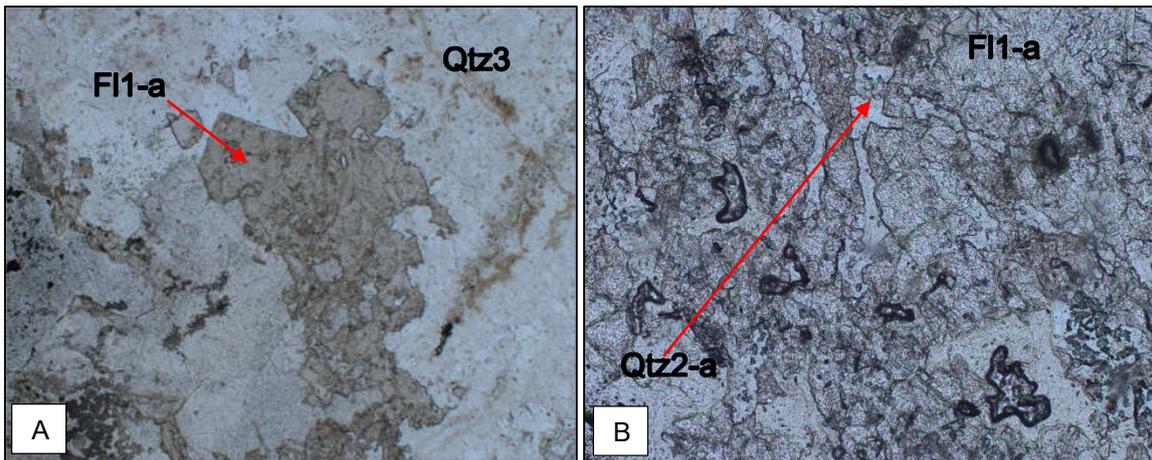


Figura 32. A) Fl1-a asociado a Qtz3. LPP. Ancho de la imagen 5 mm. B) Fl1-a asociado a Qtz2-a. LPP. Ancho de la imagen 1,25 mm.

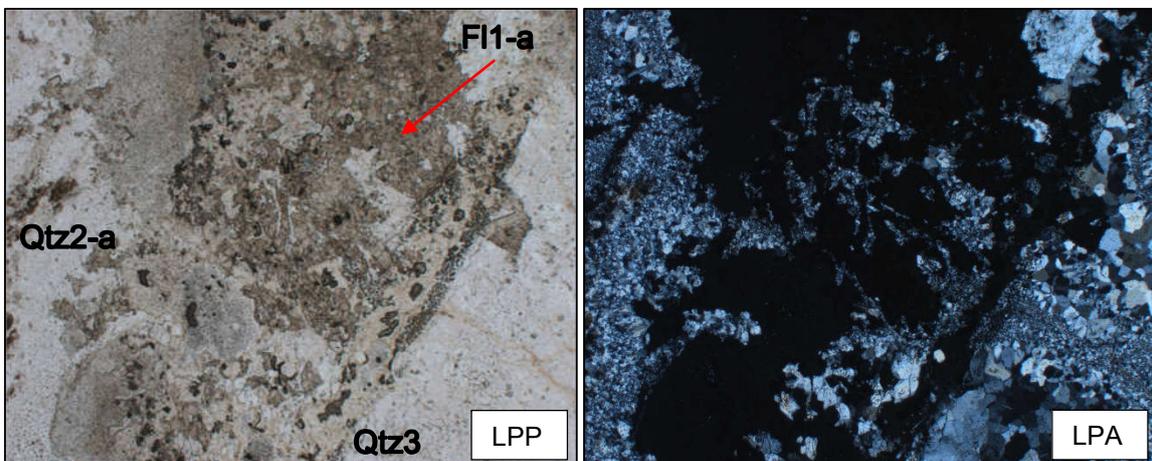


Figura 33. Fluorita asociada a Qtz2-a y Qtz3. Ancho de la imagen 5 mm.

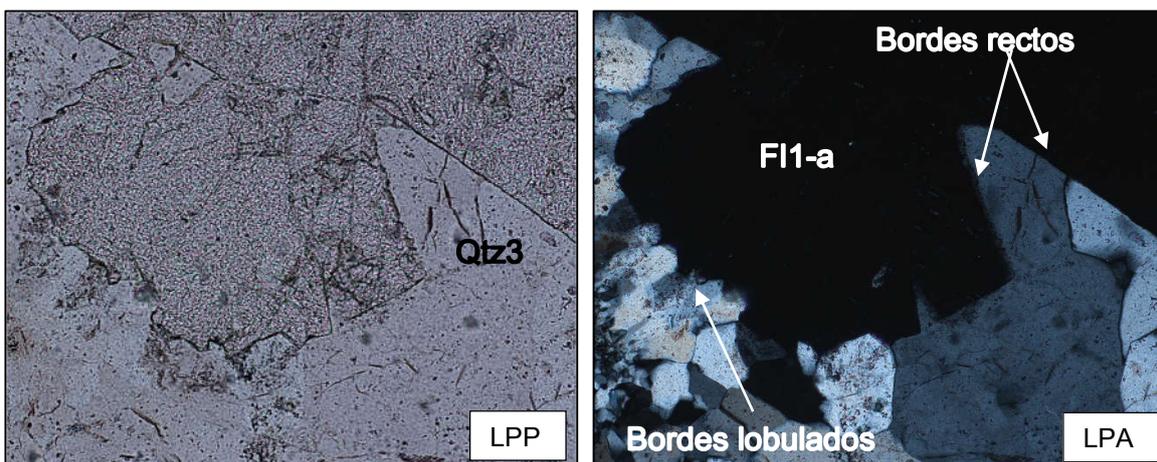


Figura 34. Contacto entre Fl1-a y Qtz3. Ancho de la imagen 1,25 mm.

Puesto que no se observan bordes interdigitados entre ambas fases y que Qtz3 ha sido clasificado como un mineral con pocas irregularidades, en general, la liberación mineral en el contacto entre ambas fases no generará demasiadas partículas mixtas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En algunas zonas puede verse la textura denominada frente de fluoritización. Esta textura corresponde a las zonas de borde de los frentes de reemplazamiento de la fluorita (figs. 35 y 36), donde los contactos varían desde rectos a interdigitados. Sin embargo, y puesto que esta relación sólo se observa en las zonas terminales de la mineralización, el número de partículas mixtas formadas por estos bordes interdigitados será, en proporción, escaso. Si bien no ha podido determinarse mediante microscopía de transmisión, trabajos anteriores (Arias, 1991; Vega, 2015) sugieren la existencia de acumulaciones de materia carbonosa asociada al avance del frente.

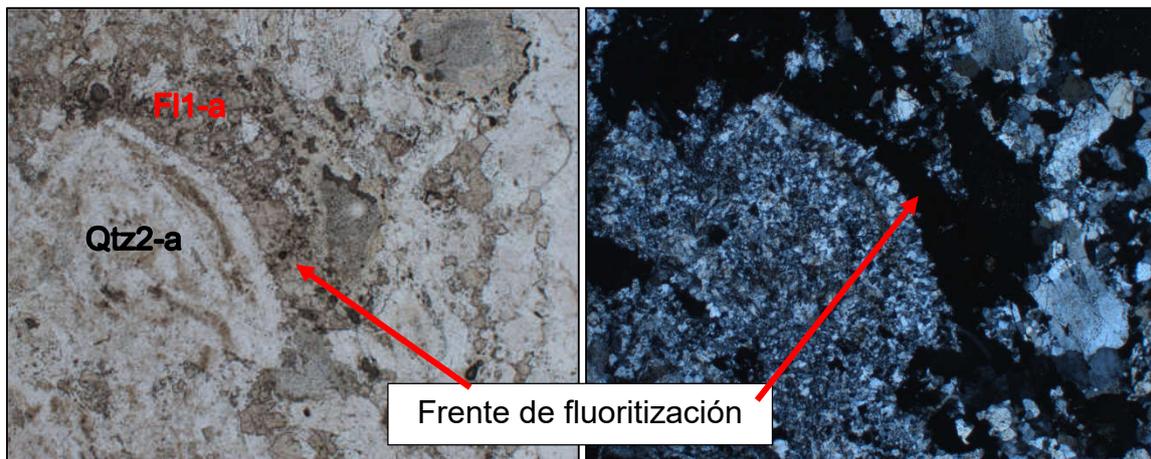


Figura 35. Frente de fluoritización en el contacto F11-a y Qtz2-a. Ancho de la imagen 5 mm

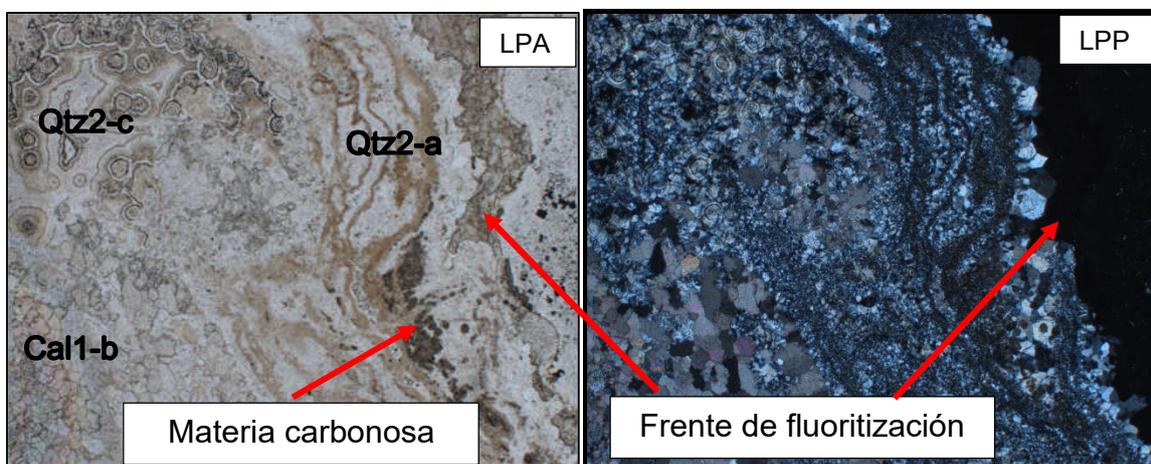


Figura 36. Frente de fluoritización y acumulación de materia carbonosa asociada. Ancho de la imagen 5 mm.

Cuando reemplaza al cemento carbonatado que rodean a los granos de cuarzo tipo 1 de la roca original, F11-a se encuentra como cemento de la roca alterada. Generalmente no presenta inclusiones de calcita, siendo el reemplazamiento completo. Esta tipología se estudia como un conjunto, es decir, se estudia el conjunto formado por F11-a y los minerales a los que engloba (figs. 22 y 23), ya que esta

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

asociación se repite en las muestras en las que aparece esta tipología. Para referirnos a esta asociación hablaremos de FI1-a & Qtz1. Únicamente en una de las muestras la asociación FI1-a & Qtz1 se relaciona con la calcita tipo II (se estudiará en el apartado de la calcita) y, aunque también se relaciona con la fluorita tipo II, esta relación no se estudia debido a que no aportaría ninguna información de interés para este trabajo.

La asociación FI1-a & Qtz1 aparece tanto en la categoría capa como en la categoría detrítico. Aunque en ambas categorías dicha asociación se encuentra formada, mayoritariamente, por FI1-a, Qtz1 y opacos, existen diferencias entre ambas categorías. En la muestra estudiada de la categoría capa, la asociación está formada por 23% Qtz1, 69% FI1-a y 8% opacos. Como se dijo en el apartado de cuarzo detrítico, el tamaño medio de este cuarzo es de  $0,26 \pm 0,15$  mm, con un tamaño máximo de 1,30 mm. En las dos muestras estudiadas de la categoría detrítico, se obtienen valores prácticamente idénticos, tanto en el análisis modal como granulométrico; la asociación está compuesta por 59% Qtz1, 37% FI1-a y 4% opacos. Qtz1 tiene, en este caso, un tamaño medio de  $0,13 \pm 0,05$  mm, con un tamaño máximo de 0,31 mm. Además, mientras que en la categoría capa la asociación está compuesta casi exclusivamente por esos tres minerales, en la categoría detrítico aparecen también todos los minerales mencionados en el subapartado traza (moscovita, plagioclasa, feldespatos potásico, rutilo, turmalina y circón). La diferencia entre categorías en el contenido en fluorita en esta asociación puede deberse, en parte, al tamaño de Qtz1; a mayor tamaño de grano, mayores son los intersticios en los que puede cementar la calcita y, por lo tanto, mayor reemplazamiento de fluorita. En consecuencia, la asociación FI1-a & Qtz1 de la categoría capa presenta mejores características de cara a su explotación (mayor ley, menos impurezas) que la asociación de la categoría detrítico.

Debido a la textura de esta tipología de fluorita, no es posible medir su tamaño de grano. Respecto a los bordes de contacto entre FI1-a y el resto de minerales, no existe diferencia entre la categoría capa y detrítico, debido a que este contacto depende de la morfología de los componentes detríticos de la roca original. El contacto generalmente es irregular, pero a pequeña escala, si los clastos Qtz1 son angulosos, con bordes rectos, el contacto será recto, mientras que, si los bordes de los clastos Qtz1 son lobulados, el contacto será irregular-lobulado. En consecuencia, debido a que el cuarzo tipo 1 fue clasificado como una partícula sin excesivas irregularidades (campo A de la gráfica circularidad-*FI*), no se prevé la generación de partículas mixtas entre FI1-a y Qtz1; sin embargo, son posibles las partículas mixtas FI1-a y opacos.

Dentro de la categoría detrítico, cabe destacar la presencia de una estrecha banda (ver esquema lámina AST9 del anexo I) cuya textura varía significativamente respecto al resto de la categoría detrítico. En dicha banda, aparecen pequeños cubos idiomórficos de fluorita, con un tamaño de grano de  $60 \pm 10$   $\mu\text{m}$ , que se encuentran

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

rodeados por una fina masa de cuarzo y filosilicatos criptocristalinos (fig. 37). Esta diferencia de textura se debe, posiblemente, a que esta zona se trate de las salbandas de una vena rellena de fluorita (fig. 38), produciéndose en estas zonas un reemplazamiento más intenso del protolito que en las zonas alejadas de la vena. Estos pequeños cubos de fluorita condicionan el tamaño de molienda previo a la flotación; así, aunque los cristales de fluorita que rellenan la vena sean de grano grueso, la muestra ha de molerse a tamaño de grano fino para garantizar la liberación de los cristales pequeños.

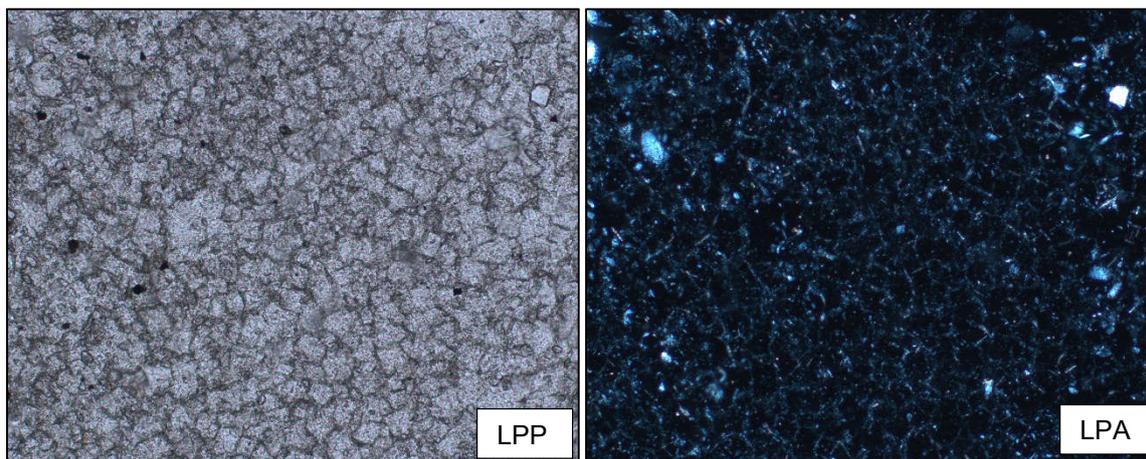


Figura 37. Banda con diferente textura dentro de la asociación FI1-a & Qtz1 (lámina AST9). Ancho de la imagen 1,25 mm

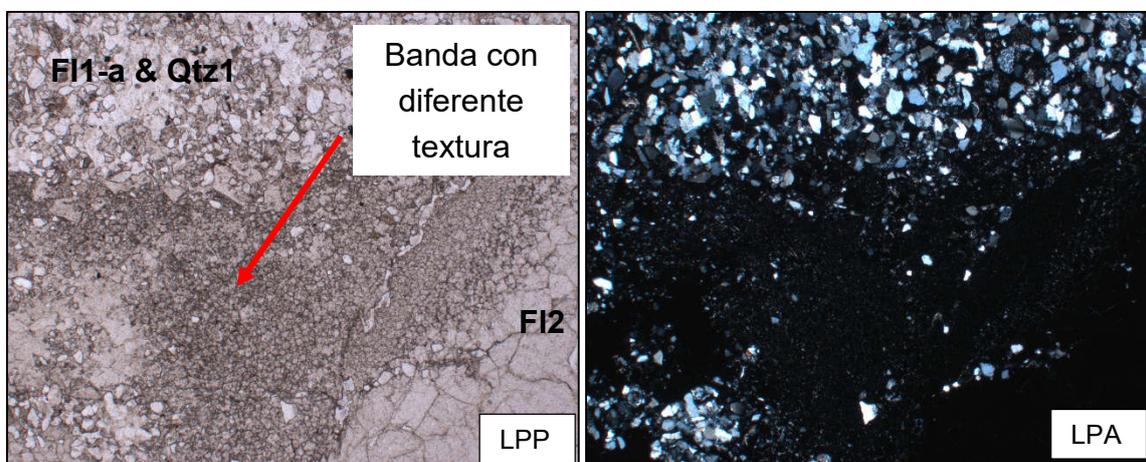


Figura 38. Banda con diferente textura dentro de la asociación FI1-a & Qtz1 (lámina AST9) y su relación con FI2 y la asociación FI1-a y Qtz1 s.s.. Ancho de la imagen 5 mm.

-Fluorita de reemplazamiento con inclusiones de calcita diseminadas (fluorita tipo 1-b, FI1-b). Aparece únicamente en una de las muestras de categoría capa. Se encuentra plagada de inclusiones de calcita (calcita tipo 1-a), que generalmente decrecen en cantidad desde el núcleo del cristal a sus bordes (en el caso de cristales individuales o asociaciones de pocos individuos) (fig. 39A), mientras

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

que, en el caso de asociación de varios cristales, únicamente los bordes de dicha asociación se presentan bastante limpios (fig. 39B).

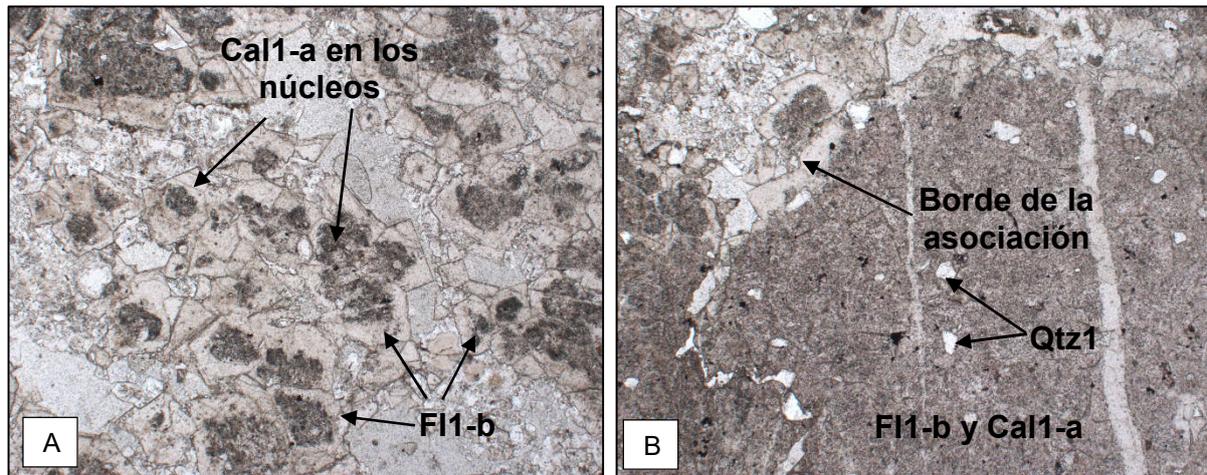


Figura 39. A) Cristales de fluorita tipo 1-b individualizados con un núcleo central de inclusiones de calcita tipo 1-a. LPP. Ancho de la imagen 5 mm. B) Asociaciones de cristales de fluorita con calcita diseminada por toda la superficie de los cristales, excepto en el borde de la asociación. LPP. Ancho de la imagen 5mm.

Para estudiar el contenido en calcita en esta tipología, se descartan las asociaciones de muchos cristales (29% de la fracción mineralógica de la muestra estudiada) debido a que la calcita tipo 1 se encuentra diseminada en toda la superficie de la fluorita y, por lo tanto, su estudio no puede realizarse mediante microscopía de transmisión (ver esquema lámina AST7 del anexo I). Además, debido al carácter criptocristalino de las inclusiones se generarán siempre partículas mixtas, excepto en la zona de borde de la asociación. Por lo tanto, se han estudiado los cristales en los que la calcita se concentra en el núcleo del cristal, estando los bordes limpios de inclusiones. En la figura 40 se muestra un ejemplo de cómo se determina el porcentaje de calcita tipo 1 existente en los núcleos de FI1-b.

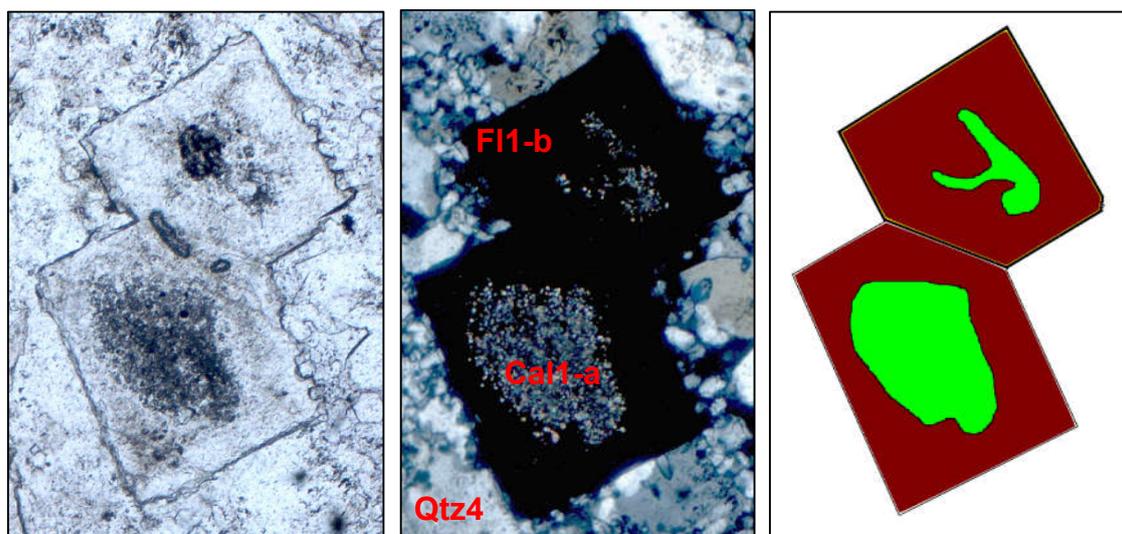


Figura 40. Determinación del porcentaje de calcita tipo 1-a existente en los núcleos de los cristales de fluorita tipo 1-b.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se considera todo el núcleo de calcita como un individuo, y una vez determinado el área de los cristales de fluorita, se calcula el porcentaje que ocupa el núcleo de calcita. Se ha determinado un valor medio de  $22\% \pm 16$ , con un valor mínimo del 1% y un máximo de 61%. Puesto que este tipo de fluorita ocupa el 57% de la muestra estudiada, la fluorita que puede considerarse limpia ocupa el 44% de la lámina mientras que los núcleos de calcita el 13%. El tamaño medio determinado para estos cristales de fluorita es de  $0,39 \pm 0,27$  mm, con unos valores mínimo y máximo de 0,03 y 1,4 mm, respectivamente. La fluorita tipo 1-b que se presenta como una asociación de varios cristales (fig. 39B) tiene un tamaño medio de  $0,47 \pm 0,13$  mm.

Según el gráfico circularidad-*FI*, la fluorita tipo 1-b que se encuentra como cristales individualizados se clasifica como una partícula sin excesivas irregularidades y ligeramente elongada. En sus bordes, FI1-b se encuentra relacionada con Qtz1 y Qtz4. En general los bordes entre FI1-b y Qtz1 son sinuosos a lobulados. Los contactos entre FI1-b y Qtz4 son generalmente rectos, debido al idiomorfismo de la fluorita y a la situación intersticial de Qtz4. Sin embargo, en ocasiones, Qtz4 genera alteración en los bordes de la fluorita (figs. 30 y 40), generándose contactos más lobulados, aunque éstos son escasos. En consecuencia, tendremos dos posibles situaciones en la etapa de liberación mineral. Por una parte, en el caso de los núcleos de calcita de los cristales individuales y en la asociación de varios cristales, donde las inclusiones se encuentran diseminadas en toda la superficie, se generarán partículas mixtas de difícil liberación. Por el contrario, en los bordes de los cristales de fluorita, debido al gran tamaño de los cristales y a su relación con Qtz1 y Qtz4, no se prevén problemas de liberación.

- Fluorita de relleno de espacios vacíos (Fluorita tipo 2, FI2). Fluorita idiomórfica, de grano grueso, se presenta bastante fracturada (fig. 41). El tamaño medio de los cristales no fracturados es de  $1,28$  mm  $\pm$   $0,73$ , con un mínimo y máximo de 0,37 y 3,11 mm, respectivamente.

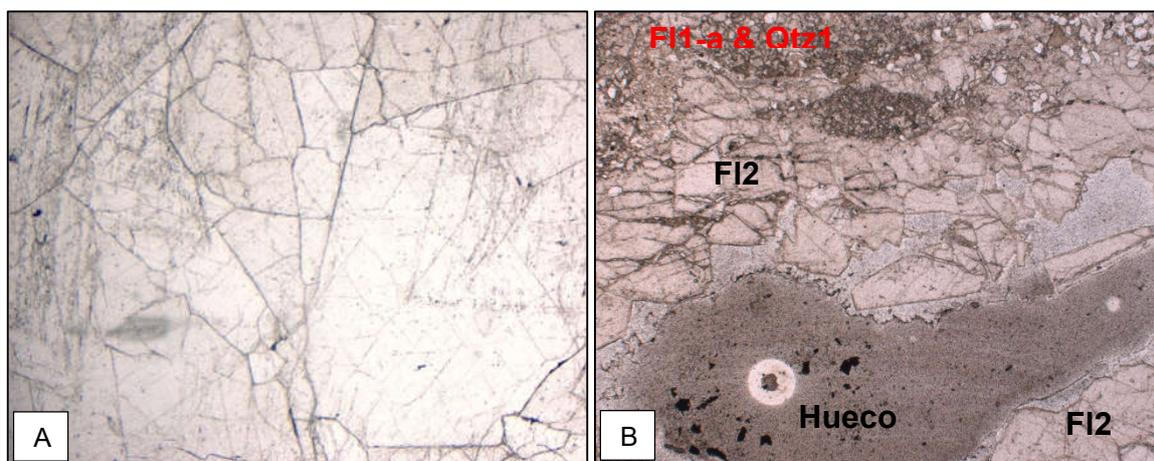


Figura 41. A) Fracturación de FI2 en la categoría capa. LPP. Ancho de la imagen 6,5 mm. B) Fracturación de FI2 en la categoría detrítico. LPP. Ancho de la imagen 5 mm.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aparece tanto en la categoría capa como en detrítico, relacionada con Qtz1 (con la asociación FI1-a & Qtz1) y con la calcita tipo 2 (de la que se hablará en el apartado correspondiente). Cuando se relaciona con Qtz1, el contacto es irregular, pero a pequeña escala, la regularidad de los contactos entre ambas fases dependerá de la regularidad o irregularidad de los granos que componen Qtz1 (fig. 42A). Según el gráfico circularidad-*FI*, la fluorita tipo 2 se clasifica como una partícula sin excesivas irregularidades y ligeramente elongada. No se prevén problemas de liberación entre FI2 y Qtz1 a excepción de los opacos, tal y como se ha explicado en los apartados anteriores. En la relación FI2-calcita tipo 2 los bordes de contacto son generalmente rectos (fig. 42B), debido al idiomorfismo de los dos minerales. En este caso, no se generarán prácticamente partículas mixtas.

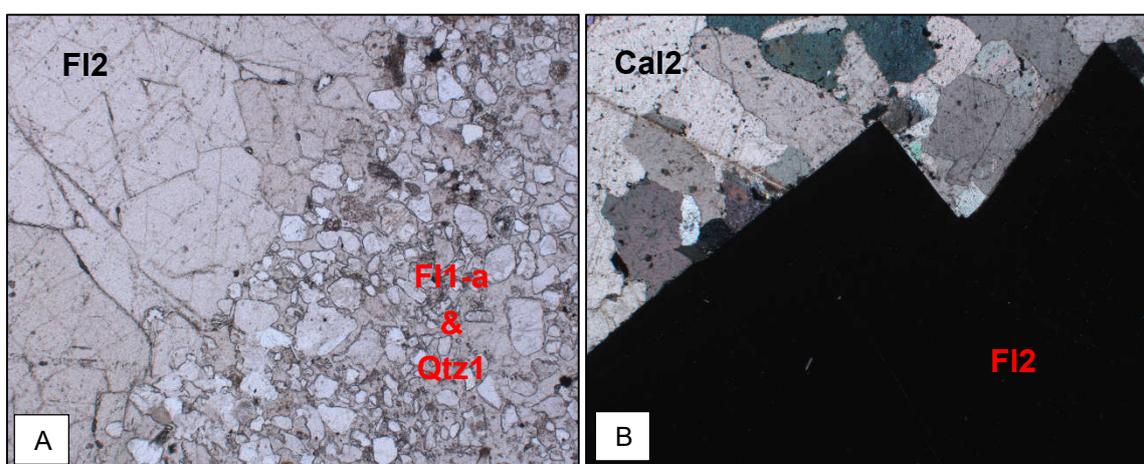


Figura 42. A) Contacto FI2 con la asociación FI1-a & Qtz1. LPP. Ancho de la imagen 5 mm. B) Contacto FI2 y Cal2. LPA. Ancho de la imagen 5 mm.

### 4.1.1.3. Calcita

Se diferencian los siguientes tipos de calcita: calcita relicta (Cal1), de la que a su vez se diferencian dos subtipos (Cal1-a y Cal1-b), y calcita de relleno de fracturas (Cal2). En la tabla V se muestra un resumen de las características de las tipologías de calcita definidas.

-Calcita relicta (Calcita tipo 1, Cal1). En esta tipología se incluye la calcita que se encontraba en el encajante y que no ha sido reemplazada por completo. Se diferencian dos subtipos.

-Calcita como inclusiones (Calcita tipo 1-a, Cal1-a). Se presenta como inclusiones criptocristalinas dentro de Qtz2-b (fig. 25) y de FI1-b (figs. 30, 39 y 40), y en cantidades anecdóticas en los otros cuarzos de reemplazamiento (Qtz2-a y Qtz2-c). Cuando aparece relacionada con Qtz2-b no puede determinarse su fracción superficial debido a que se encuentra muy dispersa dentro del mineral, aunque según estimación visual ocupa menos del 1% de la lámina delgada en la que aparece. En el

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

caso de la asociación Cal1-a con F11-b, tal y como se dijo en el subapartado correspondiente, en el caso de los cristales con núcleos de calcita, este núcleo supone el  $22\% \pm 16$  de la fracción superficial de F11-b (fig. 40).

-Calcita como “parche” (Calcita tipo 1-b, Cal1-b). Cristales de calcita relictos, aparecen únicamente en la lámina delgada estudiada en la categoría no mineralizado, como parches de carbonato que no han sido silicificados (fig. 43); se encuentra relacionada con el cuarzo de silicificación (fig. 36). El tamaño de grano medio es de  $0,17 \text{ mm} \pm 0,10 \text{ mm}$ . Según la gráfica circularidad-*FI*, son cristales sin excesivas irregularidades y una ligera elongación. Los bordes de grano son generalmente rectos o sinuosos.

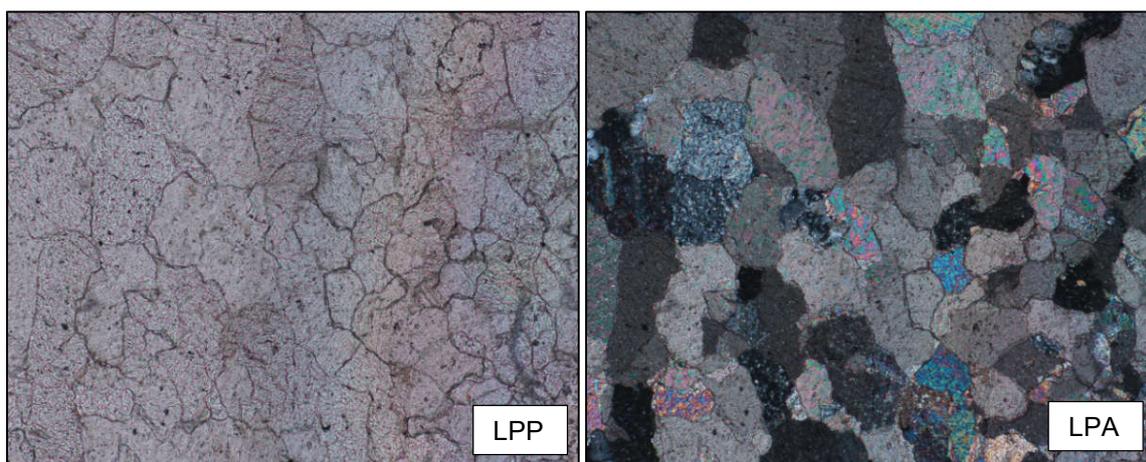


Figura 43. Calcita tipo 1-b. Ancho de la imagen 1,25 mm.

-Calcita de relleno de espacios vacíos (Calcita tipo 2, Cal2). Cristales idiomórficos, debido al relleno de espacios vacíos. Aparece en una muestra de la categoría capa. El tamaño medio es de  $1,42 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ , con una alta desviación estándar debido a la presencia de un cristal que ocupa prácticamente toda la longitud E-W de la lámina delgada. El tamaño mínimo es de  $0,01 \text{ mm}$  y el máximo de  $18 \text{ mm}$ , donde la mayoría de los cristales tienen un tamaño inferior a los  $3 \text{ mm}$ . Aparecen abundantes inclusiones de opacos, principalmente en el borde del cristal, en el contacto calcita-calcita (fig. 44A), donde aparecen los opacos más pequeños; y en el contacto de la calcita con la fluorita, donde se encuentran los opacos de mayor tamaño (Fig. 44B).

En lo referente a los bordes de grano, en el caso de F12 con Cal2, los contactos son generalmente rectos (fig. 42B), debido al idiomorfismo de ambos minerales, sugiriendo una buena liberación mineral. En el caso de los contactos Cal2 con la asociación F11-a & Qtz1, el borde es irregular, si bien a pequeña escala varía desde recto a lobulado (fig. 45).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

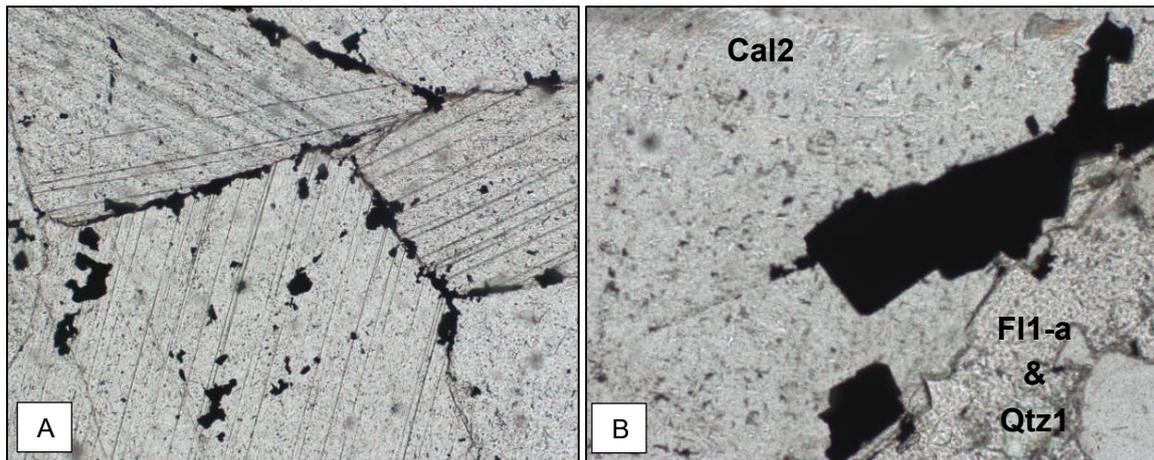


Figura 44. A) Contacto Cal2-Cal2 y acumulación de opacos. LPP. Ancho de la imagen 1,25 mm. B) Contacto Cal2 con FI1-a & Qtz1 y opacos. LPP. Ancho de la imagen 1,25 mm

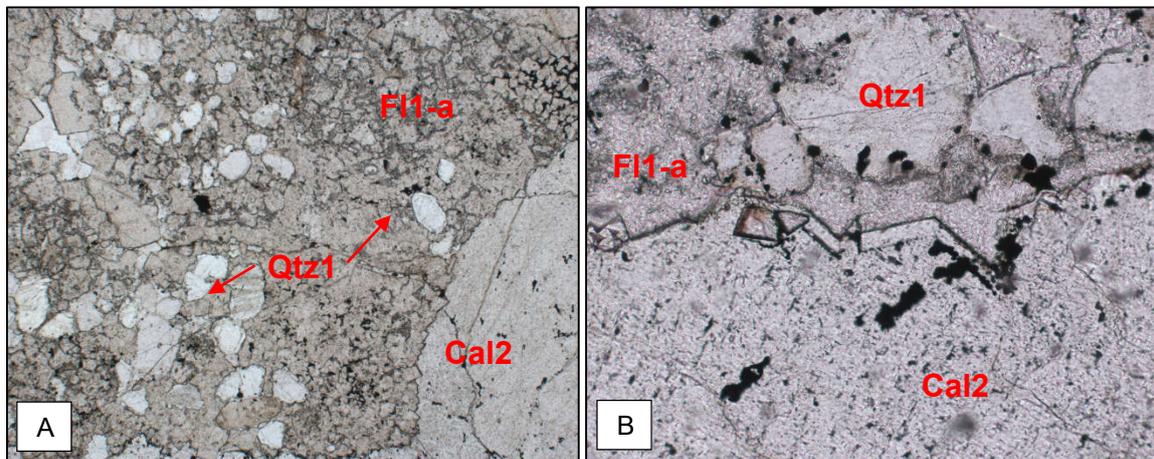


Figura 45. A) Contacto entre la asociación FI1-a & Qtz1 y calcita tipo 2. LPP. Ancho de la imagen 5 mm. B) Contacto entre los mismos minerales a una escala más pequeña. LPP. Ancho de la imagen 1,25 mm.

### 4.1.2. ACCESORIOS

Como se dijo en el apartado de metodología, se consideran accesorios aquellos minerales que aparecen en un porcentaje de entre el 1 y el 5%, siendo los minerales opacos los únicos considerados accesorios. Según Claverol et al. (2009), en el área de Villabona es frecuente la pirita, puede aparecer depositada sobre fluorita, calcita o cuarzo, o como inclusiones en fluoritas y calcitas. Según García Iglesias y Loredo (1992), hacia la zona este del distrito pueden aparecer calcopirita y galena, y hacia la zona oeste galena y esfalerita.

En la muestra correspondiente a la categoría no mineralizado, aparecen gran cantidad de opacos relacionados con el cuarzo de silicificación (Qtz2, fig. 26 y 27) y el de relleno de espacios vacíos (Qtz3, fig. 29). Tienen un tamaño mínimo de 14  $\mu\text{m}$ ; aparecen generalmente agrupados en las zonas externas por el avance del proceso de

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

reemplazamiento que sufren los minerales. Aunque no puede asegurarse, su morfología cúbica sugiere que se trata en la mayoría de los casos de cristales de pirita; en algunos casos, la morfología circular sugiere que se trata de piritas framboidales (fig. 46). Estas piritas, asociadas a procesos orgánicos, concuerdan con la posible existencia de materia carbonosa en la lámina delgada.

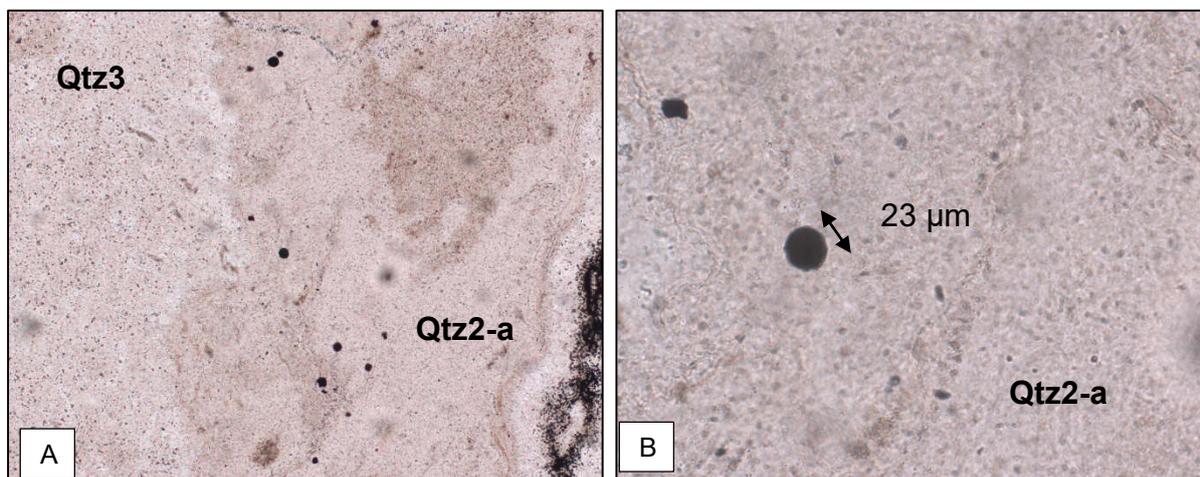


Figura 46. Posibles piritas framboidales en la categoría no mineralizado. LPP. A) Ancho de la imagen 1,25 mm. B) Ancho de la imagen 312 μm.

En la categoría capa y detrítico, es frecuente la aparición de opacos en la asociación FI1-a & Qtz1 (fig. 22 y 23). En capa, representan el 4% de la asociación, en detrítico el 8%. Como ya se comentó anteriormente, aparecen acompañando a la fluorita como cemento de los clastos de Qtz1, pudiendo surgir problemas de liberación debido a la aparición de partículas mixtas FI1-a y opacos.

La mayor concentración de opacos se encuentra relacionada con la calcita tipo 2 (fig. 44). Como se vio en el apartado correspondiente, en los contactos Cal2-Cal2 son frecuentes las acumulaciones de opacos de pequeño tamaño (fig. 44A), mientras que en el contacto Cal2 con otras fases éstos aumentan de tamaño. En la figura 44b se muestra la relación entre Cal2 y la asociación FI1-a & Qtz1; se observa la asociación de varios minerales cúbicos, sugiriendo que se trata de un agregado de piritas. El tamaño del cubo más situado a la izquierda es de 0,27 mm.

### 4.1.3. TRAZA

Como se dijo anteriormente, se consideran minerales traza aquellos que aparecen en una proporción inferior al 1%. En la categoría detrítico aparece moscovita, feldespato potásico, plagioclasa, rutilo, turmalina y circón; se presentan como clastos dentro de la asociación FI1-a y Qtz1. En la categoría capa su presencia es escasa. En las figuras 47 y 48 se muestran algunos de estos minerales. La moscovita (fig. 47A), aparece

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

generalmente con hábito acicular, adaptándose a la morfología de Qtz1; la de la figura tiene un diámetro feret de 0,14 mm. El resto de traza se presentan con morfologías típicamente detríticas, con bordes redondeados, en algunos casos, y en otros, angulosos. El rutilo (fig. 47B) y la turmalina (fig. 48A) de las imágenes tienen un diámetro feret de 0,12 mm; el circón (fig. 48B) tiene un tamaño de 0,06 mm. Además, es común la alteración de los minerales silicilásticos a sericita.

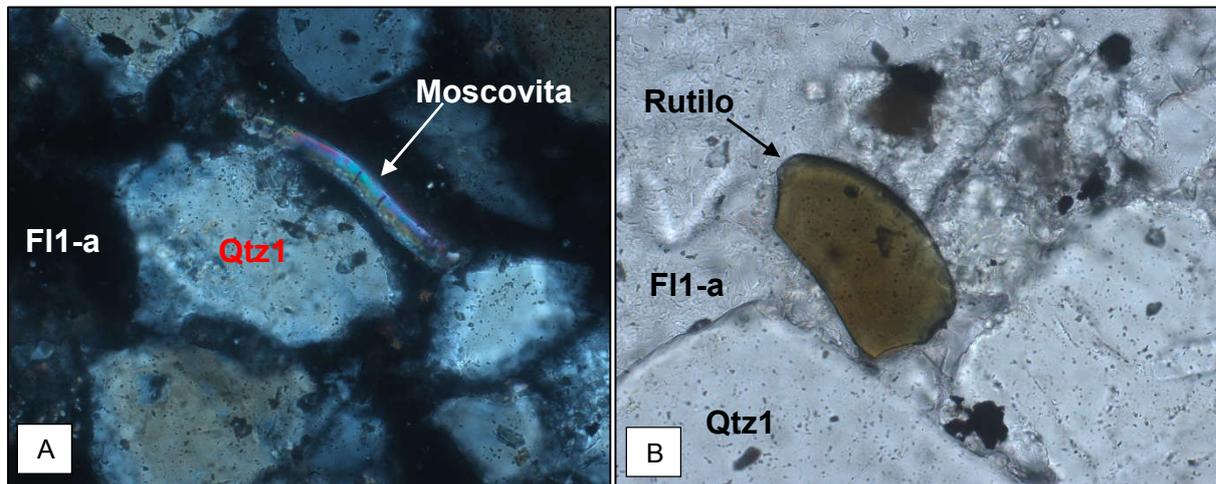


Figura 47. Minerales traza en la asociación FI1-a & Qtz1. A) Moscovita como clasto en la categoría detrítico. LPA. Ancho de la imagen 312  $\mu$ m. B) Rutilo como clasto en la categoría detrítico. LPP. Ancho de la imagen 312  $\mu$ m.

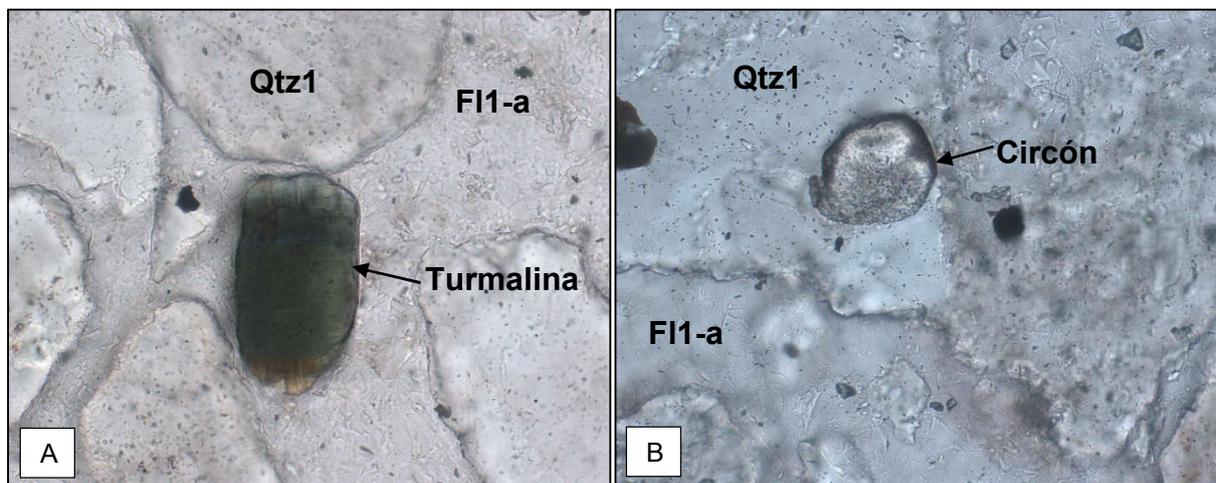


Figura 48. Minerales traza en la asociación FI1-a & Qtz1. A) Turmalina como clasto en la categoría detrítico. LPA. Ancho de la imagen 312  $\mu$ m. B) Circón en la categoría detrítico. LPP. Ancho de la imagen 312  $\mu$ m.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.2. GEOQUÍMICA

En el estudio geoquímico se analizaron un total de 143 muestras; tras su procesado y eliminación de errores y muestras patrón (analizadas para comprobar la precisión de los resultados), se trabaja con un total de 139, 129 extraídas de sondeos de exterior y 10 tomadas en el interior de la mina. De estas 139 muestras, 20 corresponden a la categoría capa no mineralizada, 20 a detrítico, 72 a capa y 27 a filón. Una síntesis de los resultados obtenidos en todos los elementos se muestra en el anexo II.

#### 4.2.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

##### 4.2.1.1. Componentes mayoritarios: CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO

A continuación se muestran los resultados de los componentes mayoritarios obtenidos en cada una de las categorías establecidas (capa no mineralizada, detrítico, capa y filón). Estos componentes son fluorita, calculada a partir de los análisis químicos (tal y como se explicó en el apartado de metodología), SiO<sub>2</sub> y CaO (tabla VI).

-Fluorita. Se obtienen valores muy similares al realizar la comparación entre los valores de fluorita obtenidos a partir del flúor del laboratorio comercial ActLabs y los proporcionados por MINERSA. En la categoría no mineralizado se obtiene el valor medio más bajo ( $4 \pm 3 \%$ ), mientras que en las categorías mineralizadas se obtienen valores medios superiores ( $19 \pm 5 \%$  en detrítico,  $34 \pm 14 \%$  en capa y  $37 \pm 17 \%$  en filón) (fig. 49A). Los valores máximos de mineralización (fig. 49B) se obtienen en las categorías capa y filón (62 y 72%); téngase en cuenta que para la capa no mineralizada se fijó un máximo del 10% de contenido en fluorita, tal y como se explicó en el apartado de metodología. La categoría más homogénea en la ley de fluorita es detrítico, con un coeficiente de variación del 27%, frente al 40-70% de las otras categorías.

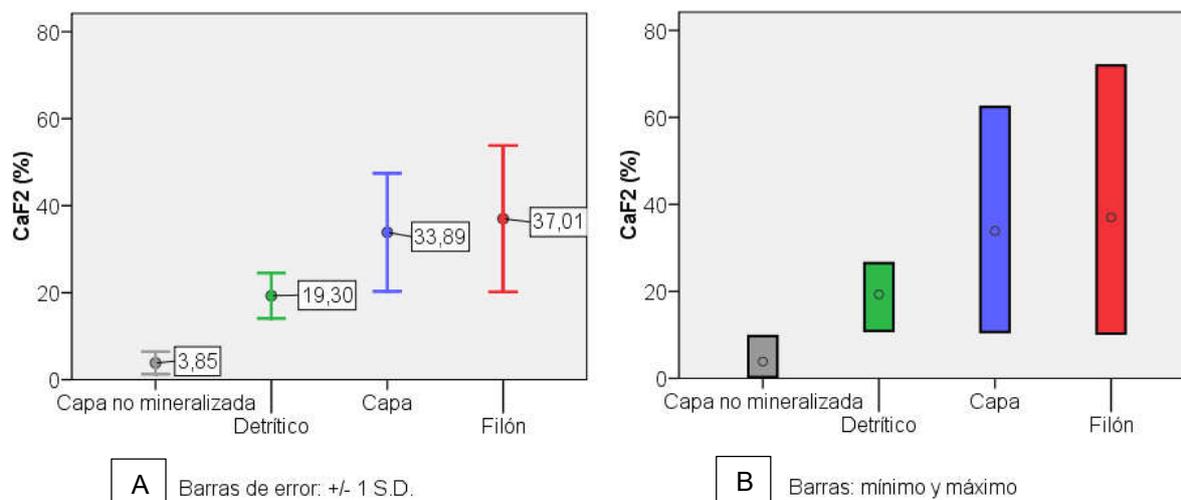


Figura 49. Valor medio del contenido en fluorita según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

		No mineralizado	Detrítico	Capa	Filón
<b>Ca F<sub>2</sub></b>	$\bar{x}$	3,85	19,30	33,89	37,01
	Me	3,54	20,17	36,85	30,20
	Mo	-	-	39,45	24,45
	Min	0,29	10,93	10,64	10,27
	Max	9,74	26,51	62,40	71,93
	S.D.	2,60	5,22	13,57	16,83
	Cv	67,49	27,06	40,04	45,48
	Rl	3,49	8,79	21,98	24,04
	g1	0,63	-0,20	-0,19	0,68
	g2	-0,10	-1,49	-1,03	-0,60
<b>SiO<sub>2</sub></b>	$\bar{x}$	29,98	68,62	44,72	50,36
	Me	24,41	66,78	44,69	52,38
	Mo	-	-	41,56	-
	Min	6,64	58,21	7,37	17,11
	Max	87,68	81,02	82,14	80,95
	S.D.	21,59	6,78	15,22	17,65
	cv	72,01	9,89	34,03	35,04
	Rl	29,98	10,39	19,39	27,47
	g1	1,34	0,45	-0,05	-0,38
	g2	1,46	-0,86	0,49	-0,74
<b>CaO</b>	$\bar{x}$	37,88	19,17	34,68	32,01
	Me	42,19	19,79	35,37	29,94
	Mo	-	-	-	-
	Min	5,34	11,08	9,62	10,56
	Max	52,05	26,09	53,60	57,77
	S.D.	13,62	4,51	10,06	13,01
	cv	35,95	23,50	29,01	40,66
	Rl	17,98	7,28	12,79	18,39
	g1	-1,27	-0,29	-0,36	0,56
	g2	0,77	-1,11	-0,07	-0,59
	N	20	20	72	27

Tabla VI. Estadística descriptiva del CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO

-SiO<sub>2</sub>. El valor medio más bajo se obtiene en capa no mineralizada ( $30 \pm 22\%$ ), mientras que el valor más alto se obtiene en la categoría detrítico ( $69 \pm 7\%$ ); las categorías capa y filón presentan valores intermedios ( $45 \pm 15\%$  y  $50 \pm 18$ ) (fig. 50A). Respecto a los valores mínimos (fig. 50B), son relativamente bajos en capa no

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

mineralizada y capa (7%), intermedio en filón (18%), y muy alto en detrítico, con un valor mínimo del 58%. Respecto a los valores máximos, no se obtienen diferencias significativas según categorías, con un valor máximo superior al 80% en todas las categorías.

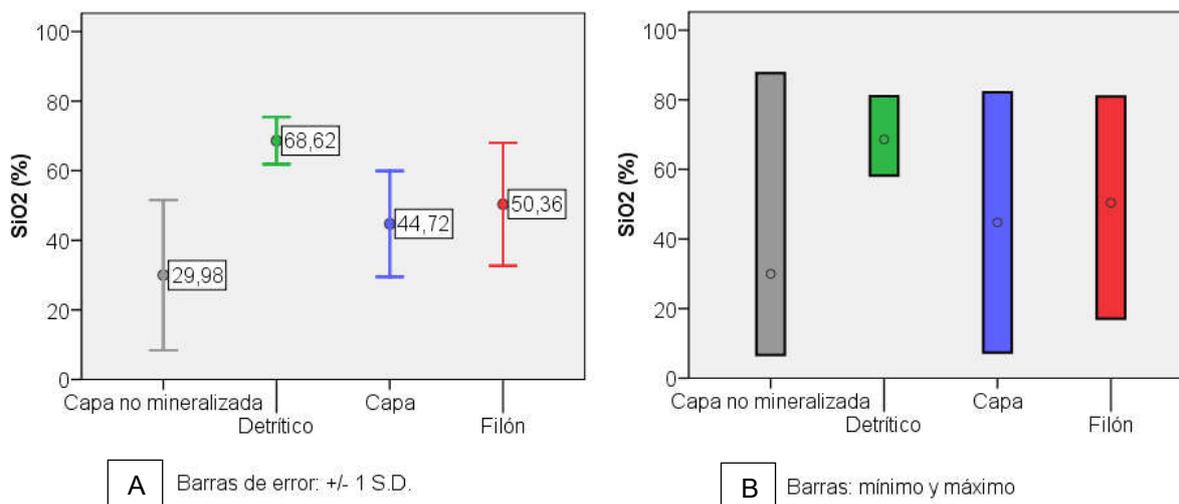


Figura 50. Valor medio del contenido en SiO<sub>2</sub> según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

La cantidad de SiO<sub>2</sub> de la categoría detrítico es función del porcentaje en granos siliciclásticos del protolito y del grado de silicificación. Por consiguiente, el valor mínimo en SiO<sub>2</sub> de esta categoría es más alto que en las demás, debido a que tiene cuarzo correspondiente a la propia litología. En las categorías no mineralizado y capa, la cantidad de SiO<sub>2</sub> depende, fundamentalmente, del grado de silicificación de la caliza micrítica original; por lo tanto, pueden existir todos los valores, desde poco silicificado (con valores de SiO<sub>2</sub> bajos), hasta muy silicificado (con valores de SiO<sub>2</sub> altos).

**-CaO:** El valor medio más bajo se registra en la categoría detrítico ( $19 \pm 5\%$ ), mientras que las categorías capa no mineralizada, capa y filón presentan valores medios parecidos ( $\approx 35 \pm 13\%$ ) (fig. 51A). Los valores mínimos (fig. 51B) son parecidos en todas las categorías ( $\approx 5 - 10\%$ ), mientras que los valores máximos son muy inferiores en detrítico (26%) respecto a las otras categorías ( $\approx 55\%$ ). Téngase en cuenta que este dato se refiere al CaO total de las muestras, es decir, tanto al CaO que se encuentra formando parte de la fluorita, como el que pertenece a otras fases mineralógicas, como la calcita.

Los valores más bajos de detrítico se deben al carácter siliciclástico de la roca original; el contenido en CaO (ya sea como fluorita o como calcita) es función, principalmente, del porcentaje de cemento que tuviese el protolito. En las categorías no mineralizado y capa, en origen una caliza micrítica, se obtiene un alto intervalo de valores de CaO.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

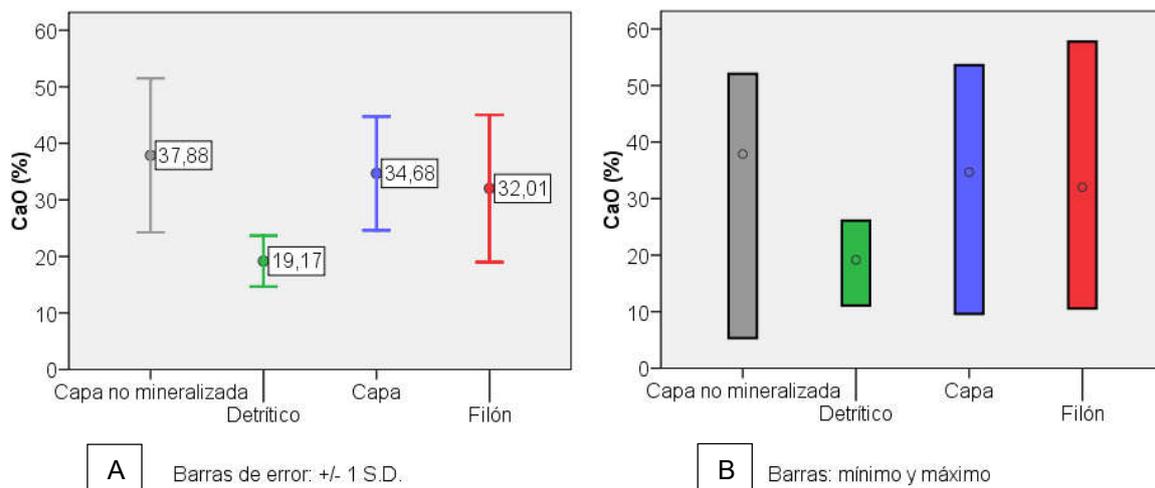


Figura 51. Valor medio del contenido en CaO según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

#### 4.2.1.2. Componentes minoritarios: $Al_2O_3$ , $Fe_2O_3$ , $MnO$ , $MgO$ , $Na_2O$ , $K_2O$ , $TiO_2$ y $P_2O_5$

A continuación se realiza una descripción del resto de óxidos que componen las muestras estudiadas; estos óxidos se encuentran en muy baja proporción respecto a los componentes mayoritarios. Una tabla simplificada de los resultados se muestra en el anexo II.

- $Al_2O_3$ . Se obtienen valores medios similares en todas las categorías (fig. 52A), con valores medios que varían entre el 1 y 2%. Respecto a los valores mínimos (fig. 52B), en las categorías no mineralizado, capa y filón se registran valores próximos a cero, mientras que en detritico todas las muestras estudiadas tienen un contenido en  $Al_2O_3$  superior al 1%. Respecto a los valores máximos, no se observan diferencias significativas en no mineralizado, detritico y capa (2 – 2,5%), frente al 4% registrado en filón. Se observa que el rango de valores es notablemente inferior en detritico respecto al resto de categorías.

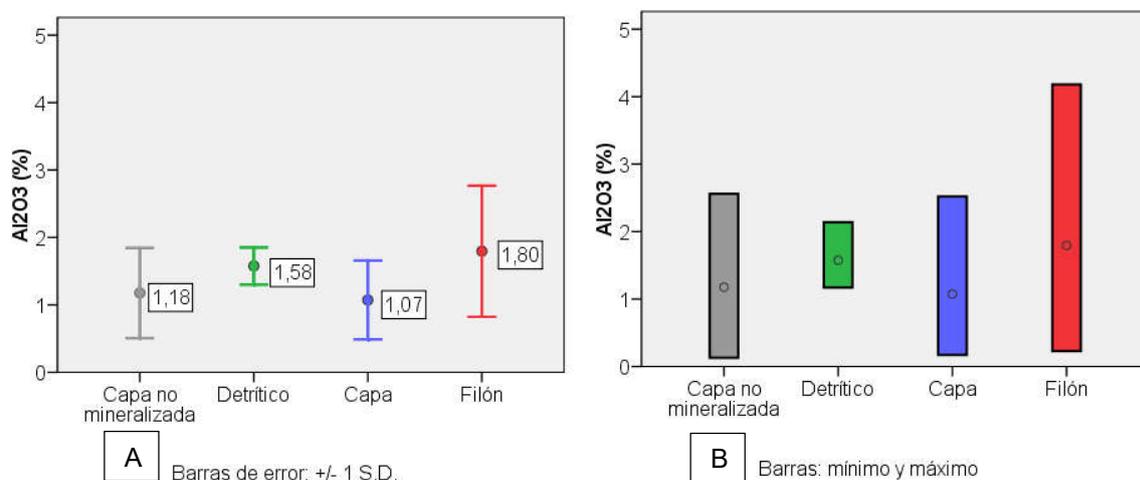


Figura 52. Valor medio del contenido en  $Al_2O_3$  según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. No se obtienen diferencias significativas en los valores medios (fig. 53A) ni en los valores mínimos (fig. 53B). Respecto a los valores máximos, mientras que en las categorías detrítico y filón el valor máximo es próximo al 2%, en las capas se obtienen valores más altos, con un valor máximo de 4,5% en no mineralizado y 10% en capa (fig. 53B).

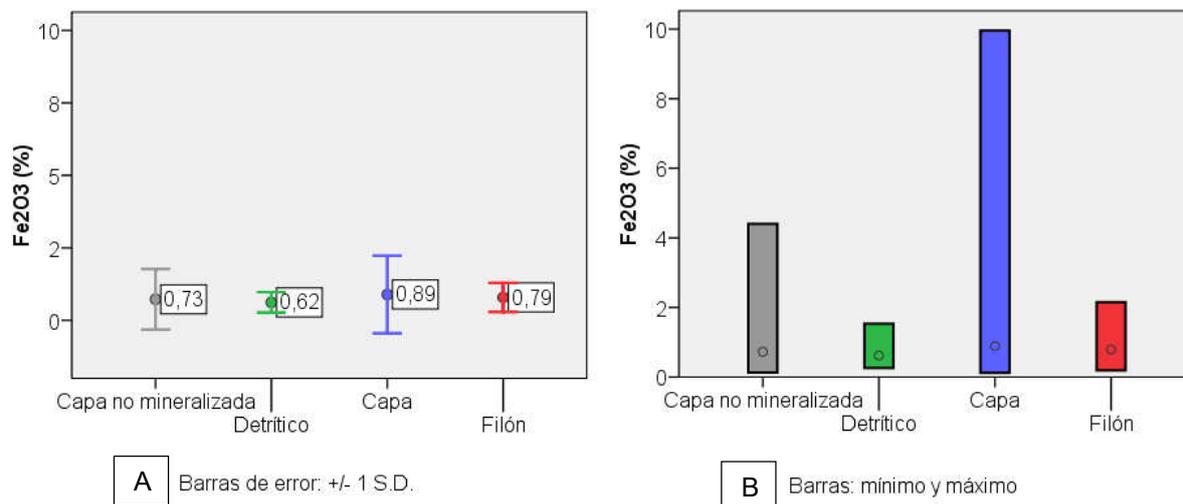


Figura 53. Valor medio del contenido en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

-MnO. En la capa no mineralizada se obtiene un valor medio cuatro veces superior al de las otras categorías (fig. 54A). Si observamos los valores máximos (fig. 54B), son mayores en no mineralizado, seguido de capa, y con valores máximos relativamente muy inferiores en detrítico y filón.

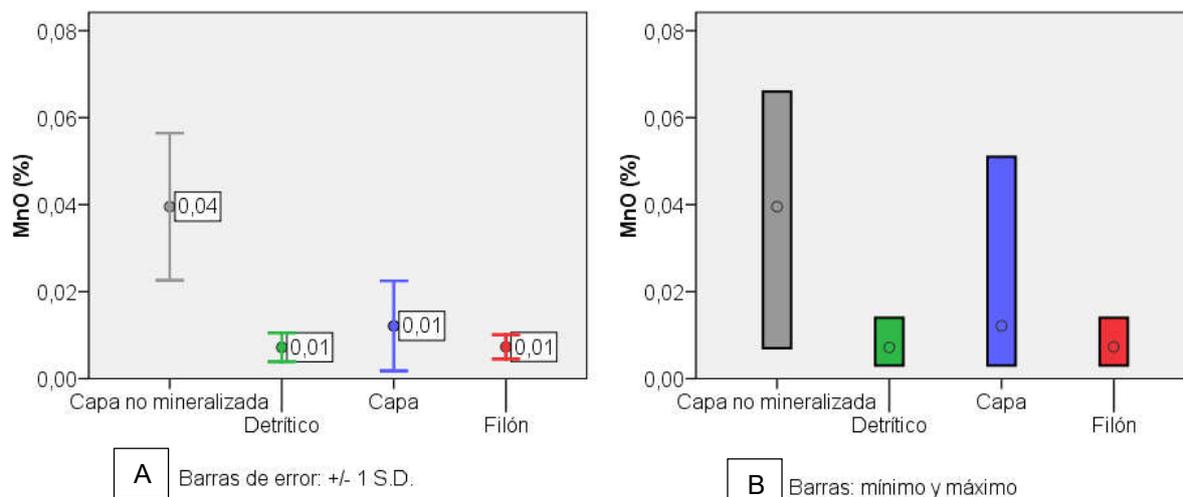


Figura 54. Valor medio del contenido en MnO según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

-MgO. En la categoría no mineralizado, el valor medio es el doble del obtenido en el resto de categorías (fig. 55A). Respecto a los valores máximos (fig.55B), en la categoría detrítico se registra el menor valor (0,15%), con valores intermedios en capa y filón; el mayor valor máximo se obtiene en no mineralizado (0,40%). Se observa que el rango de valores es notablemente inferior en detrítico respecto al resto de categorías.

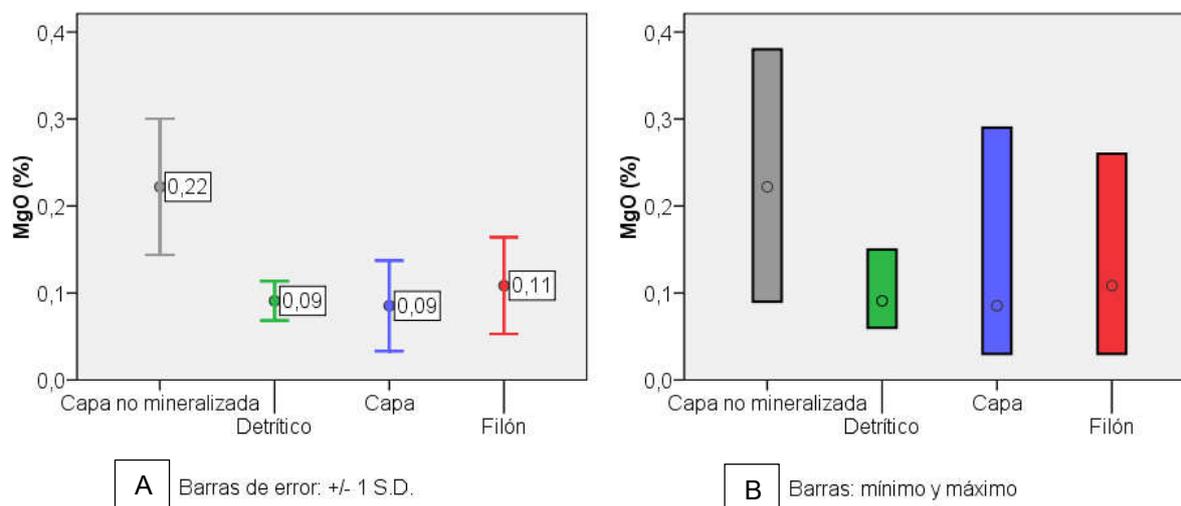


Figura 55. Valor medio del contenido en MgO según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

-Na<sub>2</sub>O. No se obtienen diferencias significativas en los valores medios de las diferentes categorías (fig. 56A). Respecto a los valores mínimos (fig. 56B), en las capas son ligeramente inferiores a los obtenidos en detrítico y filón. Los valores máximos (fig. 56B) se registran en las capas, con un valor intermedio en filón, mientras el menor valor máximo se localiza en detrítico.

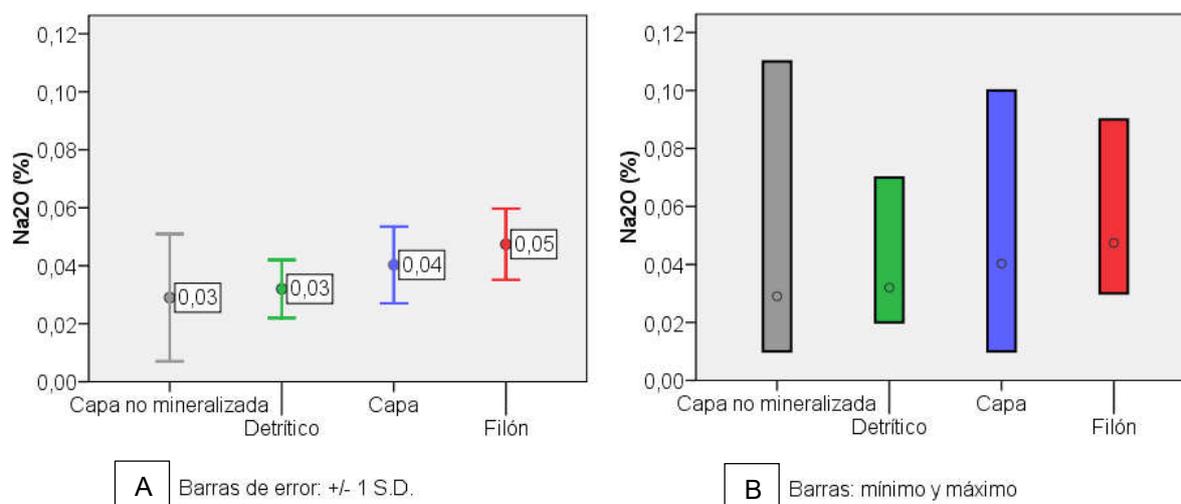


Figura 56. Valor medio del contenido en Na<sub>2</sub>O según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

-K<sub>2</sub>O. En las capas se obtienen valores medios similares (0,5 – 0,6%), cifras que aumentan en detrítico y filón (0,8%) (fig. 57A). Respecto a los valores mínimos (fig. 57B), en detrítico se registra el mayor valor (0,6%), frente a valores próximos a cero en el resto de categorías. Los valores máximos son similares en todas las categorías excepto en filón, donde se registra el mayor valor máximo (fig. 57B). Se observa que el rango de valores es notablemente inferior en detrítico respecto al resto de categorías.

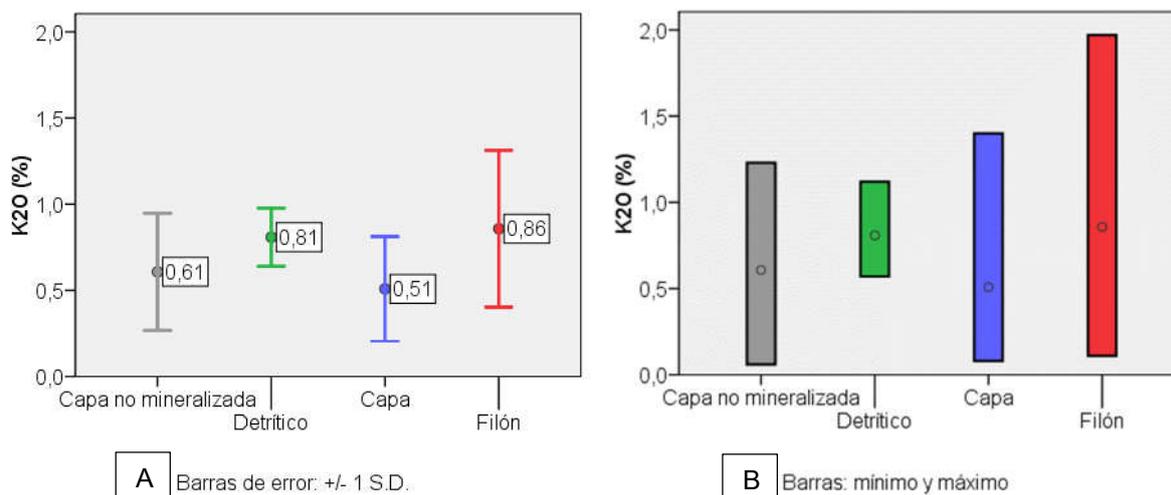


Figura 57. Valor medio del contenido en K<sub>2</sub>O según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

-TiO<sub>2</sub>. Se obtienen valores medios similares en las capas (≈0,05%) y en detrítico y filón (≈0,12%) (fig. 58A). Respecto a los valores mínimos (fig. 58B), mientras que en detrítico es del 0,10%, en el resto de categorías se encuentra próximo a cero. Los valores máximos son similares en todas las categorías excepto en filón, donde se registra el mayor valor máximo (fig. 58B). Se observa que el rango de valores es notablemente inferior en detrítico respecto al resto de categorías.

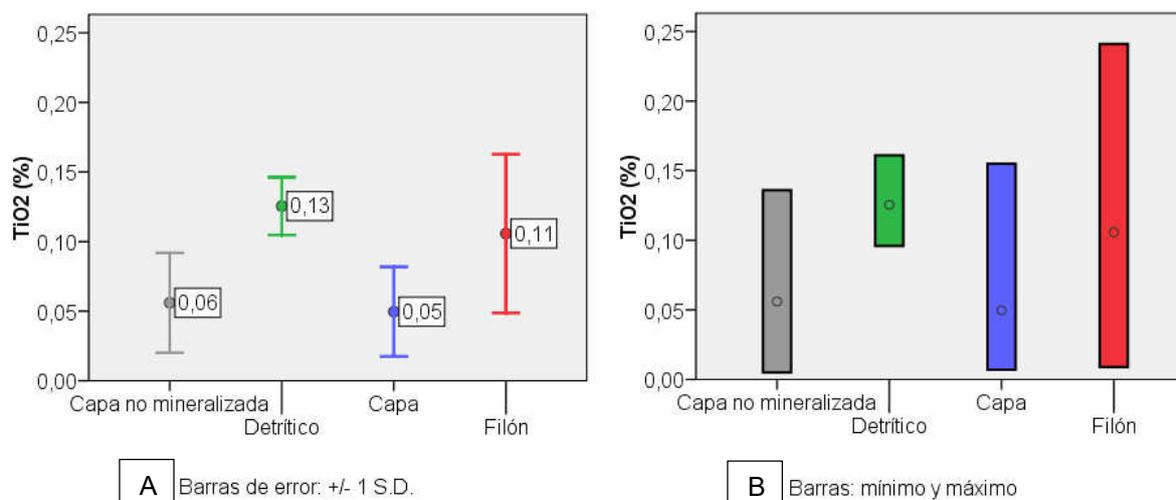


Figura 58. Valor medio del contenido en TiO<sub>2</sub> según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- $P_2O_5$ . Aunque los valores medios (fig. 59A) y mínimos (fig. 59B) son similares en todas las categorías, se observan diferencias en los valores máximos, donde la categoría no mineralizado registra un valor máximo significativamente superior al resto de categorías.

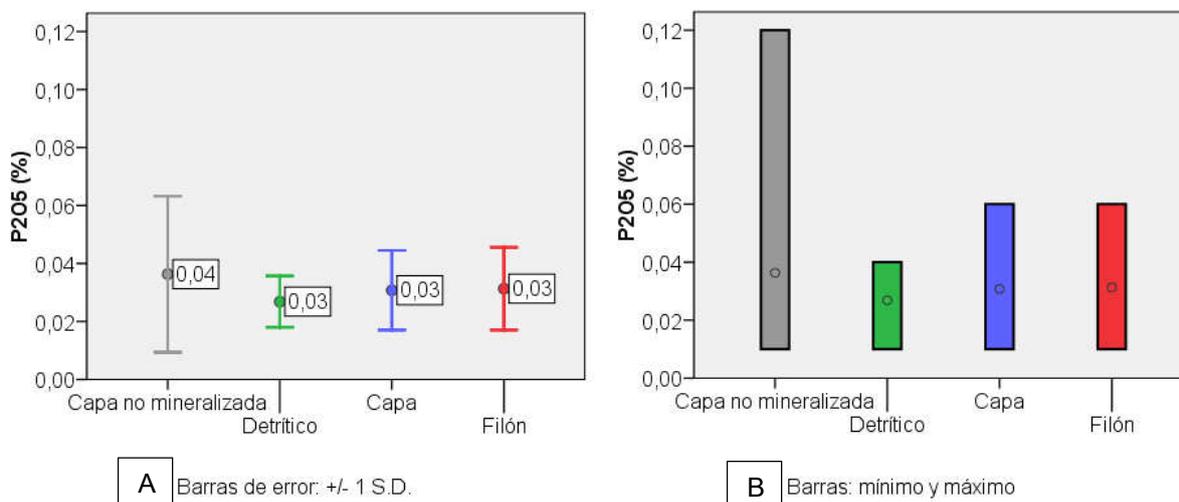


Figura 59. Valor medio del contenido en  $P_2O_5$  según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

### 4.2.1.2. LOI (*Loss on ignition*)

El LOI (Lechler y Desilets, 1987) o pérdida por calcinación es un parámetro analítico que mide la diferencia de peso entre la muestra sin calcinar y calcinada. Informa sobre el contenido en componentes volátiles (agua, carbonatos, sulfatos y sulfuros). En la figura 60 se muestra el valor medio en LOI según categorías. En las categorías con protolito carbonatado se obtienen las medias más altas (27% en no mineralizado y 12% en capa), en detrítico y filón el valor medio es inferior (8%).

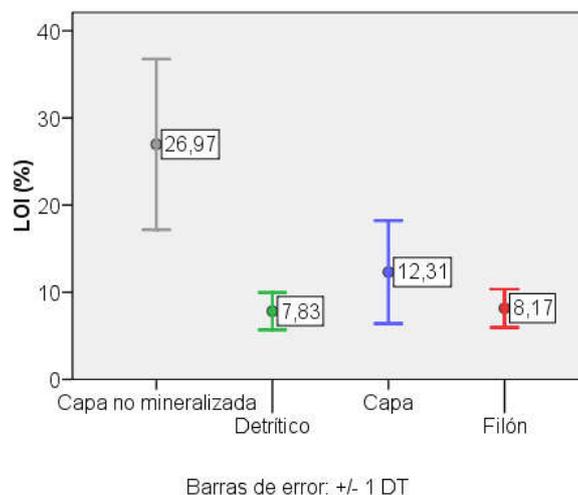


Figura 60. Valor medio del LOI y desviación estándar según categorías.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.2.2. INFERENCIA ESTADÍSTICA

Una vez realizada la estadística descriptiva de la fluorita y los óxidos mayores que componen las muestras analizadas, se estudia cómo interactúan y qué relación tienen las variables entre sí. En la tabla VII se muestra la matriz de correlación simplificada, en la que se detalla si las correlaciones significativas son positivas o negativas; los coeficientes de correlación obtenidos pueden consultarse en el anexo II. Todos los óxidos analizados han sido detectados en todas las muestras (20 en categoría no mineralizada, 20 en detrítico, 72 en capa y 27 en filón), excepto en el caso del  $P_2O_5$ , que ha sido detectado en 19 muestras de no mineralizado, 19 de detrítico, 66 de capa y 23 de filón.

	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
CaF <sub>2</sub>		(-)	(-)			(-)	(+)		(-)	(-)	
SiO <sub>2</sub>							(-)				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		(+)				<b>((+))</b>	(-)		<b>((+))</b>	<b>((+))</b>	(+)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		(+)									(-)
MnO		<b>((-))</b>	(-)	(-)		(+)					
MgO		(-)			(+)				<b>((+))</b>	<b>((+))</b>	(+)
CaO		<b>((-))</b>	(-)	(-)	<b>((+))</b>	(+)				(-)	
Na <sub>2</sub> O		(+)	(+)		(-)		(-)				
K <sub>2</sub> O		(+)	<b>((+))</b>				(-)	(+)		<b>((+))</b>	(+)
TiO <sub>2</sub>		(+)	<b>((+))</b>		(-)		(-)	(+)	<b>(+)</b>		(+)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>						(+)					
CaF <sub>2</sub>		<b>((-))</b>	(-)			(-)	<b>((+))</b>		(-)	(-)	
SiO <sub>2</sub>	(-)		(+)			(+)	<b>((-))</b>		(+)	(+)	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(-)	(+)		(+)		<b>((+))</b>	(-)		<b>((+))</b>	<b>((+))</b>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						(+)			(+)	(+)	
MnO	(-)	(-)	(-)								
MgO	(-)		(+)		(+)		(-)		<b>((+))</b>	(+)	
CaO	(+)	<b>((-))</b>	(-)		(+)				(-)	(-)	
Na <sub>2</sub> O		(+)	(+)		(-)		(-)				
K <sub>2</sub> O	(-)	(+)	<b>((+))</b>		(-)	(+)	(-)			<b>((+))</b>	
TiO <sub>2</sub>	(-)	(+)	<b>((+))</b>		(-)	(+)	(-)		<b>((+))</b>		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		(+)	(+)		(-)				(+)	(+)	

Tabla VII. Matriz de correlación simplificada. Se muestran las correlaciones con un p-valor inferior a 0,05. En negrita y con doble paréntesis se remarcan aquellas correlaciones con  $r > 0,75$  y  $r < - 0,75$ . En color gris la categoría no mineralizado, en verde detrítico, en azul capa y en rojo filón.

#### 4.2.2.1. Componentes mayoritarios: CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO

Tal y como se vio en el apartado de estadística descriptiva, las muestras se encuentran formadas principalmente por CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO. A continuación se estudian las relaciones existentes entre estas tres variables.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Fluorita – SiO<sub>2</sub>. Se observan dos tendencias (fig. 61); por una parte, en la categoría no mineralizado no se obtiene correlación entre SiO<sub>2</sub> y CaF<sub>2</sub>, frente a la clara relación lineal negativa existente en las categorías mineralizadas. Así, es evidente que en el caso de que exista mineralización, si aumenta el contenido en CaF<sub>2</sub> disminuye el contenido en SiO<sub>2</sub>.

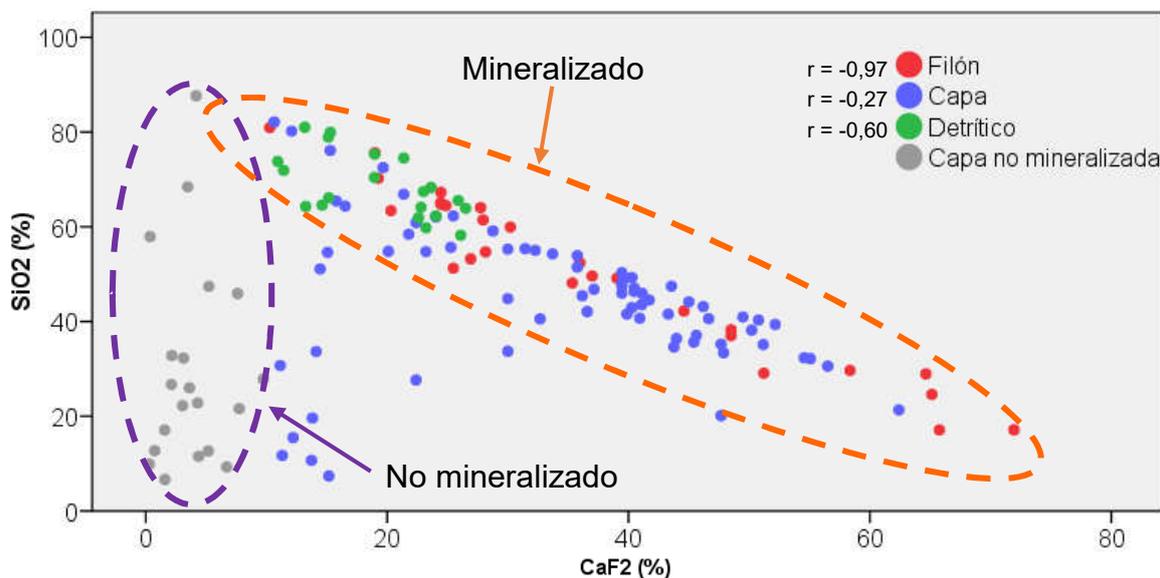


Figura 61. Diagrama de dispersión CaF<sub>2</sub> – SiO<sub>2</sub> (%) según categorías. La nube de puntos morada indica los casos en los que no existe relación; la naranja en los que existe relación lineal negativa.

Si observamos capa no mineralizada y capa como un único conjunto, se observa que para contenidos en fluorita inferiores al 16% no existe ninguna relación, aparecen puntos en todos los rangos posibles de sílice. Para porcentajes de fluorita superiores al 16%, existe una clara relación lineal negativa, donde a medida que aumenta el contenido en CaF<sub>2</sub> disminuye el contenido en SiO<sub>2</sub>. En el caso de detrítico, la nube de puntos se restringe en una zona pequeña. Como se expuso en el apartado de estadística descriptiva, detrítico es la categoría con menor variación de resultados tanto en SiO<sub>2</sub> (en el rango 60 – 80%) como en CaF<sub>2</sub> (en el rango 10 – 22%). En el caso de filón, la correlación lineal es prácticamente negativa perfecta.

- Fluorita – CaO. Se observan dos tendencias (fig. 62); no existe relación en el caso de no mineralizado y existe relación lineal positiva en el caso de las categorías mineralizadas, cuando aumenta el contenido en CaF<sub>2</sub> aumenta el contenido en CaO. Téngase en cuenta que parte de este CaO se encuentra formando parte de la fluorita (ecuación 5), de manera que el diagrama de dispersión nos informa sobre cómo se presenta el CaO. Si existe correlación positiva, el CaO se encuentra mayoritariamente relacionado con la mineralización (nube de puntos naranja), y en consecuencia, se

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

encontrará principalmente como fluorita. Donde no existe relación (nube de puntos morada), el calcio no se encuentra formando parte de la fluorita, de manera que existirá otra fase mineral que lo contenga (principalmente carbonato).

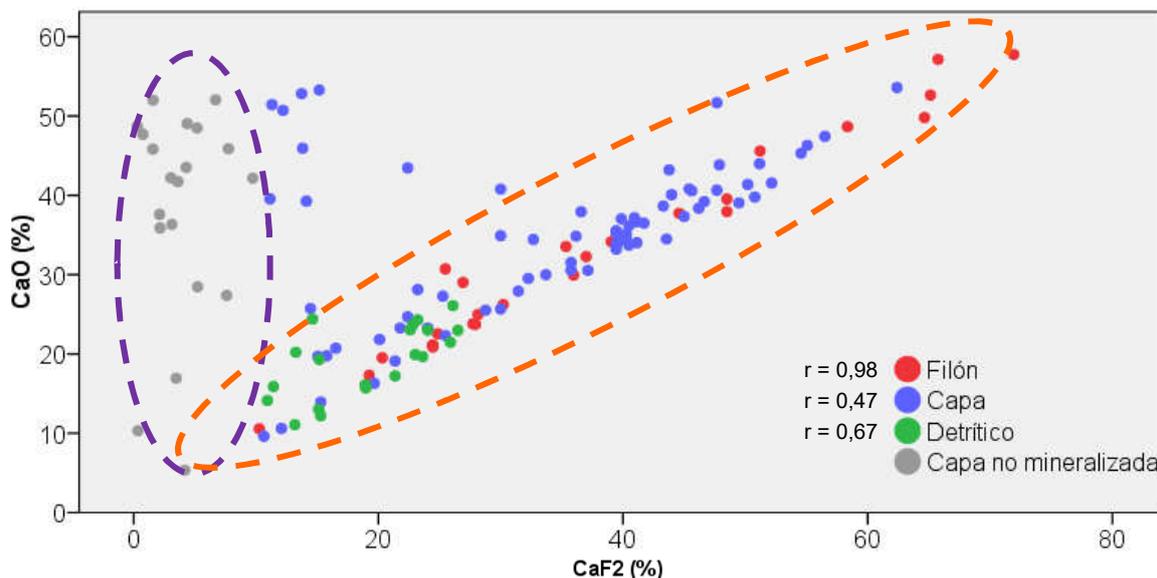


Figura 62. Diagrama de dispersión CaF<sub>2</sub> – CaO (%) según categorías. La nube de puntos morada indica los casos en los que no existe relación; la naranja en los que existe relación lineal positiva.

En la categoría no mineralizado, hay poca cantidad de fluorita, y debido al carácter carbonatado de la roca, pueden existir todos los rangos de CaO, dependiendo, principalmente, del contenido en carbonato de la roca y del grado de silicificación de esta. En consecuencia, no existe correlación, ya que casi todo el CaO se encuentra como carbonato, con cantidades menores de fluorita. En el caso de la categoría detrítico, la cantidad de CaO se encuentra limitada por la proporción de cemento carbonatado existente en el protolito. Según se observa en la correlación, en este caso, la mayoría del CaO se encuentra como CaF<sub>2</sub>, excepto en los casos donde la mineralización es baja (se desvían un poco de la correlación). En la categoría capa, si la mineralización es inferior al 16% no existe relación entre CaO y fluorita, lo que sugiere que la mayoría del CaO se encuentra en otras fases minerales (como ya se ha dicho, principalmente carbonato). Sin embargo, a partir del 16% la relación es lineal positiva, indicando que la fase principal que contiene el CaO es la fluorita. La correlación casi perfecta entre CaO y CaF<sub>2</sub> en la categoría filón sugiere que el calcio se encuentra principalmente como fluorita.

- SiO<sub>2</sub> – CaO. Tal y como se observa en la figura 63, existe una fuerte correlación negativa en todas las categorías, con coeficientes de correlación de Pearson muy próximos a -1, mostrando una relación antagónica. Por consiguiente, si aumenta el SiO<sub>2</sub> disminuye el CaO y viceversa.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

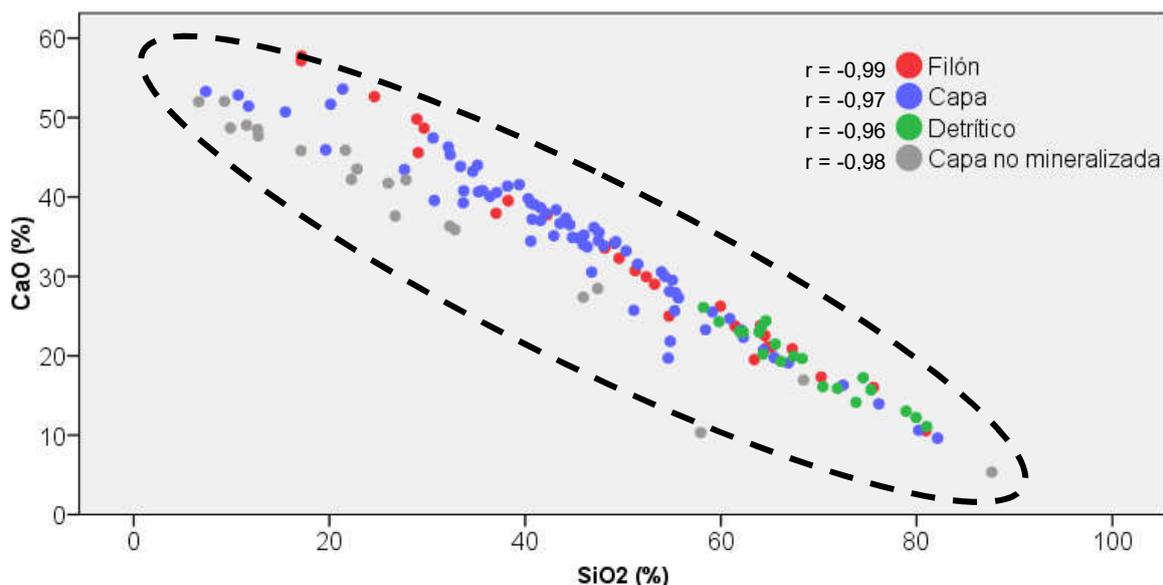


Figura 63. Diagrama de dispersión SiO<sub>2</sub> – CaO (%) según categorías.

La integración de las observaciones realizadas en el estudio petrográfico y en el estudio estadístico nos permite realizar las siguientes consideraciones sobre los componentes principales de las muestras:

-La categoría no mineralizado y capa, son, en origen, la misma roca, una caliza micrítica. Existen tres situaciones extremas, entre las cuales existe una variación continua. Si la roca no ha sufrido ni silicificación ni fluoritización (fig. 64A), el componente principal será carbonato (CaO alto), mientras que cuarzo y fluorita serán anecdóticos (CaF<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub> bajos). Si la roca ha sido fuertemente mineralizada (fig. 64B), el componente mineral principal será la fluorita (CaF<sub>2</sub> alto), con cantidades menores de carbonato y cuarzo (en los análisis químicos, alto CaO y bajo SiO<sub>2</sub>). Si el proceso dominante es la silicificación (fig. 64C), el mineral principal será el cuarzo (SiO<sub>2</sub> alto), con cantidades anecdóticas de carbonato y fluorita (CaO y CaF<sub>2</sub> bajos).

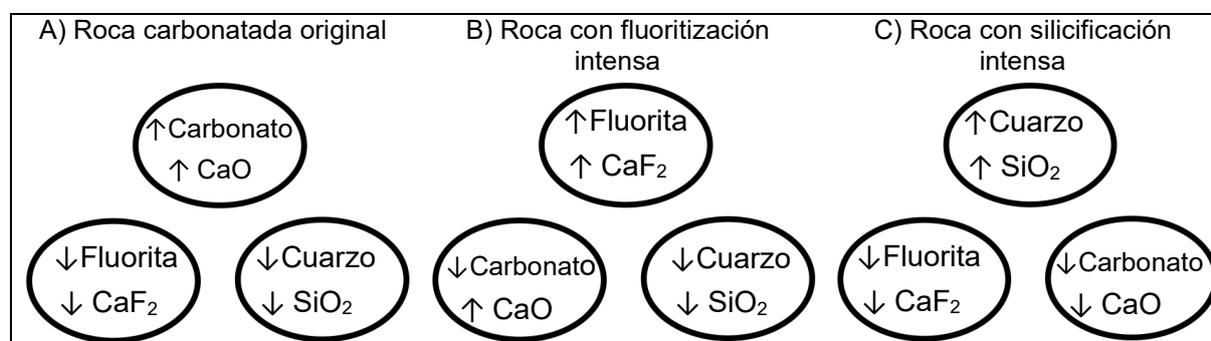


Figura 64. Composiciones extremas posibles en las categorías no mineralizado y capa.

-En la categoría detrítico, los posibles extremos composicionales (fig. 65) son diferentes debido al protolito. En este caso, la roca original es una calcarenita, con

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

clastos de mayoritariamente cuarzo rodeados de un cemento carbonatado. Según la petrografía, el porcentaje de granos frente a cemento es 59% clastos siliciclásticos y 37% cemento carbonatado. Por lo tanto, el contenido en SiO<sub>2</sub> no puede ser inferior al 60%, aunque si puede aumentar por silicificación. Esto se traduce en que en la categoría detrítico siempre se obtienen altos valores en sílice, y, además, el porcentaje en fluorita no puede ser superior al porcentaje en cuarzo.

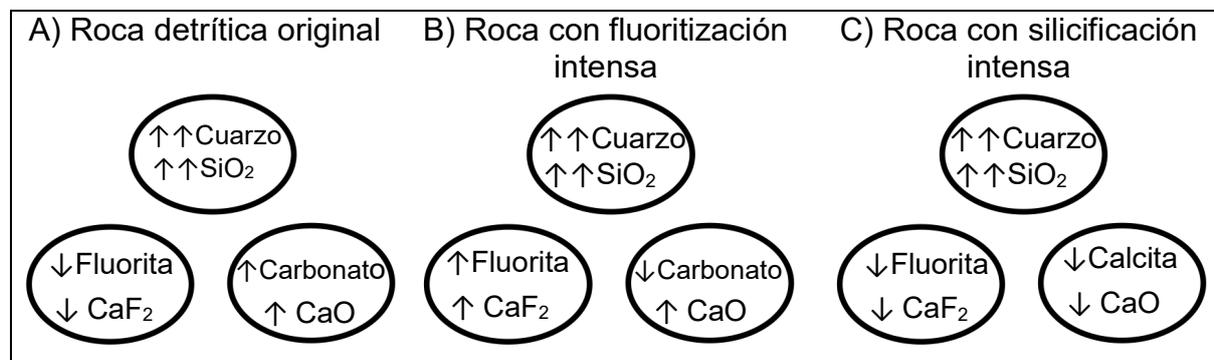


Figura 65. Composiciones extremas posibles en categoría detrítico.

#### 4.2.2.2. Óxidos con mayor concentración en capa no mineralizada: MnO y MgO

Como se vio en la estadística descriptiva, MnO y MgO registran los mayores valores en capa no mineralizada (fig. 66A). Se realizan correlaciones entre estos elementos y los componentes mayoritarios. Al estudiar la relación entre MnO y MgO, se obtiene relación lineal positiva en todas las categorías excepto en filón (fig. 66B).

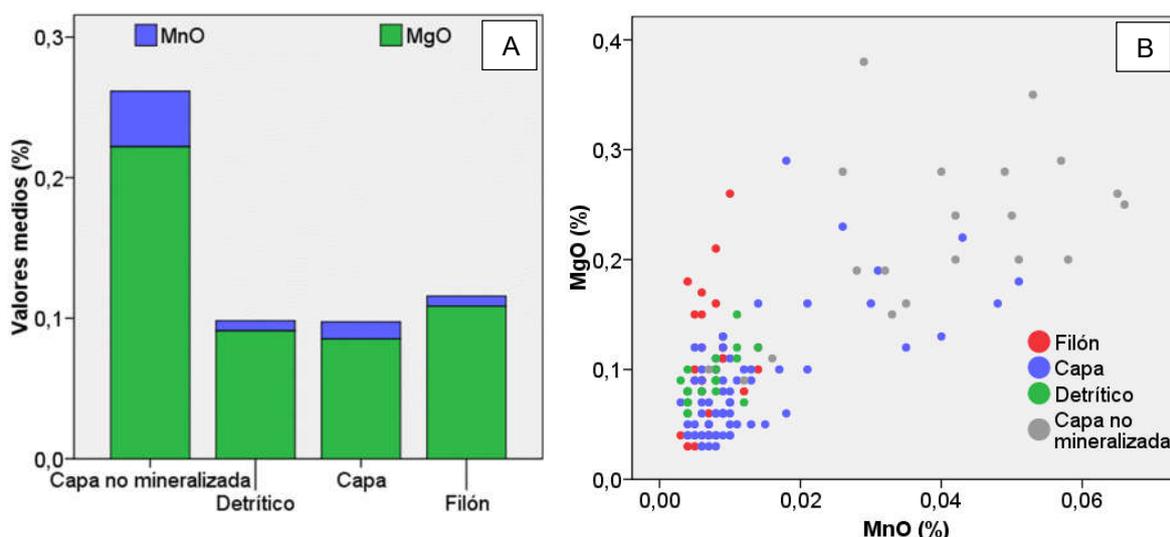


Figura 66. A) Valores medios de MnO y MgO según categoría. B) Diagrama de dispersión MgO-MnO.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

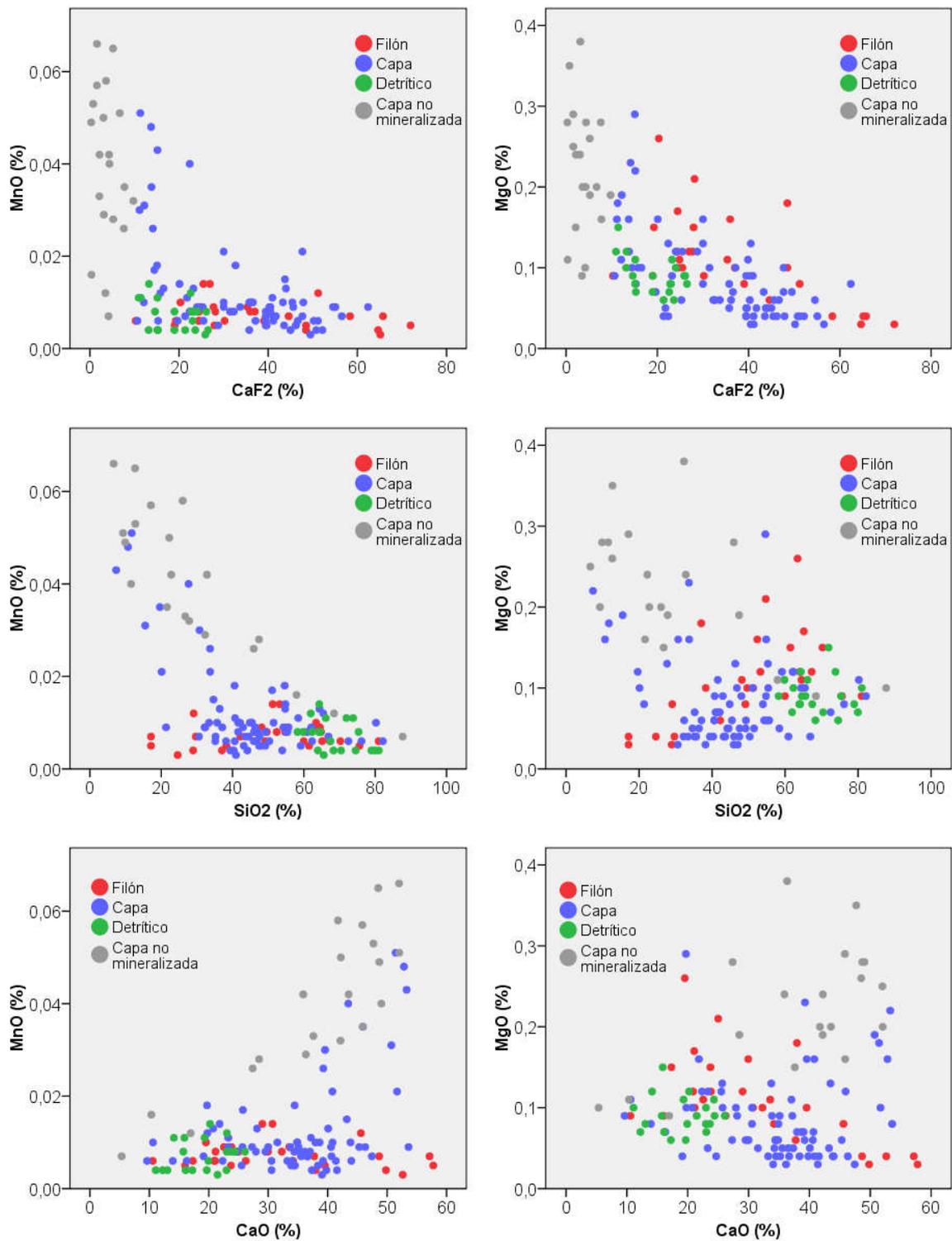


Figura 67. Diagramas de dispersión entre el MnO y MgO y los componentes mayoritarios (CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO).

En la figura 67 se muestran las correlaciones entre MnO-MgO y los componentes principales (CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> y CaO). En el caso de la fluorita, MnO sólo correlaciona en la categoría capa (negativa), y el magnesio en capa y filón (negativa). Con el SiO<sub>2</sub>,

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

correlacionan negativamente en no mineralizado y capa, pero además, el MgO correlaciona positivamente en filón. Respecto al CaO, ambos tienen relación lineal positiva en no mineralizado, y el MgO negativa en filón. Así, parece evidente que ambos tienen algún tipo de relación con la roca original. En un intento de cuantificar esta observación, y puesto que la roca original de la categoría no mineralizado es una roca de composición carbonatada, se extrae de las correlaciones el CaO que se encontraría formando parte de la fluorita, y que, por lo tanto, correspondería al CaO del protolito. Varios factores condicionan la composición de la fluorita, entre los que se incluyen: la composición de la roca por la que circulan los fluidos y la roca encajante donde precipita la mineralización, la capacidad del fluido hidrotermal para transportar las especies geoquímicas, la presencia de otras fases minerales distintas a la fluorita que incorporen preferentemente ciertos elementos, y la capacidad de los elementos para entrar en la estructura de la fluorita (Hiell et al., 2000, en Mahdy et al., 2014). La sustitución de iones en la fluorita es mínima (Eppinger, 1988), se estima que no es superior al 0,1% (Keller, 1950). El Ca puede ser sustituido por Li, Na, K, Mg, Mn, Fe, Zn, Sr, Y, Zr, Ba, lantánidos, Pb, Th y U (Mao et al., 2015). En consecuencia, y tras asumir una composición ideal de la fluorita, se calcula el CaO (CaO “estimado”) que se encontraría en otras fases, principalmente como carbonato. Los datos obtenidos se muestran en la tabla VIII y en la figura 68.

	No mineralizado	Detrítico	Capa	Filón
CaO estimado				
$\bar{x}$	35,11	5,31	10,35	5,43
S.D.	13,63	3,43	10,17	2,47
Min	2,34	1,24	1,93	2,38
Max	50,86	13,92	43,32	12,42
CaO total				
$\bar{x}$	37,88	19,17	34,68	32,05

Tabla VIII. CaO “estimado” y CaO total según categorías.

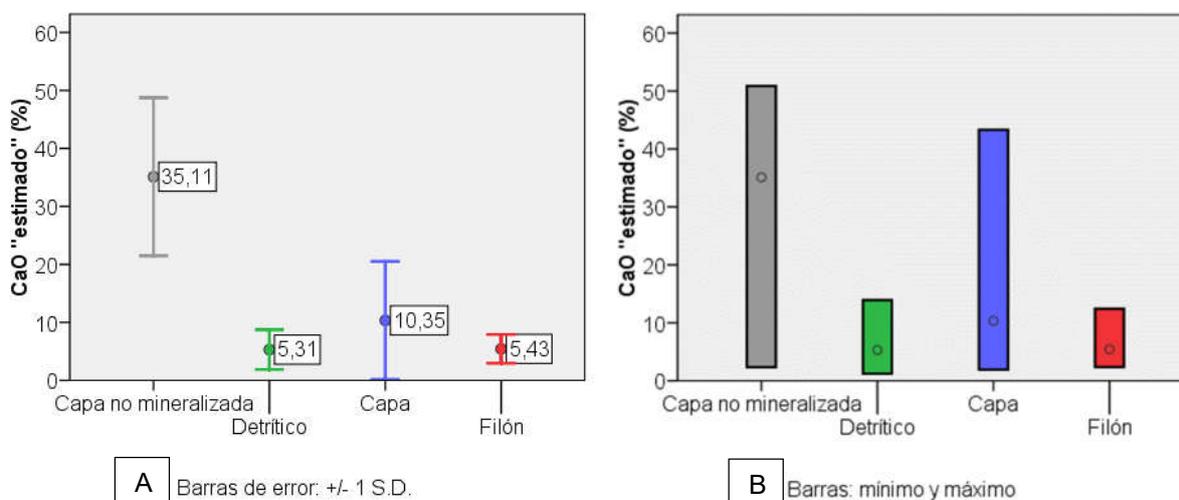


Figura 68. Valor medio del contenido en CaO “estimado” según categorías, con su desviación estándar (A) y el rango de valores (B).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al correlacionar MnO y MgO con el CaO estimado, (fig. 69) se obtiene una buena correlación entre MnO y CaO estimado, confirmando la relación existente entre el CaO original de la roca y el MnO. En el caso del MgO esta relación se cumple en todas las categorías excepto en filón. En esta categoría, la coexistencia de varias litologías y, posibles alteraciones diferentes a las silicificación y/o fluoritización, hacen su interpretación más compleja.

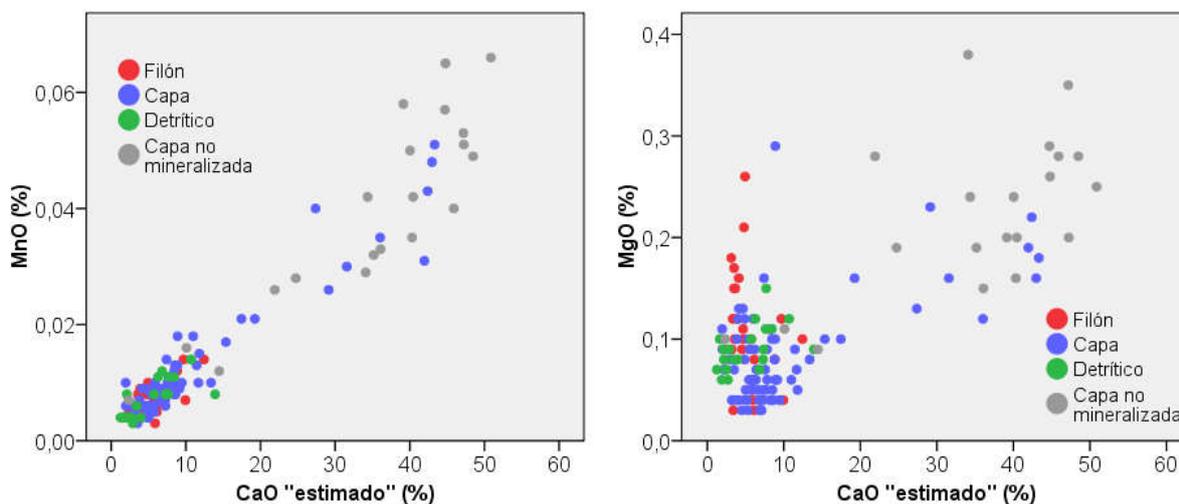


Figura 69. Diagramas de dispersión MnO y MgO con el CaO “estimado”.

Según su distribución en las diferentes categorías y el análisis de las correlaciones, podemos asegurar que son elementos relacionados con los minerales existentes en la roca original, antes del proceso de silicificación y/o fluoritización. La excelente correlación entre MnO y CaO pone de manifiesto la fuerte afinidad del MnO con el calcio composicional.

### 4.2.2.3. Óxidos con mayor concentración en filón: $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{K}_2\text{O}$ y $\text{TiO}_2$

Aluminio, potasio y titanio son elementos que muestran correlaciones positivas casi perfectas entre sí en todas las categorías (fig. 70), con coeficientes de correlación de Pearson que varían entre 0,96 y 0,99. Según lo visto en la estadística descriptiva, las similitudes entre estos elementos son: registran los valores medios más bajos en las capas (no mineralizado y capa), más alto en detrítico y en filón, siendo esta última la categoría donde se obtienen los valores máximos; la categoría detrítico es la que presenta menor rango de valores y por lo tanto, menor variación en los resultados; en las capas (no mineralizado y capa), se obtienen resultados similares, con medias y rangos parecidos.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

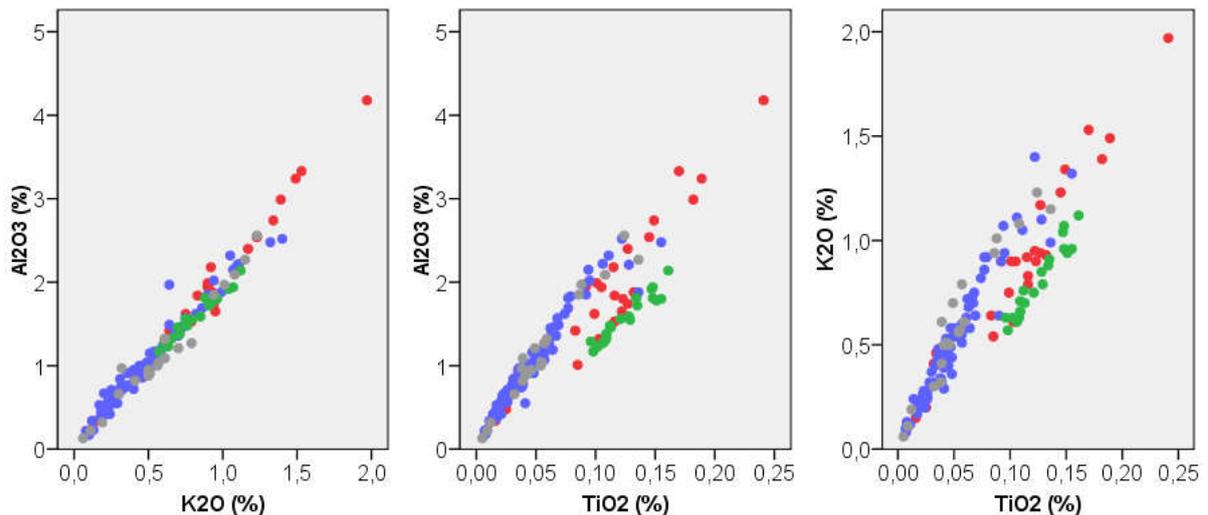


Figura 70. Diagramas de dispersión obtenidos entre las variables  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$ .

En la tabla IX se muestra una síntesis de las correlaciones obtenidas entre estos tres elementos y los componentes mayoritarios ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$ ).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{TiO}_2$  presentan la misma distribución en todas las correlaciones. Con la fluorita, no correlacionan en la categoría no mineralizado; presenta relación lineal negativa en el resto de categorías; es decir, disminuyen al aumentar la mineralización. En lo referente al  $\text{SiO}_2$ , existe relación lineal positiva entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  en todas las categorías excepto en detrítico. Con el  $\text{CaO}$ , se obtiene relación lineal negativa en todas las categorías. En la figura 71 se muestran algunos de los diagramas de dispersión obtenidos al representar estas correlaciones.

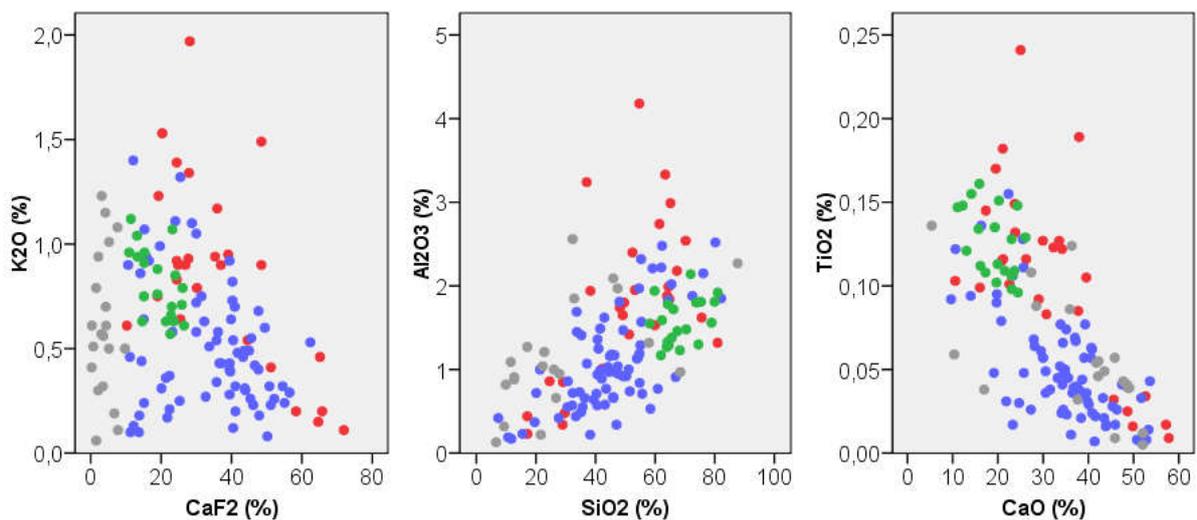


Figura 71. Diagramas de dispersión entre los elementos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  con los componentes mayoritarios ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$ ).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO
No mineralizado	No	Positiva	Negativa
Detrítico	Negativa	No	Negativa
Capa	Negativa	Positiva	Negativa
Filón	Negativa	Positiva	Negativa

Tabla IX. Correlaciones significativas entre Al-K-Ti y CaF<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub> son compuestos que típicamente aparecen asociados a minerales arcillosos. Su mayor presencia en detrítico frente a las capas podría explicarse con la presencia de minerales arcillosos asociados al carácter detrítico de esta categoría. Su relación positiva con el SiO<sub>2</sub> y negativa con el CaO podría atribuirse a alteraciones arcillosas asociadas al proceso de silicificación.

#### 4.2.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS

En esta etapa se estudia la distribución espacial de los óxidos analizados a nivel de yacimiento. A continuación se estudia la distribución espacial de los óxidos minoritarios analizados en la fase de inferencia estadística.

En la figura 72 se muestran los mapas de la distribución del MnO y MgO, donde la envolvente (línea discontinua) diferencia las zonas mineralizadas (parte interna de la envolvente) de las zonas no mineralizadas (parte externa). La distribución de estos elementos, asociados claramente al carbonato de la roca original, marcan perfectamente la diferenciación entre las zonas mineralizadas y las no mineralizadas.

En la figura 73 se muestran los mapas de distribución del TiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O. Al estudiar la estadística descriptiva, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O registraban los mayores valores en la categoría filón. En la etapa de inferencia estadística, correlacionaban positivamente entre sí. Tal y como se observa en la figura 73, la distribución del TiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O es similar (al igual que la del aluminio, que no se ha incluido por su similitud). En ambos mapas se observa que los mayores valores (en colores más fuertes), se registran a lo largo de la falla que aparece en el suroeste de los mapas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

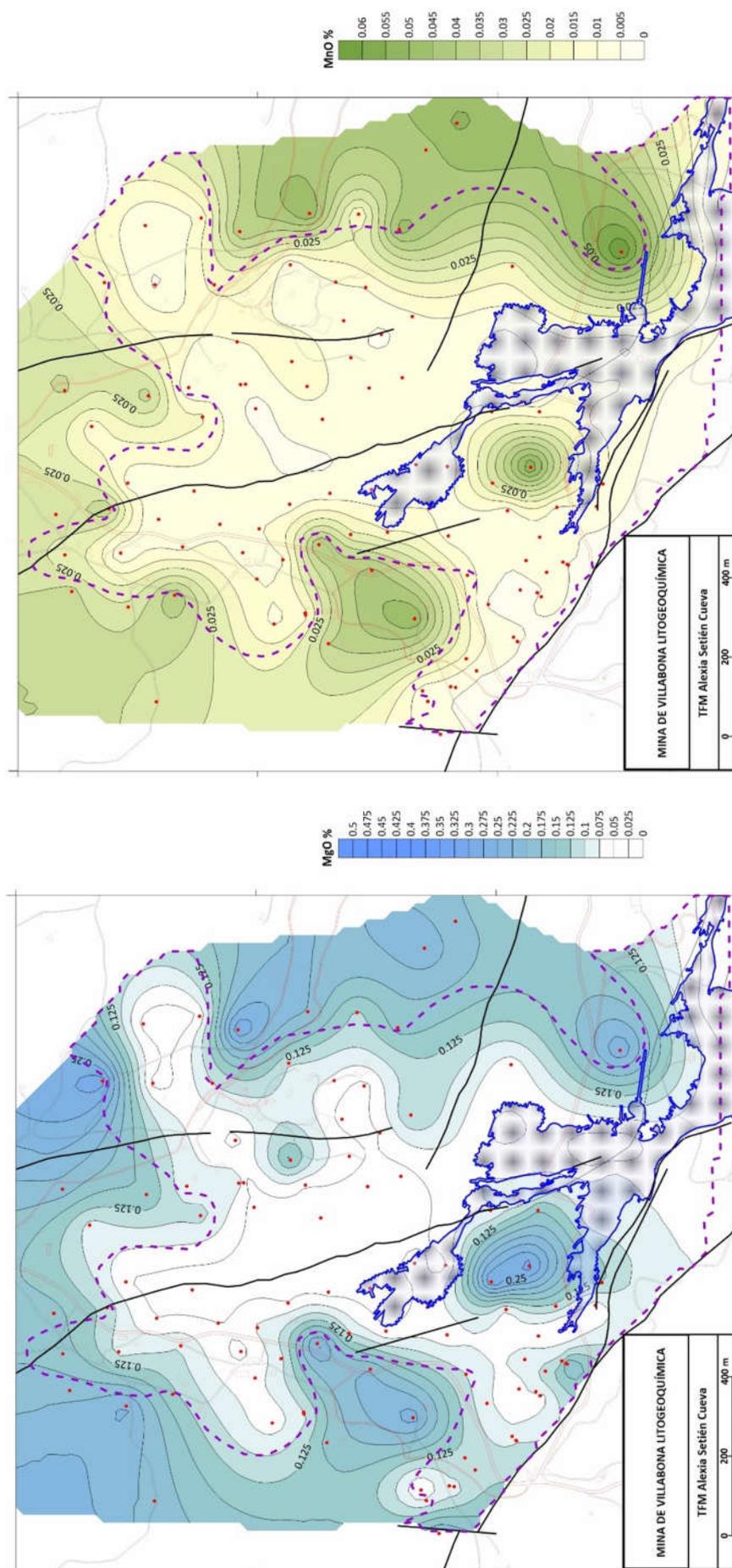


Figura 72. Mapas de la distribución espacial del MnO y MgO en el yacimiento de Minas de Villabona. La envolvente (línea discontinua en color morado) separa las zonas mineralizadas (parte externa de la envolvente) de las mineralizadas (parte interna de la envolvente). El polígono marcado en azul hace referencia a la superficie de la mina de Villabona.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

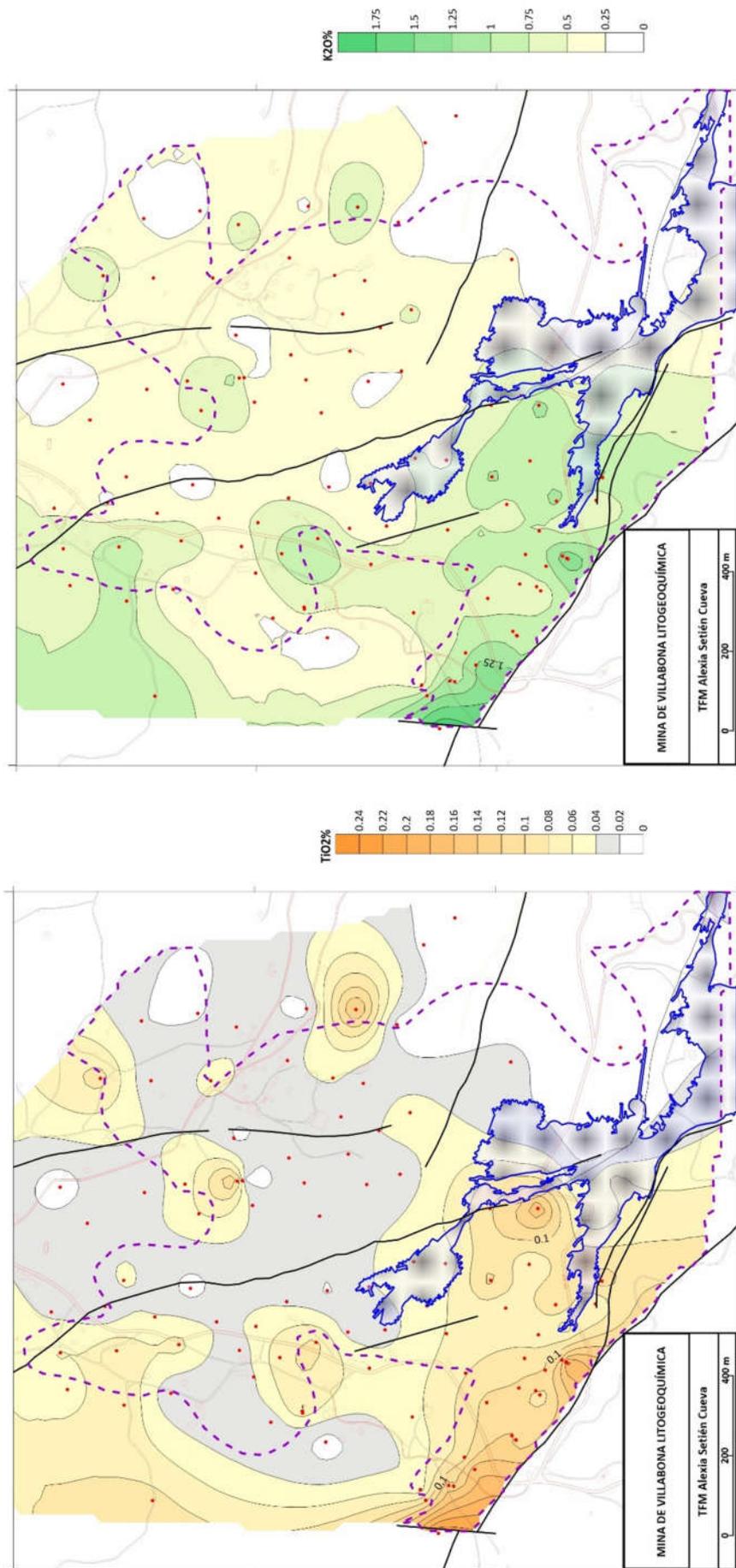


Figura 73. Mapas de la distribución espacial del TiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O en el yacimiento de Minas de Villabona. La envolvente (línea discontinua en color morado) separa las zonas mineralizadas (parte externa de la envolvente) de las mineralizadas (parte interna de la envolvente). El polígono marcado en azul hace referencia a la superficie de la mina de Villabona.

# 5. CONCLUSIONES

Las mineralizaciones estratiformes del distrito minero de Villabona-Arlós aparecen en niveles detrítico-carbonatados que presentan intensos cambios de facies, que varían desde conglomerados a calizas puras (García Iglesias y Loredó, 1992). Según la petrografía, las muestras estudiadas están compuestas principalmente por fluorita, cuarzo y carbonato. Los resultados obtenidos en los análisis geoquímicos corroboran esta observación, siendo los compuestos mayoritarios  $\text{CaF}_2$  (obtenido a partir del porcentaje en flúor),  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$ .

En lo referente a los componentes mineralógicos principales, la información obtenida se resume a continuación:

-Fluorita. Se encuentra presente en todas las categorías. La fluorita tipo 1 (de reemplazamiento), puede presentarse libre de inclusiones (FI1-a, en las categorías no mineralizado, detrítico y capa) debido a que el reemplazamiento de calcita por fluorita ha sido completo; o con inclusiones dispersas (FI1-b, en la categoría capa), si el reemplazamiento no ha sido completo. Según sus características petrográficas, se prevé la formación de partículas mixtas en los contactos entre FI1-a y cuarzo de silicificación (Qtz2), FI1-a y opacos (cuando FI1-a se presenta como cemento de los granos siliciclásticos), FI1-b y carbonato (debido a la disposición de las inclusiones de carbonato a lo largo de la superficie de los cristales de fluorita) y, en menor medida, en los frentes de fluoritización. La fluorita tipo 2 (de relleno de espacios vacíos) aparece en las categorías capa, detrítico y filón. En esta tipología no se prevén problemas de liberación mineral.

-Cuarzo. Es el mineral del que más tipologías se han diferenciado. Puede aparecer como cuarzo detrítico (Qtz1) en las categorías detrítico y capa; corresponde al cuarzo existente en el protolito. Aparecen también diferentes tipos de cuarzo hidrotermal. El cuarzo de silicificación (Qtz2) y el de relleno de espacios vacíos (Qtz3) aparecen únicamente en la categoría no mineralizada. El cuarzo intersticial tardío (Qtz4) se encuentra en la categoría capa.

-Calcita. Se diferencian dos tipologías principales de calcita. Por una parte, aparece calcita composicional, es decir, aquella que se encontraba en el protolito. Puede aparecer como inclusiones en el cuarzo (categoría no mineralizado) o en la fluorita (categoría capa), o como parches que han resistido la silicificación y/o fluoritización (en la categoría no mineralizado). Por otra parte, la calcita de relleno de espacios vacíos (Cal2) se encuentra únicamente en la categoría capa. Mencionar que la cantidad de carbonato en la categoría detrítico es anecdótica.

## 5. CONCLUSIONES

-Como minerales accesorios se incluyen los opacos, principalmente pirita, que aparece en todas las categorías. Como minerales traza (con una proporción inferior al 1%), aparece el grupo de los feldespatos, micas, rutilos, circones y turmalinas; estos minerales se encuentran principalmente en la categoría detrítico.

Según los análisis químicos, los resultados obtenidos para los componentes principales son:

-CaF<sub>2</sub>. Los valores medios más bajos se registran en las categorías no mineralizado (4%) y detrítico (19%), obteniéndose los mayores valores medios en las categorías capa (34%) y filón (37%). El contenido en CaF<sub>2</sub> de la categoría detrítico se encuentra restringido por la cantidad de cemento carbonatado del protolito (37%).

-SiO<sub>2</sub>. El mayor valor medio se alcanza en la categoría detrítico (69%), categoría que presenta el menor rango de valores (entre 58 y 81%). En el resto de categorías se obtienen valores inferiores (30% no mineralizado, 45% capa y 50% filón), aunque registran un alto rango (desde el 10 hasta el 85% aproximadamente), función del grado de silicificación de la roca.

-CaO: En lo referente al CaO total, en la categoría detrítico se obtiene la media más baja (19%), presentando también la menor variación (entre 11 y el 26%). En el resto de categorías se obtienen resultados similares, con un valor medio de 35%, aunque varían entre el 10 y el 55%, aproximadamente. Si extraemos el CaO que se encuentra formando parte de la fluorita, obtenemos una estimación del "CaO" considerado composicional, que se encuentra principalmente como carbonato y en cantidades menores en otros silicatos. Este "CaO estimado" no presenta diferencias con el CaO total de la categoría no mineralizado (35%), pero si varía considerablemente en las categorías mineralizadas, con un valor medio del 5% en detrítico y filón, y del 10% en capa.

-El resto de óxidos analizados aparecen en proporciones muy bajas, el sumatorio de los valores medios de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no supera el 4% en ninguna de las categorías (fig. 74). Dentro de estos, merece la pena destacar el MnO y MgO, que registran una mayor concentración en la categoría no mineralizado, y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, cuya mayor concentración se produce en la categoría filón. Al estudiar la distribución espacial elemental del MnO y MgO, se observa que estos elementos se distribuyen de forma que separan las partes mineralizadas de las no mineralizadas, siempre teniendo en cuenta que nos estamos refiriendo a las zonas de mayor o menor mineralización de fluorita. En el caso del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, estos elementos presentan una mayor concentración en los alrededores de la falla situada al suroeste.

## 5. CONCLUSIONES

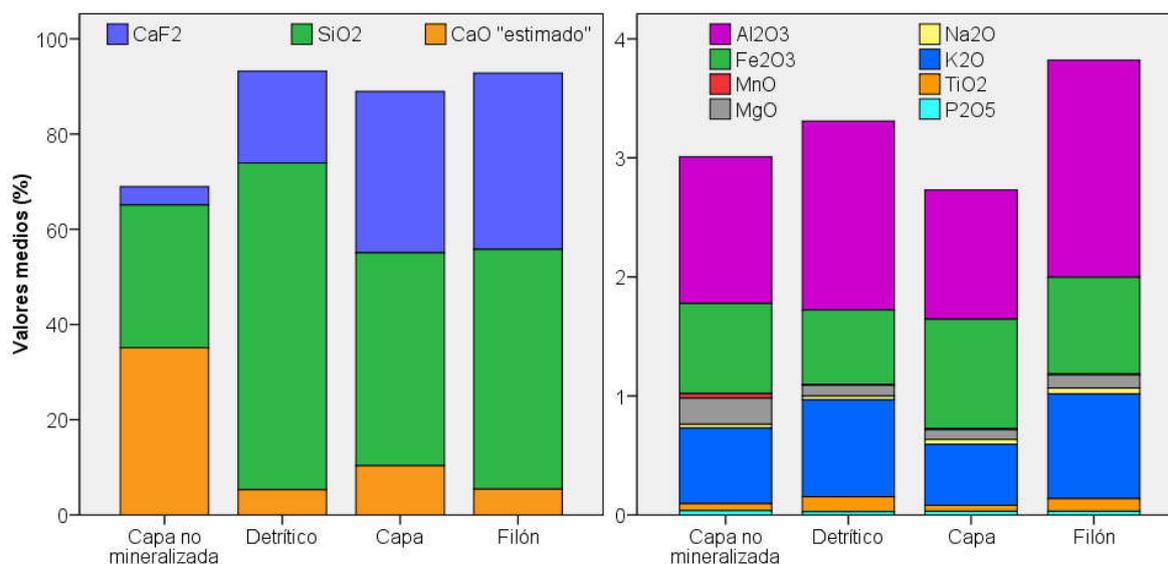


Figura 74. Comparativa entre la concentración de los componentes mayoritarios (CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, y CaO "estimado", siendo éste el CaO total menos el CaO que se encuentra formando parte del CaF<sub>2</sub>) y el resto de óxidos.

Si estudiamos como correlacionan estos elementos

- El par CaF<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub> no correlacionan en la categoría no mineralizado, mientras que en las categorías mineralizadas tienen una relación lineal negativa.

- CaF<sub>2</sub> y CaO no correlacionan en la categoría no mineralizado, mientras que en las categorías mineralizadas tienen una relación lineal positiva. Esta relación nos permite discriminar el CaO que se encuentra como CaF<sub>2</sub> y el CaO considerado composicional.

- SiO<sub>2</sub> y CaO son compuestos antagónicos, tal y como evidencia su correlación negativa casi perfecta en todas las categorías. Puesto que son los componentes mayoritarios (teniendo en cuenta que CaO también incluye a CaF<sub>2</sub>), cuando existe gran cantidad de un compuesto, el otro ha de estar en baja proporción.

- En lo referente a las correlaciones de los óxidos minoritarios, MnO y MgO están relacionados con el CaO composicional, mostrando una relación lineal positiva, relación más evidente en el caso del MnO. MnO y MgO pueden haber sido lixiviados durante los procesos de silicificación y/o fluoritización.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, se comportan de manera inversa que el MnO y MgO, correlacionando negativamente con el CaO, mientras que presentan relación lineal positiva con el SiO<sub>2</sub>, lo que podría atribuirse a alteraciones arcillosas asociadas al proceso de silicificación.

## 5. CONCLUSIONES

La integración de todos estos datos permite extraer las siguientes conclusiones:

-Capa no mineralizada. Los componentes principales son carbonato (componente de la caliza micrítica original) y cuarzo, siendo la fluorita escasa. El contenido en cuarzo depende, principalmente, del grado de silicificación de la roca. Existen relaciones complejas entre la fluorita y el cuarzo, lo que se traduce en una posible generación de partículas mixtas entre ambos minerales, en los contactos entre la fluorita y el cuarzo de silicificación, y en los frentes de fluorización.

-Detrítico: el constituyente principal en esta roca es el cuarzo. La media de  $\text{SiO}_2$  en esta categoría según análisis químicos es del 69%. Al analizar la asociación formada por cuarzo detrítico y fluorita, que actúa como cemento de los clastos siliciclásticos, se observa que el contenido en fluorita en esta categoría se encuentra limitado por el porcentaje de cemento de la roca original (37%), a excepción de los pequeños filoncillos de fluorita que ocasionalmente pueden atravesar esta categoría. En consecuencia, esta es la categoría más homogénea de las mineralizadas, y además, la que menos ley presenta, no superándose nunca el 40%. En lo referente a la liberación mineral, las posibles partículas mixtas se deberán, principalmente, a la presencia de opacos englobados por la fluorita que actúa como cemento, y las zonas de salbandas en las que los pequeños cristales de fluorita ( $60 \mu\text{m}$ ), aparecen rodeados por una red de moscovita y cuarzo microcristalinos.

-Capa. Categoría muy heterogénea en cuanto a los componentes principales, la cantidad de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaO}$  (y, por lo tanto, de fluorita), depende del grado de silicificación y/o fluorización que haya sufrido la roca original. El contenido en sílice lo aporta, principalmente, la alteración hidrotermal, aunque también existe cuarzo detrítico (como clastos individuales o pasadas microconglomeráticas). El contenido en carbonato, depende, en general, de la composición de la roca original. En esta categoría, aparecen todos los tipos de fluorita. Pueden presentarse problemas de liberación debido a la existencia de opacos inmersos en la fluorita que actúa como cemento de los clastos detríticos, más acentuado si también aparece calcita de relleno de espacios vacíos, ya que es la zona en la que más opacos se acumulan. En los casos en los que el reemplazamiento fluorita por carbonato no ha sido completo, se generaran partículas mixtas entre ambas fases, debido a que el carbonato se encuentra como inclusiones diseminadas a lo largo de la fluorita. Únicamente en el caso de cristales de fluorita individualizados, donde el tamaño medio de estos cristales es de 0,4 mm, podrán generarse partículas libres en los bordes de los cristales.

-Filón. Es la categoría que más ley de fluorita presenta. No puede interpretarse de una manera individualizada debido a sus características estructurales; atraviesa diferentes litologías y puede tener otras alteraciones diferentes a la silicificación y/o fluorización.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Adams, S. F. (1920). *A microscopic study of vein quartz* (Master Thesis). Stanford University.

Akande, S. O., Horn, E. E., and Reutel, C. (1988). Minerology, fluid inclusion and genesis of the Arufu and Akwana Pb- Zn- F mineralization, middle Benue Trough, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 7(1), 167-180.

Amstutz, G. C. (1962). How microscopy can increase recovery in your milling circuit. *Mining World*, 24(12), 19-23.

Arias D. (1991). *La caracterización geoquímica y mineralógica del yacimiento de Pb-Zn de rubiales, (Luego, Galicia, España)* (Tesis Doctoral). Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica), Universidad de Oviedo. A Coruña: Serie Nova Terra. Nº4, Instituto Universitario de Xeoloxia.

Butcher, A. R. (2010). A practical guide to some aspects of mineralogy that affect flotation. En Christopher J. Greet (Ed.). *Flotation Plant Optimisation A Metallurgical Guide to Identifying and Solving Problems in Flotation Plants*, (pp. 83-94). Australia: Ausimm – The Minerals Institute – Spectrum Series

Cabal, C. L., Claverol, M. G., y Pando, L. (2010). Contribución de la geología minera al conocimiento de la cuenca permotriásica asturiana. *Trabajos de geología*, Universidad de Oviedo. 30(30), 361-385.

Calleja, L. (1981). *Estudio petrofísico de materiales graníticos gallegos: Emisión acústica* (Tesis de Licenciatura). Departamento de Petrología, Universidad de Oviedo.

Cardellach, E., Corbella, M., Sánchez, V., Vindel, E., and Boyce, A. J. (2007). Origins of fluids associated to gangue minerals in fluorite deposits of Asturias (N Spain). En Andrew C.J et al. (Eds). *Digging Deeper: Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin* (Vol. 2, pp. 1311-1314).

Craig, J., and Vaughan, D. (1994). *Ore Microscopy & Ore Petrography*. New York, USA: John Wiley and sons.

Demoustier, A., Castroviejo Bolibar, R., y Charlet, J. M. (1998). Clasificación textural del cuarzo epitermal (Au-Ag) de relleno filoniano del área volcánica de Cabo de Gata, Almería. *Boletín geológico y minero*, 109(5-6), 449-468.

Díaz González, J. S. (1978). *Estudio geológico de los indicios y yacimientos de fluorita en Asturias* (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas, Universidad de Oviedo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Dong, G., Morrison, G., and Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology*, 90(6), 1841-1856.
- Dunham, K.. (1983). Ore genesis in the English Pennines, A fluoritic subtype: *International Conference on Mississippi Valley-type Lead-Zinc Deposits, Proceedings Volume*, p. 271-278.
- Eppinger, R. G. (1988). *Trace element and rare earth element variation in fluorites collected from skarn and epithermal mineral deposits in the Sierra Cuchillo area, south-central New Mexico* (No. 88-566). Denver: US Geological Survey.
- Fernández Suárez, J. (2013). *Investigación, evaluación y ordenación minero-ambiental-social de los recursos de rocas y minerales industriales de la zona central de Asturias* (Tesis doctoral). Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo.
- Ferrand, A. (1978): *Étude géologique et géochimique du gisement de fluorine de Villabona (Asturies, Espagne)* (Thèse de 3e cycle). Universidad de Orleans.
- Ferrand, A., Grappin, C., Garcia-Iglesias, J., et Touray, J. C. (1978). Nouvelles données sur le gîte de fluorine de Villabona (Asturies-Espagne) et ses conditions de genèse. *Bull. BRGM II*, 4, 367-369.
- Gallastegui Suárez, J. (2000). Estructura cortical de la cordillera y margen continental cantábricos: perfiles ESCI-N (Tesis doctoral). *Trabajos de Geología*, Universidad de Oviedo. 22 (22), 9-231.
- Gálvez Montaña, L. (2014). *Estudio de líneas de crecimiento en fluoritas asturianas mediante ablación láser acoplada a ICP-MS* (Trabajo de Fin de Máster). Universidad de Oviedo.
- García García, G., y Calvo Rebollar, M. (1998). Mineralogía de los yacimientos de fluorita asturiana. *Bocamina*, (3), 34-59.
- García Iglesias, J. (1972): Los yacimientos de fluorita en Asturias. *Fundación Juan March (informe inédito)*, Madrid.
- García Iglesias, J. (1978). Estudio de inclusiones fluidas en los depósitos de fluorita de Berbes, Asturias. *Boletín Geológico y Minero*, 89, 69-83.
- García Iglesias, J. y Loredó, J. (1992). Yacimientos de fluorita en Asturias. En García Guinea, J. y Martínez Frías, J. (Eds). *Recursos Minerales de España. Textos Universitarios*. 15, 487-497. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- García-Iglesias, J., y Loredó, J. (1994). Geological, geochemical and mineralogical characteristics of the Asturias fluorite district, northern Spain. *Exploration and Mining Geology*, 3(1), 31-37.
- García-Iglesias, J., y Touray, J. C. (1977). A fluorite-calcite-quartz paragenesis with liquid and gaseous organic inclusions at La Cabana, Berbes, Asturias fluorite district, Spain. *Economic Geology*, 72(2), 298-303.
- Gaudin, A.M. (1939). *Principles of Mineral Dressing*. New York: McGraw-Hill
- González Laguna, R., Banks, D., López García, J. A., y Vindel, E. (1996). Geoquímica y origen de los fluidos asociados a los yacimientos de fluorita de Berbes-La Cabaña y La Collada (Asturias). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, (19-1), 43-44.
- Gutiérrez Claverol, M., Luque Cabal, C., García Álvarez, J. R., y Rodríguez Terente, L. M. (2009). *La Fluorita. Un siglo de minería en Asturias*. Oviedo.
- Henley, K.J. (1983). Ore-Dressing mineralogy – A review of techniques, applications and recent developments. *Spec. Publ. geol. S. Afr.*, 7, 175-200.
- Higgins, M.D. (2006). *Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology*. United Kingdom: Cambridge, University Press
- Hurlbut, C. and Klein, C. (1996). *Manual de Mineralogía, basado en la obra de J.D. Dana*. 2 vols. Barcelona: Reverté.
- IGME. (1976). *Estudio sobre estado actual y tendencias futuras de Mercado y tecnología de algunas sustancias minerales destinado a la elaboración de planes de actuación sobre estas sustancias. Tomo XIII-Espato flúor*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (1982). *Inventario nacional de recursos de fluorita. 5 Vol.* Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (1995a). *Informe hidrogeológico. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (1995b). *Informe hidroquímico. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (1995c). *Informe geológico. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

## 6. BIBLIOGRAFIA

IGME. (1995d). *Informe geotécnico y de subsidencia. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (1995e). *Informe de convergencia y expansión. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (1995f). *Informe de procesos activos. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (1995g). *Informe estructural. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (1995h). *Estudios geomorfológico, neotectónico y sismotectónico. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (1995i). *Informe ambiental. Caracterización de estructuras subterráneas artificiales. Aplicación a un caso concreto (Estructuras subterráneas. Asturias II). Aplicación Mina Villabona*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

IGME. (2013). *Mapa de rocas y minerales industriales de Asturias*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Janoo, V. (1998). *Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials*. Special Report 98-1, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory.

Jones, M. P. (1987) *Applied mineralogy, a quantitative approach*. London: Graham and Trotman Ltd.

Julien, J. (1974): *Recherches sur les minéralisations fluorées liées à l'évolution du bassin permo-triasique des Asturies (Espagne) (Tesis Doctoral)*. Univ. Paris VI, 298 pp.

Julivert, M. (1967). *La ventana del Rio Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga. Trabajos de Geología*. Universidad de Oviedo, 1, pp 1-26.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Keller, W. D., 1950, Systematic chemical trace element study of a producing a stone quarry. *Pit and Quarry*, v. 42, no. 11, p. 118-124
- Leach, D.L. and Sangster, D.F., 1993, Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, in Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorp, R.I., and Duke, J.M., (Eds.). *Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada Special Paper 40*, p. 289-314.
- Lechler, P. J., and Desilets, M. O. (1987). A review of the use of loss on ignition as a measurement of total volatiles in whole-rock analysis. *Chemical Geology*, 63(3-4), 341-344.
- Loredo, J. (1981). *Aplicación de los estudios de inclusiones fluidas a la investigación metalogénica de los yacimientos Asturias de fluorita* (Tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas, Universidad de Oviedo.
- Loredo, J., y Iglesias, J. G. (1981). Análisis microtermométrico del yacimiento de fluorita de "Pie de Potro"(Caravia, Asturias). *RDM: Revista de Minas*, (2), 117-125.
- Loredo, J., y Iglesias, J. G. (1984). Inclusions fluides et modèle génétique des minéralisations à fluorine dans le district «Villabona-Arlos»(Asturias, Espagne). *Bulletin de minéralogie*, 107(2), 217-226.
- Lotze, F. 1945. Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsh.*, 6: 78-92. Traducido al español en *Publ. Extr. Geol. España*, 5: 149-166.
- Lovering, T. G. (1972). *Jasperoid in the United States; its characteristics, origin, and economic significance*. Geological Survey Professional Paper 710. U.S.: USGS
- Mahdy, N. M., Shalaby, M. H., Helmy, H. M., Osman, A. F., El Sayed, H., and Zeid, E. K. A. (2014). Trace and REE element geochemistry of fluorite and its relation to uranium mineralizations, Gabal Gattar Area, Northern Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(7), 2573-2589.
- Manjon, M., Gutiérrez Claverol. M. y Martínez García, E. (1992): La sucesión posthercínica preliásica del área de Villabona (Asturias, N de España) *III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*, Actas 2: 104-111, Salamanca
- Mao, M., Simandl, G.J., Spence, J., and Marshall, D., 2015. *Fluorite trace-element chemistry and its potential as an indicator mineral: Evaluation of LA-ICP-MS method*. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings, November 13-14, 2015*, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 251-264.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Martínez García, E. (1991). Hercynian syn-orogenic and post-orogenic sucession in the Cantabrian and Palentian zones (NW Spain). Comparison with other western European occurrences. *Giornale di Geologia*, Bologna, 53(1): 209-228

Merkus, H. G. (2009). *Particle size measurements: fundamentals, practice, quality*. New York: Springer.

Millán Chagoyen, A., García-Guinea, J., Arribas Fernández, J. G., y Calderón Garcia, T. (1990). Caracterización óptica de fluoritas españolas. *Boletín Sociedad Española de Mineralogía*, 13, 99-108

MINERSA Group, MPD Fluorspar, S.L.U., (2014). Proyecto de investigación "Prospección mediante sondeos mecánicos del área comprendida entre mina Moscona y minas de Villabona".

Paniagua Condado, A., Maturana Campos, S., y Sainz de Baranda Graf, B. (1998). Rasgos geológicos de la fluorita asturiana. *Bocamina*, (3), 4-15.

Pérez Barnuevo, L. (2014). *Caracterización automatizada de texturas de menas mediante análisis digital de imagen para su aplicación geometalúrgica* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

Petruk, . (1986). *Predicting and measuring mineral liberations in ores and mill products, and effect of mineral liberations*. In R.D. Hagni (Ed.). *Process Mineralogy VI*, Warrendale, PA: TMS, pp. 393-403.

Petruk, W. (2000). *Applied mineralogy in the mining industry*. Amsterdam: Elsevier.

Pulgar, J. A., Alonso, J. L., Espina, R. G., y Marín, J. A. (1999). La deformación alpina en el basamento varisco de la Zona Cantábrica. *Trabajos de geología*, Univerisdad de Oviedo. 21(21), 283-295.

Ramdohr, P. (1980). *The Ore Minerals and their Intergrowths*. Oxford: Pergamon Press.

Sánchez, V. (2009): *Las mineralizaciones de fluorita del N.E. de Asturias: Caracterización y evolución del proceso hidrotermal* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid.

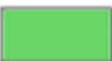
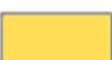
Sánchez, V., Martín-Crespo, T., Vindel, E., Corbella, M., y Cardellach, E. (2010). Contribución de los isótopos de He al origen de los fluidos hidrotermales: aplicación al estudio de las mineralizaciones de fluorita de Asturias (N de España). *Estudios Geológicos*, 66(1), 75-82.

Sánchez, V., Vindel, E., Corbella, M., Banks, D., Martín Crespo, T. y Cardellach, E. (2006): Geoquímica de los fluidos en fluoritas de los depósitos de Asturias Oriental. *Macla* 6: 445-447.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Schwarz, H. (1980). Two-dimensional feature-shape indexes. *Mikroskopie* 37, 64-67.
- Shawe, D. R., (1976). *Geology and resources of fluorine in the United States*. US Geological Survey Prof. Paper 933,
- Suárez del Rio, L.M. (1982). *Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes*. (Tesis Doctoral).Departamento de Geología, Universidad de Oviedo.
- Suárez Rodríguez, A. (1988). Estructura del área de Villaviciosa-Libardón (Asturias, Cordillera Cantábrica). *Trabajos de Geología*, Universidad de Oviedo. 17: 87-98
- Tejerina Lobo, L. y Vargas Alonso, I. (1980): Descripción geológica del distrito minero de La Collada (Fluorita teletermal, Asturias). *Tecniterrae*, 4 (35): 44-53.
- Tejerina Lobo, L. y Zorrilla Bringas, J. (1980): Descripción geológica del distrito minero Caravia-Berbes (Asturias). *Boletín Geológico y Minero*, 91 (6): 716-731.
- Valenzuela, M., García-Ramos, J.C. y Suárez de Centi, C (1986): The Jurassic Sedimentation in Asturias (N Spain). *Trabajos de Geología*, Universidad de Oviedo, 16, 121-132
- Vázquez Soto, C. (2013). *Estratigrafía y estructura de la terminación suroriental del Distrito Minero Villabona-Arlós (Asturias)* (Trabajo de Fin de Máster). Departamento de Geología, Universidad de Oviedo
- Vega García, A. (2015). *Caracterización mineral y textural del yacimiento de fluorita explotado en Mina Moscona, distrito minero de Villabona-Arlós (Asturias)* (Trabajo de Fin de Máster). Departamento de Geología, Universidad de Oviedo
- Vizcarra, T.G., Harmer, S.L., Wightman, E.M., Johnson, N.W., and Manlapig, E.V. (2011).The influence of particle shape properties and associated surface chemistry on the flotation kinetics of chalcopyrite. *Minerals Engineering* 24, pp. 807–816

**ANEXO I**  
**RESULTADOS PETROGRAFÍA**

	Fluorita tipo 1-a (FI1-a): láminas AST6, AST8, AST9, AST10
	Fluorita tipo 1-b (FI1-b): lámina AST7
	Fluorita tipo 2 (FI2): láminas AST8, AST9, AST10
	Cuarzo tipo 1 (Qtz1): láminas AST8, AST9, AST10
	Cuarzo tipo 2-a (Qtz2-a): lámina AST6
	Cuarzo tipo 2-b (Qtz2-b): lámina AST6
	Cuarzo tipo 2-c (Qtz-2c): lámina AST6
	Cuarzo tipo 3 (Qtz3): lámina AST6
	Cuarzo tipo 4 (Qtz4): láminas AST7
	Calcita tipo 1-a (Cal1-a): láminas AST6, AST7
	Calcita tipo 1-b (Cal1-b): lámina AST6
	Calcita tipo 2: lámina AST8
	Opacos: lámina AST8

Leyenda de los esquemas de las láminas. Además, en alguna de las láminas aparecen polígonos grises que corresponden a huecos existentes en las láminas, debidos seguramente al proceso de fabricación de la lámina.

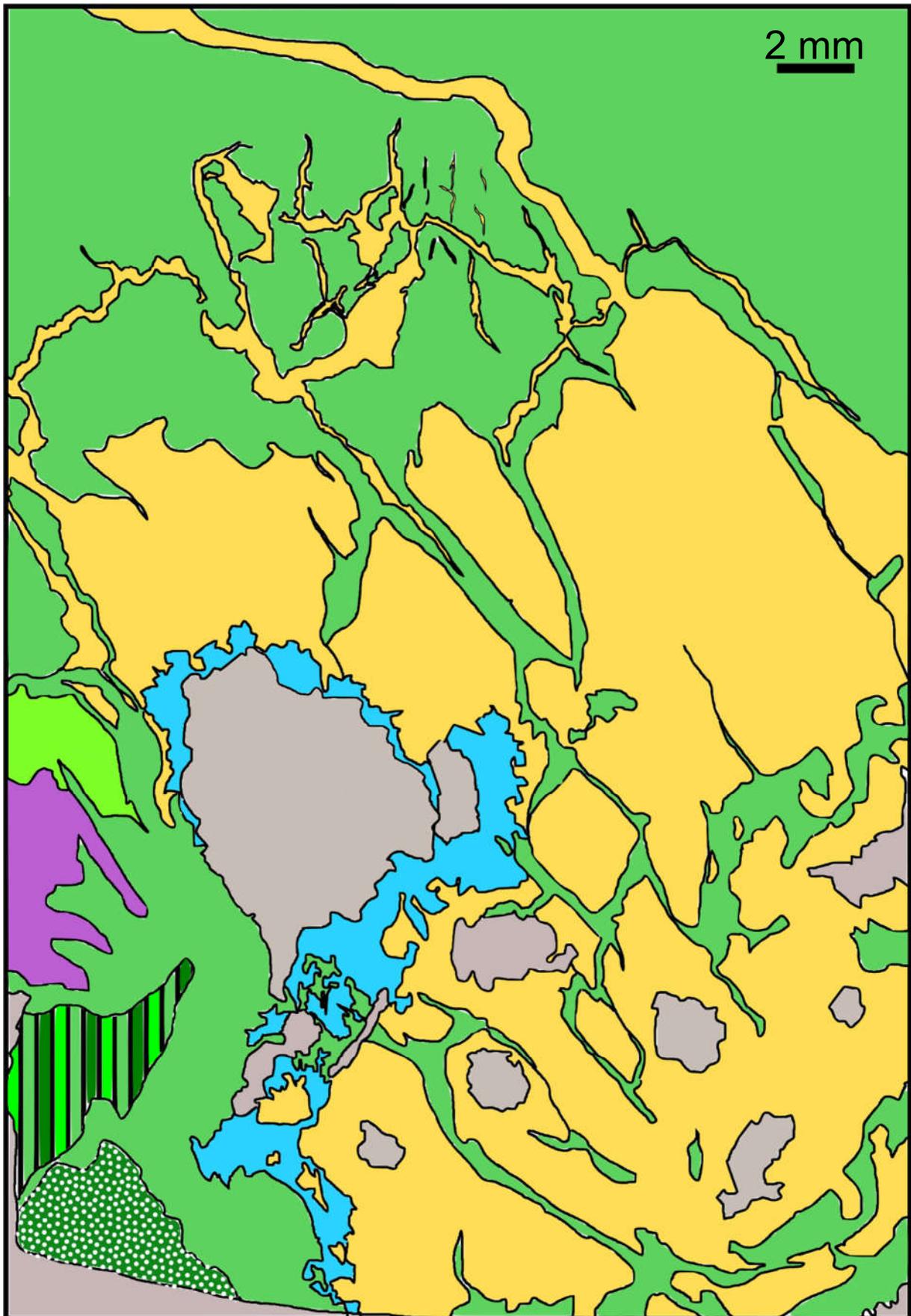


Lámina delgada AST6, categoría capa no mineralizada.

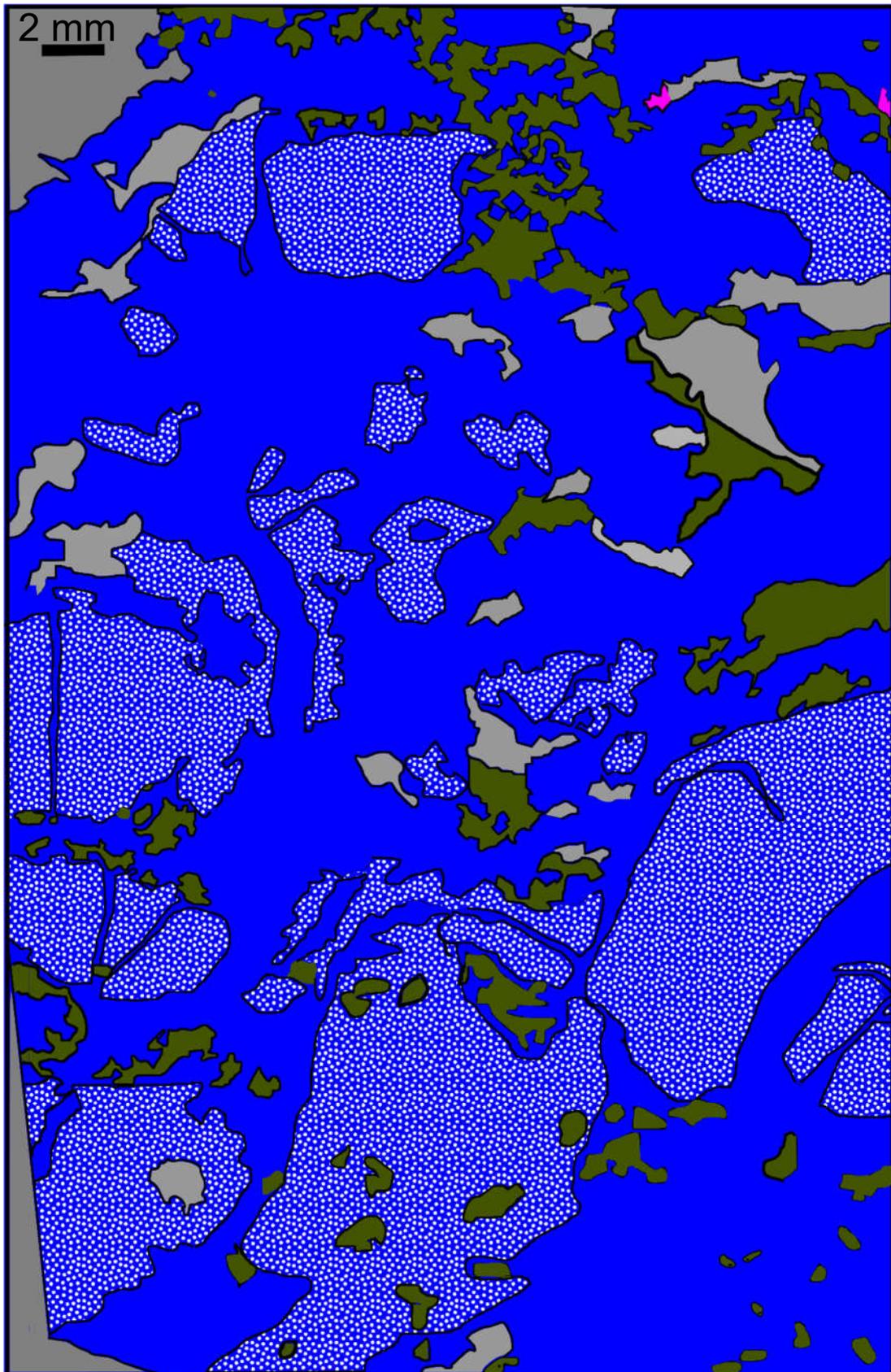


Lámina delgada AST7, categoría capa. Todas las zonas en azul indican FI1-b; en los casos en los que aparecen los puntos la diferenciación entre FI1-b y Cal1-a no ha sido posible.

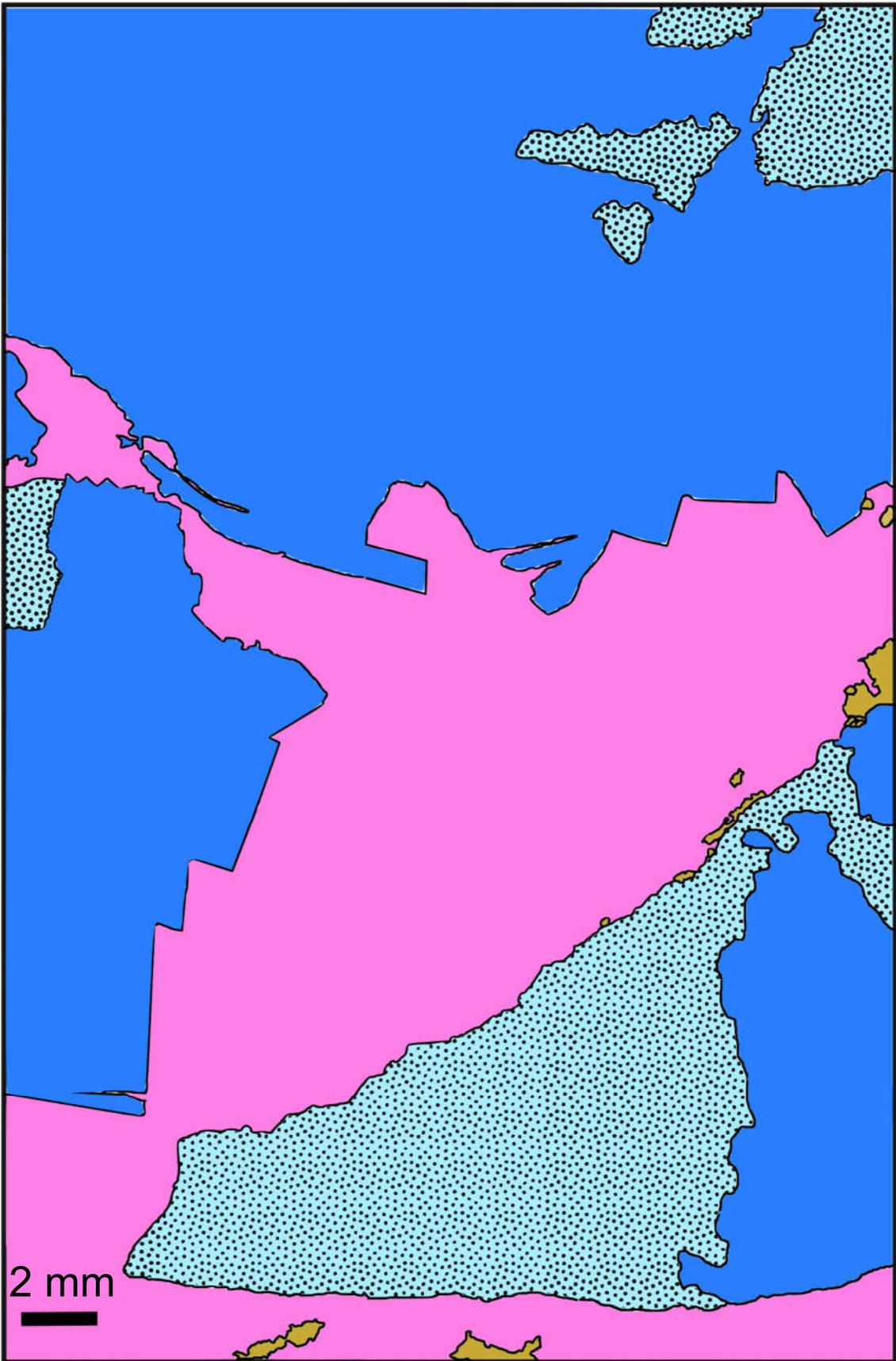


Lámina AST8, categoría capa.

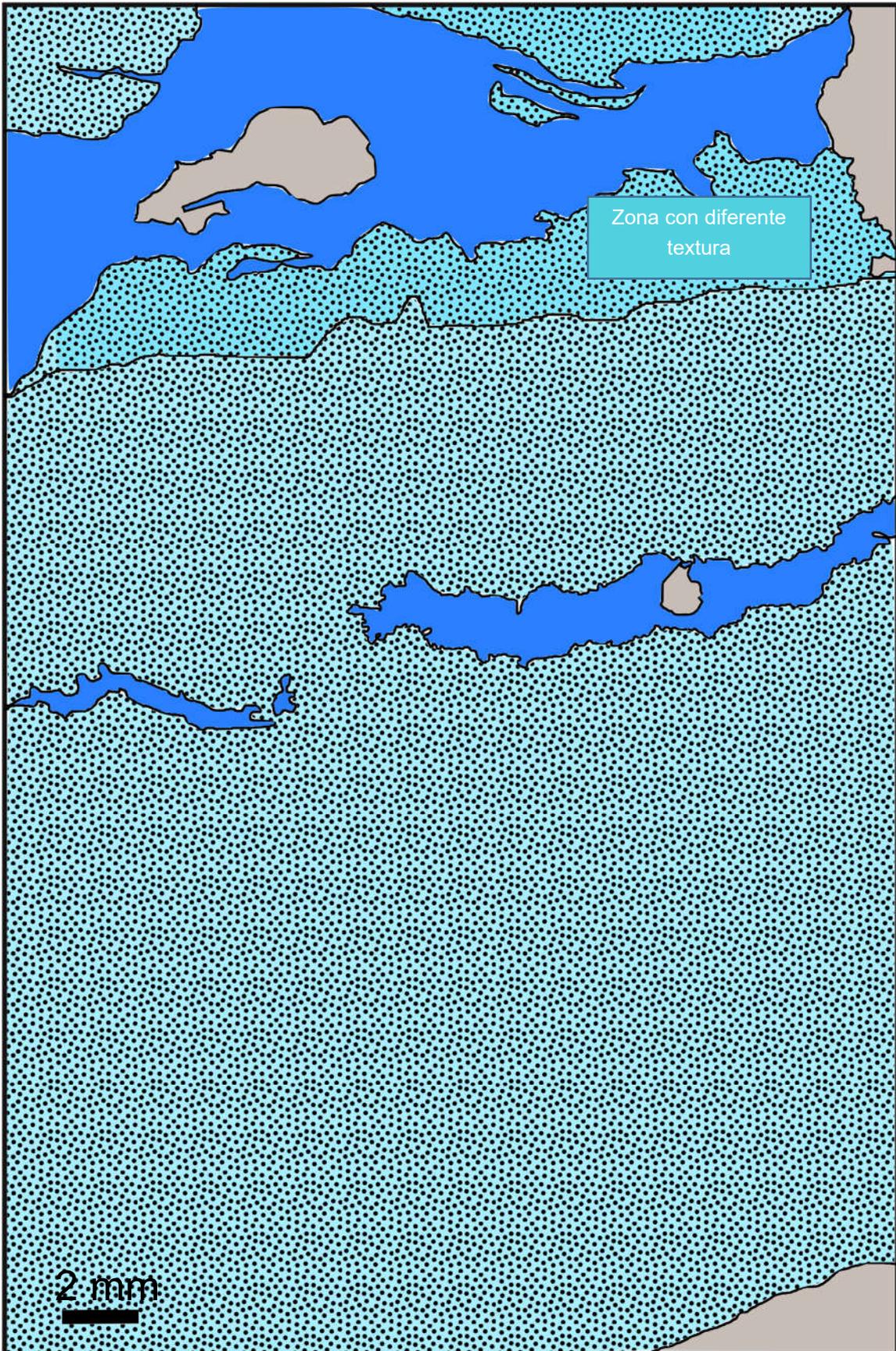


Lámina AST9, categoría detrítico.

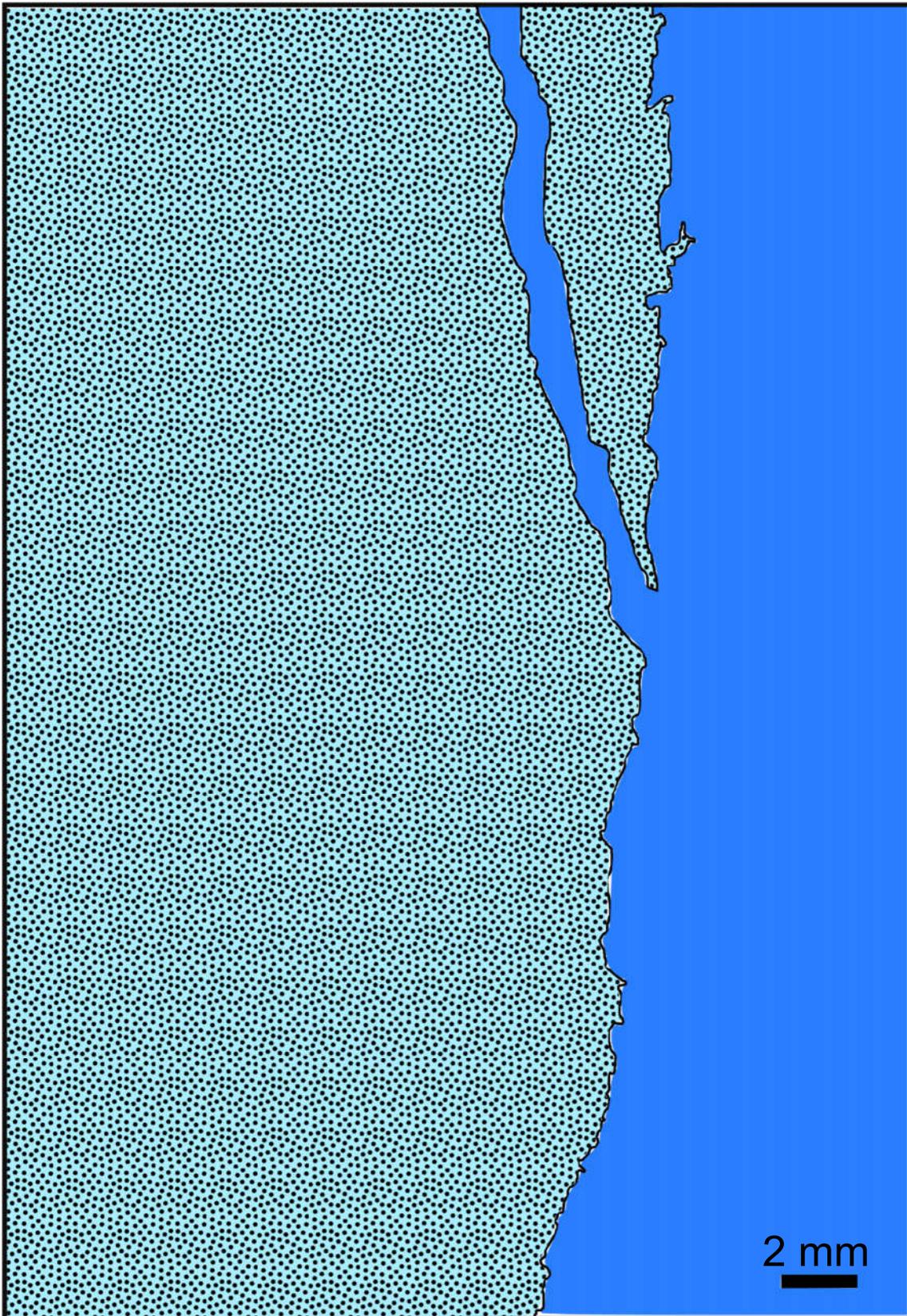
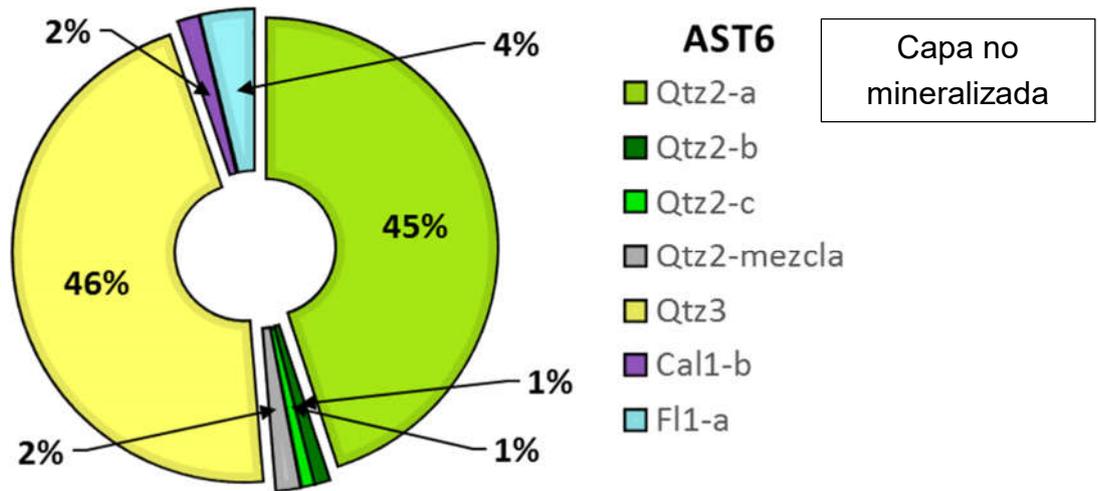
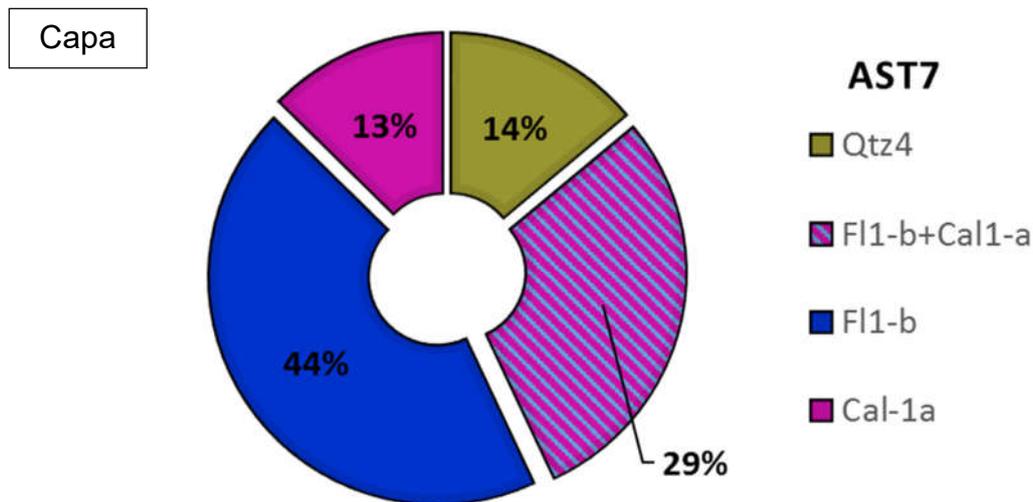


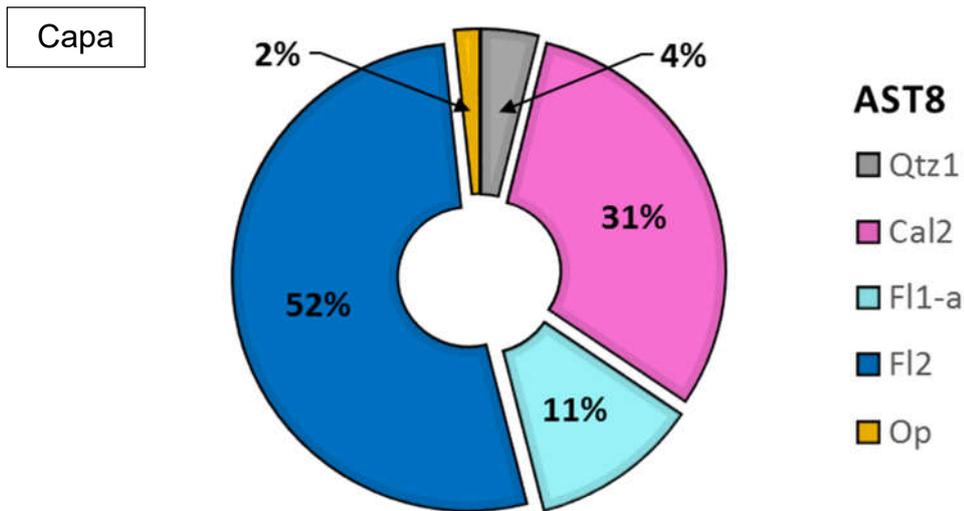
Lámina AST10, categoría detrítico en contacto con categoría filón.



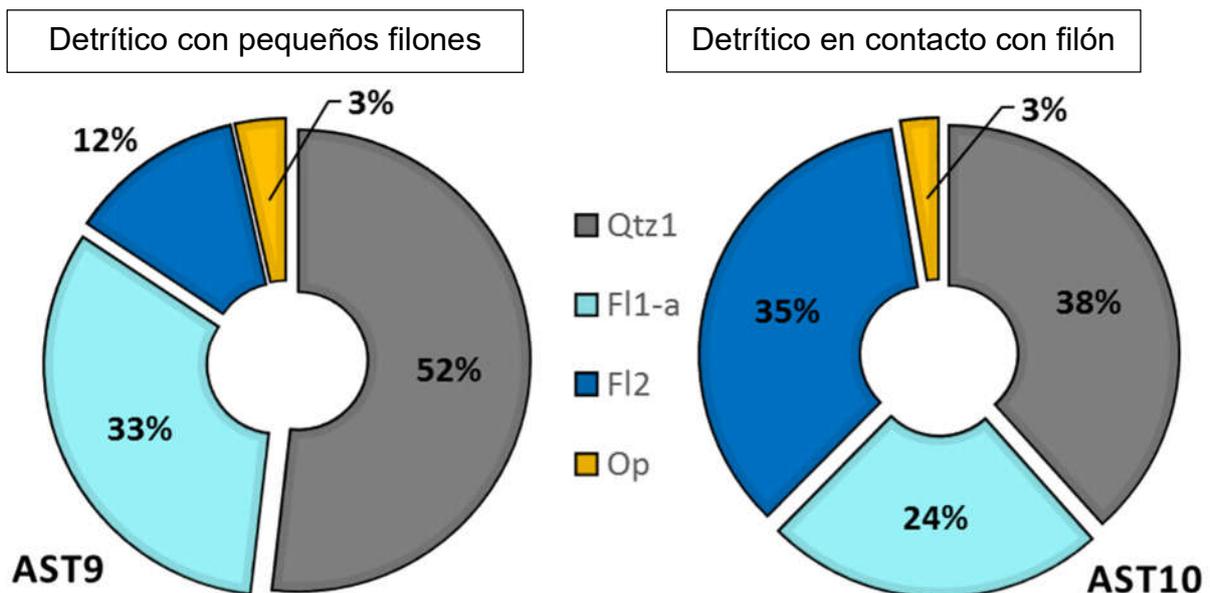
Fracción superficial de las fases minerales identificadas en la lámina AST6. Se excluyen los opacos, debido a que su porcentaje es inferior al 1%. El valor Qtz2-mezcla corresponde a la zona de la lámina ocupada por los tres tipos de cuarzo de silicificación (zona rayada del esquema de la lámina delgada).



Fracción superficial de las fases minerales identificadas en la lámina AST7. Se excluye el cuarzo detrítico y los opacos debido a que su porcentaje es inferior al 1%. En la asociación Fl1-b + Cal1-a (zona punteada del esquema de la lámina delgada) no puede realizarse el análisis modal de las dos especies minerales debido a la diseminación total de las inclusiones de Cal1-a en los cristales de Fl1-b. En el esquema, las zonas de color azul, sin puntos, corresponden a las zonas en las que si puede determinarse el porcentaje de Fl1-b y Cal1-a.

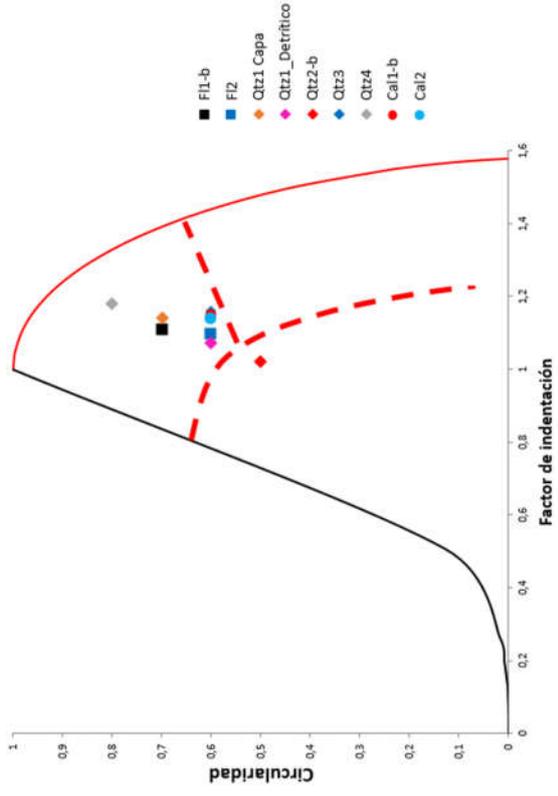


Fracción superficial de las fases minerales identificadas en la lámina AST8. En el porcentaje de opacos se incluyen únicamente los opacos estimados en la masa compuesta por Fl1-a, Qtz1 y opacos, y los de mayor tamaño alojados en el contacto calcita tipo II con otras fases minerales.



Fracción superficial de las fases minerales identificadas en las láminas AST9 y AST10.

	AST	N	A (mm <sup>2</sup> )		P (mm)		W (mm)		H (mm)		Mj (mm)		mn (mm)		D (mm)				
			x	S.D.	x	S.D.	Min	Max	x	S.D.	x	S.D.	x	S.D.	x	S.D.	Min	Max	
FI1-b	AST7	173	0.094	0.127	1.13	0.78	0.09	4.13	0.34	0.24	0.32	0.22	0.35	0.24	0.17	0.39	0.27	0.03	1.40
FI2	AST8	21	0.825	0.895	3.73	2.23	1.02	8.98	1.14	0.73	0.98	0.53	1.16	0.66	0.42	1.28	0.73	0.37	3.11
	AST7	21	0.025	0.036	0.57	0.49	0.07	2.11	0.16	0.13	0.16	0.12	0.18	0.13	0.09	0.19	0.15	0.03	0.64
Qtz1	AST8	269	0.047	0.078	0.77	0.53	0.03	5.48	0.22	0.12	0.22	0.14	0.24	0.14	0.08	0.26	0.15	0.01	1.30
	AST9	36	0.008	0.006	0.42	0.20	0.13	1.03	0.12	0.05	0.12	0.05	0.13	0.05	0.03	0.14	0.06	0.05	0.31
	AST10	86	0.007	0.005	0.37	0.18	0.15	1.04	0.10	0.05	0.10	0.04	0.11	0.04	0.03	0.12	0.05	0.05	0.31
Qtz2-b	AST6	35	0.016	0.028	0.58	0.45	0.16	2.43	0.14	0.08	0.16	0.16	0.17	0.15	0.09	0.19	0.16	0.06	0.90
Qtz3	AST6	592	0.022	0.045	0.53	0.52	0.04	4.40	0.16	0.14	0.15	0.14	0.17	0.15	0.09	0.19	0.17	0.02	1.23
Qtz4	AST7	81	0.002	0.008	0.11	0.15	0.04	1.26	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.02	0.41
Cal1-b	AST6	149	0.013	0.016	0.47	0.28	0.05	1.55	0.13	0.07	0.14	0.09	0.16	0.10	0.01	0.02	0.10	0.02	0.59
Cal2	AST8	82	1.957	11.14	4.19	7.11	0.38	63.1	1.17	1.80	1.09	1.41	1.26	1.85	0.93	1.42	2.06	0.01	18.03



	AST	N	C		AR		R	
			x	S.D.	x	S.D.	x	S.D.
FI1-b	AST7	173	0.7	0.1	1.5	0.5	0.7	0.1
FI2	AST8	21	0.6	0.1	1.8	0.4	0.6	0.1
	AST7	21	0.7	0.1	1.5	0.2	0.7	0.1
Qtz1	AST8	269	0.7	0.1	1.6	0.4	0.7	0.1
	AST9	36	0.6	0.1	1.7	0.5	0.6	0.1
	AST10	86	0.6	0.2	1.7	0.4	0.6	0.1
Qtz2-b	AST6	35	0.5	0.2	1.9	0.8	0.6	0.2
Qtz3	AST6	592	0.6	0.2	1.9	0.7	0.6	0.2
Qtz4	AST7	81	0.8	0.1	1.6	0.4	0.7	0.2
Cal1-b	AST6	149	0.6	0.1	1.9	0.7	0.6	0.2
Cal2	AST8	82	0.6	0.1	2	0.7	0.6	0.2

Resultados de la caracterización granulométrica y morfológica

**ANEXO II**  
**RESULTADOS GEOQUÍMICA**

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Capa no mineralizada	$\bar{x}$	1,18	0,73	0,040	0,22	0,03	0,61	0,06	0,04	26,97
	Me	1,02	0,39	0,041	0,22	0,02	0,57	0,05	0,03	29,71
	Mo	-	0,13	0,042	0,28	0,02	0,61	0,04	0,04	-
	Min	0,13	0,13	0,007	0,09	0,01	0,06	0,01	0,01	3,37
	Max	2,56	4,40	0,066	0,38	0,11	1,23	0,14	0,12	39,84
	S.D.	0,67	1,05	0,017	0,08	0,02	0,34	0,04	0,03	9,79
	cv	56,87	144,10	42,77	35,24	75,80	55,93	64,04	74,12	36,30
	Rl	0,88	0,43	0,024	0,11	0,02	0,56	0,04	0,02	13,72
	g1	0,51	2,94	-0,265	0,10	2,85	0,28	0,85	1,87	-1,02
	g2	-0,27	8,68	-0,661	-0,31	9,99	-0,69	0,29	4,54	0,48
	N	20	20	20	20	20	20	20	19	20
Detrítico	$\bar{x}$	1,58	0,62	0,007	0,09	0,03	0,81	0,13	0,03	7,83
	Me	1,56	0,52	0,008	0,09	0,03	0,78	0,12	0,03	7,29
	Mo	1,81	0,43	0,004	0,08	0,03	0,63	0,11	0,03	#N/A
	Min	1,17	0,26	0,003	0,06	0,02	0,57	0,10	0,01	4,70
	Max	2,14	1,53	0,014	0,15	0,07	1,12	0,16	0,04	11,75
	S.D.	0,28	0,35	0,003	0,02	0,01	0,17	0,02	0,01	2,15
	cv	17,52	56,83	45,87	24,93	31,41	20,87	16,56	32,98	27,41
	Rl	0,50	0,45	0,006	0,04	0,00	0,32	0,04	0,01	3,95
	g1	0,30	1,46	0,467	0,88	3,01	0,33	0,23	-0,36	0,29
	g2	-0,92	1,45	-0,900	0,90	11,56	-1,13	-1,37	-0,25	-1,26
	N	20	20	20	20	20	20	20	19	20
Capa	$\bar{x}$	1,07	0,89	0,012	0,09	0,04	0,51	0,05	0,03	12,31
	Me	0,96	0,50	0,009	0,07	0,04	0,44	0,04	0,03	10,76
	Mo	0,77	0,49	0,006	0,04	0,04	0,58	0,06	0,03	10,29
	Min	0,17	0,12	0,003	0,03	0,01	0,08	0,01	0,01	4,18
	Max	2,52	9,96	0,051	0,29	0,10	1,40	0,16	0,06	31,72
	S.D.	0,59	1,34	0,010	0,05	0,01	0,30	0,03	0,01	5,91
	cv	54,55	150,41	85,18	61,07	32,80	59,75	64,91	44,66	47,99
	Rl	0,78	0,41	0,007	0,06	0,02	0,40	0,04	0,02	4,14
	g1	0,74	5,10	2,32	1,62	1,79	0,94	1,19	0,15	1,93
	g2	-0,15	30,89	5,04	3,07	7,29	0,39	1,29	-0,80	3,48
	N	72	72	72	72	72	72	72	66	72
Filón	$\bar{x}$	1,80	0,79	0,007	0,109	0,05	0,86	0,11	0,03	8,17
	Me	1,80	0,63	0,007	0,100	0,04	0,90	0,12	0,03	7,78
	Mo	#N/A	0,54	0,006	0,100	0,04	0,90	0,13	0,02	6,99
	Min	0,23	0,19	0,003	0,030	0,03	0,11	0,01	0,01	5,39
	Max	4,18	2,15	0,014	0,260	0,09	1,97	0,24	0,06	13,71
	S.D.	0,97	0,50	0,003	0,056	0,01	0,46	0,06	0,01	2,20
	cv	54,19	62,97	38,17	51,224	25,90	53,07	53,96	45,49	26,91
	Rl	1,39	0,49	0,004	0,070	0,01	0,63	0,05	0,02	2,32
	g1	0,42	1,47	1,02	0,79	2,02	0,32	0,07	0,47	1,23
	g2	0,10	1,94	0,90	0,86	5,03	0,10	0,07	-0,46	1,07
	N	27	27	27	27	27	27	27	23	27

Resultados en porcentaje de los óxidos mayores según categorías.

	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO**
CaF <sub>2</sub>	-	-0,60	-0,61	X	X	-0,53	0,67	X	-0,58	-0,60	X	X
SiO <sub>2</sub>	X	-	X	X	X	X	-0,96	X	X	X	X	-0,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	0,60	-	X	X	<b>0,77</b>	-0,48	X	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	0,53	X
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	0,49	X	-	X	X	X	X	X	X	-0,53	X
MnO	X	-0,88	-0,53	-0,49	-	0,64	X	X	X	X	X	0,74
MgO	X	-0,61	X	X	0,55	-	X	X	<b>0,77</b>	<b>0,76</b>	0,53	0,50
CaO	X	-0,98	-0,59	-0,64	<b>0,87</b>	0,60	-	X	X	-0,46	X	0,58
Na <sub>2</sub> O	X	0,50	0,68	X	-0,45	X	-0,50	-	X	X	X	X
K <sub>2</sub> O	X	0,50	<b>0,98</b>	X	X	X	-0,49	0,65	-	<b>0,96</b>	0,53	X
TiO <sub>2</sub>	X	0,64	<b>0,98</b>	X	-0,53	X	-0,62	0,61	<b>0,96</b>	-	0,55	X
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	X	X	X	X	X	0,68	X	X	X	X	-	X
CaO**	X	-0,99	-0,59	0,62	<b>0,89</b>	0,62	<b>0,99</b>	-0,50	-0,49	-0,62	X	-
	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO**
CaF <sub>2</sub>		<b>-0,97</b>	-0,62	X	X	-0,62	<b>0,98</b>	X	-0,60	-0,60	X	X
SiO <sub>2</sub>	-0,27		0,56	X	X	0,54	-0,99	X	0,55	0,63	X	-0,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,29	0,68		0,56	X	<b>0,95</b>	-0,64	X	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	X	X
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X	X	X		X	0,62	X	X	0,53	0,54	X	X
MnO	-0,55	-0,61	-0,34	X		X	X	X	X	X	X	0,68
MgO	-0,64	X	0,27	X	0,66		-0,63	X	<b>0,93</b>	0,88	X	X
CaO	0,47	<b>-0,97</b>	-0,70	X	0,44	X		X	-0,63	-0,70	X	0,46
Na <sub>2</sub> O	X	0,40	0,60	X	-0,45	X	-0,34		X	X	X	X
K <sub>2</sub> O	-0,29	0,63	<b>0,98</b>	X	-0,30	0,25	-0,63	0,60		<b>0,97</b>	X	X
TiO <sub>2</sub>	-0,30	0,66	<b>0,96</b>	X	-0,31	0,24	-0,67	0,56	<b>0,96</b>		X	-0,41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	X	0,26	0,39	X	-0,29	X	X	0,25	0,37	0,35		X
CaO**	-0,49	-0,70	-0,41	X	<b>0,95</b>	0,62	0,54	-0,50	-0,35	-0,38	-0,33	

Coefficientes de correlación de Pearson con p-valor inferior a 0,05. En gris la categoría no mineralizado, en verde detrítico, en azul capa y en rojo filón. En negrita se marcan aquellos valores con un coeficiente de correlación superior a 0,75.