

VIII. APLICACIÓN DEL METODO DE ESPECTROMETRIA DE REFLECTANCIA EN EL PROYECTO LA INDIA PARA IDENTIFICAR ZONAS DE ALTERACIÓN

VIII.1. Metodología

Para cumplir con las expectativas de este trabajo, se analizaron un total de 618 muestras de roca que fueron colectadas de forma sistemática en líneas este-oeste, con una separación de 50 metros entre línea y 50 metros entre cada muestra dentro del área conocida como Viruela-La Cruz dentro del proyecto La India, en un área de aproximadamente 1.5 x 1.7 km que se muestra en la figura 2. En cada punto de muestreo se tomaron al menos tres ejemplares de mano que estuvieran libres de materia orgánica; el lugar de muestreo también fue condicionado a la presencia de afloramientos. La ubicación de cada muestra en la figura 19 fue obtenida con un posicionador satelital, esta información fue documentada junto con la mayor cantidad de información geológica posible de la zona de muestreo, como: tipo de roca, alteración, datos estructurales, tipo y grado de oxidación, mineralogía y comentarios. Esta información fue capturada digitalmente, para formar una base de datos para posteriormente ser procesada. La totalidad de muestras fue analizada con un espectrómetro PIMA II, y los datos obtenidos fueron procesados para la identificación de minerales con el *software SPEC-MIN ver 3.1* y *SpecWin Aplicacion ver 2.0*.

Al completar la base de datos, con los resultados obtenidos del análisis de muestras, la información se transfirió al programa de dibujo, para la elaboración de mapas, en los cuales se utilizó una base topográfica con curvas de nivel a 20 m y

una malla de coordenadas referidas al sistema de proyección *Universal Transverse Mercator UTM Zone 12 (NAT 27 for MEX)*. Con la información concentrada en un mapa, se delimitaron las diferentes zonas de asociaciones minerales.

También se añadió la información de muestras de geoquímica para elaborar un mapa de anomalía para Au, esto con el objetivo de observar relaciones entre las diferentes zonas de asociaciones minerales y rangos de valores de Au en g/t.

Los códigos y nomenclatura, así como también, la información geológica de cada muestra, su ubicación y los resultados del análisis con el espectrómetro, se encuentran en los ANEXOS I y III

VIII.2 Especificaciones PIMA II y Software

El análisis de las muestras fue realizado con el espectrómetro PIMA II (Portable Infrared Mineral Analyzer), foto 5, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2. La información recabada por el espectrómetro es procesada y mostrada en forma gráfica, con la ayuda del software PIMA SP, para después ser gravada, analizada e interpretada.



Foto 5.- PIMA II: consta de un espectrómetro, fuente de poder, computadora, cableado y soporte. Requiere de enfriamiento externo para trabajar adecuadamente.

Las gráficas o espectros fueron comparados y analizados con la ayuda del software *SPEC-MIN ver 3.1* donde se encuentra una extensa base de datos que compara los principales rasgos de absorción de la muestra que se analiza, con minerales de referencia previamente identificados. El programa *SpecWin Aplicacion ver 2.0.*, muestra de manera simultánea diferentes espectros, de modo que permite observar y comparar diferentes gráficas.

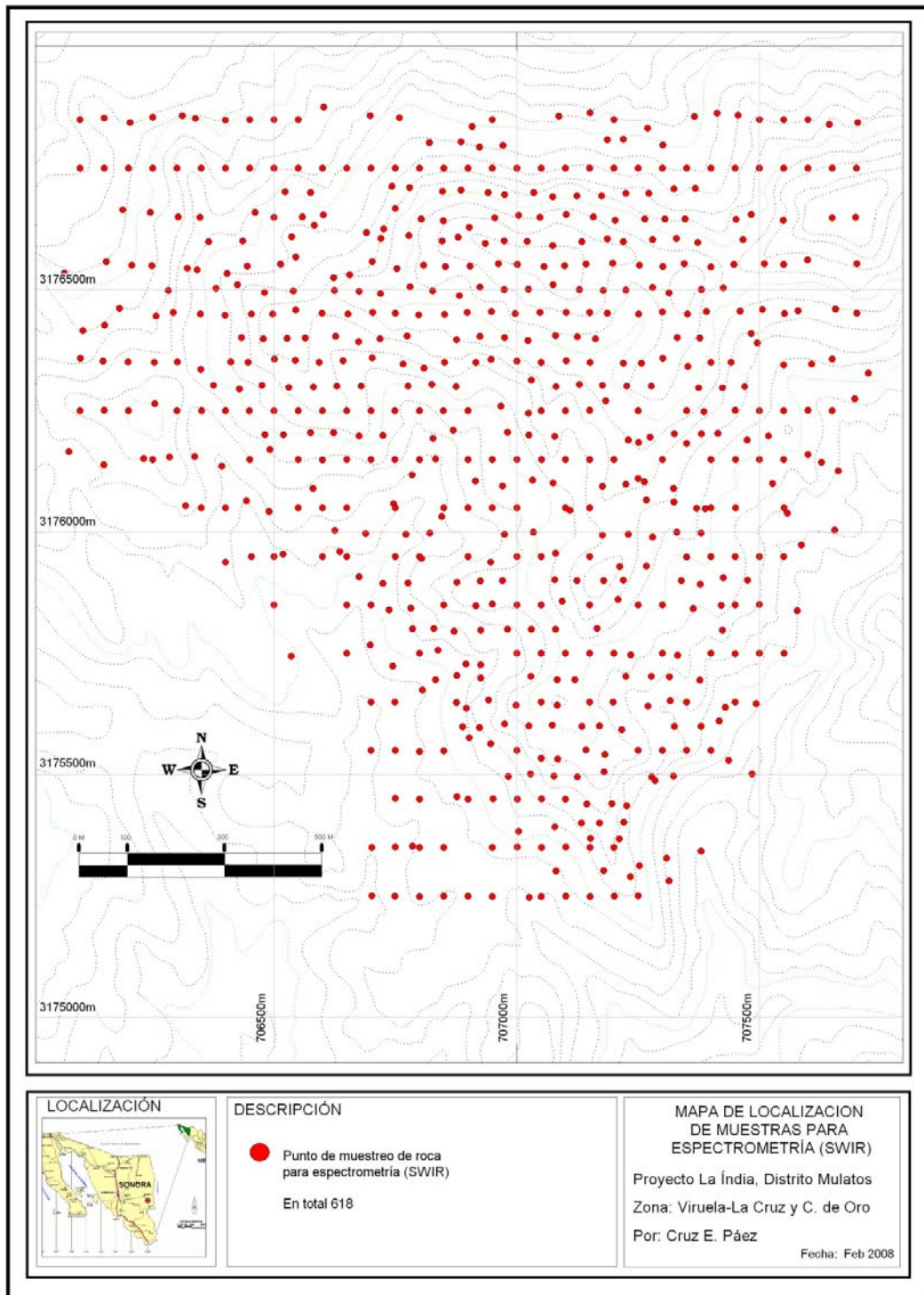


Figura 19.- Mapa de localización de muestras para espectrometría en las zonas de Viruela - La Cruz y Cerro de oro.

Intervalo de longitud de Onda	1300-2500 nm
Resolución	7-10 nm
Intervalo de muestreo	2nm
Iluminación	Interna
Calibración	Basada en STD Internos
Enfriamiento	Ventilación interna por abanicos
Dimensiones	27 x 17 x 12 cm
Peso	3.9kg incluidas baterías y computadora
Tiempo de medida	16seg – 6 min, promedio 37 seg.

Tabla 2.- Especificaciones del espectrómetro PIMA II

VIII.3 Análisis de muestras

Según el análisis, los minerales identificados fueron alunita (Al), dickita (Dik), caolinita (K), illita (I), smectita (Smc), y jarosita (Jar) además sílice (sil), los detalles como composición y grupo mineral se muestran en la Tabla 3. También se observó que en una muestra se pueden encontrar asociaciones de dos y hasta tres diferentes especies minerales en diferentes proporciones, siendo las más comunes Al-K, Al-Dik, Dik-K, K-Dik-Al, (con variable contenido de Sil), también I-Smc-K, I-Smc, I-K.

MINERAL	CLASE	GRUPO	FORMULA QUIMICA
Alunita	Sulfatos	Alunita	$Al(SO_4)_2(OH)_6$
Dickita	Filosilicatos	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Caolinita	Filosilicatos	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Smectita	Filosilicatos	Smectita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_{2-n}(H_2O)$
Illita	Filosilicatos		$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$
Sílice	Tectosilicatos	Silicatos	SiO_2
Clorita	Silicatos	Clorita	$(Fe, Mg, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$

Tabla 3.- Minerales que pudieron ser identificados mediante el espectrómetro PIMA II.

Alunita

Como es de esperarse, una gran cantidad de muestras contienen Alunita ya que es un mineral de común ocurrencia en depósitos epitermales de alta sulfuración (Tompson, A.J.B., y Tompson J.F.H., 1996). Según las observaciones de campo, puede ocurrir en vetillas de color blanco (1 mm – 5 cm) en forma masiva, o cristales de coloración ligeramente rosada a café claro relleno de fracturas y cavidades en zonas con fuerte silicificación, (Sílice masivo, sílice “vuggy”, sílice alunita), también diseminada en rocas con moderada silicificación (“Sílice clay”).

Los rasgos espectrales para identificar este mineral son: doble agudo en (1420-1440 y 1470-1500 nm), uno simple corto y ligeramente abierto (1760, 2170) otro rasgo abierto en (2320), entre otros de menor importancia y la forma general es como se muestra en la gráfica de la figura 20.

De la observación de espectros con alunita, se identificaron al menos tres tipos diferentes de gráficos, que corresponden a variaciones importantes en la composición de la molécula del mineral y el grado y forma cristalina.

Los rasgos espectrales de alunita en vetillas generalmente son más abiertos y profundos, mientras que los de alunita en fracturas, cavidades o roca, son más agudos pero menos profundos. La sustitución de átomos de K y Na en la molécula del mineral se ve expresada como una variación en la posición del rasgo doble en (1420-1440 y 1470-1500 nm), donde alunita potásica corresponde a valores menores respecto al eje de absorción que alunita sódica. Los casos de alunita cálcica, menos comunes, son identificados fácilmente por su característico rasgo múltiple irregular entre 1420 – 1520 nm y otro simple y menor en 2370nm, figura 21.

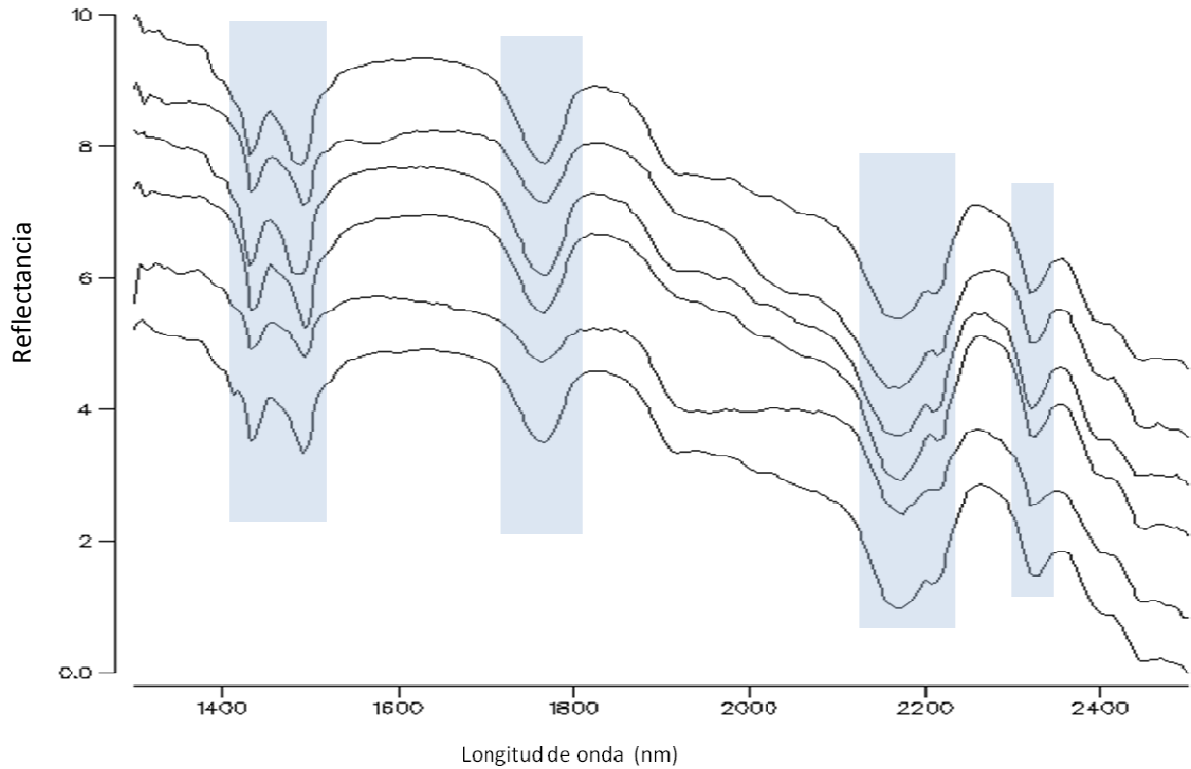


Figura 20.- Muestra las características espectrales diagnósticas del mineral alunita.

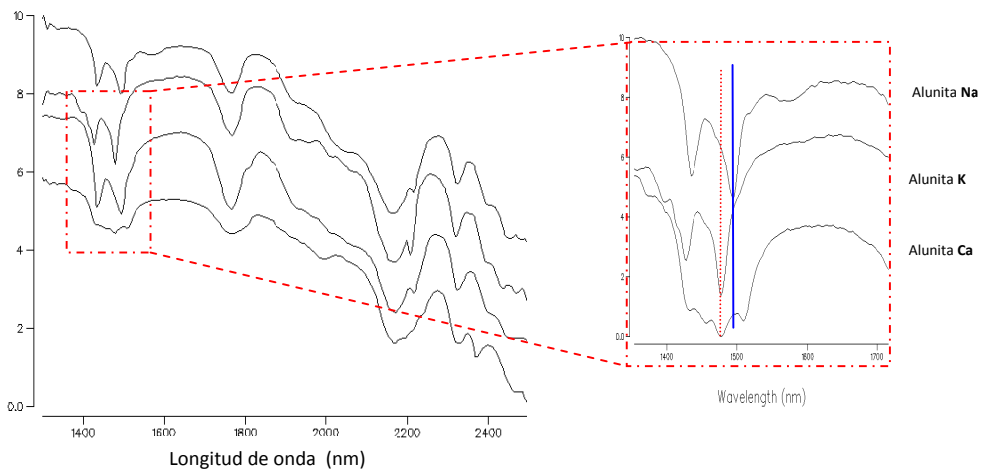


Figura 21. Diferentes clases de alunita que pudieron ser identificadas. En la ampliación del recuadro se observan las diferentes posiciones y forma de las rasgos de absorción: **A)** Alunite Na, **B)** Alunite K, **C)** Alunite Ca.

Dickita

Se trata de un mineral del grupo de la caolinita, también presente en yacimientos de tipo alta sulfuración, Tompson, A.J.B., y Tompson J.F.H., (1996). En este caso, se le encuentra en forma micro cristalina, rara vez forma cristales visibles, de color blanco a ligeramente rosado o café claro. Comúnmente en asociaciones con alunita y/o caolinita. Por sus características físicas y abundancia relativa, es difícil de identificar en campo; generalmente se encuentra en rocas con moderada silicificación (Sílice alunita y “sílice clay”) y algunas veces con alteración de sílice masivo.

Los rasgos diagnósticos para este compuesto son: Doble agudo (1383 y 1414 nm), hombro (1830-1915 nm), doble asimétrico (2120-2238 nm), y otros rasgos menores a 2300 y 2384 nm. Regularmente se encuentra asociada con alunita y caolinita en zonas con débil a moderada silicificación, figura 22. Excepto por el rasgo doble alrededor de 1400nm, este mineral comparte las mismas características espectrales de la caolinita.

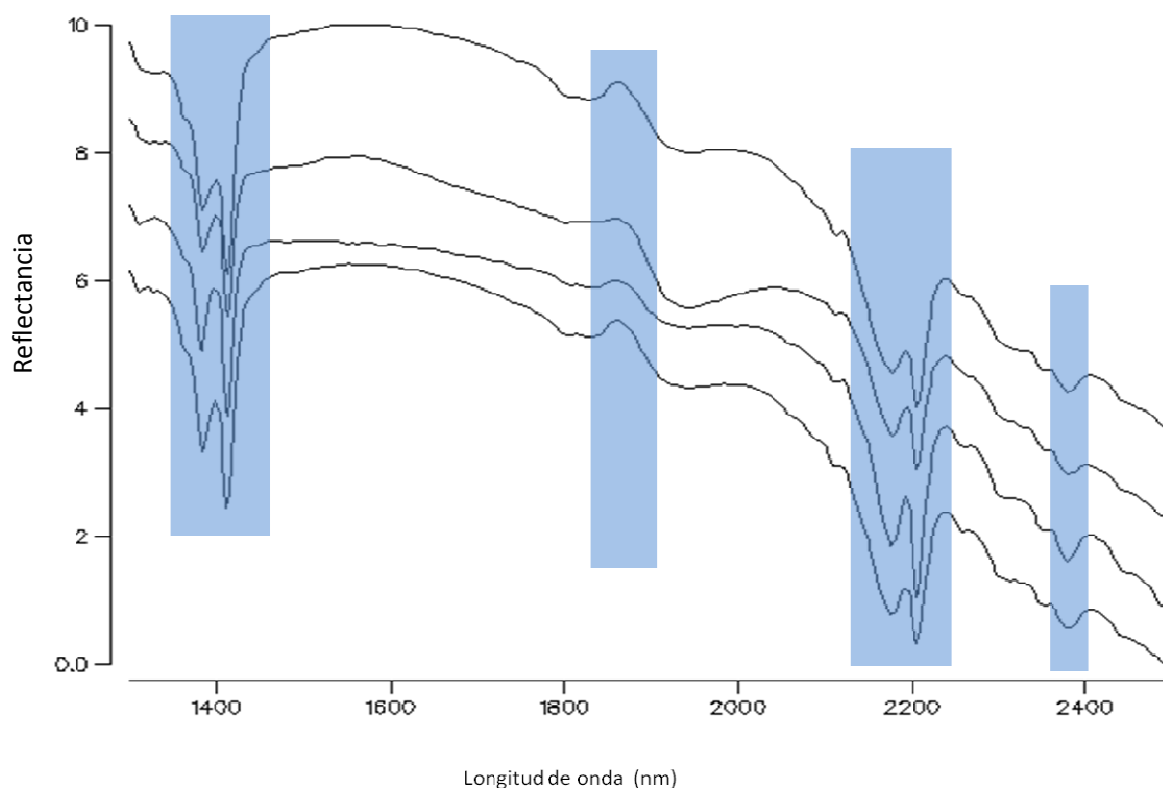


Figura 22.- Muestra las características espectrales diagnósticas del mineral dickita.

Caolinita

En muestra de mano, se observa de textura arcillosa generalmente de color blanco, en forma masiva y rara vez forma cristales. Se asocia con dickita, alunita, illita y smectita y se le puede encontrar en cualquier tipo de roca alterada, aunque es más abundante en aquellas con alteración argílica avanzada y argílica.

Los rasgos espectrales diagnósticos de la caolinita son muy similares a las de la dickita, estas difieren únicamente en la forma de los rasgos alrededor de 1400 nm.

Observe en la figura 23 algunos ejemplos de caolinita y sus características espectrales más importantes.

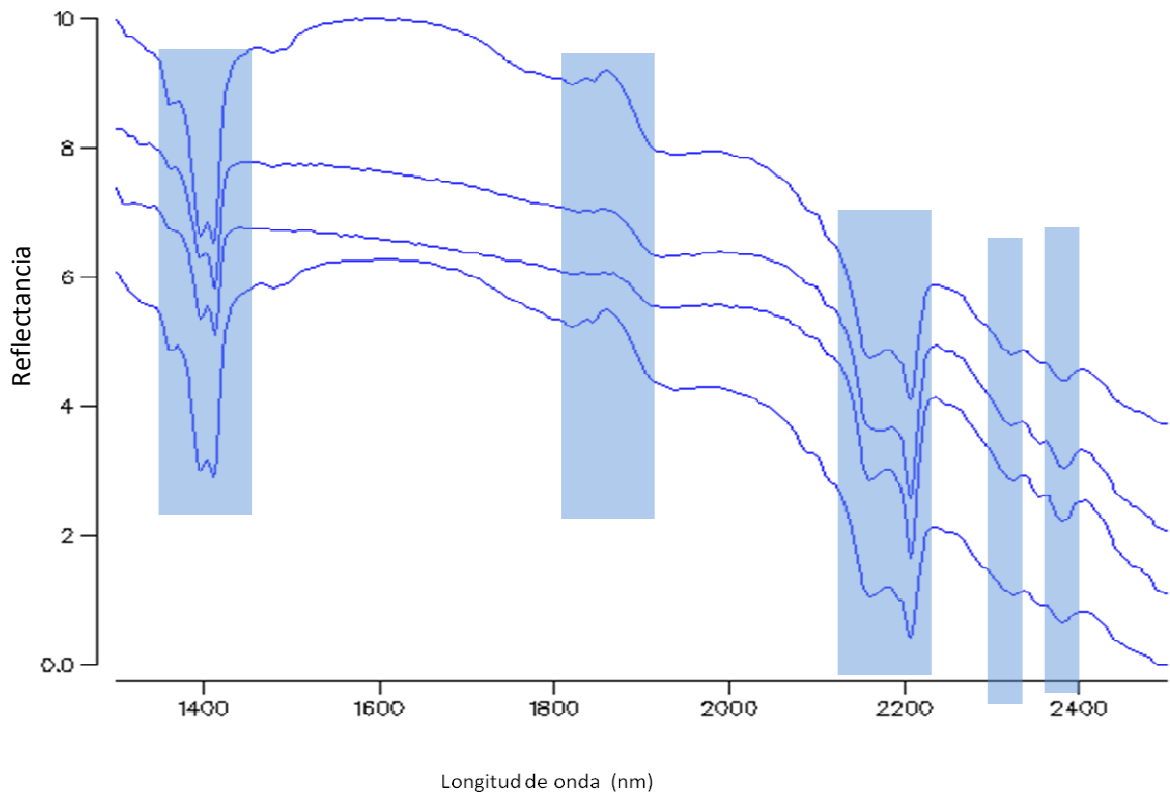


Figura 23.-Muestra las principales características y rasgos de absorción en diferentes muestras con caolinita.

Illita, illita-smectita.

Se trata de un mineral y asociación mineral producto de la alteración hidrotermal de bajo grado, comúnmente en zonas de alteración argílica. Con hábito masivo extremadamente fino, algunas veces en forma de finas hojuelas de color blanco a café muy claro, ligeramente ceroso. En las rocas analizadas, se relaciona

directamente con alteración argílica y argílica débil, raras veces en rocas con débil a moderada silicificación. Las rocas con abundante contenido de smectita, generalmente son de color verde claro que puede confundirse con cloritización débil, figura 24.

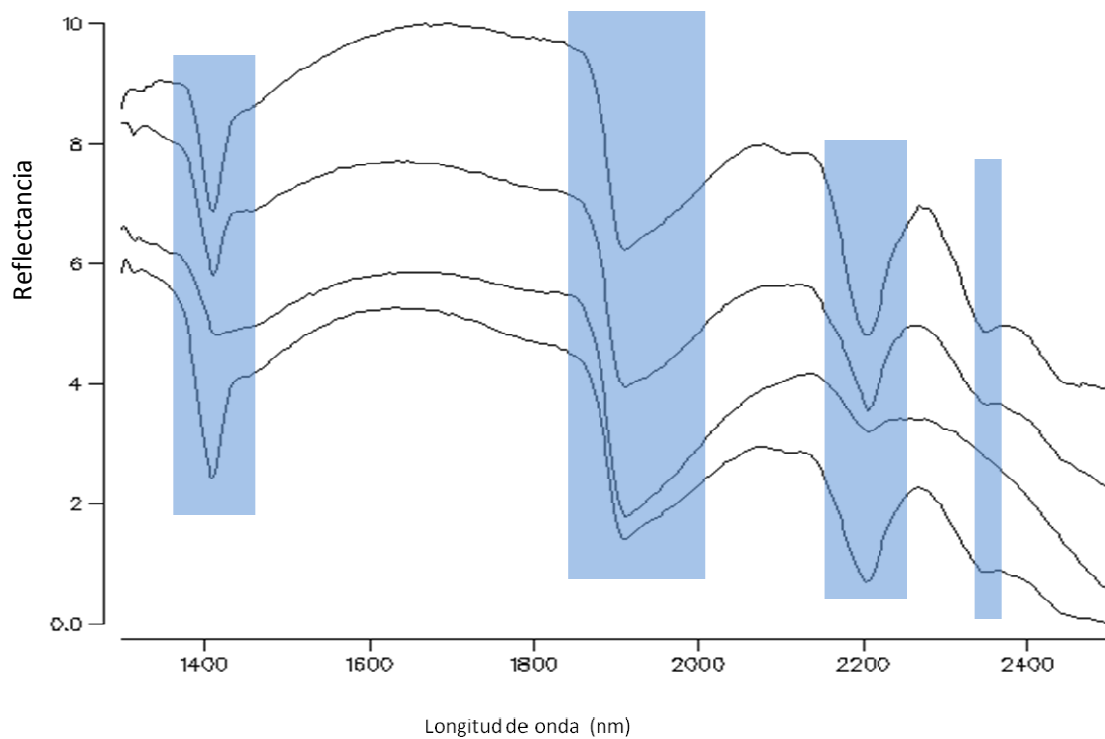


Figura 24.- Muestra las principales características y rasgos de absorción de smectita-illita.

VIII.4 Resultados del análisis de muestras.

De acuerdo a lo observado en las diferentes gráficas de las muestras analizadas con el espectrómetro PIMA II, además de la revisión de la información geológica adjunta a cada una de ellas, se identificaron tres principales zonas de alteración, que a su vez, se dividen en subzonas como se muestra en la Tabla 4. Cada una de estas fronteras de alteración se definió en base a la asociación y abundancia relativa de sílice, alunita, dickita, caolinita, illita, smectita y clorita.

VIII.4.1 Zona de alteración de Sílice.

Sub-zona de Sílice masivo (SM), se caracteriza por una fuerte silicificación que borra la textura original (textura obliterada) de la roca alterada y solamente se conservan los cristales de cuarzo en el caso de rocas dacíticas, dando como resultado, una masa de sílice de tonos claros a grisáceos. Es regularmente afectada por fracturas, zonas de falla y/o brechas. Los rasgos espectrales de las muestras tomadas en esta zona, presentan una distintiva forma suavizada, de curva amplia alrededor de 1400 y otra en 1900 nm, ocasionalmente con rasgos débiles de caolinita y alunita, figura 25

En afloramientos con alteración sílice masivo con alunita (SM + Al), es posible observar a simple vista, la formación de cristales finos de alunita de tonos rosados, que se encuentran en fracturas y rellenando cavidades de rocas fuertemente silicificadas. Las gráficas D y E de la figura 25 obtenidas con el espectrómetro,

indican la presencia de alunita cuyos rasgos principales son afectados por los de sílice, provocando un ensanchamiento y deformación leve a lo largo de todo el espectro.

Zona de alteración	Sub zona	Asociación mineral	Descripción
Sílice (SM y SV)	SM	Síl	Sílice masivo
	SM + Al	Síl+ Alunita	Sílice masivo + Alunita en fracturas y cavidades
	SV	Síl (Al, Dik, K)	Sílice “vuggy” (oqueroso) con arcillas en cavidades, (Al, Dik, K). En zonas de brecha.
Argílica Avanzada (AA)	AA 1	Sil, Al (Dik,K)	Fuerte silicificación, Alunita + (K-Dik), se pueden observar vetillas con alunita, y alunita en cavidades y fracturas.
	AA 2	Sil, Dik	Fuerte silicificación + Dickita, en muestra de mano difícil distinguir de sílice + alunita.
	AA 3	Dik, K > Sil (Al, I, I-Smc)	Débil a moderada silicificación + abundantes arcillas.
Argílica (A)	A 1	K,Dik (Sil, Al, I-Smc)	Rocas con alteración argílica fuerte
	A 2	K, I-Smc, I (Sil, Al)	Con alteración argílica, pero sin dickita
	A 3	I-Smc (Cl)	Débil argilización, en algunos casos con clorita y trazas de pirita.

Tabla 4.- Resume las principales zonas y sub-zonas de alteración definidas por las diferentes asociaciones minerales, mismas que pudieron ser definidas mediante el uso del espectrómetro (IR) PIMA II.

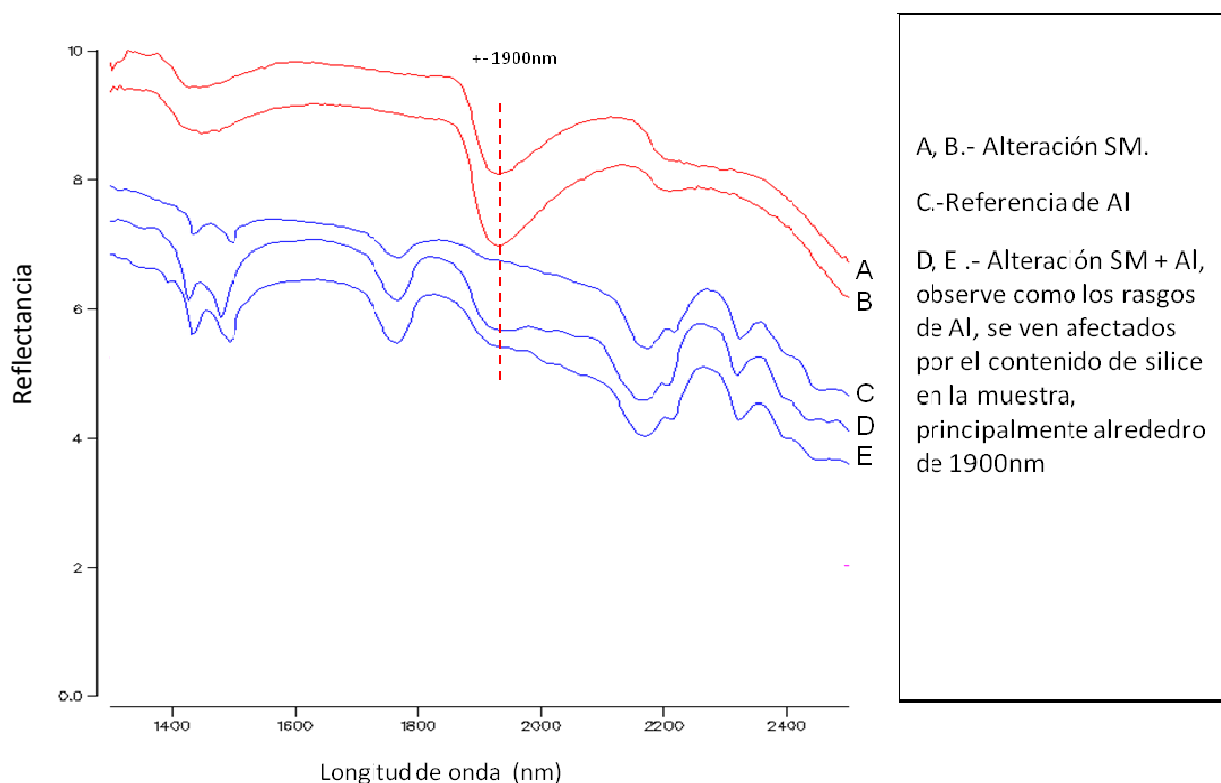


Figura 25.- Principales rasgos espectrales de muestras en rocas con fuerte silicificación SM y sílice alunita.

Sílice “vuggy” (SV) la presencia de este tipo de alteración se restringe enormemente en superficie, aunque se han encontrado cuerpos de más de 20 m de espesor en barrenos de circulación inversa.

Esta zona de alteración es de suma importancia ya que representa el centro de un sistema de alteración en un depósito de alta sulfuración y en algunos casos la zona principal de mineralización. Los afloramientos con rocas alteradas a SV presumen de un protolito de textura porfírica, donde solo se puede apreciar una matriz fuertemente silicificada y cavidades de lo que pudieron ser fenocristales

lixiviados. En el caso de rocas de composición dacítica o riodacítica aun se conservan los cristales de cuarzo. De acuerdo con los requerimientos de muestreo para el análisis con espectrómetro, este tipo de alteración no permite obtener una lectura confiable para ser interpretada debido a la porosidad de la muestra, observe en la figura 26 como se distorsionan los rasgos de otros minerales que pueden estar presentes. Aunque en algunos casos es posible detectar la presencia además de sílice, alunita, dickita o caolinita, en la figura 27 los rasgos principales de alunita y arcillas como colinita, se ven afectados por el “ruido” provocado por la porosidad de la muestra.

VIII.4.2. Zona de alteración Argílica Avanzada (AA)

Se divide en tres sub-zonas donde la diferencia radica en el contenido de sílice y la presencia de minerales como alunita, dickita y caolinita principalmente.

Alteración **AA1**, fuerte silicificación, donde a diferencia de la alteración SM + Al, el mineral Alunita está presente en la totalidad de la roca como: Matriz, Vetillas, Cavidades, reemplazando fenocristales, etc. se pueden observar fracciones menores de K y Dik. Este tipo de alteración es comúnmente asociada a estructuras como brechas, zonas de fracturas, stockwork de cuarzo, vetillas de alunita, y circundando zonas de SM o SM + Al.

Los afloramientos con alteración **AA2** son similares a los de **AA1** respecto al grado de silicificación, a diferencia que en vez de alunita, contienen únicamente sílice + dickita. Es importante hacer notar que sin la ayuda del espectrómetro, es muy difícil diferenciar entre AA1 y AA2.

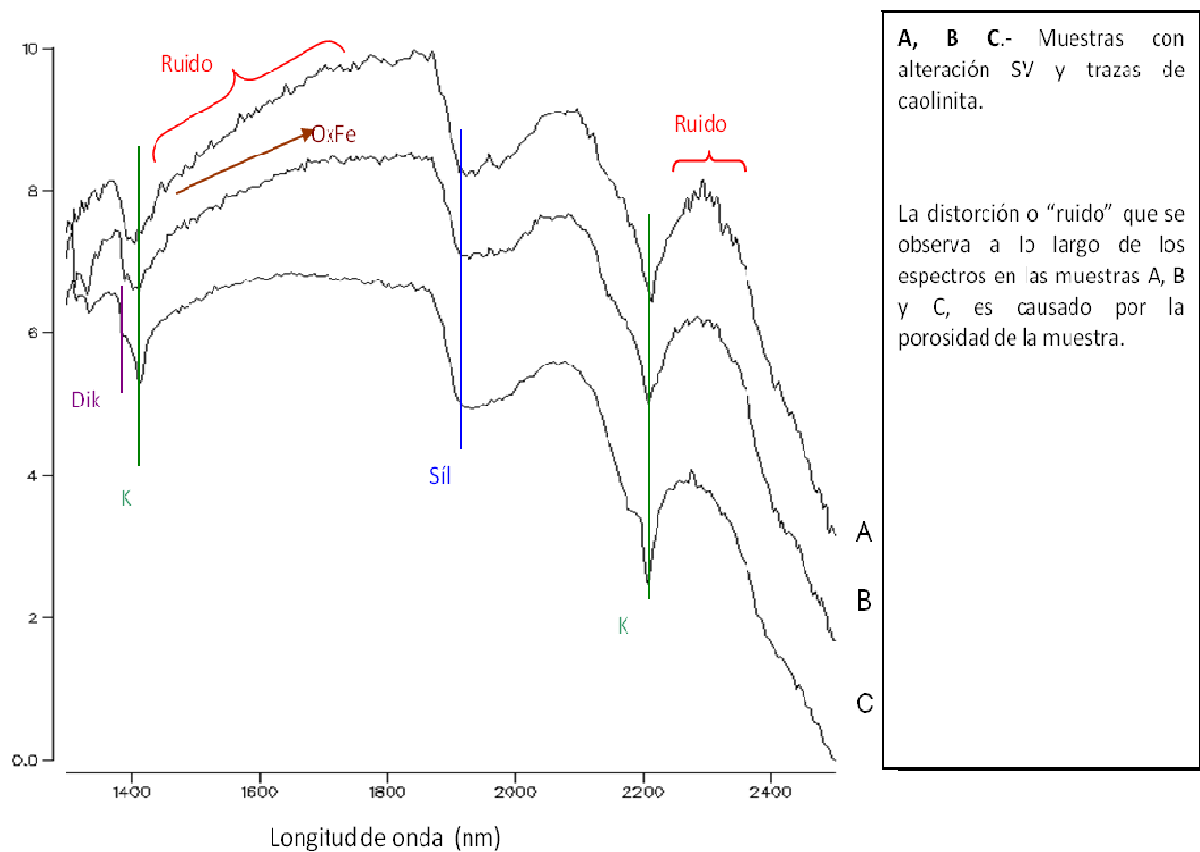


Figura 26.- Muestras de roca con alteración sílice "vuggy", y como afecta la porosidad de la roca para el análisis con el espectrómetro y la interpretación de los datos.

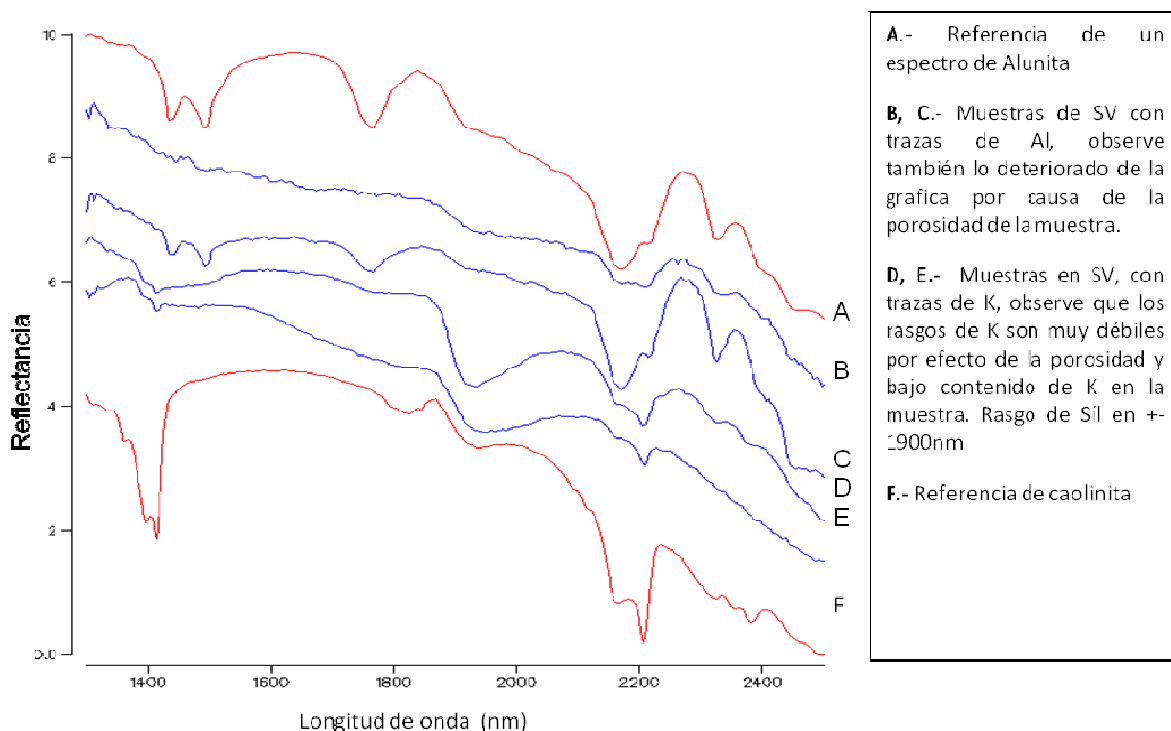


Figura 27.- Muestras con alteración sílice “vuggy” y trazas de alunita y caolinita.

Los afloramientos con alteración **AA3** se distinguen por la presencia de una moderada silicificación, lo que en campo es clasificado como alteración sílica clay (**SC**), en esta se puede observar un contenido bien definido de arcillas como caolinita y dickita, también algo de alunita y ocasionalmente illita o illita-smectita. Esta zona de alteración se encuentra generalmente bordeando los cuerpos con alteración de sílice.

La profundidad y rasgos dominantes en las graficas de espectros de rocas con alteración **AA3** pueden variar significativamente, así como también, la presencia y porcentaje de minerales como sil, alunita, dickita, caolinita, illita-smectita, Figura 28.

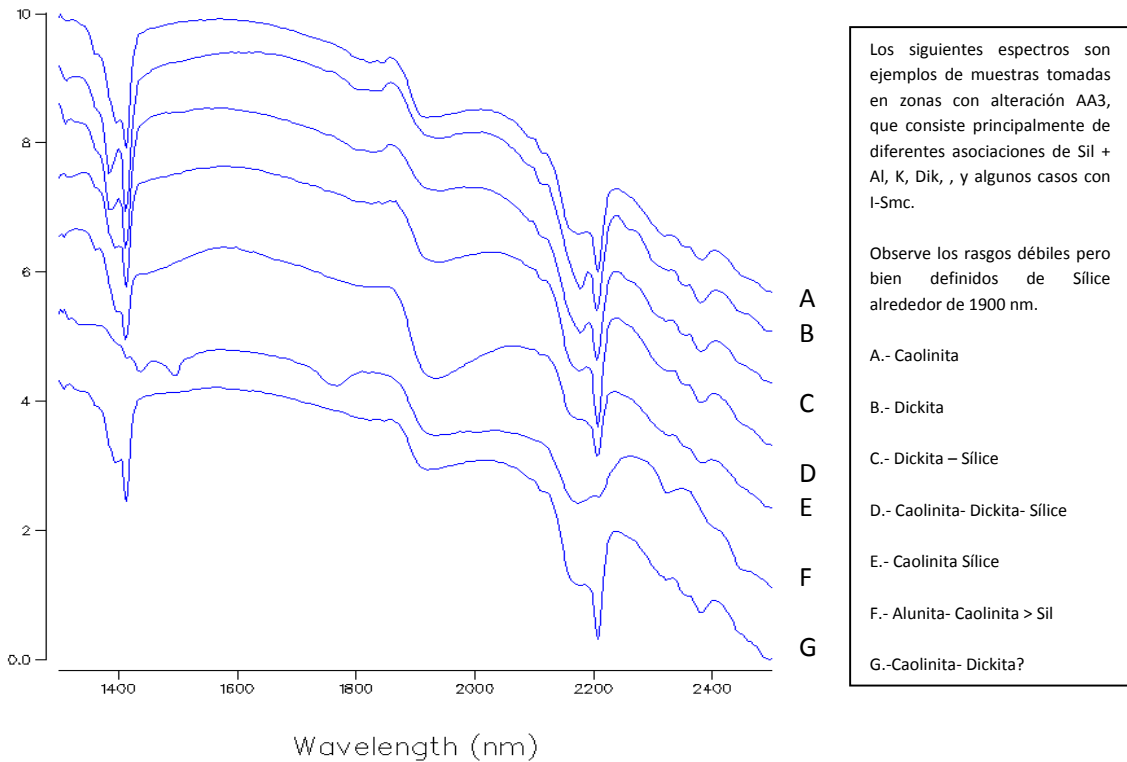


Figura 28.- Muestra las características y rasgos espectrales obtenidos de rocas con alteración AA3.

VIII.4.3 Zona de alteración Argílica (A)

Las rocas con ausencia o escasa silicificación son clasificadas *grosso modo*, dentro de los límites de alteración argílica o “clay”, sin embargo, con la información de campo y datos obtenidos con el espectrómetro, se han delimitado tres sub unidades de alteración argílica:

A1, aquellas rocas que contienen dickita y caolinita principalmente, con menor contenido de sílice, alunita e illita smectita. Estos afloramientos se caracterizan por su aspecto terroso de color amarillento a café claro. Se hallan generalmente bordeando zonas de alteración AA3, también en contacto por fallas con zonas de alteración de Sílice fuerte como SM.

A2 en rocas con un característico contenido de caolinita – illita - smectita ocasionalmente algo de alunita y trazas de dickita. Este tipo de afloramientos permite en cierto modo determinar el tipo de roca alterada, a diferencia de A1 donde la mayoría de fragmentos y cristales han sido alterados excepto por el cuarzo en rocas dacíticas.

A3 son rocas con alteración argílica muy débil en las que puede determinarse fácilmente el color y textura del protolito, se ubican generalmente en zonas distales a los focos de fuerte alteración. Mediante el uso del espectrómetro se definió una asociación de illita - smectita principalmente con menor contenido de caolinita y en ocasiones, clorita, también en algunos afloramientos se pueden observar cristales de pirita.

El análisis con espectrómetro de las muestras en zonas de alteración argílica, reflejan un notable contenido de smectitas que se muestra como un rasgo profundo y asimétrico alrededor de 1900 nm. El contenido de smectita o illita-smectita provoca también una fuerte deformación en las zonas de absorción que corresponden a caolinita o dickita alrededor de 1400 nm, en casi todos los espectros de muestras con alteración argílica, también, por el contenido de smectita, las rocas con esta

alteración suelen retener humedad que en cierto modo dificulta la identificación precisa de minerales. La figura 29 muestra diferentes espectros de muestras tomadas en las zonas de alteración argílica.

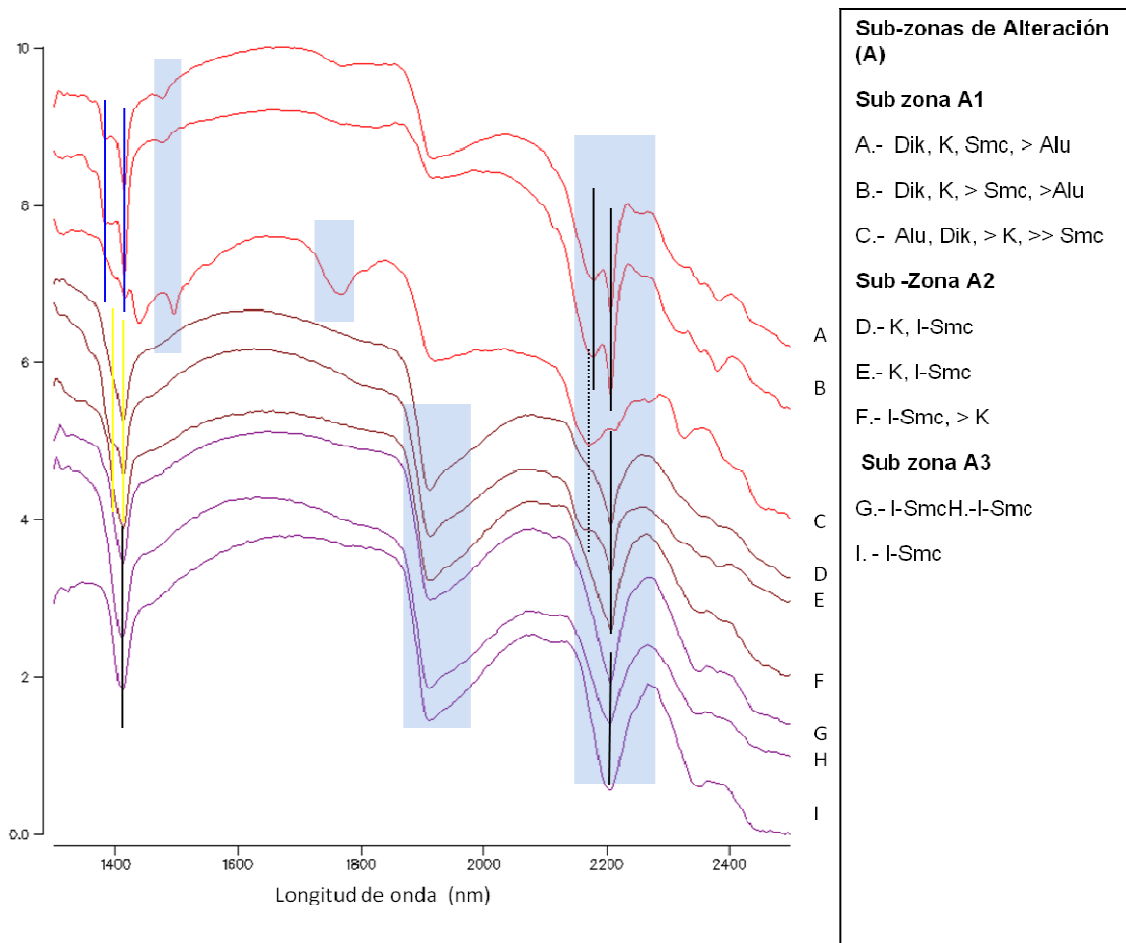


Figura 29.- Principales características y rasgos espectrales de las diferentes sub zonas de alteración argílica

VIII.5. Mapas de alteración y anomalía geoquímica.

Después de analizar las 618 muestras de roca donde se generaron alrededor de 1500 espectros que fueron interpretados para determinar los minerales presentes, toda la información generada fue integrada junto con mapas de alteración y de estructuras. Con estos datos se elaboró un mapa interpretado de las diferentes zonas de alteración reconocidas con ayuda del espectrómetro, figura 30.

Con el objetivo de reconocer aquellas zonas de alteración que están asociadas con la mineralización de oro se integró la información de 1215 muestras de roca analizadas por los métodos Au – AA24 y ME – ICP41, con estos datos se elaboró un mapa de contornos con valores de Au en g/t como se muestra en la figura 31.

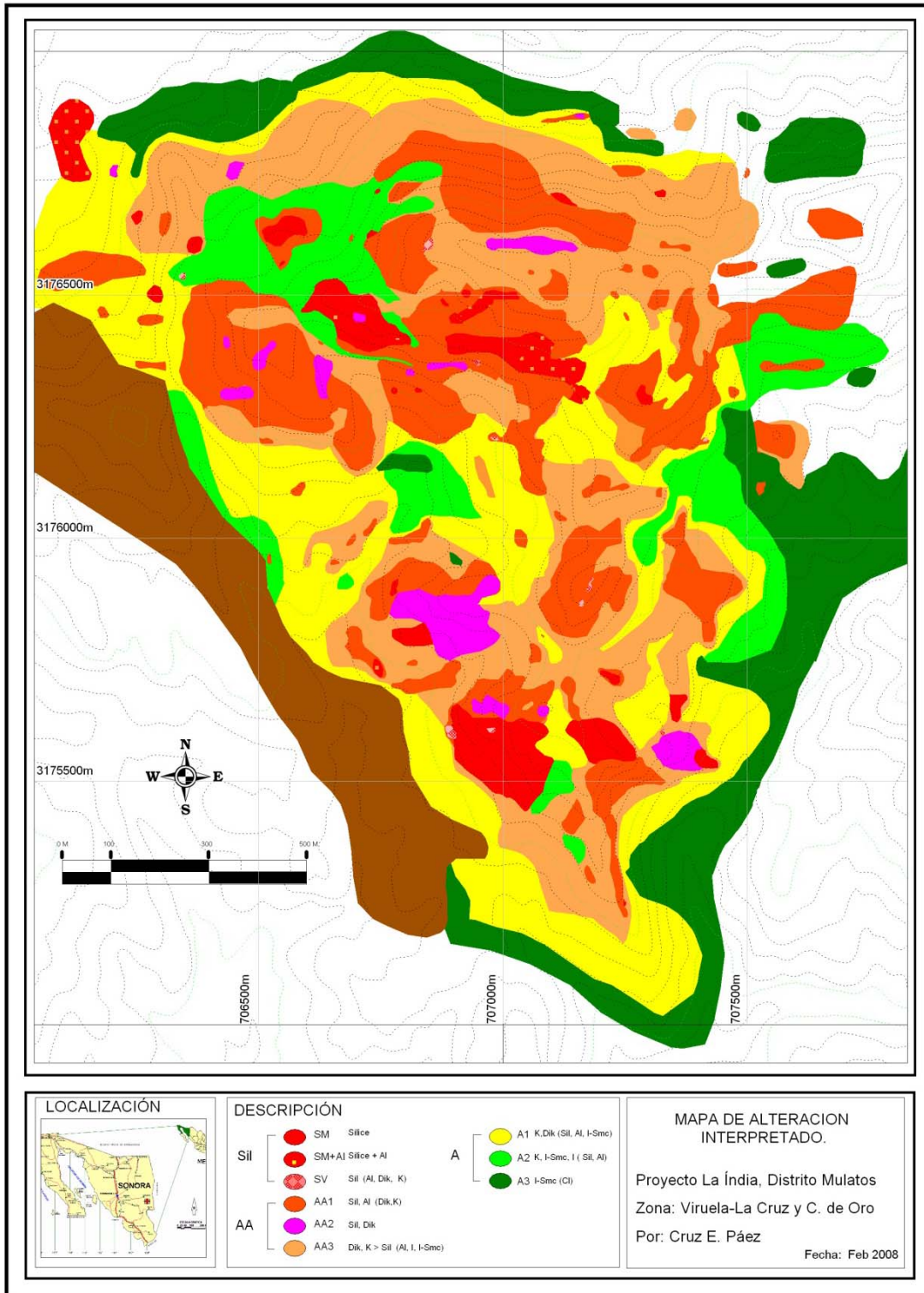


Figura 30.- Mapa de alteración interpretado, zona Viruela – La Cruz, Cerro de Oro proyecto La India

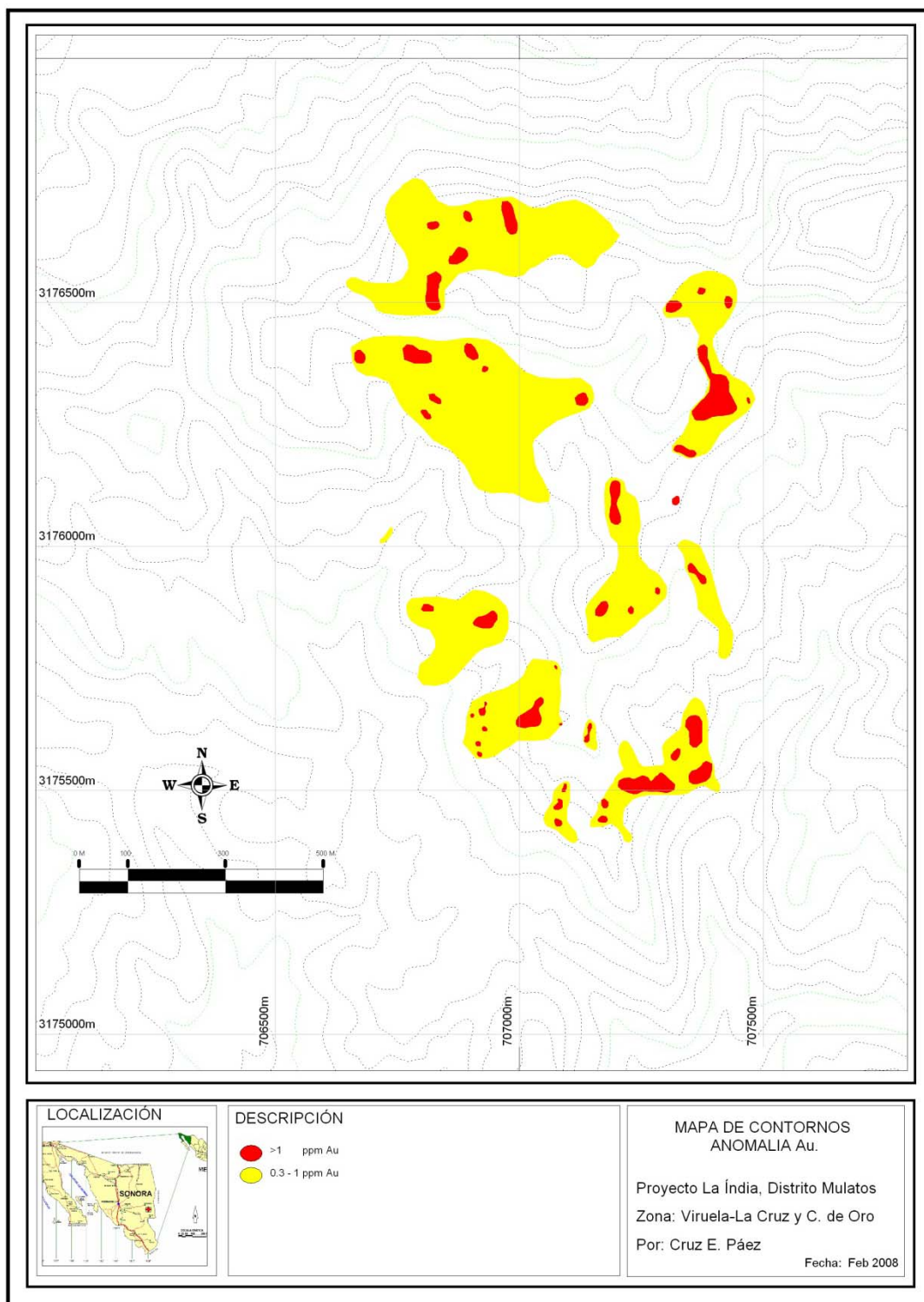


Figura 31.- Mapa de contornos de anomalía (Au ppm), zona Viruela – La Cruz, Cerro de Oro proyecto La India