



Universidad  
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería  
Ingeniería Civil Geológica

**Calibración de cámara hiperespectral para su uso en la geometalurgia: aplicación en muestras de tipo cutting de mina El Teniente**

Rodrigo González Aguilera  
Profesor(a) guía: Claudio Contreras Hidalgo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo

Rancagua, Chile  
Diciembre, 2023

## **Dedicatoria**

Dedicatoria para mi hijo Lucas Benjamín González Cornejo. Te amo hasta el infinito y más allá.

## Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de esta memoria de título y durante toda mi etapa de formación profesional.

Primero y principalmente agradecer a mi padre Hernán González, mi madre Consuelo Aguilera y mi hermana Carolina González. Por su amor, consejos y apoyo durante mi etapa universitaria y en cada momento de mi vida. A mi hijo Lucas, por ser mi motivación y mi motivo de alegrías.

A la familia González Villaseca, por ser mi segunda familia y hogar, por sus valores entregados y especialmente por todo el cariño que me han brindado. A mi familia paterna y materna cercana, por su preocupación y grandes enseñanzas durante mi vida.

A mis amigos de la infancia; Marcos, Ignacio, Nicole y Daniel, por alegrarme y sacarme una sonrisa en momentos difíciles. Y mis CompaGeos; Ignacio, Paloma y Yose por todos los buenos y malos momentos que pasamos juntos en la Universidad. También a cada amigo que me sacaba una sonrisa y alegraba el día.

A mi profesor guía; Claudio Contreras, por ser un gran guía durante todo este proceso, destacando su preocupación e interés, a Jaime Varas por toda la ayuda logística y apoyo brindado, a Nicolás Lobos por todas las herramientas entregadas durante la práctica profesional y permitirme ser ayudante del curso Sistemas de Información Geográfica.

Al RISLab, en especial a Hernán Reyes por toda la ayuda brindada, por contribuir con herramientas claves y permitirme un espacio durante estos meses. Por último, agradecer a Codelco- El Teniente por facilitar las muestras de tipo *cutting*.

## Índice

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMEN.....</b>                                                                                       | <b>7</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                                  | <b>8</b>  |
| <b>HIPÓTESIS.....</b>                                                                                     | <b>9</b>  |
| <b>OBJETIVO GENERAL.....</b>                                                                              | <b>9</b>  |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>                                                                         | <b>9</b>  |
| <b>MARCO TEÓRICO.....</b>                                                                                 | <b>10</b> |
| IMÁGENES HIPERESPECTRALES .....                                                                           | 10        |
| APLICACIÓN DE LA CÁMARA HIPERESPECTRAL EN GEOMETALURGIA.....                                              | 13        |
| <b>MARCO GEOLÓGICO.....</b>                                                                               | <b>14</b> |
| CODELCO- DIVISIÓN EL TENIENTE .....                                                                       | 14        |
| <b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>                                                                           | <b>17</b> |
| I) ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA HIPERESPECTRAL .....                                                     | 18        |
| II) CALIBRACIONES MECÁNICAS DE LA CÁMARA HIPERESPECTRAL .....                                             | 19        |
| III) CALIBRACIONES DE CÁMARA EN EL SOFTWARE SPECTRONONPRO .....                                           | 20        |
| IV) SEGMENTACIÓN EN EL SOFTWARE SPECTRONONPRO.....                                                        | 23        |
| V) RECOPIACIÓN DE DATOS HIPERESPECTRALES DE LA BIBLIOTECA DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS .....  | 24        |
| VI) PRUEBA DE PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN EN MUESTRAS DE TIPO CUTTING DE EL TENIENTE .....                   | 25        |
| <b>RESULTADOS .....</b>                                                                                   | <b>26</b> |
| I) CALIBRACIONES MECÁNICAS DE LA CÁMARA HIPERESPECTRAL .....                                              | 26        |
| II) CALIBRACIONES DE CÁMARA EN EL SOFTWARE SPECTRONONPRO .....                                            | 27        |
| III) SEGMENTACIÓN CON EL SOFTWARE SPECTRONONPRO.....                                                      | 36        |
| IV) RECOPIACIÓN DE DATOS HIPERESPECTRALES DE LA BIBLIOTECA DEL SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS. .... | 38        |
| V) PRUEBA DE PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN EN MUESTRAS DE TIPO CUTTING DE EL TENIENTE .....                    | 40        |
| <b>DISCUSIÓN .....</b>                                                                                    | <b>42</b> |
| <b>CONCLUSIÓN.....</b>                                                                                    | <b>45</b> |
| <b>REFERENCIAS.....</b>                                                                                   | <b>47</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                                       | <b>49</b> |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1. Setup de captura de datos hiperespectrales de muestras de tipo cutting de Codelco-El Teniente. ....</i>                                                                                                                                                                                                    | <i>8</i>  |
| <i>Figura 2. Ilustración de tipo de imágenes que se pueden adquirir.....</i>                                                                                                                                                                                                                                            | <i>10</i> |
| <i>Figura 3. Clasificación de sensores hiperespectrales según su rango de longitud de onda .....</i>                                                                                                                                                                                                                    | <i>11</i> |
| <i>Figura 4. Imagen descriptiva de un hipercubo.. .....</i>                                                                                                                                                                                                                                                             | <i>12</i> |
| <i>Figura 5. Mapa geológico de la mina Rajo Sur cota 2910. Modificado del plano GL9-11042-0, División El Teniente-Codelco-Chile.....</i>                                                                                                                                                                                | <i>15</i> |
| <i>Figura 6. Cámara hiperespectral, modelo Pika L RESONON. Figura extraída del sitio web de RESONON. ....</i>                                                                                                                                                                                                           | <i>19</i> |
| <i>Figura 7. Imagen que muestra cómo se desbloquea el ajuste de enfoque de la cámara.. .....</i>                                                                                                                                                                                                                        | <i>21</i> |
| <i>Figura 8: Ejemplo de enfoque de cámara hiperespectral en el software SpectrononPro. ". ....</i>                                                                                                                                                                                                                      | <i>21</i> |
| <i>Figura 9. Parámetros de segmentación utilizados para la muestra P100040496X. I.....</i>                                                                                                                                                                                                                              | <i>23</i> |
| <i>Figura 10. Tabla de clasificación de muestras según su granulometría.....</i>                                                                                                                                                                                                                                        | <i>25</i> |
| <i>Figura 11. Imagen de la posición y distancia de la cámara Pika L RESONON respecto a las muestras. ....</i>                                                                                                                                                                                                           | <i>26</i> |
| <i>Figura 12. Resultado de calibración de Focusing Objective Lens, a la izquierda realizada con luz LED a la derecha realizada con luz halógena. ....</i>                                                                                                                                                               | <i>27</i> |
| <i>Figura 13. Resultados de calibración de relación de aspecto, a la izquierda un ejemplo de 1200 líneas capturada con luz LED, a la derecha el ejemplo con 2400 líneas capturadas con luz halógena, en esta se puede apreciar un color amarillo ya que se hizo antes de hacer la calibración de reflectancia. ....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 14. Representación RGB de la Dark Correction con sus respectivos ejes, en la parte superior Dark Correction realizada con luz solar a 55.0000 lux, y en la parte inferior Dark Correction realizada con luz halógena.. .....</i>                                                                              | <i>29</i> |
| <i>Figura 15. Representación RGB de la calibración de Reflectancia. En orden descendente la calibración a 88 lux, 1.100 lux, 23.500 lux, 43.000 lux y 100.000 lux. ....</i>                                                                                                                                             | <i>29</i> |
| <i>Figura 16. Recopilación de gráficos de espectros de la luz natural a distintas luminosidades. Los niveles de luz corresponden a 1.100 lux, 43.000 lux y 100.000 lux.....</i>                                                                                                                                         | <i>31</i> |
| <i>Figura 17. Representación RGB con luz LED (5.550 lux) de la muestra P100040496X antes y después de realizar la Response Correction. A la derecha el espectro de la luz LED.....</i>                                                                                                                                  | <i>32</i> |
| <i>Figura 18. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada a 5.500 lux con láminas de teflón blanco. . ....</i>                                                                                                                                                                                   | <i>32</i> |
| <i>Figura 19. Imagen RGB de la diferencia entre láminas y micas de teflón blanco. A la izquierda se encuentra la lámina de teflón blanco, se observa una pequeña rugosidad y una gran diferencia en el color (RGB), a la derecha la mica de teflón blanco, con una superficie completamente lisa y uniforme.. ....</i>  | <i>33</i> |
| <i>Figura 20. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada con luz LED a 5.500 lux con micas de teflón blanco.....</i>                                                                                                                                                                            | <i>33</i> |
| <i>Figura 21. Captura RGB de la muestra P100040496X junto con un píxel seleccionado del mineral pirita, con su respectivo espectro.. .....</i>                                                                                                                                                                          | <i>34</i> |
| <i>Figura 22. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada con luz halógena a 5.000 lux con micas de teflón blanco.....</i>                                                                                                                                                                       | <i>35</i> |
| <i>Figura 23. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100040496X, los píxeles seleccionados corresponden a pirita (primer espectro) y calcopirita (segundo espectro).. .....</i>                                                                                                                                 | <i>35</i> |
| <i>Figura 24: Resultado segmentación de la muestra P100040496X con 6 clústeres.....</i>                                                                                                                                                                                                                                 | <i>36</i> |
| <i>Figura 25: Representación de una segmentación semiasistida.....</i>                                                                                                                                                                                                                                                  | <i>37</i> |
| <i>Figura 26. Gráficos de espectros de Pirita y Calcopirita, en el rango de 205 a 2976 nanómetros, destacando el rango VNIR.....</i>                                                                                                                                                                                    | <i>38</i> |
| <i>Figura 27. Gráficos de reflectancia promedio de espectros de Pirita y Calcopirita en el rango de 205 a 2976 nanómetros, destacando el rango VNIR. ....</i>                                                                                                                                                           | <i>39</i> |

|                                                                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 28. Gráficos de reflectancia promedio de espectros de Pirita y Calcopirita en el rango VNIR (387 a 1.025 nanómetros). .....</i>                                                     | <i>40</i> |
| <i>Figura 29. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100040496X.....</i>                                                                                                              | <i>40</i> |
| <i>Figura 30. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100037330X (primeros dos espectros) y P100037331X (últimos dos espectros). . .....</i>                                           | <i>41</i> |
| <i>Figura 31. Comparación de espectros obtenidos de pirita (P100037330X) y calcopirita (P100037331X) con los espectros graficados con los datos de la biblioteca espectral del USGS. ....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 32: Esquema explicativo del protocolo de captura de imágenes hiperespectrales en muestras de tipo cutting. ....</i>                                                                 | <i>46</i> |

## Resumen

El margen de precisión de los métodos convencionales de caracterización mineral durante las etapas de exploración y producción mineral pueden generar pérdidas enormes en la industria. La búsqueda de nuevas tecnologías de adquisición y procesamiento de imágenes, buscan contribuir a mejorar la precisión y eficacia de la identificación de mineralogía indicativa de depósitos de pórfidos cupríferos. La aplicación de la tecnología hiperespectral se da a escalas de yacimientos de pórfidos cupríferos completos (Prado et al. 2023) y a nivel de muestras geológicas como núcleos de perforación (Egaña et al., 2020). Entonces el desafío corresponde a generar un protocolo de calibración de la cámara hiperespectral para su uso en muestras de tipo *cutting* de El Teniente.

Este trabajo presenta una metodología para caracterizar minerales en muestras de *cutting*, el proceso de captura y posterior análisis hiperespectral requiere de una calibración de la cámara hiperespectral. Esta calibración permite ajustar el foco y la posición de la cámara para trabajar a diferentes escalas y condiciones externas como la reflectancia y la oscuridad que dependen del tipo e intensidad de luz. Estos elementos de luminosidad constituyen la problemática principal en el proceso de calibración, las complicaciones asociadas con los diversos tipos de luz incluyen la falta de uniformidad en la distribución lumínica, los espectros característicos de cada fuente de luz, problemas de saturación ocasionados por valores elevados de intensidad de luz, particularmente superiores a 43.000 lux, así como la presencia de ruido en el espectro en situaciones de baja intensidad lumínica, definida como inferior a 1.100 lux.

Los resultados reflejan a la necesidad y obligación de seguir este protocolo de calibración, de lo contrario es inviable realizar una caracterización mineralógica empleando esta tecnología. La pirita y calcopirita son minerales objetivos para El Teniente, definir su firma espectral en muestras de *cutting* es un gran avance ya que con el uso de las firmas espectrales se propone mejorar la rapidez, precisión y exactitud en la caracterización de minerales respecto a la identificación realizada por un humano, que depende de la experiencia del profesional.

**Keywords:** Tecnología hiperespectral; Caracterización mineralógica; Protocolo de calibración; Firmas espectrales.

## Introducción

Una caracterización mineralógica deficiente puede implicar la nula o errónea identificación de minerales, lo que puede derivar en interpretaciones de modelos geológicos erradas o en cuantificación de ley de mena imprecisas, en consecuencia, se pueden generar pérdidas enormes en la industria minera. La búsqueda de nuevas tecnologías de adquisición y procesamiento de imágenes buscan mejorar la identificación de mineralogía indicativa de minerales de interés. Una reciente investigación (Egaña et al., 2020) emplea la tecnología hiperespectral con el fin de realizar mineralogía semicuantitativa, esta tecnología permite la detección de características de absorción de luz en múltiples longitudes de onda, posibilitando la identificación de minerales en función a sus firmas espectrales.

Los dispositivos utilizados para obtener este tipo de información son llamados espectrómetros, como la cámara hiperespectral. La aplicación de la cámara hiperespectral se puede establecer a diferentes escalas, como en yacimientos completos o a nivel de muestras geológicas. Al ser una tecnología relativamente nueva ha generado desafíos y dificultades, como establecer las estandarizaciones y calibraciones para asegurar su exactitud y precisión, siendo esta la motivación principal del trabajo de investigación, el cual se enfoca en generar un protocolo para utilizar la cámara hiperespectral Pika L RESONON en muestras de tipo *cutting* de Codelco–El Teniente (Figura 1).



*Figura 1. Setup de captura de datos hiperespectrales de muestras de tipo cutting de Codelco–El Teniente. Fotografía tomada por R. González*

### **Hipótesis**

- Reconocimiento y segmentación de minerales asociados a pórfidos cupríferos a través de la cámara hiperspectral requiere de la aplicación de estandarizaciones y calibraciones de tales ítems. Su no aplicación conlleva a errores de captura de datos.

### **Objetivo general**

- Generar un protocolo de uso de la cámara hiperspectral para su utilización en muestras de tipo cutting provenientes de Codelco-El Teniente.

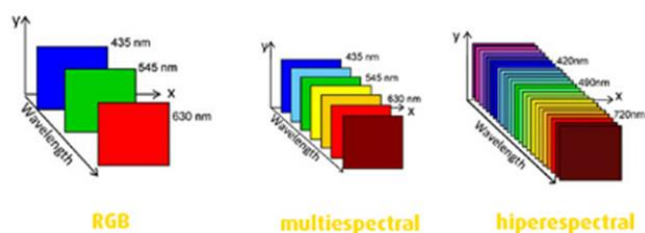
### **Objetivos específicos**

- Calibrar condiciones mecánicas y de software de la cámara hiperspectral Pika L RESONON.
- Establecer una estandarización a nivel de iluminación para adquirir datos hiperspectrales en el rango VNIR de las muestras tipo cutting.
- Aplicar el protocolo de calibración de la cámara hiperspectral en muestras de tipo cutting de mina El Teniente para caracterizar minerales.

## Marco teórico

### *Imágenes hiperespectrales*

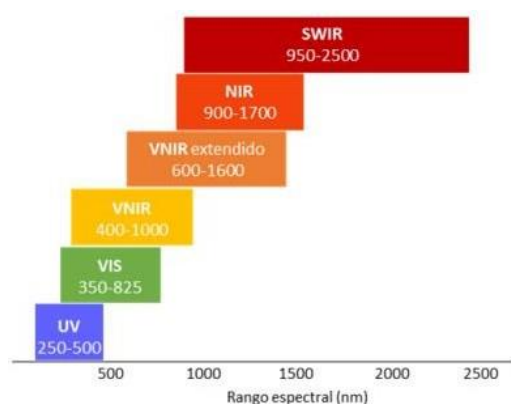
Las imágenes hiperespectrales representan una tecnología evolucionada a lo largo de las décadas, en 1970 tiene su origen en la técnica de sensores remotos, más conocida como teledetección. El objetivo de esta técnica es realizar mediciones cuantitativas de los componentes del sistema terrestre a partir de espectros calibrados y que son adquiridos como imágenes con una gran cantidad de bandas (Van Der Meer et al., 2012). De acuerdo con el número de bandas es posible clasificar las imágenes como: imágenes RGB con 3 bandas en el rango visible (R: red, G: green, B: blue), multispectrales, aquellas imágenes que contienen más de 3 bandas (ej. Landsat, Aster) e hiperespectrales las que presentan más de 100 bandas (Roman-González & Vargas-Cuentas, 2013).



*Figura 2. Ilustración de tipo de imágenes que se pueden adquirir. Figura extraída de BCN Vision (2021). Cámaras Hiperespectrales. Modificada por R. González.*

Las imágenes a color están compuestas por tres canales (RGB), estas imágenes tienen tres veces más datos que las imágenes en escala de grises. Este tipo de imágenes es importante en aplicaciones donde el color es una característica relevante. Las imágenes multispectrales en comparación con las imágenes a color presentan un aumento en la dimensión y se obtiene información relevante de varias longitudes de onda. Las cámaras multispectrales recopilan información de un rango que abarca desde 2 a 10 longitudes de onda, no contiguas entre sí. Estas imágenes sirven para detectar diferencias en composición de objetos o zonas. (BCN Vision 2021).

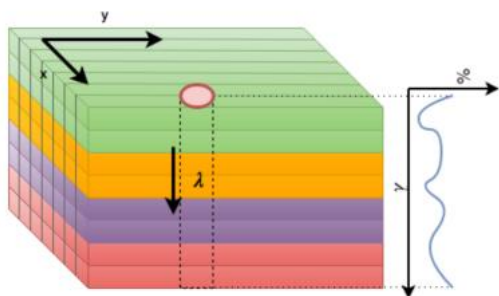
La cámara hiperespectral es un espectrómetro que recopila fotones sin emitir energía por sí mismo, es decir que aprovechan fuentes de energía externa, como la radiación solar en caso de teledetección o fuentes de luz artificial, para aplicaciones más controladas en laboratorios (Hanna Castro, 2017). Los sensores de detección se caracterizan de acuerdo con el rango de longitud de onda que son capaces de captar, en teledetección los rangos de longitud de onda del espectro electromagnético que más se utilizan son el Visible e Infrarrojo Cercano o VNIR (Visible and Near-Infrared), Infrarrojo de Onda corta o SWIR (Short-Wave Infrared) e Infrarrojo Térmico o TIR (Thermal Infrared). En la figura 3, se clasifican los sensores para el rango 250– 2500 nanómetros (nm) (Hanna Castro, 2017).



*Figura 3. Clasificación de sensores hiperespectrales según su rango de longitud de onda (Hanna Castro, 2017).*

*La cámara hiperespectral utilizada en este trabajo de título se encuentra en el rango espectral VNIR (400–1000 nm), mientras que el rango espectral que es perceptible para el ojo humano es el rango VIS (350–825 nm). Figura extraída de Hanna Castro (2017).*

La información obtenida por la cámara hiperespectral entrega una representación altamente detallada del objeto bajo estudio, estos objetos reflejan, absorben y emiten radiación electromagnética dependiendo de su composición química y textura superficial. Esta característica para reflejar radiación se conoce como firma espectral o espectro y puede ser usada para potencialmente identificar cualquier objeto (Plaza et al., 2009). Una imagen hiperespectral vista como un objeto matemático corresponde a un cubo de datos, llamado hipercubo (Figura 4). Cada dato capturado por la cámara hiperespectral está ordenado por argumentos  $(x, y, \lambda)$ , donde las dos primeras coordenadas indican la posición espacial y la tercera componente hacer referencia a intervalos con longitudes de onda específicos (Campos, 2020).



*Figura 4. Imagen descriptiva de un hipercubo. Figura extraída de Campos, 2020.*

En la figura 4 se observa un cubo de datos hiperespectrales o hipercubo, en el plano  $x$ - $y$  se representa la posición espacial, el eje  $\lambda$  representa la información según distintas bandas de longitud de onda. Cada píxel de la imagen captura información espectral, lo que proporciona un espectro completo por cada punto de la imagen.

Los datos hiperespectrales se presentan como una perspectiva prometedora en la mejora de la eficiencia y estimación de la concentración de cobre (Cu) en núcleos de perforación. La exploración minera implica análisis geoquímicos costosos y que requieren mucho tiempo de muestras de núcleos de perforación para determinar la concentración de elementos valiosos, tales como el cobre. Estos estudios se caracterizan por tener una baja resolución espacial debido a los grandes intervalos de muestreo (Prado et al., 2023).

Las cámaras hiperespectrales desempeñan un papel importante en el campo de la geometurgia, ya que permiten la predicción del grado de distribución mineral en perforaciones a escalas centimétricas y milimétricas. A diferencia de las imágenes convencionales (imágenes con límite de bandas espectrales), las imágenes hiperespectrales poseen cientos de bandas, lo que resulta en datos de gran volumen y complejidad. En consecuencia, el análisis de dato no se lleva a cabo mediante una interpretación visual, sino que se realiza con algoritmos especializados para extraer la información deseada de estas imágenes, como la determinación de abundancia mineral y la composición (Prado et al., 2023).

Debido a la gran cantidad de información disponible de los datos hiperespectrales, se han generado desafíos y dificultades relevantes, especialmente en aplicaciones relacionadas con el análisis de muestras geológicas y geometurgia con enfoque de aprendizaje automatizado (Egaña et al., 2020). Un desafío importante radica en la estandarización de firmas espectrales para

identificar y cuantificar de forma digital y automatizada minerales asociados a pórfidos cupríferos, y así, implementar la cámara hiperespectral como una alternativa tecnológica de innovación en la industria minera.

### ***Aplicación de la cámara hiperespectral en geometurgia.***

En la geometurgia, el mapeo de la distribución espacial de la concentración de elementos en la subsuperficie permite verificar la viabilidad económica de un yacimiento, diseñar la extracción de minerales y guiar la operación minera. Para obtener esta información se realizan análisis geoquímicos y mineralogía automatizada. Las técnicas analíticas empleadas con tecnología hiperespectral en el yacimiento “Olympic Dam” ubicado en Australia son la fluorescencia de rayos (XRF), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) (Prado et al., 2023). Estas técnicas ayudan a comprender la composición química de minerales y rocas, la XRF se caracteriza por entregar resultados rápidos y no destructivos, la ICP-MS puede detectar elementos en concentraciones muy bajas y garantiza la precisión y fiabilidad en el análisis de muestras, y la ICP-OES permite identificar elementos en muestras químicas con una gran precisión. A pesar de la gran utilidad de estas técnicas en la industria minera durante las últimas décadas, el alto costo analítico no permite un muestreo a alta densidad.

Los sensores hiperespectrales son herramientas no invasivas capaces de escanear núcleos de perforación en poco tiempo (Prado et al., 2023) estos adquieren imágenes en cientos de bandas espectrales continuas, capturando información hiperespectral detallada para cada píxel de imagen. Por lo tanto, se comenzó a aplicar los datos hiperespectrales en geometurgia para la identificación de minerales de forma precisa e información detallada sobre la distribución espacial de diferentes minerales, facilitando la identificación de zonas de mineral (Prado et al., 2023).

A menor escala respecto a los análisis hiperespectrales en yacimientos, se encuentran los análisis realizados por el Laboratorio Avanzado de Supercomputación Geoestadística (ALGES), donde implementan la tecnología de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) para realizar caracterización de muestras geológicas y geometurgia.

Se emplean escáneres hiperespectrales de un solo píxel como el Hylogger o sistemas de imágenes 2D como el Corescan para registrar las bandejas de núcleos de perforación (Egaña et al., 2020).

Este análisis se emplea para llevar a cabo la caracterización semicuantitativa de mineralogía, litología y alteración. Además, se adquieren espectros de compuestos presentes en segmentos de núcleos de perforación mediante el uso de instrumentos hiperespectrales de un solo píxel como el ASD SpecLab, estos espectros se utilizan para la identificación de arcillas y minerales específicos basándose en el análisis NIR clásico (Egaña et al., 2020).

### **Marco Geológico.**

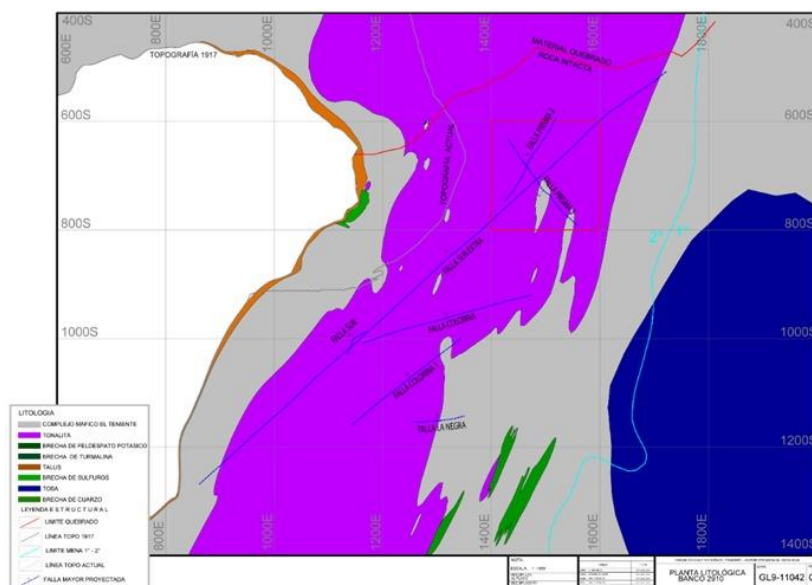
#### ***Codelco– División El Teniente***

El Teniente está ubicado en el margen occidental de la Cordillera de los Andes en la región central del cinturón cuprífero porfirítico chileno (Vry et al., 2009). Forma parte de un grupo de depósitos de cobre de finales del Mioceno–Plioceno en la región. Se caracteriza por ser un depósito rico en cobre, molibdeno, azufre, hierro, calcio y boro, pero pobre en oro (Vry et al., 2009), además de su gran tonelaje, es el depósito de cobre–molibdeno más grande del mundo en términos de metal contenido, albergando un recurso de más de 12 mil millones de toneladas métricas de mineral con leyes promedio de 0,65 % de Cu y 0,019 % de Mo (Vry et al., 2009). Siguiendo con la mineralización, la mineralogía y alteraciones en el yacimiento El Teniente, son de gran importancia debido a su asociación con la mineralización de cobre y molibdeno. Los minerales de cobre son los principales objetivos de la minería en El Teniente, estos incluyen la calcopirita, covelina, bornita y otros minerales de cobre. Además del cobre, el molibdeno es otro metal de interés, siendo la molibdenita el mineral más común, también se pueden encontrar otros minerales en el yacimiento como la piritita, esfalerita, galena y minerales de hierro (Vry et al., 2009). Estos minerales están asociados a depósitos de cobre, para más información sobre los pórfidos cupríferos revisar Anexo N°1.

Si bien el depósito El Teniente comparte similitudes con los pórfidos cupríferos típicos, como la asociación con intrusiones de roca ígnea y la presencia de mineralización de cobre, este yacimiento no se ajusta completamente al modelo clásico de un pórfido cuprífero (Vry et al., 2009). Una de las diferencias que hacen único al depósito El Teniente es su sistema de complejo de brechas en la parte superior de las intrusiones, se trata de una característica distintiva y desempeñan un papel importante en la mineralización, también el depósito presenta múltiples intrusiones de diferentes composiciones, incluyendo dacitas y dioritas (Vry et al., 2009). Estas

intrusiones se emplazaron en distintas fases y contribuyeron a la formación de diferentes tipos de brechas e interacción hidrotermal. Por último, el proceso de mineralización de El Teniente parece haber ocurrido en múltiples etapas a lo largo de un período de tiempo, en lugar de ser predominantemente sincrónico con el depósito de la intrusión principal como ocurre en la mayoría de los modelos de pórfidos cupríferos clásicos. (Vry et al., 2009). Esto se refleja en la secuencia de diferentes tipos de vetas y brechas.

La litología presente en el yacimiento El Teniente corresponde a “Complejo Máfico El Teniente” (CMET, Ex- “Andesitas de la mina”), “Complejo Félsico”, “Complejo Brecha Braden”, “Cuerpos de Brechas”, “Intrusivos Menores”, “Pórfido Latítico”, “Diques de Cuarzo y Anhidrita”, “Dique de Andesita” y “Diques de Lamprófido” (figura 5) (Rojas, 2014).



*Figura 5. Mapa geológico de la mina Rajo Sur cota 2910. Modificado del plano GL9-11042-0, División El Teniente-Codelco-Chile.*

De las litologías presentes en El Teniente, se detalla con motivos de este estudio, la mineralogía y alteración de Complejo Máfico El Teniente (CMET) y Tonalita, perteneciente al Complejo Félsico. Para describir la litología de El Teniente se utiliza el trabajo de Rojas (2014).

### **Complejo Máfico El Teniente (CMET)**

Esta unidad es la roca de caja del yacimiento, y corresponde a un conjunto rocas oscuras, de edad Mioceno Superior, que a gran escala conforman un lacolito que intruye a la Formación Farellones (Skewes et al., 2002; Stern et al., 2011). Se trata de un complejo subvolcánico de

composición básica, de color pardo oscuro a negro, cuyas dimensiones son de aproximadamente 2 km de alto, 2,4 km de ancho y 1,2 km de largo, donde se agrupan gabros, diabasas, basaltos, pórfidos y andesitas basálticos (Burgos, 2002).

La alteración, mineralización y brechización del complejo han cambiado la mineralogía y textura de este conjunto de rocas, obliterándolas. La alteración principal que afecta a esta unidad es la alteración potásica, que le da una coloración gris-pardo a negro a estas rocas y que tiene a la biotita como mineral predominante (Villalobos, 1975), y anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina en cantidades menores (Skewes et al., 2002). Este complejo presenta, además, un intenso stockwork que enmascara las características primarias de las rocas.

Otra alteración que se presenta en esta unidad es la alteración fílica, que se encuentra asociada a minerales y sulfuros de hierro, como la pirita y calcopirita (Vry et al., 2009) a menudo se presenta rodeando zonas de mineralización de cobre y molibdeno.

### **Complejo Félsico – Tonalita**

También denominada Diorita Sewell, se presenta como un cuerpo intrusivo en el sector sureste del depósito (Figura 5), intruyendo al CMET. El cuerpo es de color gris claro. En las zonas marginales posee una textura porfídica con fenocristales primarios de plagioclasa, biotita y relictos de anfíbol. La parte central del intrusivo presenta una textura fanerítica. Ambas zonas han sufrido una fuerte alteración cuarzo-sericitaclorita (Cuadra, 1986).

En el yacimiento El Teniente también se puede encontrar otro tipo de alteraciones como la alteración propilítica se encuentra en áreas de menor mineralización y se asocia a minerales como epidota, clorita y actinolita (Vry et al., 2009) y suele estar presente en rocas circundantes al yacimiento, también la alteración silicatada, que implica la formación de minerales como epidota y clorita. La alteración de sulfuros, común en áreas de mineralización de cobre y molibdeno, la cual está relacionada con la presencia de minerales como la pirita y calcopirita. Por último, la alteración carbonatada, que se encuentra en algunas partes del yacimiento e involucra minerales como calcita y dolomita (Vry et al., 2009). Este tipo de alteraciones y minerales son indicadores claves para los geólogos en exploración minera y trabajos de metalurgia, ya que facilitan la identificación de zonas de interés económico en el yacimiento. En este trabajo de título se presentará una colección de datos hiperespectrales de algunos de estos minerales guías o indicadores.

En Codelco – División El Teniente, se emplean técnicas de muestreo específicas para caracterizar depósitos minerales, algunas de estas técnicas son el mapeo de *cutting* y la caracterización de sondajes, el mapeo de *cutting* se utiliza para llevar a cabo una caracterización petrográfica de las muestras extraídas de pozos de tronadura, con el propósito de determinar los porcentajes de los minerales de interés presentes en las muestras. Por otro lado, la caracterización de sondajes es una técnica que proporciona información esencial para evaluar la calidad del depósito mineral, este proceso implica la recopilación de datos geológicos y geoquímicos de las muestras obtenidas a través de sondajes de exploración, el análisis de composición química, la identificación de minerales, la medición de espesores de capas y la presencia de discontinuidades contribuyen a que esta caracterización sea una evaluación precisa de los depósitos minerales. Las muestras geológicas que se utilizan para la captura de datos hiperspectrales en este trabajo de investigación corresponden a muestras de tipo *cutting*, las cuales provienen de la mina Rajo Sur de Codelco– División El Teniente. La litología de estas muestras tiene su origen del Complejo Mafico El Teniente (CMET) y el Complejo Félsico – Tonalita.

### **Marco metodológico**

La aplicación de la tecnología hiperspectral se puede usar a diferentes escalas, a nivel de pórfidos cupríferos en el caso de Prado et al. (2023) y a nivel de muestras geológicas como núcleos de perforación en el estudio de realizado por el Laboratorio Avanzado de Supercomputación Geoestadística (ALGES) (Egaña et al., 2020).

El proceso de captura de datos y su posterior digitalización requiere de una etapa de calibración del sensor y pre procesamiento de las imágenes (Campos, 2020). Estos procedimientos son fundamentales en el presente trabajo ya que posibilitan el establecimiento de una estandarización de captura para las muestras de tipo “*cutting*” de Codelco–El Teniente.

El marco metodológico de este estudio presenta un procedimiento para establecer el protocolo de uso de la cámara hiperspectral Pika L RESONON para las muestras geológicas empleadas por El Teniente. Este protocolo de uso y captura de imágenes hiperspectrales se centra en las calibraciones mecánicas y de software de la cámara hiperspectral. El primer paso para

establecer este protocolo es (1) describir las especificaciones de la cámara hiperespectral. Luego con ayuda de las especificaciones de la cámara hiperespectral, se definen los dos principales pasos de calibración: (2) calibraciones mecánicas de la cámara hiperespectral y (3) calibraciones de cámara en el software *SpectrononPro*. En las calibraciones mecánicas se busca estandarizar parámetros como la distancia y posición de la cámara respecto a las muestras, y definir la resolución a capturar. Las calibraciones de cámara en *SpectrononPro* permite realizar calibraciones de enfoque de la cámara, calibraciones de relación de aspecto y, por último, correcciones de oscuridad y correcciones de respuesta o reflectancia, estas correcciones tienen relación directa con el tipo de luz (natural o artificial) y la cantidad de luz (luminosidad) que se refleja en las muestras.

Una vez generado el protocolo de captura de imágenes hiperespectrales para las muestras de tipo *cutting*, se realiza una (4) segmentación en las imágenes en el software *SpectrononPro*. Realizar esta tarea implica considerar todas las limitaciones existentes en el software, desde la etapa de procesamiento hasta obtener los resultados, por lo tanto, sólo se busca dar el primer paso en la segmentación de imágenes de muestras de tipo *cutting*.

Posteriormente se necesita verificar si las calibraciones tuvieron un buen resultado, por lo que se hace una (5) recopilación de datos hiperespectrales de la biblioteca espectral del USGS. Con el fin de comparar esos datos con los datos adquiridos en las (6) pruebas de protocolo de calibración en muestras de tipo *cutting* de El Teniente. Estas muestras están enfocadas en minerales de mena como lo son la piritita y calcopiritita.

Hay que añadir que algunas imágenes de corrección de reflectancia tienen un pequeño marco negro en su exterior, esto se hace con el propósito de distinguir la imagen del fondo blanco del escrito.

#### ***i) Especificaciones de la cámara hiperespectral***

La cámara hiperespectral utilizada en el presente trabajo de título corresponde al modelo Pika L RESONON (figura 6). Esta cámara se caracteriza por su estructura compacta y ligera, y está diseñada para capturar información en el rango espectral VNIR, que abarca longitudes de onda desde 400 nm hasta 1000 nm. Este rango incluye el espectro visible e infrarrojo cercano y es importante en la aplicación de la espectrografía de infrarrojo cercano (NIR) que se utiliza en la

caracterización mineral. La Pika L RESONON se utiliza en diversos contextos como sistemas espectrales aéreos, trabajos de laboratorio y trabajos de campo. La capacidad que tiene de adaptarse a diferentes escalas geológicas la convierten en una herramienta ideal en la geometalurgia permitiendo su uso a nivel de muestras de mano y afloramientos, para la caracterización de minerales y asociaciones mineralógicas, como también a nivel de campo para la identificación de zonas de alteración. El Instituto de Ciencias de la Ingeniería (ICI) emplea la cámara hiperspectral en el proyecto denominado “Transferencia y adopción de Tecnologías para la Gestión de Riesgo en el Proceso Productivo de la Cereza”. En este proyecto, la cámara Pika L RESONON es utilizada con el propósito de adquirir datos hiperspectrales de las cerezas y su árbol.



*Figura 6. Cámara hiperspectral, modelo Pika L RESONON. Figura extraída del sitio web de RESONON.*

Para la calibración de la cámara hiperspectral se han considerado las especificaciones técnicas de la cámara Pika L RESONON, que incluyen parámetros como: cantidad de canales (281), rango de longitud de onda (387–1025 nm), distancia focal (23 mm), campo de visión (FOV) de 13,1 grados y el campo de visión instantáneo (iFOV) de 0,52 mrad.

Con el propósito de establecer el protocolo de captura, es necesario llevar a cabo una serie de análisis de sensibilidad de la cámara, además de realizar calibraciones mecánicas y de cámara con el software *SpectrononPro*, estas calibraciones se pueden observar en la sección de resultados del presente informe.

## ***ii) Calibraciones mecánicas de la cámara hiperspectral***

Considerando los parámetros de especificaciones de la cámara mencionados anteriormente, se llevaron a cabo pruebas utilizando granos de café (Anexo N°2), tierra y tierra de hoja, el objetivo de usar estos materiales consistía en configurar la distancia de captura, revisar el enfoque y a definir las dimensiones físicas (cantidad de líneas) que se iba a capturar con un tamaño

de objeto similar o inferior al *cutting*. Se realizaron pruebas a distintas distancias cámara–objeto variando entre 18 a 28 cm y a la vez probando distintas resoluciones, las cuales fueron 900x900 píxeles, 900x1200 píxeles y 900x2400 píxeles. La resolución de 900 píxeles de ancho queda establecida de forma predeterminada por el software *SpectrononPro* por lo que solo se puede cambiar el valor de las líneas que captura a lo largo del actuador lineal.

### **iii) Calibraciones de cámara en el software *SpectrononPro***

Las calibraciones de la cámara hiperespectral se hacen con el software *SpectrononPro*, este software con ayuda del “*User Manual for Spectronon Version 3.4.11*” permite ajustar los últimos parámetros antes de usar la cámara Pika L Resonon los cuales son: Lente de Objetivo de Enfoque (*Focusing Objective Lens*), Escaneo con Relación de Aspecto Unity (*Scanning with Unity Aspect Ratio*), Corrección de Oscuridad (*Dark Correction*) y Corrección de Respuesta o Reflectancia (*Response Correction*).

El *Focusing Objective Lens* es un componente que se utiliza para ajustar y enfocar el objetivo con el fin de obtener imágenes claras y nítidas. El proceso de ajuste se inicia haciendo clic en el botón de enfoque (F) en el software *SpectrononPro*, lo que mostrará una imagen en vivo de los fotogramas capturados por la cámara del espectrómetro. Para ajustar el enfoque, primero se desbloquea el ajuste de enfoque de la cámara Pika L RESONON utilizando una llave Allen de 5/64 pulgadas, mientras se realiza este proceso se ajusta el lente de captura como se presenta en la figura 7 hasta enfocar correctamente el lente y luego volver a bloquear el ajuste de enfoque de la cámara con la llave Allen. Para verificar el enfoque correcto, se realiza una prueba de captura de la imagen una hoja de enfoque llamada “*Focusing Sheet*” (Anexo N°3). Para confirmar si la calibración con esta hoja de enfoque es correcta, se ajusta el enfoque hasta que el software muestra líneas horizontales de forma nítida al ojo humano, en caso contrario se verá una serie de líneas borrosas o poco visibles en la imagen en vivo mostrada en el panel de *SpectrononPro*. En la figura 8 se muestra cómo se deben ver las líneas al momento de enfocar correctamente la cámara en vivo, con sus respectivos ejes espectral y espacial.

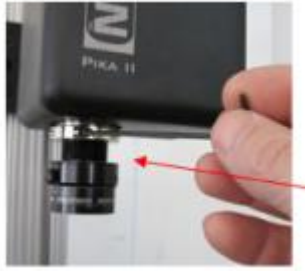


Figura 7. Imagen que muestra cómo se desbloquea el ajuste de enfoque de la cámara. Figura extraída de “User Manual for Spectronon Version 3.4.11”.

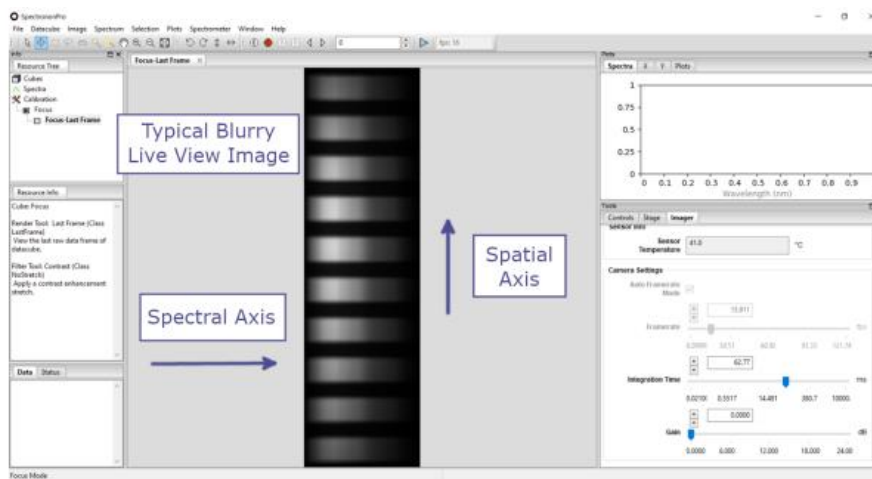


Figura 8: Ejemplo de enfoque de cámara hiperespectral en el software SpectrononPro. Figura extraída de “User Manual for Spectronon Version 3.4.11”.

La calibración del *Scanning with Unity Aspect Ratio* permite obtener imágenes sin distorsiones y con una relación de aspecto 1:1 horizontal y verticalmente.

Para llevar a cabo la calibración de aspecto se utiliza una hoja llamada “*Aspect Ratio Calibration Sheet*” (Anexo N°4). En esta calibración se busca que la cámara capture de forma perfecta las circunferencias presentes en la hoja de calibración de relación de aspecto, para esto se prueba con los parámetros del controlador de movimiento horizontal de la cámara (motor del actuador lineal) que son FPS (fotogramas por segundo), líneas y distancia.

La cámara realiza el escaneo siguiendo la dirección indicada por la hoja, si la circunferencia queda estirada horizontalmente, se debe incrementar la velocidad de movimiento o disminuir los FPS, por el contrario, si la circunferencia se queda estirada verticalmente, se debe disminuir la velocidad de movimiento o incrementar los FPS hasta conseguir el radio 1:1. Una vez terminada la *Dark*

*Correction* se puede generar una representación RGB del hipercubo creado durante el proceso.

La *Dark Correction* consiste en eliminar la oscuridad promedio de la cámara Pika L RESONON, en este proceso se selecciona el botón *Dark Correction* (D) en la barra de herramientas de *SpectrononPro*, mientras la cámara se encuentra con su respectiva tapa del lente. Una vez se acepta la corrección, el software recopilará múltiples fotogramas oscuros y utilizará esas mediciones para restar la oscuridad promedio de las capturas. Una vez la *Dark Correction* se haya completado, se desbloquea el lente de la cámara.

La *Response Correction* se encarga de corregir y ajustar la respuesta de la cámara hiperspectral respecto a las reflectancias o efecto de iluminación espacialmente no uniformes. Para iniciar este proceso hay que seleccionar el botón de *Response Correction* (R) en la barra de herramientas del software, luego se indica que hay que colocar un material de referencia dentro del campo de visión de la cámara hiperspectral. Los materiales utilizados en la industria hiperspectral para realizar esta calibración son el *Spectralon®*, el *Fluorilon®* y láminas de teflón blanco. El material utilizado en este estudio corresponde a Teflón blanco, en formato de láminas y de mica de 1mm de espesor. Una vez terminada la corrección de reflectancia se puede generar una representación RGB del hipercubo creado durante el proceso.

La cantidad de luz o luminosidad se mide utilizando un sensor externo a la cámara hiperspectral llamado luxómetro, que proporciona información acerca de la intensidad de luz presente en la región que se quiere capturar imágenes. Esta medición se expresa en lux, la unidad de medida de la iluminancia. Para esto se realizan una serie de pruebas que se testean distintas condiciones de luz, las cuales son:

- Pruebas con luz natural: en condiciones de laboratorio sin luz artificial y con luz solar.
- Pruebas con luces artificiales: en condiciones de laboratorio con luz LED y luz halógena.

En las pruebas de calibración de *Response Correction* que se realizan sin luz artificial en laboratorio se usan niveles de luz que varían entre 88 y 100 lux. En las pruebas de calibración con luz solar se usan niveles de luz que van desde los 1.100 lux (a la sombra) hasta 100.000 lux (directo al sol del mediodía) para conseguir estos valores de luminosidad se realizan calibraciones cada media hora aproximadamente durante las 09:00 am y las 16:00 pm, esto con el fin de tener

variados niveles de luz y ver como se comportaba la reflectancia con cada uno.

En las pruebas de calibración con luz LED se usa un tubo de luz led de 30W, este tubo se ubica en el actuador lineal a una distancia de 24 centímetros sobre la zona de captura, los niveles de luz varían entre 5.000 a 6.000 lux. Por último, en las pruebas de calibración con luz halógena, se usa un foco de 150W, colgado en el actuador lineal a una distancia de 15 centímetros respecto a la zona de captura, los niveles de luz varían entre 4.500 y 5.500 lux

#### iv) *Segmentación en el software SpectrononPro*

Para realizar una segmentación en el software *SpectrononPro* se utiliza la herramienta *K-Means Clustering*, esta es una herramienta de agrupamiento de clasificación no supervisada, su función es agrupar los clústeres o clases según su similitud espectral.

Los parámetros utilizados en esta segmentación corresponden a las clases y a las iteraciones, las cuales pueden ser modificada por el usuario para lograr una mejor segmentación. Para probar la segmentación en una imagen con granos de café y tierra de hoja se utiliza 5 clases y 3 iteraciones como máximo. Se eligen 5 tipos de clústeres para definir las siguientes clases: granos de café, tierra de hoja, manchas de tierra de hoja, el papel usado de fondo. Se agrega un número de clase más ya que es lo recomendado por el software *SpectrononPro*.

Mientras que para realizar la segmentación de datos hiperespectrales en las muestras de tipo *cutting* se procesa la muestra P100040496X con los parámetros de 6 clases, que corresponden a pirita, calcopirita, rocas oxidadas, rocas no oxidadas y el fondo, además del número de clase extra recomendado por el software *SpectrononPro*, con un máximo de 10 iteraciones para una mayor precisión (figura 9).

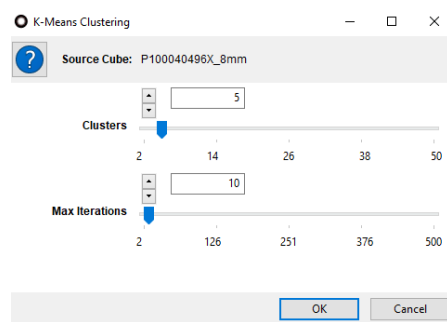


Figura 9. Parámetros de segmentación utilizados para la muestra P100040496X. Imagen capturada con el software *SpectrononPro*.

v) ***Recopilación de datos hiperespectrales de la biblioteca del Servicio Geológico de Estados Unidos***

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) alberga una extensa biblioteca de datos hiperespectrales de minerales adquiridos en condiciones controladas de laboratorio, que corresponden a factores como iluminación, tamaño de píxel ajustado, distancia cámara–muestra, entre otros parámetros. Es importante destacar que un mismo mineral puede manifestar características espectrales distintas en función de su ubicación geológica, lo que acentúa la importancia de esta investigación. Los minerales de interés de este estudio corresponden a minerales de alteración como la anhidrita, calcita, clorita, epidota, magnetita, moscovita, piritita, calcopiritita, cuarzo, feldespatos y tectosilicatos.

Los datos hiperespectrales utilizados corresponden de la versión 7 de la biblioteca espectral del USGS con fecha de publicación el año 2017 (<https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/science/spectral-library>). Esta biblioteca contiene espectros de rocas, suelos y mezclas naturales de minerales medidos con espectrómetros de laboratorio y de campo. Las longitudes de onda cubiertas en esta versión van desde el ultravioleta (UV) al infrarrojo lejano (FIR), es decir desde 200 a 200.000 nanómetros (0,2 a 200 micras). La publicación “*USGS Spectral Library Versión 7*” describe los instrumentos utilizados, descripciones de metadatos de espectros y muestras, y posibles artefactos en las mediciones espectrales (Kokaly et al., 2017). Los cuatro tipos de espectrómetros utilizados para medir los espectros en la biblioteca son:

- *Beckman™ 5270* que cubre el rango espectral de 200 a 3.000 nm
- Modelos estándar de alta resolución y de alta resolución de próxima generación de espectrómetros portátiles de campo ASD que cubren el rango de 350 a 2.500 nm.
- Espectrómetros de interferómetro de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) Nicolet™ que cubren el rango entre 1.120 a 216.000 nm.
- Espectrómetro aéreo de imágenes visibles/infrarrojas AVIRIS de la NASA que cubre el rango de 370 a 2.500 nm.

Los datos hiperespectrales seleccionados para esta recopilación de datos fueron los adquiridos a través del espectrómetro *Beckman™ 5270*, ya que se trata de un instrumento de

laboratorio, similar a las condiciones de trabajo para esta investigación y abarca un rango de la longitud de onda que coincide con el espectro contemplado por la cámara hiperspectral empleada en el presente trabajo. Los espectros se proporcionan en archivos de formato de texto ASCII, los canales eliminados (bandas defectuosas) se indican con un valor de  $-1,23 \times 10^3$ . *Beckman*<sup>TM</sup> 5270 utiliza datos con 480 canales y longitudes de onda con un valor mínimo de 0,205 micras (205 nm) y un valor máximo de 2,976 micras (2.976 nm).

**vi) Prueba de protocolo de calibración en muestras de tipo cutting de El Teniente**

Para demostrar la funcionalidad del protocolo de calibración, se captura una serie de imágenes hiperspectrales en muestras de tipo *cutting* con la finalidad de ver los espectros de los minerales. Estos espectros son comparados con la caracterización mineralógica de las muestras para obtener una firma espectral y finalmente esta firma espectral es comparada con los espectros obtenidos de la biblioteca espectral del USGS. La comparación de espectros se hace con el objetivo de corroborar de que realmente se está adquiriendo la información hiperspectral de ese mineral y no de cualquier otro espectro.

Se captura un total de 12 imágenes hiperspectrales de 12 muestras distintas, todas perteneciente a mina Rajo Sur de El Teniente y sus diferentes zonas las cuales son Zona Norte, Zona Sur y Zona Fondo Mina. La litología de estas son CMET y Tonalita, estas muestras se dividen según el tamaño de grano, las cuales se muestran agrupadas en la figura 10.

| Cantidad de Muestras | Muestras                                                                        | Granulometría                    |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 5                    | P100037320X, P100038743X, P100039077X,<br>P100040496X, P100041790X              | $X \geq 8\text{mm}$              |
| 6                    | P100037320X, P100037331X, P100039228X,<br>P100040508X, P100040845X, P100041790X | $4\text{mm} \leq x < 8\text{mm}$ |
| 1                    | P100039077X                                                                     | Menor a 0,25 mm                  |

*Figura 10. Tabla de clasificación de muestras según su granulometría. Figura de elaboración propia.*

De estas 12 muestras, 11 fueron seleccionadas según su porcentaje de sulfuros y observaciones realizadas con lupa binocular estereoscópica (modelo NIKON). Mientras que la muestra restante corresponde a finos.

Se descarta usar los espectros obtenidos en el software SpectrononPro para la visualización de espectros ya que tiene valores de reflectancia máximos superiores a 1.000 y por lo tanto se

genera más fluctuaciones o ruido en los espectros. Entonces para la representación RGB de estas imágenes hiperespectrales capturadas se utiliza la interfaz de Felipe Gómez (memorista UOH) que consiste en un Visualizador Hiperespectral y así realizar un análisis de cada píxel de la imagen hiperespectral para determinar los espectros de los minerales de interés. Esto se hace con el fin de establecer valores de reflectancia más cercanos a los del USGS y así comparar con los datos obtenidos de su biblioteca espectral.

## Resultados

### *i) Calibraciones mecánicas de la cámara hiperespectral*

Para comenzar se selecciona una posición específica para la cámara sobre la muestra, ubicándola a una altura de 18 centímetros con respecto al objeto para capturar, como se muestra en la figura 11. Esta altura se define ya que a esa distancia se ven de manera nítida, en términos visuales, los granos de café en cada píxel que logra capturar la cámara hiperespectral. Por lo tanto, considerando el tamaño de muestra que se busca fotografiar la altura ideal es de 18 centímetros. Además, se define una resolución de imagen de 900 x 2400 píxeles con el objetivo de capturar la mayor cantidad de datos posibles. Hay que añadir que se mide con una regla las dimensiones físicas de la zona capturada, generando un rectángulo de 4,77 x 12,7 centímetros cuadrados.



*Figura 11. Imagen de la posición y distancia de la cámara Pika L RESONON respecto a las muestras. Fotografía tomada por R. González.*

Considerando estos parámetros, se puede calcular el tamaño del píxel de la imagen hiperespectral con la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño de píxel (cm)} = \frac{\text{Dimensión de la imagen física(cm)}}{\text{Resolución de la imagen en píxeles}}$$

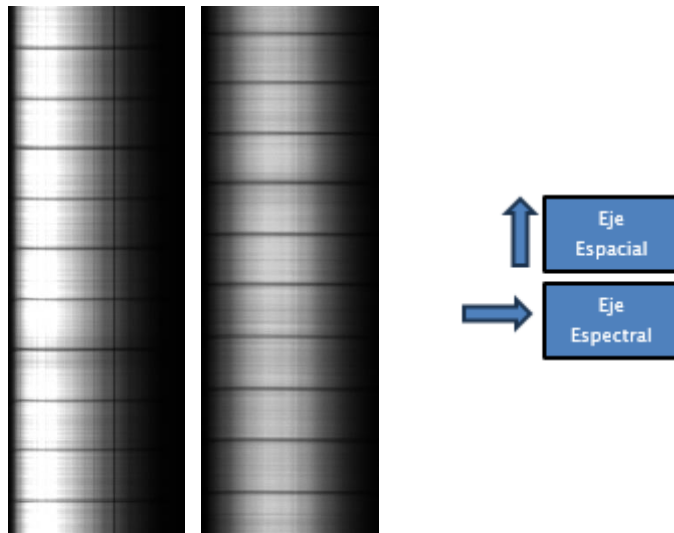
Donde, las dimensiones de la imagen física es 4,77 x 12,72 cm<sup>2</sup> y la resolución de la imagen en píxeles es 900 x 2400 píxeles. Entonces el tamaño de píxel se define como:

$$\text{Tamaño de píxel (cm)} = \frac{4,77 \text{ cm}}{900} \text{ o } \text{Tamaño de píxel (cm)} = \frac{12,72 \text{ cm}}{2400}$$

Lo que equivale a un tamaño de píxel 0,0053 centímetros, y con su conversión a milímetros el tamaño de píxel en cada imagen es de 0,053 milímetros.

## ii) **Calibraciones de cámara en el software SpectrononPro**

Para verificar el enfoque correcto de la cámara se utiliza la hoja de enfoque, está se pone en la posición donde se va a capturar la imagen y se comprueba que esta calibrada cuando las líneas horizontales puedan enfocarse de forma correcta y apreciarse con nitidez, como se ilustra en la figura con sus respectivos ejes espacial y espectral.

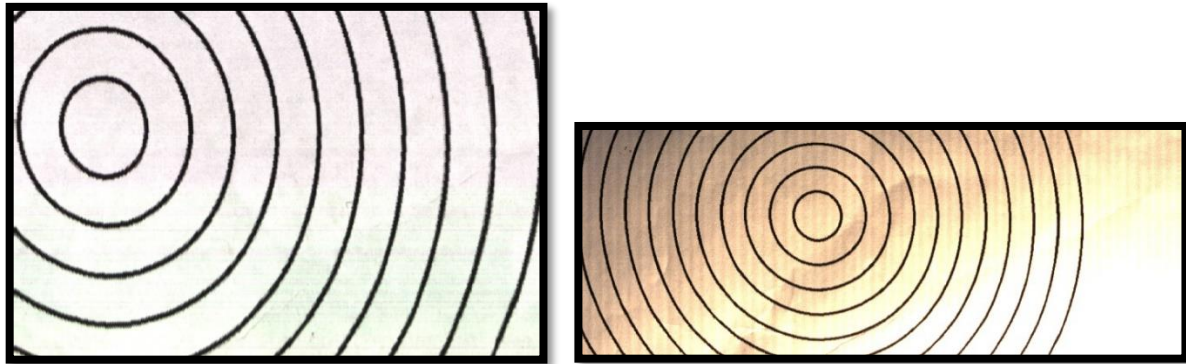


*Figura 12. Resultado de calibración de Focusing Objective Lens, a la izquierda realizada con luz LED a la derecha realizada con luz halógena. Imágenes modificadas, tomadas con el software SpectrononPro.*

Para la calibración de relación de aspecto se realizan distintas capturas con el fin de lograr una circunferencia perfecta, en las primeras pruebas se logra alcanzar una relación de aspecto 1:1 definiendo en el software *SpectrononPro* los parámetros: 60 FPS para capturar las 1200 líneas. Por otro lado, en el programa Arduino, diseñado y encargado de mover la cámara horizontalmente mediante un actuador lineal, se establece una velocidad de 13 FPS, una captura de 261 líneas y una distancia de movimiento de la cámara de 6,5 centímetros. Esto es debido que *SpectrononPro*

utiliza una relación 4,6:1 en comparación con la configuración de Arduino respecto a las líneas, el código de Arduino se puede visualizar en Anexo N°5.

Sin embargo, posteriormente se decide cambiar la resolución a 2400 líneas, por lo que los parámetros de Arduino como líneas y distancia deben duplicarse siendo 522 líneas y 13 centímetros el movimiento de la cámara. La velocidad de captura al momento de capturar las 2400 líneas sigue siendo la misma respecto a usar 1200 líneas (13FPS). En la figura 13, se presentan los resultados de la calibración de relación de aspecto para 1200 y 2400 líneas respectivamente. Los resultados indican que la relación de aspecto se encuentra bien ya que se forman las circunferencias con aspecto 1:1.



*Figura 13. Resultados de calibración de relación de aspecto, a la izquierda un ejemplo de 1200 líneas capturada con luz LED, a la derecha el ejemplo con 2400 líneas capturadas con luz halógena, en esta se puede apreciar un color amarillo ya que se hizo antes de hacer la calibración de reflectancia. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.*

Para representar los resultados de la corrección de oscuridad (Dark Correction) se realiza una representación RGB del hipercubo generado en el software *SpectrononPro*. Esta representación muestra la captura de una imagen 30x900 píxeles, significa que se toman 30 líneas (en el eje espectral) y las repite 900 veces (en el eje espacial) debido a la cantidad de píxeles en ese eje espacial que está definido por defecto en el software *SpectrononPro*.



Figura 14. Representación RGB de la Dark Correction con sus respectivos ejes, en la parte superior Dark Correction realizada con luz solar a 55.0000 lux, y en la parte inferior Dark Correction realizada con luz halógena. Imágenes modificadas, tomadas con el software SpectrononPro.

En los resultados de *Response Correction* se realizan una serie de pruebas que se testean distintas condiciones de luz, como lo son con y sin luz artificial. La representación RGB muestra la captura de una imagen 30x900 píxeles, significa que se toman 30 líneas (en el eje espectral) y las repite 900 veces (en el eje espacial) debido a la cantidad de píxeles en ese eje espacial que está definido por defecto en el software. Las primeras pruebas de calibración de *Response Correction* se realizan sin ningún tipo de luz artificial, en estas el nivel de luz variaba entre 88 y 100 lux (en laboratorio) y entre 1.100 y 100.000 lux (expuesto a la luz solar). En la figura 15 se encuentran algunas de las representaciones RGB de la calibración de reflectancia.

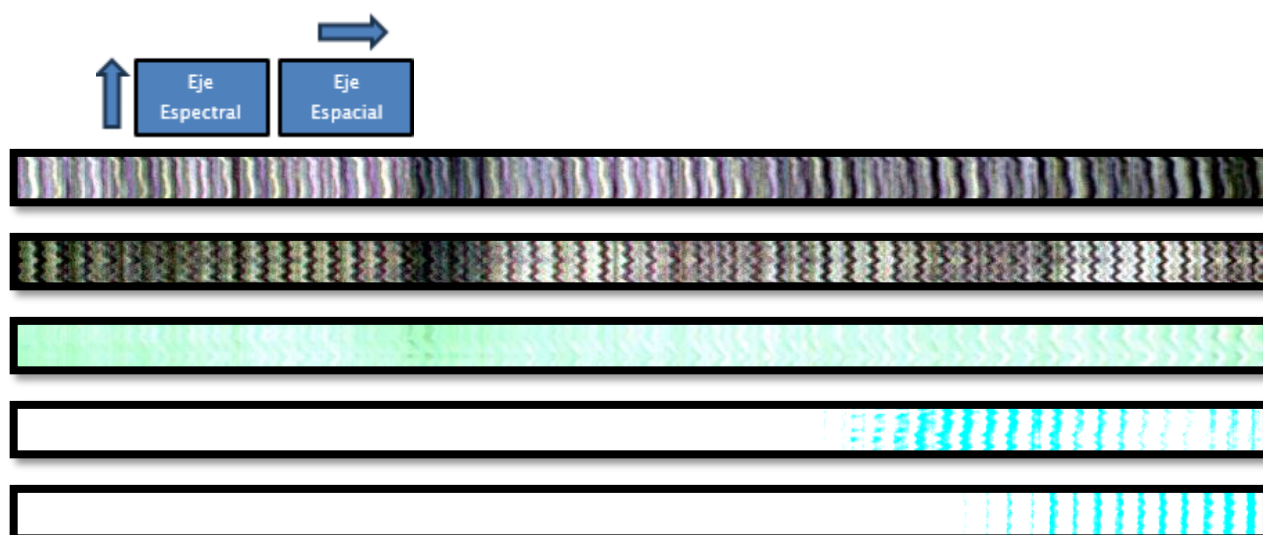
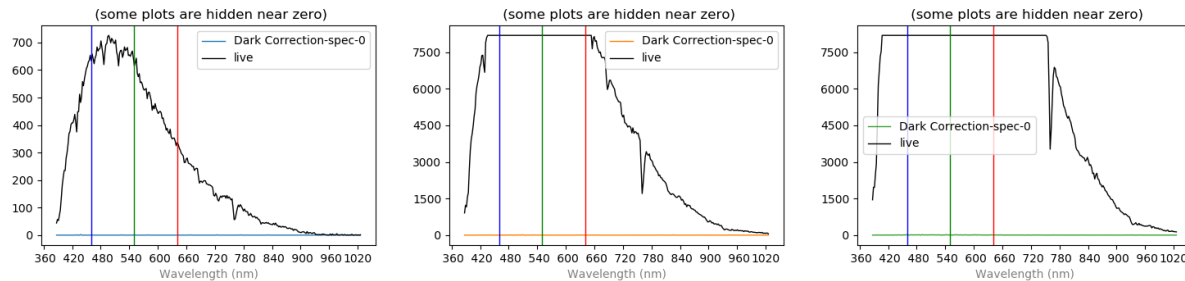


Figura 15. Representación RGB de la calibración de Reflectancia. En orden descendente la calibración a 88 lux, 1.100 lux, 23.500 lux, 43.000 lux y 100.000 lux. Imágenes modificadas, tomadas con el software SpectrononPro.

Los resultados iniciales de la calibración de corrección de reflectancia (88 y 1.100 lux) presenta desafíos significativos, siendo el problema principal la inadecuada calibración de reflectancia. En este contexto es importante señalar que la calibración debería representar la imagen RGB capturada como una barra de color “blanco” y uniforme. Sin embargo, se evidencia una falta de uniformidad de niveles de blanco, en incluso se observa que predominan los niveles de negro. La elección de niveles de luz bajo (88 y 1.100 lux) introduce la posibilidad de errores significativos que comprometen la precisión de la calibración de corrección de respuesta. Por este motivo se descarta la aplicación de la corrección de respuesta en condiciones de iluminación reducida como se muestra en las primeras dos representaciones RGB.

Para abordar este desafío, se decide llevar a cabo la calibración en condiciones de luz naturales, es decir, con luz solar, las ventajas de utilizar este tipo de luz es que proporciona iluminación uniforme además de unos niveles de luz sustancialmente elevados (más de 20.000 lux). Este entorno mejora significativamente la calibración en comparación con la realizada en condiciones de baja iluminación. Sin embargo, esta elección conlleva otros problemas como la dependencia de la posición del sol y la necesidad de un clima despejado para la captura óptima de datos. En Anexos N°6 se encuentran más resultados de representación RGB de las calibraciones de *Response Correction*.

En las últimas tres representaciones RGB se puede apreciar una gran mejora respecto a la obtención del blanco en la imagen RGB con las pruebas realizadas sin luz y a baja luminosidad, también es importante destacar que a los 43.000 lux ya se trata de una calibración correcta, y que no tiene mucha diferencia con la calibración realizada a 100.000 lux, entonces se establece momentáneamente como valor máximo 43.000 lux para conseguir una buena calibración de respuesta del sensor. Este valor de nivel máximo de luz toma más importancia al momento de comparar los espectros de la luz natural y su reflectancia máxima, esto se puede ver en la siguiente figura.



*Figura 16. Recopilación de gráficos de espectros de la luz natural a distintas luminancias. Los niveles de luz corresponden a 1.100 lux, 43.000 lux y 100.000 lux. El espectro llamado “live” corresponde a la corrección de oscuridad, debido a eso no presenta reflectancia. El eje X representa la longitud de onda (nm) y el eje Y la reflectancia. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.*

De la figura 16 se aprecia que el espectro de luz solar tiene la misma forma en todos los gráficos, la variación es principalmente que a los 1.100 lux los valores máximos de reflectancia llegan a 700 (en *SpectrononPro*), mientras que sobre 43.000 lux los valores superan los valores de reflectancia supera el máximo valor que alcanza a graficar el software *SpectrononPro*. Esto significa que en algunos rangos de longitudes de onda se pierde el valor de reflectancia, es decir que el espectro se satura, ya que supera el máximo valor de reflectancia. Este problema destaca de mayor forma en el tercer gráfico, donde se calibra con niveles de luz de 100.000 lux (máximo valor tomado por el sensor de luz), en esa calibración los valores de reflectancia superan el máximo establecido por *SpectrononPro* en casi la totalidad de su espectro.

Este análisis, indica principalmente que se debe bajar el valor máximo de luminancia establecido previamente (43.000 lux) y a la vez utilizar un tipo de luz que se refleje de forma más uniforme que la luz natural, ya que a menor nivel luminancia los gráficos RGB pierden la uniformidad del “blanco”. Debido a estos problemas generados en condiciones de luz solar se decide utilizar luz artificial en condiciones de laboratorio para lograr resultados correctos en la calibración.

Es necesario y obligatorio realizar la calibración de reflectancia en el software *SpectrononPro* ya que este funciona como “tara” y elimina el espectro y el color de la luz utilizada para capturar una imagen hiperespectral (figura 17).

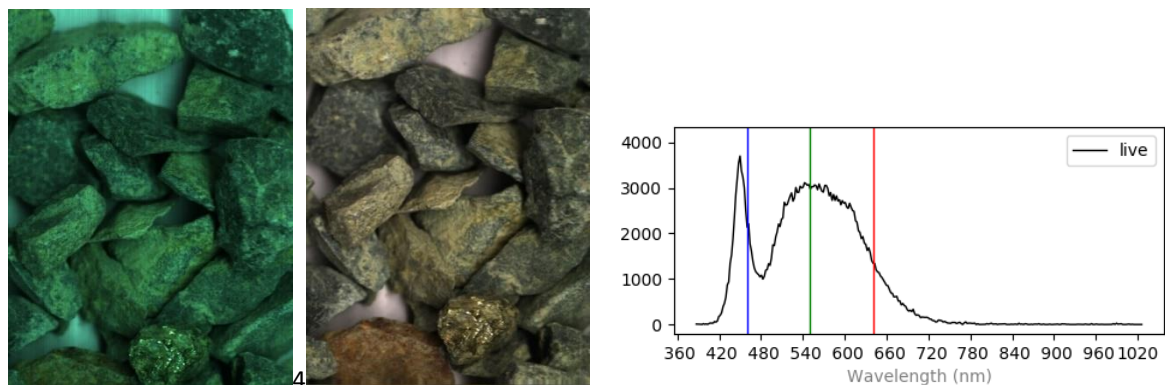


Figura 17. Representación RGB con luz LED (5.550 lux) de la muestra P100040496X antes y después de realizar la Response Correction. A la derecha el espectro de la luz LED. El eje X representa la longitud de onda (nm) y el eje Y la reflectancia. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.

De la figura 17 se observa que el color de la luz LED predomina en toda la imagen de la izquierda, también añadir que el espectro que se ve en la figura se presenta en cada píxel de la imagen hiperespectral, por lo que se hace inviable capturar datos hiperespectrales sin la calibración de corrección de respuesta o reflectancia.



Figura 18. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada a 5.500 lux con láminas de teflón blanco. Imagen modificada, tomada con el software SpectrononPro.

La figura 18 es la representación RGB de la calibración de corrección de respuesta o reflectancia con luz LED, se observa una mejor uniformidad de iluminación, sin embargo, se presenta un patrón de figuras de color verde-calipso intercalado con blancos, esto se debe a una leve rugosidad que presenta el material que se utiliza para realizar la calibración que es el Teflón blanco. El color verde-calipso generado se debe al color de la luz LED, ya que como se menciona anteriormente la calibración de corrección de reflectancia “tara” el blanco y por lo tanto el software utiliza el color presentado en la figura 18 como su nuevo “blanco”. La solución para abordar este problema consiste en reemplazar las láminas de teflón blanco por una superficie completamente lisa como es la mica de teflón blanco, de tal manera que la pequeña rugosidad no afecte al momento de realizar la

calibración. Se presenta la diferencia de “blancos” y rugosidad de la superficie de las láminas de teflón blanco respecto a las micas de teflón blanco (figura 19).



*Figura 19. Imagen RGB de la diferencia entre láminas y micas de teflón blanco. A la izquierda se encuentra la lámina de teflón blanco, se observa una pequeña rugosidad y una gran diferencia en el color (RGB), a la derecha la mica de teflón blanco, con una superficie completamente lisa y uniforme. Imagen tomada con el software SpectrononPro.*

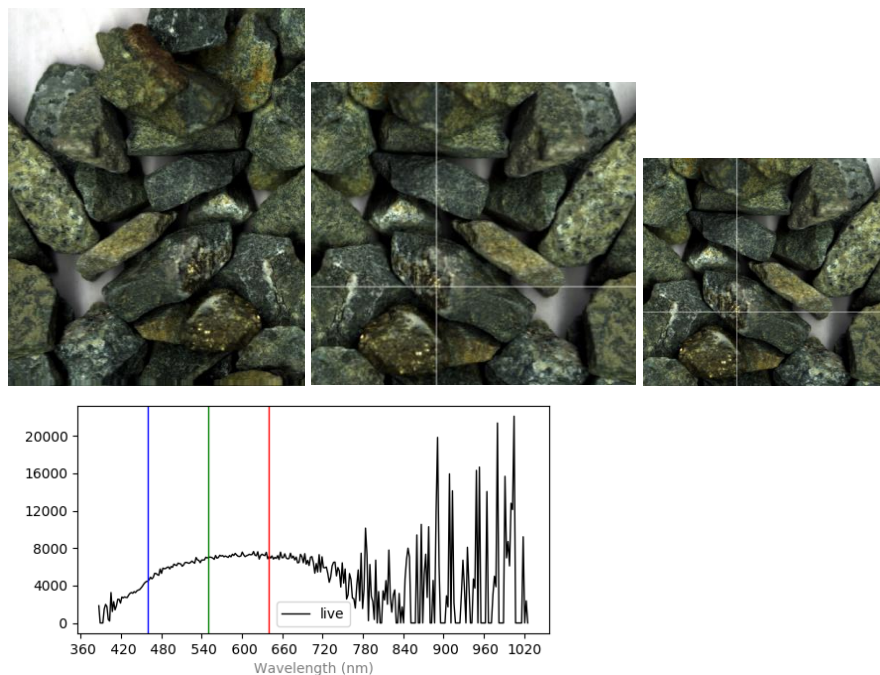
Con la transición al nuevo material de calibración, se observa una mejora notable en la uniformidad de la representación RGB en condiciones de luz LED (ver figura 20). Al mencionar “uniformidad”, se refiere a la consistencia visual y cromática que se logra a lo largo de toda la representación RGB, esta mejora se traduce en la predominancia de un color consistente en toda la representación RGB, cosa que era difícil de lograr con las láminas de teflón blanco debido a su rugosidad.

La utilización del nuevo material no solo elimina los patrones de blanco que se generaban anteriormente (figura 18), si no que también contribuye a una representación visual más homogénea en términos de color. Se decide el cambio de material a micas de teflón blanco para obtener mejores resultados durante el proceso de *Response Correction*.



*Figura 20. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada con luz LED a 5.500 lux con micas de teflón blanco. El color blanco nuevamente es representado como verde-calipso y no como blanco, debido a que la calibración de corrección de respuesta “tara” el nuevo color y lo utiliza como un “blanco”. Imagen modificada, tomada con el software SpectrononPro.*

Una vez terminado este protocolo de calibración con la luz LED, se decide capturar con la cámara Pika L RESONON en la muestra de tipo *cutting* P100040496X. Desde este punto, todas las imágenes son capturadas siguiendo el protocolo de captura de la cámara hiperspectral, es decir, las calibraciones mecánicas y las calibraciones de software.



*Figura 21. Captura RGB de la muestra P100040496X junto con un píxel seleccionado del mineral pirita, con su respectivo espectro. El eje X representa la longitud de onda (nm) y el eje Y la reflectancia. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.*

De la figura 21 se puede apreciar que el espectro en las bandas RGB (420–750 nanómetros) tiene un comportamiento esperado, sin embargo, en el rango ultravioleta (387–450 nanómetros) presenta un leve “ruido” o fluctuaciones, mientras que en el rango infrarrojo (750–1025 nanómetros) el comportamiento del espectro cambia considerablemente su amplitud de reflectancia y por ende las fluctuaciones son más notorias, alcanzando máximos de 20.000 en la reflectancia. Este comportamiento se observa en cada píxel de la imagen y por lo tanto se hace imposible caracterizar la firma espectral de los minerales en estas condiciones de luminosidad.

Se toma la decisión de cambiar el tipo de luz LED a una luz halógena para ver si este comportamiento se debe al tipo de luz. Antes de capturar imágenes hiperspectrales se debe calibrar nuevamente la reflectancia con el nuevo tipo de luz y la representación RGB se muestra en la siguiente figura.



Figura 22. Representación RGB de la calibración Response Correction realizada con luz halógena a 5.000 lux con micas de teflón blanco. Imagen tomada con el software SpectrononPro.

En la figura 22 el “blanco” se observa como naranja, y no como color verde-calipso como sucede con las calibraciones realizadas con luz LED, esto se debe a que el nuevo “blanco” se tara con el color que refleja la luz halógena, que, en este caso, la luz emite un color de tono anaranjado.

Luego de finalizar con el protocolo de calibración con el nuevo material de calibración y la nueva luz artificial, se decide capturar la muestra P100040496X para corroborar si las fluctuaciones se deben al tipo de luz.

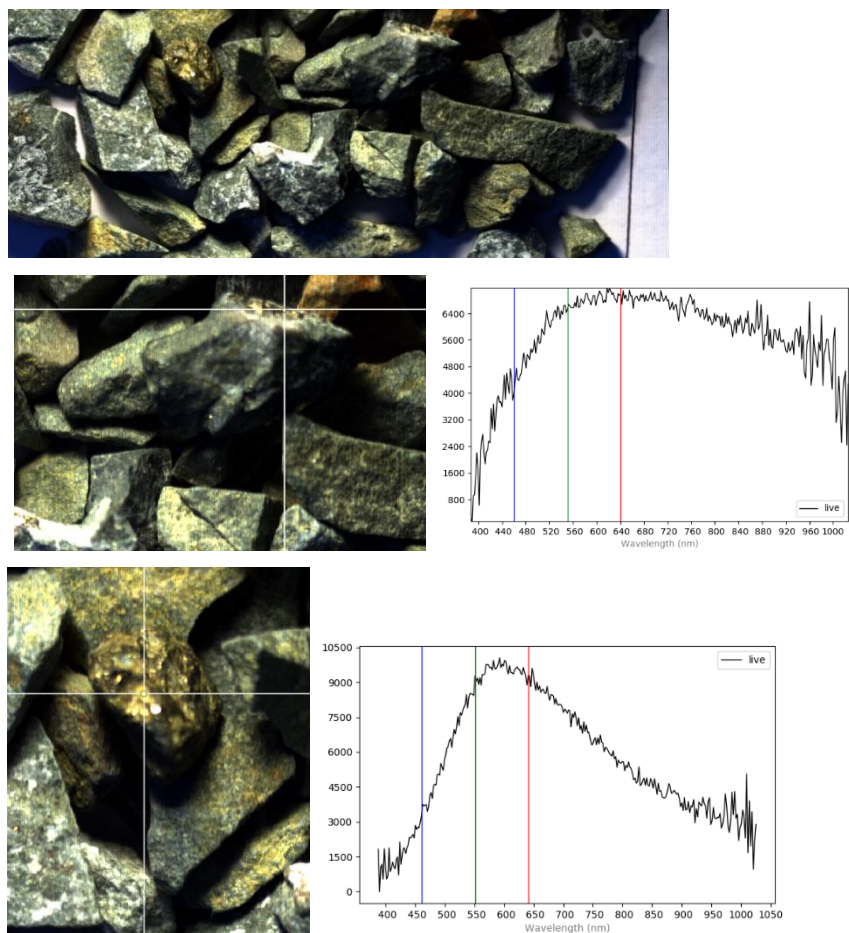


Figura 23. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100040496X, los píxeles seleccionados corresponden a pirita (primer espectro) y calcopirita (segundo espectro). El eje X representa la longitud de onda (nm) y el eje Y la reflectancia. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.

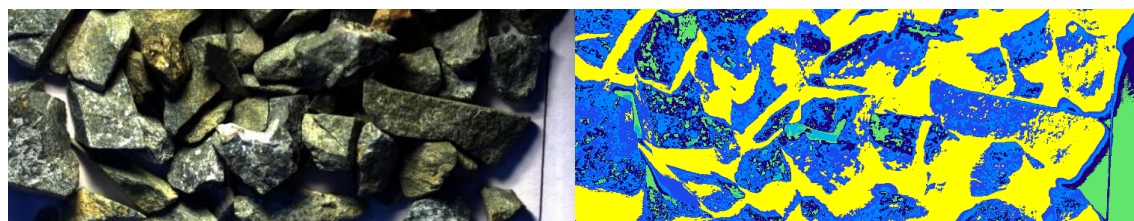
Las fluctuaciones o variaciones que tenían una reflectancia de 20.000 desaparecen, por lo que se puede inferir que ese error se debía al tipo de luz, que era LED. Estas oscilaciones que se dan en el rango NIR (720–1025 nanómetros) se deben a que la luz LED utiliza la energía para emitir luz en lugar de calor, a diferencia de las luces halógenas que son menos eficientes y la mayor parte de la energía se convierte en calor en vez de luz.

Entonces la luz halógena al tener un espectro en el rango NIR que se puede capturar es más útil para esta investigación que la luz LED que genera ruido dentro de este rango y por lo tanto limita más el rango de longitud de onda a trabajar.

Además se obtienen los primeros resultados de espectros de los minerales pirita y calcopirita, en la figura 23 se observa los píxeles seleccionados de cada mineral y de su espectro en el rango VNIR (387–1025 nanómetros) que captura la cámara Pika L. Para comprobar que los espectros son los correctos se necesita identificar y seleccionar píxeles de estos minerales en otras muestras seleccionadas con el fin de conseguir mejores resultados.

### *iii) Segmentación con el software SpectrononPro*

La segmentación realizada con granos de café y tierra de hoja se encuentra en Anexo N°7. El resultado de la segmentación de la muestra P100040496X con los parámetros de 6 clases definidos anteriormente se encuentran a continuación en la figura 24.



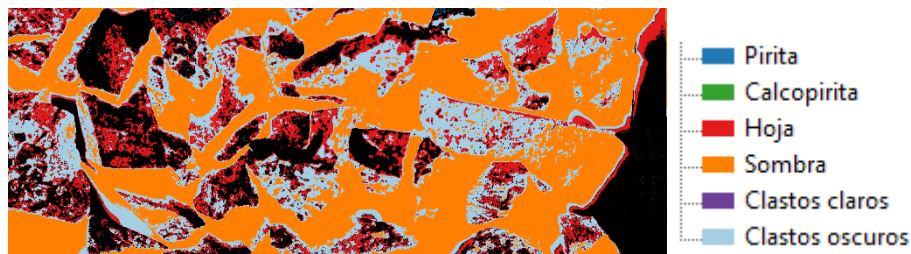
*Figura 24: Resultado segmentación de la muestra P100040496X con 6 clústeres. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.*

Este resultado no es el esperado, el primer problema se debe a la selección de parámetros, ya que se define el número de clases o clústeres al ojo humano, por lo que ya se asume un error de segmentación. Un caso donde se elimina este error de segmentación sería donde el software identifique de manera no asistida las clases presentes en la imagen hiperespectral a segmentar, sin embargo, *SpectrononPro* funciona de manera asistida por lo que siempre existirá este error humano al momento de seleccionar el número de clústeres. Según lo observado en la figura 24, el color

amarillo representa las zonas donde no hay una buena iluminación, el color verde las zonas donde se reflejan tonos blancos, y los 4 distintos tonos de azules representan a los clastos.

El número de iteraciones también puede afectar al momento de realizar la segmentación, el número de iteraciones máxima del software es de 500, y en este caso se trabaja con un máximo de 10 iteraciones, entonces también se puede asumir que la precisión de la segmentación va a mejorar si se usan más iteraciones, o por lo menos más cercanas al máximo, un problema de esto es que el software tarda alrededor de 15 minutos en segmentar una imagen con 10 iteraciones, entonces el tiempo invertido para realizar 400 o 500 iteraciones aumenta considerablemente. Aquí radica otra limitación del software y es la poca optimización que tiene para realizar este tipo de tareas. Las limitaciones mencionadas anteriormente y considerando el ruido de los espectros y la iluminación no uniforme, se puede hacer difícil para el software asignar que espectro pertenece a que clase.

Al momento de segmentar hay que considerar dos factores principales, los espectros que es información de píxel a píxel y la vecindad espacial, esto se refiere a como un píxel se conecta con otro para formar una zona o región con el mismo espectro. Considerando estos factores el problema del software radica principalmente en como reconoce los espectros para formar las vecindades, ya que hay píxeles que se encuentran con sombra o no son lo suficientemente visibles que pueden contener el mismo mineral que otros píxeles más expuestos a la luz y por lo tanto claramente visibles, entonces el software puede reconocer el mismo espectro como dos clases distintas. Una posible solución sería mejor hacer una segmentación semiasistida para conseguir mejores resultados. Una segmentación semiasistida consiste en asignar de forma manual un espectro específico a algún clúster en particular y solucionar el problema de la iluminación no uniforme durante toda la captura de la imagen hiperespectral.

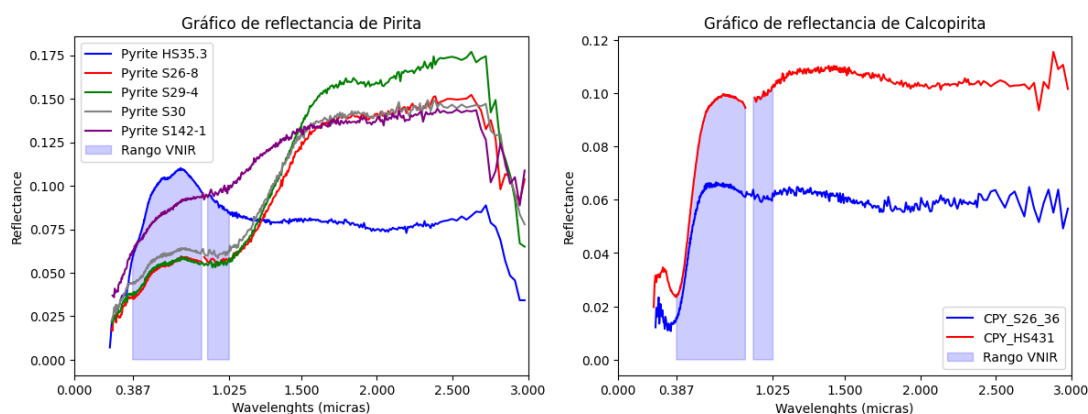


*Figura 25: Representación de una segmentación semiasistida. Imágenes tomadas con el software SpectrononPro.*

La figura 25 muestra una segmentación semiautista con asignación de clases según el espectro de cada píxel. En la imagen predomina el color naranja que representa a la sombra, mientras que se asignó un color negro por parte del software que se trata de unos “espectros no asignados”, es decir que el software reconoce más de 6 clases en la imagen hiperespectral. Si se compara con la imagen de segmentación no asistida se consigue un resultado similar, por lo que es importante considerar estas limitaciones al momento de realizar la segmentación en *SpectrononPro*.

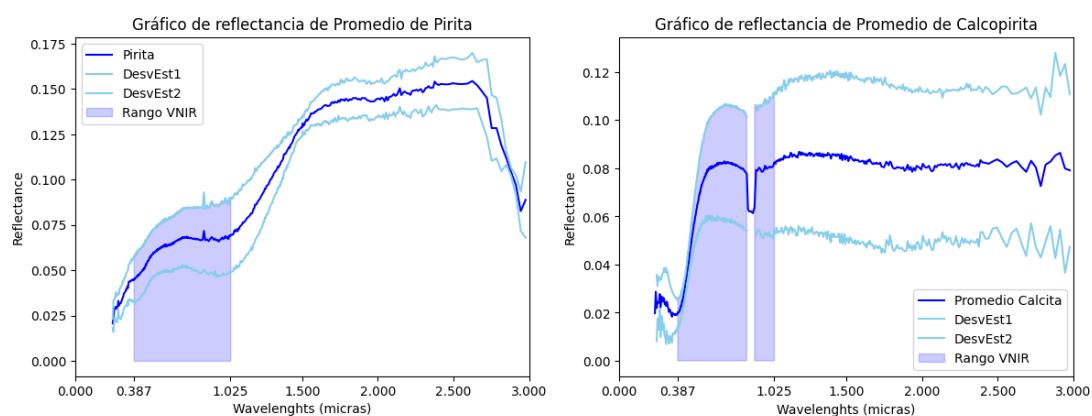
#### iv) **Recopilación de datos hiperespectrales de la biblioteca del Servicio Geológico de Estados Unidos.**

Para representar gráficamente los datos hiperespectrales de la biblioteca del USGS se usan los datos de reflectancia de cada mineral de interés. Cada uno de estos valores de reflectancia se encuentra asociado con una longitud de onda específica (en micras). Posteriormente se procede a generar gráficos individuales para cada mineral, que puede incluir distintas muestras. Los códigos de programación utilizados para la generación de estos gráficos se encuentran en Anexos N°8. En estos gráficos, el eje horizontal (eje X) representa los valores de longitud de onda (en micras) y el eje vertical (eje Y) representa la reflectancia de cada mineral. En la figura 26, se muestran gráficos de espectros de algunos minerales de interés, como lo son la pirita y calcopirita. El resto de los gráficos de minerales que se mencionaron anteriormente (dar página N°25) se encuentran en el anexo N°9.



*Figura 26. Gráficos de espectros de Pirita y Calcopirita, en el rango de 205 a 2976 nanómetros, destacando el rango VNIR. Figura de elaboración propia.*

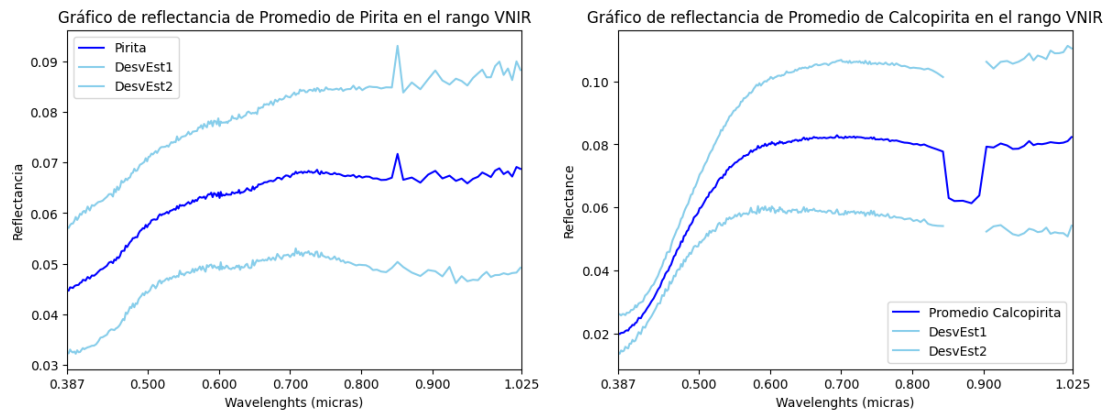
Cada gráfico mineral representa un conjunto de muestras correspondientes a dicho mineral. Los espectros de cada mineral tienen muchas similitudes en su forma, sin embargo, la principal variación entre diferentes muestras de un mismo mineral son los valores de reflectancia. Debido a esto se toma la decisión de no utilizar datos hiperespectrales individuales para cada mineral, si no generar gráficos que representen el promedio de reflectancia para cada mineral de interés. Los gráficos de promedios de reflectancia de los minerales presentados anteriormente se muestran en la figura 27. Mientras que el gráfico de reflectancia promedio de los otros minerales de interés se encuentran en Anexos N°9.



*Figura 27. Gráficos de reflectancia promedio de espectros de Pirita y Calcopirita en el rango de 205 a 2976 nanómetros, destacando el rango VNIR. Figura de elaboración propia.*

La utilización de valores promedio de reflectancia para cada mineral desempeña un rol fundamental en la reducción del ruido y las fluctuaciones de datos individuales, esto se traduce en resultados más confiables.

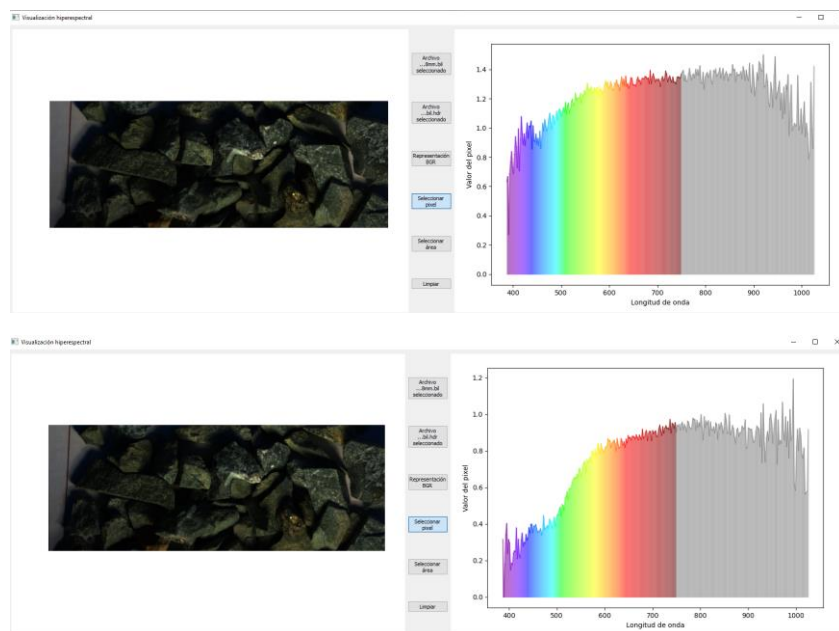
Como la cámara Pika L RESONON captura datos en el rango 387–1025 nm, se ajustan los rangos de los datos adquiridos en la biblioteca espectral del USGS para generar gráficos en el rango VNIR, esto con el objetivo de hacer la comparación de datos hiperespectrales de manera precisa y confiable. Los gráficos en el rango VNIR se muestran en la figura 28. El resto de los gráficos de minerales en el rango VNIR se encuentra en Anexos N°9.



*Figura 28. Gráficos de reflectancia promedio de espectros de Pirita y Calcopirita en el rango VNIR (387 a 1.025 nanómetros). El gap o error en el gráfico de la calcopirita se debe a que cerca de los 870 nanómetros se debe a que la base de datos utilizada generaba un error en ese valor, por lo que se decide eliminar. Figura de elaboración propia.*

#### **v) Prueba de protocolo de calibración en muestras de tipo cutting de El Teniente**

En la figura 29 se selecciona un píxel de la muestra P100040496X que contenga Pirita (imagen superior) y de Calcopirita (imagen inferior) y a la derecha se encuentra su respectivo espectro.



*Figura 29. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100040496X. Figura de elaboración propia, extraída de la interfaz de visualización hiperespectral desarrollada por F. Gómez.*

Los espectros de estos minerales son similares a los espectros obtenidos de la biblioteca espectral del USGS, teniendo en cuenta el ajuste en el eje de la reflectancia (eje Y) ya que los valores de

reflectancia en el software *SpectrononPro* superan los 1.000.

Con el motivo de seguir corroborando que se está observando pirita y calcopirita, se hace una serie de pruebas en las distintas muestras de *cutting*, en la siguiente figura se presenta los espectros de estos minerales de interés en las muestras P100037330X ( $\geq 8$  mm) y P100037331X ( $4\text{mm} \leq x < 8\text{mm}$ ).

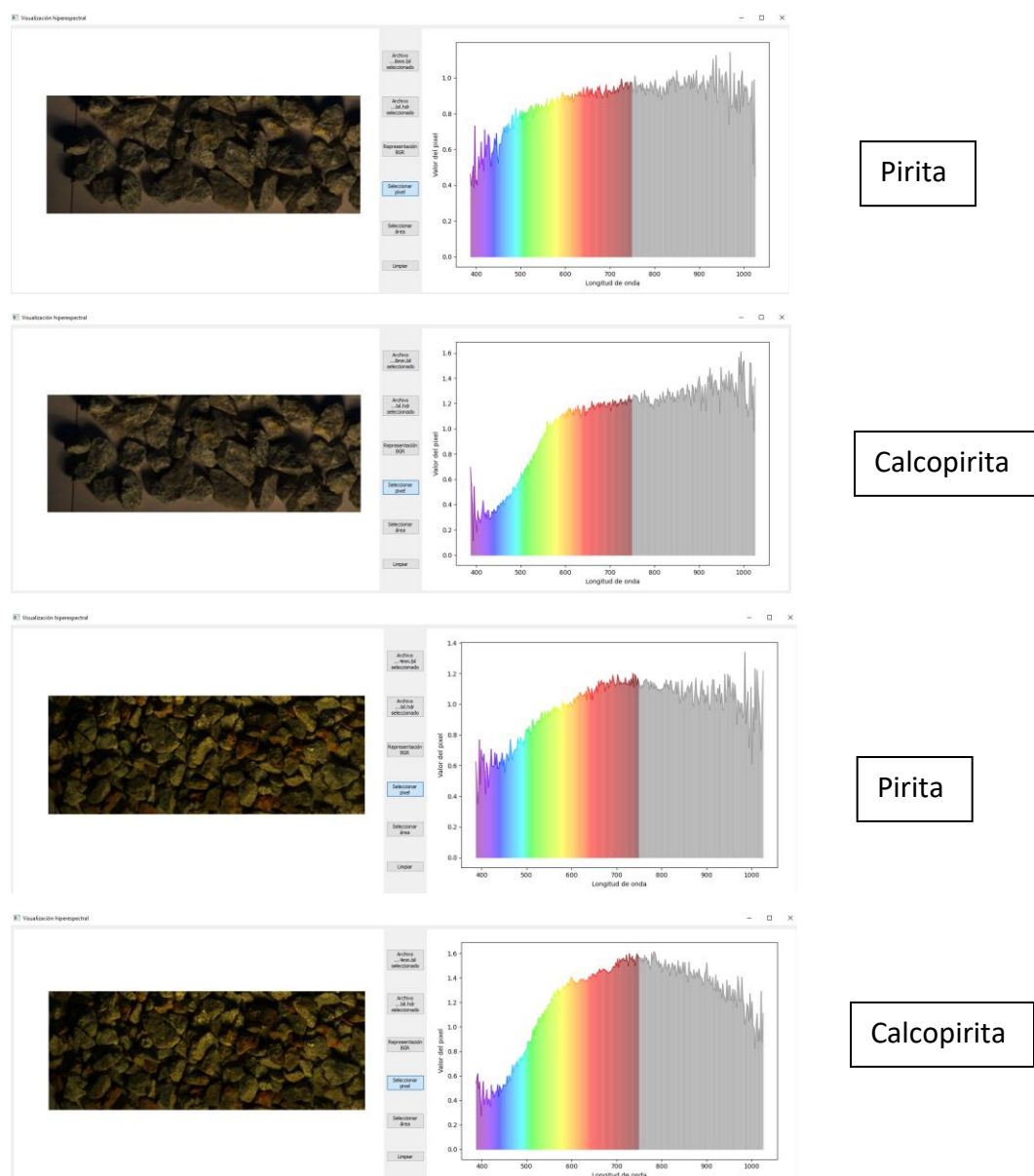


Figura 30. Prueba de protocolo de calibración en muestra P100037330X (primeros dos espectros) y P100037331X (últimos dos espectros). Figura de elaboración propia, extraída de la interfaz de visualización hiperespectral desarrollada por F. Gómez.

El protocolo de calibración entrega resultados correctos en muestras de tipo cutting de

granulometría  $4\text{mm} \leq x < 8\text{mm}$  y muestras  $x \geq 8\text{mm}$ . El espectro de la pirita tiene un aumento constante en la reflectancia a medida aumenta la longitud de onda durante todo el rango VNIR, mientras que la calcopirita presenta un aumento exponencial en la reflectancia al término del rango UV (400 nm) y comienzo del rango RGB, hasta comportarse de manera estable en el rango IR (700 nm).

Los espectros de pirita y calcopirita son similares en sus formas en el rango VNIR, respecto a la información recopilada de la biblioteca espectral del USGS. Por temas de tiempo no se pudo analizar los minerales del resto de las muestras de tipo *cutting* de El Teniente seleccionadas para este trabajo.

## Discusión

El resultado final del este trabajo se refleja en el reconocimiento y por lo tanto caracterización de la firma espectral de los minerales pirita y calcopirita en las muestras de tipo *cutting* de El Teniente (figura 31).

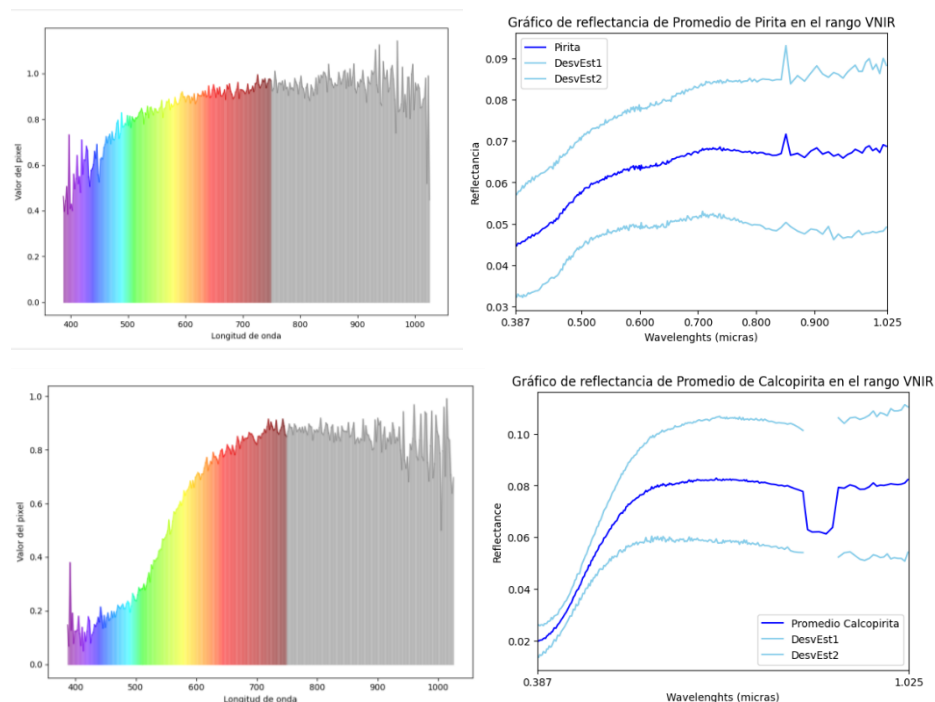


Figura 31. Comparación de espectros obtenidos de pirita (P100037330X) y calcopirita (P100037331X) con los espectros graficados con los datos de la biblioteca espectral del USGS.

Sin embargo, antes de llegar a este resultado existieron muchas dificultades y también quedan desafíos pendientes para seguir implementando la tecnología hiperespectral en la geometalurgia. Las primeras discusiones tienen relación con la cámara hiperespectral usada, que corresponde al modelo Pika L RESONON, ya que esta cubre solo el rango VNIR y con esfuerzo se distinguen los espectros de minerales con esta cámara, esto toma aún más importancia al momento de comparar con la biblioteca espectral del USGS, ya que ellos abarcan rangos hasta los 3.000 nanómetros aproximadamente, por lo que es recomendable cambiar la cámara hiperespectral y utilizar un espectrómetro que capture información de longitudes de onda hasta el rango SWIR.

La necesidad de realizar las calibraciones de corrección de oscuridad (*Dark Correction*) y corrección de reflectancia (*Response Correction*) toma la mayor importancia respecto al tema de la luminosidad, el capturar una imagen hiperespectral sin hacer la calibración de corrección de reflectancia genera ruido o fluctuaciones en cada píxel de la imagen, además de no calibrar el “blanco” correctamente por lo que se vería reflejado el color que emite la luz utilizada en toda la imagen. Los problemas de la *Response Correction* radican en la cantidad y tipo de luz utilizada, en temas de cantidad queda demostrado que, con valores bajos de luminosidad, es decir menos de 1.100 lux la cámara hiperespectral captura una imagen llena de ruido en sus píxeles por lo que es imposible distinguir un espectro, en el caso contrario, a más de 43.000 lux los píxeles de la imagen se saturan y el espectro alcanza valores que superan la reflectancia máxima del software *SpectrononPro*. Esta fue una de las razones por la que se descarta usar la luz natural y se opta por usar luces artificiales, la luz natural alcanzaba *peaks* de reflectancia de hasta 100.000 lux y este valor dependía netamente de la hora del día, es decir, en la mañana los valores de reflectancia eran más bajos que al mediodía. Otra diferencia importante entre la luz natural y la luz artificial es que la luz natural no iluminaba de manera uniforme la zona de captura, un factor muy importante que se debe cumplir al momento de seguir este protocolo de captura.

Respecto a las luces artificiales queda demostrada que la principal diferencia entre las luces LED y luces halógenas es la emisión de calor que tienen estas últimas. Al usar la luz LED existieron problemas de ruido en los rangos UV e IR, esto se debe principalmente a que el espectro de luz LED en esos rangos no absorbe luz (figura 17), entonces al momento de realizar la calibración de reflectancia toma este espectro con reflectancia 0 en esas longitudes de onda, lo que genera un

gran ruido del espectro en esos canales. Otra limitación generada en la calibración de corrección de reflectancia corresponde al material utilizado para calibrar, si bien las micas de teflón cumplen bien la función, tiende a generar un poco de ruido en los espectros, debido a esto el manual de usuario de RESONON recomienda usar materiales como el *Spectralon®* y el *Fluorilon®* con precios en el mercado desde los 400 USD. Usar los materiales recomendados por el manual de usuario de RESONON es importante, ya que, al realizar calibración de oscuros, siempre se consiguen resultados correctos y por lo tanto la eliminación de oscuridad, estos buenos resultados se deben con propia tapa de la cámara Pika L RESONON, el material recomendado para esta calibración.

La comparación de los espectros capturados con la cámara Pika L y los espectros obtenidos de la figura (figura 31) resulta muy buena con el fin de corroborar que la cámara esta reconociendo pirita como pirita y calcopirita como calcopirita, un objetivo cercano debe ser utilizar este mismo protocolo de captura para comparar y posteriormente caracterizar el resto de los minerales mencionados durante el informe de investigación.

Por último, en temas de segmentación, el software *SpectrononPro* presenta algunas dificultades al momento de segmentar, estos errores se deben principalmente a la luminosidad no uniforme y el leve ruido que puede existir en los espectros y es por esto por lo que los píxeles no pueden formar vecindades ya que no se reconocen y no pueden formar regiones, este tipo de segmentación *K-Means Clustering* ayuda, pero es solo un primer paso en la segmentación de imágenes de muestras de tipo cutting.

Para mejorar este proceso de segmentación es importante considerar los grandes factores gobernantes que son: los espectros, que entregan información píxel a píxel y la vecindad espacial que se refiere a cómo un píxel se conecta con otro para formar una región. Entonces el primer paso sería seleccionar y asignar estos espectros de forma semiasistida a una clase. El segundo paso sería solucionar el problema de que los píxeles vecinos no se reconocen y por lo tanto no forman una región, este problema se puede solucionar mejorando la visibilidad (en temas de luminosidad) y también entrenando algoritmos nuevos que puedan aprender a juntar estos píxeles con el mismo espectro.

## Conclusión

En este trabajo de título se ha presentado una serie de desafíos para conseguir la generación de un protocolo de calibración de la cámara hiperespectral para su uso en muestras de geometalurgia. La aplicación de este protocolo de calibración garantizaría la minimización de errores en la captura de datos, por lo que se puede asegurar la caracterización de minerales según su firma hiperespectral.

Este protocolo se divide en dos etapas principales, las calibraciones mecánicas de la cámara hiperespectral Pika L RESONON y las calibraciones de cámara en el software *SpectrononPro*. Hay que destacar que este protocolo se realiza teniendo en cuenta las especificaciones de la cámara hiperespectral usada y el tamaño de muestra a capturar.

El seguimiento correcto del protocolo paso a paso sería comenzar con las calibraciones mecánicas de la cámara hiperespectral. Las calibraciones mecánicas permiten ajustar la cámara para trabajar a distintas escalas, en este caso se ajustaron para trabajar en muestras de tipo *cutting*, pero también podrían ajustarse para trabajar a nivel de testigos de perforación o incluso hasta a nivel de depósitos de minerales. El primer paso sería posicionar la cámara a una altura de 18 centímetros sobre la muestra a capturar, para luego delimitar las dimensiones físicas de la zona a capturar, estas dimensiones están dadas por la resolución de la imagen que se busca capturar, en el caso de esta investigación, al ser una imagen de 900 x 2400 píxeles, las dimensiones físicas de la zona fue de 4,77 x 12,7 centímetros cuadrados.

El siguiente paso sería comenzar con las calibraciones de la cámara hiperespectral en el software *SpectrononPro*. Las calibraciones de cámara en el software, realizadas con ayuda del manual de Resonon, permiten reducir el nivel de ruido de los espectros. Se comienza por verificar el enfoque correcto de la cámara con ayuda de la calibración de *Focusing Objective Lens*, posteriormente se realiza la calibración de relación de aspecto (*Scanning with Unity Aspect Ratio*). Para estas dos primeras calibraciones de cámara en el software, es necesario utilizar las hojas de calibración respectivas entregadas por el manual de Resonon.

Siguiendo con las calibraciones en el software *SpectrononPro*, se realizan las calibraciones de luminosidad, la primera es la calibración de corrección de oscuridad (*Dark Correction*) con la tapa de la cámara Pika L y para finalizar estas series de calibraciones se realiza la calibración de

reflectancia o respuesta (*Response Correction*) para eliminar el espectro de luz que se usa para iluminar las muestras de cutting con ayuda del material de calibración. Por lo que se hace necesario escoger correctamente el tipo de iluminación para conseguir buenos resultados. La luz utilizada en este trabajo luego de muchas pruebas fue la luz halógena ya que no presenta mayores problemas de luminosidad y su espectro no genera problemas de reflectancia en las longitudes de onda del rango VNIR.

Una vez terminadas todas estas calibraciones, la cámara hiperespectral está lista para ser usada para capturar imágenes de muestras de tipo *cutting*. Se presenta un esquema resumen del protocolo de captura de imágenes hiperespectrales en la figura 32.

El resultado del trabajo y uso del protocolo de captura de imágenes hiperespectrales permitió reconocer los espectros de dos minerales relevantes en la mina Rajo Sur: pirita y calcopirita.



Figura 32: Esquema explicativo del protocolo de captura de imágenes hiperespectrales en muestras de tipo cutting. Figura de elaboración propia.

## Referencias

- BCN Vision. (2021). Cámaras Hiperespectrales. Recuperado de <https://www.bcnvision.es/blog-vision-artificial/camaras-hiperespectrales/>
- Campos, M. (2020). Análisis de imágenes hiperespectrales geológicas mediante herramientas de aprendizaje de máquinas.
- Camus, F. (1975). Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wallrock alteration. *Economic Geology*, 70, 1341–1372.
- Camus, F. (2003). Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 267.
- Creasey, S. (1966). Hydrothermal alteration. *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*, 51–74.
- Egaña, Á. F., Santibáñez-Leal, F. A., Vidal, C., Díaz, G., Liberman, S., & Ehrenfeld, A. (2020). A Robust Stochastic Approach to Mineral Hyperspectral Analysis for Geometallurgy. *Minerals*, 10(12), 1139. <https://doi.org/10.3390/min10121139>
- Giggenbach, F. (1997). The origin and evolution of fluids in magmatic–hydrothermal systems. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3, 737–796.
- Gilluly, J. (1946). The Ajo mining district. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 209, 112.
- Graton, L. C., & Bowditch, S. I. (1936). Alkaline and acid solutions in hypogene zoning at Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology*, 31, 651–698.
- Hanna Castro, V. (2017). Evaluación de tecnologías hiperespectrales en la caracterización mineral de yacimientos para aplicaciones geometalúrgicas: Caso aplicado a Mina Florida, Distrito Minero Alhué, Región Metropolitana, Chile.
- Howell, F. H., & Molloy, J. S. (1960). Geology of the Braden orebody, Chile, South America. *Economic Geology*, 55, 863–905.
- Kokaly, R., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Wise, R. A., Benzel, W. M., Lowers, H. A., Driscoll, R. L., & Klein, A. J. (2017). USGS Spectral Library Version 7 Data [dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/F7RR1WDJ>
- Lindgren, W., & Bastin, E. S. (1922). The Geology of the Braden mine, Rancagua, Chile. *Economic Geology*, 17, 75–99.
- Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration–mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65 (4), 373–408. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>

- Maksaev, V. (2004). Depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., & Ruiz, J. (2004). New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U–Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Re–Os, and Fission–Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu–Mo Deposit.
- Meyer, C., & Hemley, J. J. (1967). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: Vol. Wall rock alteration* (Primera Edición). Holt, Rinehart, and Winston Inc. Publication.
- Park, C. F. jr. (1955). Zonal theory of ore deposits. *Economic Geology*, 44, 465–484.
- Plaza, A., Benediktsson, J. A., Boardman, J. W., Brazile, J., Bruzzone, L., Camps–Valls, G., Chanussot, J., Fauvel, M., Gamba, P., Gualtieri, A., Marconcini, M., Tilton, J. C., & Trianni, G. (2009). Recent advances in techniques for hyperspectral image processing. *Remote Sensing of Environment*, 113, S110–S122. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.028>
- Prado, E. M., De Souza Filho, C. R., & Muico Carranza, E. J. (2023). Ore–Grade Estimation from Hyperspectral Data Using Convolutional Neural Networks: A Case Study at the Olympic Dam Iron Oxide Copper–Gold Deposit, Australia. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5023>
- Rojas Churkovic, I. (2014). *Reología y fábrica de la mineralización primaria, yacimiento El Teniente*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131477>
- Roman–González, A., & Vargas–Cuentas, N. I. (2013). Análisis de imágenes hiperespectrales. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, 9(35), 14–17.
- Sales, R. H., & Meyer, C. (1948). Wall rock alteration, Butte, Montana. *American Institute of Mining Engineers, Transactions*, 178, 9–35.

## Anexos

### Anexo N°1

#### Pórfidos Cupríferos

Los pórfidos cupríferos son depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje, es decir que presentan una baja concentración de cobre en relación con su gran volumen de mineralización. Se denominan “pórfidos” porque frecuentemente se asocian con rocas ígneas intrusivas, las cuales presentan cristales de feldespatos en una matriz cristalina de grano fino. Esta textura porfírica indica que los magmas intruyeron y cristalizaron cerca de la superficie lo que los clasifica como intrusiones epizonales, aunque ocasionalmente exhiben granulometría moderadamente gruesa (Maksaev, 2004).

Los pórfidos cupríferos abarcan una diversidad depósitos minerales que comparten características comunes, lo que ha permitido formular generalizaciones y desarrollar modelos empíricos (Lowell & Guilbert, 1970). Los pórfidos de Cu (Mo, Au) se forman en torno a intrusivos porfídicos con diámetros desde 100 metros hasta unos cuantos kilómetros, los cuales son ramificaciones sobre cúpulas de plutones félsicos a intermedios más profundos (Sillitoe, 1997) Dentro de los sistemas de pórfido Cu existen varias fases de intrusión y las más tempranas tienden a poseer las leyes más altas. Los depósitos de pórfido cuprífero se encuentran alojados principalmente en rocas cajas, aunque el modelo de Lowell y Guilbert (1970) se base en un 70% de mineralización intrusa.

Los primeros estudios detallados de alteración y mineralización en rocas de pórfidos cupríferos se realizaron en Cerro Pasco, Perú (Graton & Bowditch, 1936) y en Butte, Montana (Sales & Meyer, 1948). Gilluly (1946) y Schwartz (1947) identificaron asociaciones de biotita, cuarzo–ortoclasa, cuarzo–sericita–pirita y sericita–minerales de arcilla. Schwartz reconoció que cerca de menas en sistemas porfídicos se presentaba localmente alteración argílica avanzada, pero no estaba directamente asociada con las menas. Posteriormente con estudios de Park (1955) que indicaba que Butte se transformó en un ejemplo clásico de zonación de alteraciones hidrotermales en depósitos minerales, Meyer y Hemley (1967) identificaban secuencias de alteraciones al aumentar la distancia de vetas. Creasey (1966) llevó a cabo uno de los primeros

intentos para establecer los tipos de alteración presentes en pórfidos. El propuso el uso de los términos generales de alteración propilítica, argílica y potásica para denominar asociaciones minerales específicas de alteración típicas de pórfidos cupríferos.

Estos estudios permitieron que Sillitoe (2010) señale que la alteración y mineralización en los depósitos de Cu porfídico se zonifican hacia arriba desde una zona estéril sódico-cálcica, pasando por una zona potásica con potencial de mineralización, luego una zona de clorita-sericita (sericítica) hasta llegar a una zona argílica avanzada. Sillitoe también indica que los sistemas de pórfidos cupríferos se inician mediante la inyección de magma saturado con fluidos ricos en azufre y metales desde las cúpulas en la parte superior de los plutones subyacente, además de que la secuencia de eventos de alteración-mineralización es progresiva y va de la mano con el enfriamiento de la roca y los fluidos.

El agrupamiento de asociaciones minerales es útil desde una perspectiva genética y permite la comparación entre depósitos, particularmente para desarrollar una imagen de la zonación de alteración. Estas asociaciones son una simplificación de la diversidad de tipos de alteraciones hidrotermales que los pórfidos pueden presentar. Por lo cual se agrupan en los siguientes grandes grupos de alteración.

La alteración potásica (o K-silicatada) se encuentra en el núcleo del sistema porfídico, los minerales asociados a esta alteración corresponden a biotita, ortoclasa y cuarzo. La alteración fílica (o sericítica) envuelve al núcleo potásico y se compone de minerales como cuarzo, sericita y pirita (hasta 20% del volumen). La alteración argílica se encuentra externa a la sericítica y presenta minerales de arcilla, montmorillonita, clorita y pirita. La alteración propilítica halo de alteración más externo, normalmente se encuentra fuera del cuerpo de mena económica y los minerales presentes son clorita, epidota, albita y calcita (Maksaev, 2004).

El modelo clásico de Lowell y Gilbert (1970) basado en el estudio de depósitos de San Manuel - Kalamazoo, compilación de estudios de otros pórfidos cupríferos norteamericanos y un modelo más actualizado que se presenta por Giggenbach (1997), Makshev (2004) presenta el modelo de distribución de zonas de alteración hidrotermal usado hasta el día de hoy, que se presenta en la figura 1.

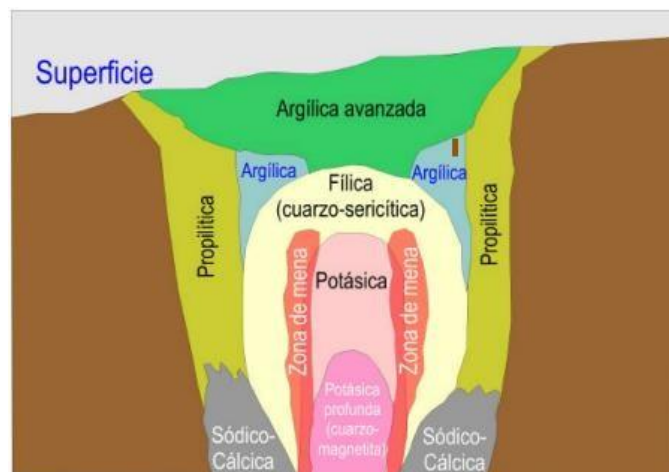
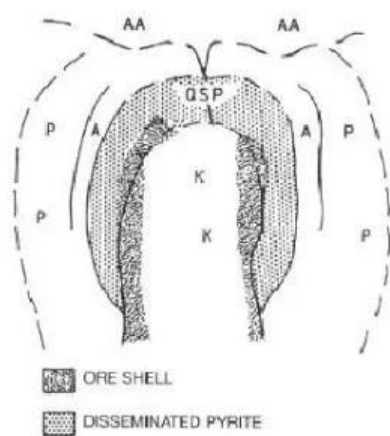
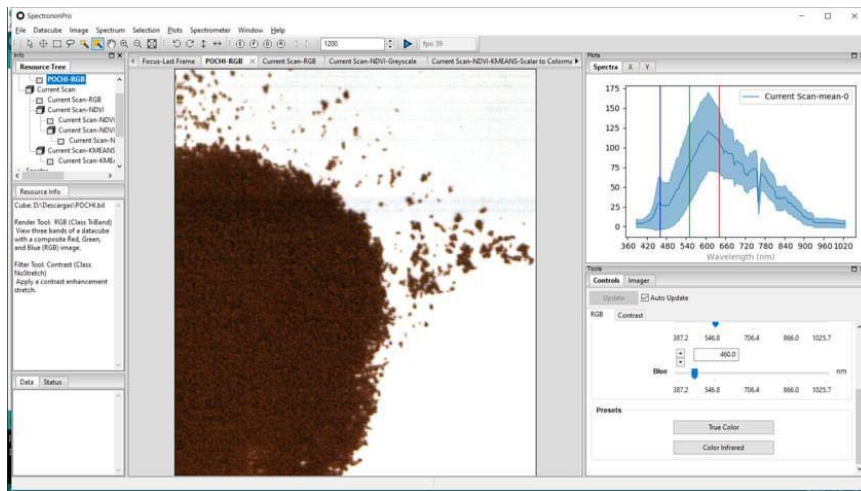


Figura 1. Comparación entre (a la izquierda) zonación de alteración hidrotermal en un pórfido cuprífero típico, ligeramente modificada de Lowell y Gilbert (1970) agregando una zona poco profunda de alteración argílica avanzada (AA). Otras abreviaturas: K = potásica; A = argílica; QSP = cuarzo-sericita-pirita; P = propilítica. A la derecha, distribución de zonas de alteración hidrotermal en un pórfido cuprífero combinando los modelos de Lowell y Gilbert (1970); y Giggenbach (1997), modificado por Makshev (2004). Figuras extraídas de (Makshev et al., 2004) y (Makshev, 2004).

Con base en la recopilación de los estudios mencionados anteriormente más la aplicación del modelo de zonación hidrotermal modificado por Makshev (2004) es posible sostener que, durante la etapa de exploración minera, la primera zona de alteración hidrotermal que se suele identificar es la propilítica, seguida de la zona de alteración argílica, posteriormente la alteración filica y finalmente la alteración potásica hasta llegar a la zona de mena del pórfido cuprífero. Las zonas de mena de pórfido cuprífero con las concentraciones explotables más grandes en el mundo de Cu (203 millones de toneladas: Los Bronces– Río Blanco, Chile (Sillitoe, 2010) y Mo (2.5 millones de toneladas: El Teniente, Chile; Camus, 2003).

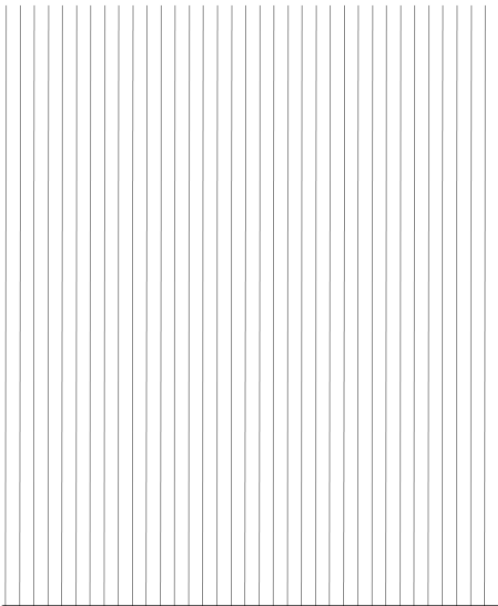
## Anexo N°2



*Figura 2. Pruebas de enfoque con granos de café. Figura de elaboración propia, extraída del software SpectrononPro.*

## Anexo N°3

### Focusing Sheet



*Figura 3. Hoja de enfoque. Figura extraída del manual de usuario de RESONON.*

## Aspect Ratio Calibration Sheet

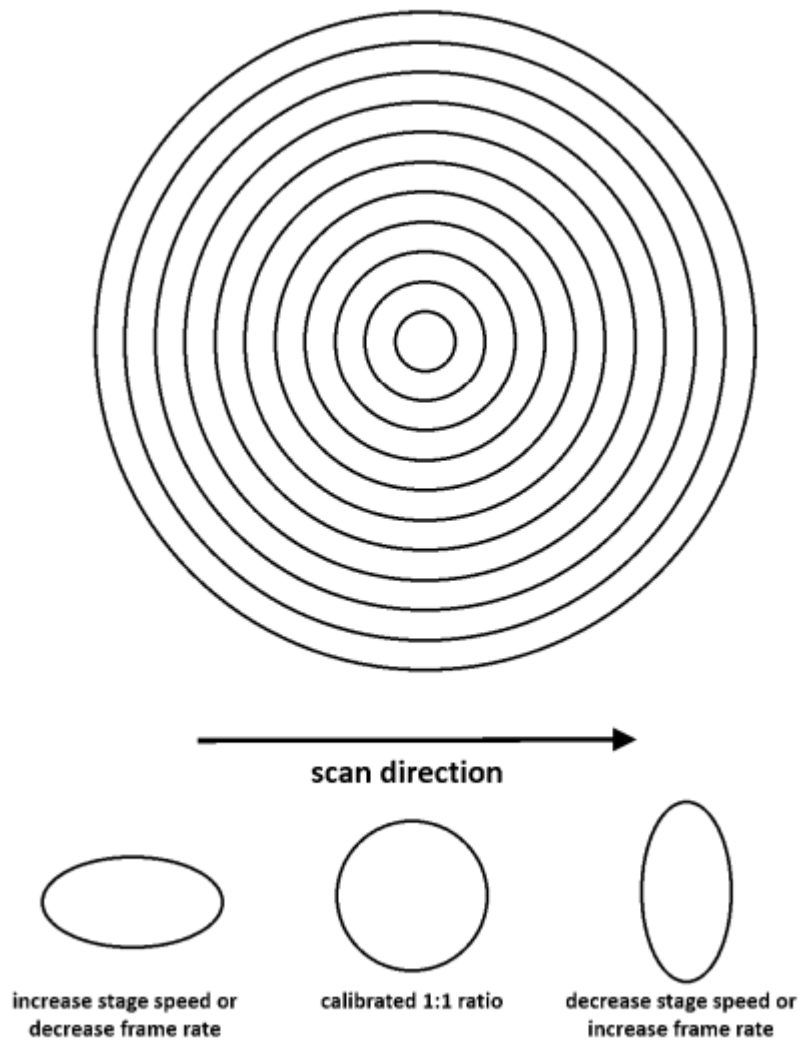


Figura 4: Hoja de calibración de relación de aspecto. Figura extraída del manual de usuario de RESONON.

## Anexo N°5

```
// t_semi_ciclo inversa de la t_semi_ciclo como tal
#define FPS 13
#define Lineas 261
#define distancia 65

const float Duracion = (float)Lineas/FPS;
const float Velocidad = (float)distancia/Duracion;
const unsigned long N_total_pasos = (long)distancia*50L;
const float t_semi_ciclo = ((Duracion/N_total_pasos)*pow(10, 6))/2;
```

*Figura 5: Código de Arduino con los parámetros establecidos para capturar imágenes de 1200 líneas.*

*Figura modificada por R. González.*

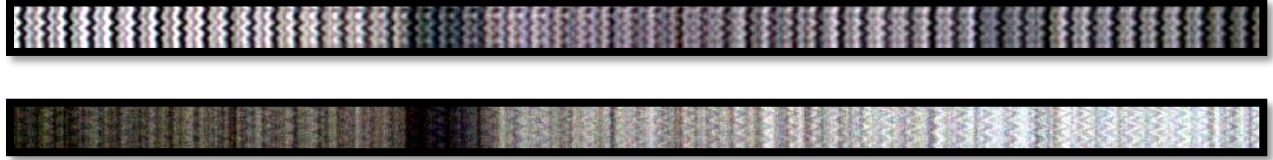
```
// t_semi_ciclo inversa de la t_semi_ciclo como tal
#define FPS 13
#define Lineas 522
#define distancia 130

const float Duracion = (float)Lineas/FPS;
const float Velocidad = (float)distancia/Duracion;
const unsigned long N_total_pasos = (long)distancia*50L;
const float t_semi_ciclo = ((Duracion/N_total_pasos)*pow(10, 6))/2;
```

*Figura 6: Código de Arduino con los parámetros establecidos para capturar imágenes de 2400 líneas.*

*Figura modificada por R. González.*

## Anexo N°6



*Figura 7: En la imagen superior la representación RGB de la calibración a 100 lux en condiciones de laboratorio y en la parte inferior la representación RGB de la calibración a 750 lux.*

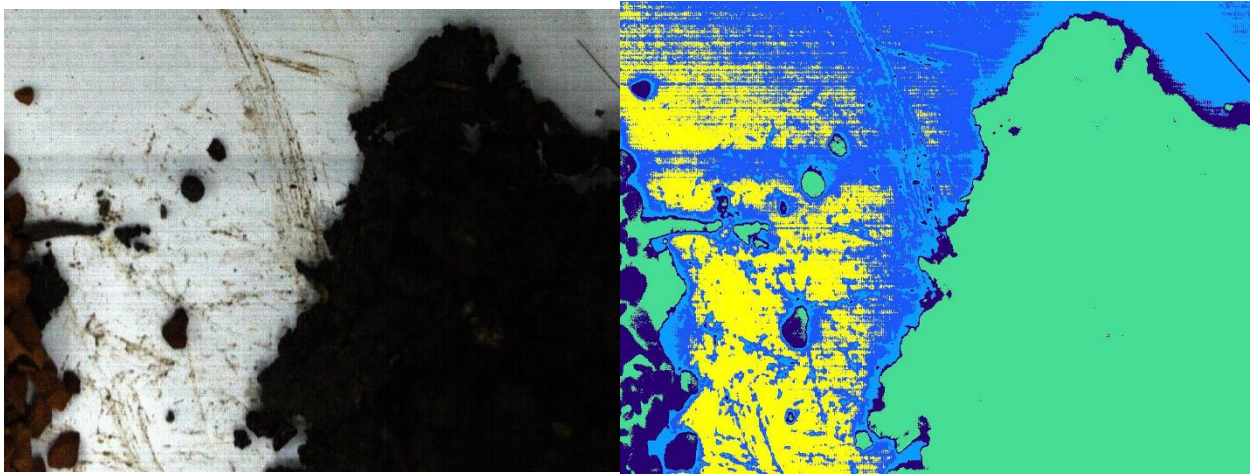
Estas calibraciones (figura 7) de Response Correction se realizaron en condiciones de laboratorio (sin luz artificial) a las 10.30 am y en condiciones de luz solar (en la sombra) a las 16:17 pm, si bien se nota una mejora clara en la representación de blancos de la cámara en la calibración realizada a 750 lux, se siguen notando patrones de oscuridad en algunas zonas, lo que significa que hay menos nivel de luz en algunas zonas. Entonces, también queda descartado tomar datos hiperespectrales con estas condiciones de luz.

En las siguientes imágenes (figura 8), se representa en imágenes RGB la calibración realizada con mayor nivel de luminosidad (más de 24.500 lux).



*Figura 8. Representación RGB de una serie de calibraciones de Response Correction con distintas luminosidades. En orden descendente, los niveles de luz son 24.500 y 63.000 lux.*

## Anexo N°7



*Figura 9: Ejemplo de segmentación realizada a modo de prueba con granos de café y tierra de hoja. Figura de elaboración propia, extraída del software SpectronPro.*

## Anexo N°8

```
[11] import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

excel = pd.read_excel("Minerales Graficos.xlsx", sheet_name=None)

[12] anhidrita = excel["Anhidrita"]
calcita = excel["Calcita"]
clorita = excel["clorita"]
epidota = excel["Epidota"]
magnetita = excel["Magnetita"]
moscovita = excel["Moscovita"]
pirita = excel["Pirita"]
cuarzo = excel["Cuarzo"]
feldespato = excel["Feldespato"]
calcopirita = excel["Calcopirita"]
minerales_graficos = excel["Minerales Graficos"]
all_minerals = excel["All Minerals"]
```

*Figura 10: Código para importar el Excel con los datos de reflectancia de los minerales. Elaboración propia.*

```
[41] x_pirita = pirita["Wavelengths BECK"].to_numpy()
y_pirita = pirita["Pyrite HS35.3"].to_numpy()
y2_pirita = pirita["Pyrite S26-8"].to_numpy()
y3_pirita = pirita["Pyrite S29-4"].to_numpy()
y4_pirita = pirita["Pyrite S30"].to_numpy()
y5_pirita = pirita["Pyrite S142-1"].to_numpy()

fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(x_pirita, y_pirita, label='Pyrite HS35.3', c='blue')
ax.plot(x_pirita, y2_pirita, label='Pyrite S26-8', c='red')
ax.plot(x_pirita, y3_pirita, label='Pyrite S29-4', c='green')
ax.plot(x_pirita, y4_pirita, label='Pyrite S30', c='gray')
ax.plot(x_pirita, y5_pirita, label='Pyrite S142-1', c='purple')
x_range = np.linspace(0.387, 1.025)
y_range = np.zeros_like(x_range)
ax.fill_between(x_range, y_range, y2=y_pirita[x_pirita.searchsorted(x_range)], color='blue', alpha=0.2, label='Rango VNIR')
plt.xticks([0.0, 0.387, 1.025, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0])

plt.xlabel('Wavelengths (micras)')
plt.ylabel('Reflectance')
plt.xlim(0, 3)

plt.title('Gráfico de reflectancia de Pirita')
plt.legend()

plt.show()
```

Figura 11. Código para generar el gráfico de reflectancias en el rango de 205 a 2976 nanómetros.

Elaboración propia.

```
[39] x_pirita = pirita["Wavelengths BECK"].to_numpy()
y_pirita = pirita["Promedio"].to_numpy()
y2_pirita = pirita["DesvEst1"].to_numpy()
y3_pirita = pirita["DesvEst2"].to_numpy()

fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(x_pirita, y_pirita, label='Pirita', c='blue')
ax.plot(x_pirita, y2_pirita, label='DesvEst1', c='skyblue')
ax.plot(x_pirita, y3_pirita, label='DesvEst2', c='skyblue')
x_range = np.linspace(0.387, 1.025)
y_range = np.zeros_like(x_range)
ax.fill_between(x_range, y_range, y2=y3_pirita[x_pirita.searchsorted(x_range)], color='blue', alpha=0.2, label='Rango VNIR')
plt.xticks([0.0, 0.387, 1.025, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0])

plt.xlabel('Wavelengths (micras)')
plt.ylabel('Reflectance')
plt.xlim(0, 3)

plt.title('Gráfico de reflectancia de Promedio de Pirita')
plt.legend()

plt.show()
```

Figura 12. Código para generar el gráfico de reflectancias promedio en el rango de 205 a 2976 nanómetros.

Elaboración propia.

```

[40] x_pirita = pirita["Wavelengths BECK"].to_numpy()
y_pirita = pirita["Promedio"].to_numpy()
y2_pirita = pirita["DesvEst1"].to_numpy()
y3_pirita = pirita["DesvEst2"].to_numpy()

index_to_cut_left = np.searchsorted(x_pirita, 0.387)
index_to_cut_right = np.searchsorted(x_pirita, 1.025, side='right')

x_pirita_cut = x_pirita[index_to_cut_left:index_to_cut_right]
y_pirita_cut = y_pirita[index_to_cut_left:index_to_cut_right]
y2_pirita_cut = y2_pirita[index_to_cut_left:index_to_cut_right]
y3_pirita_cut = y3_pirita[index_to_cut_left:index_to_cut_right]

fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(x_pirita_cut, y_pirita_cut, label='Pirita', c='blue')
ax.plot(x_pirita_cut, y2_pirita_cut, label='DesvEst1', c='skyblue')
ax.plot(x_pirita_cut, y3_pirita_cut, label='DesvEst2', c='skyblue')

x_range = np.linspace(0.387, 1.025)
y_range = np.zeros_like(x_range)

plt.xticks([0.0,0.387,1.025,1.5,2.0,2.5,3.0])

plt.xlabel('Wavelengths (micras)')
plt.ylabel('Reflectancia')
plt.xlim(0.387,1.025)

plt.xticks([0.387,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.025])
plt.title('Gráfico de reflectancia de Promedio de Pirita en el rango VNIR')
plt.legend()

plt.show()

```

Figura 13. Código para generar el gráfico de reflectancias promedio en el rango VNIR. Elaboración propia.

## Anexo N°9

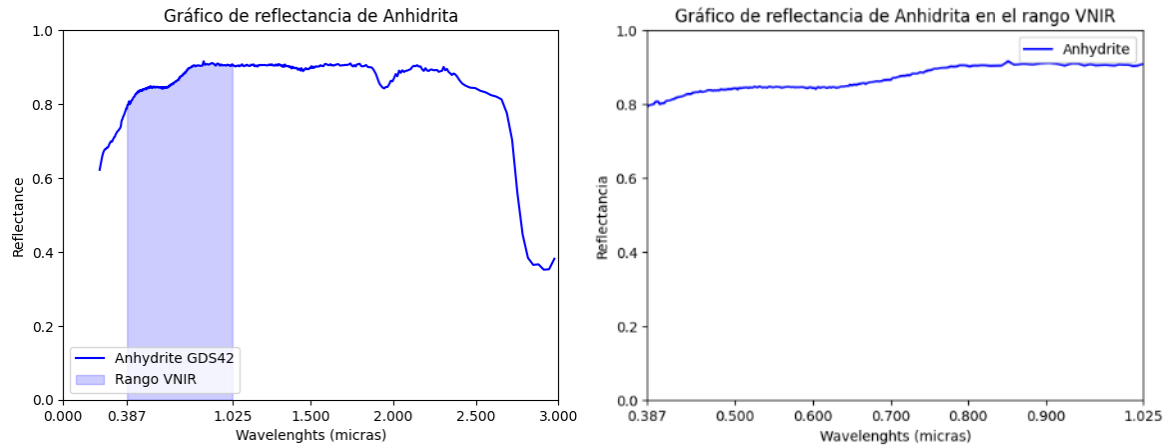


Figura 14. Gráficos de reflectancia para el mineral Anhidrita. Elaboración propia.

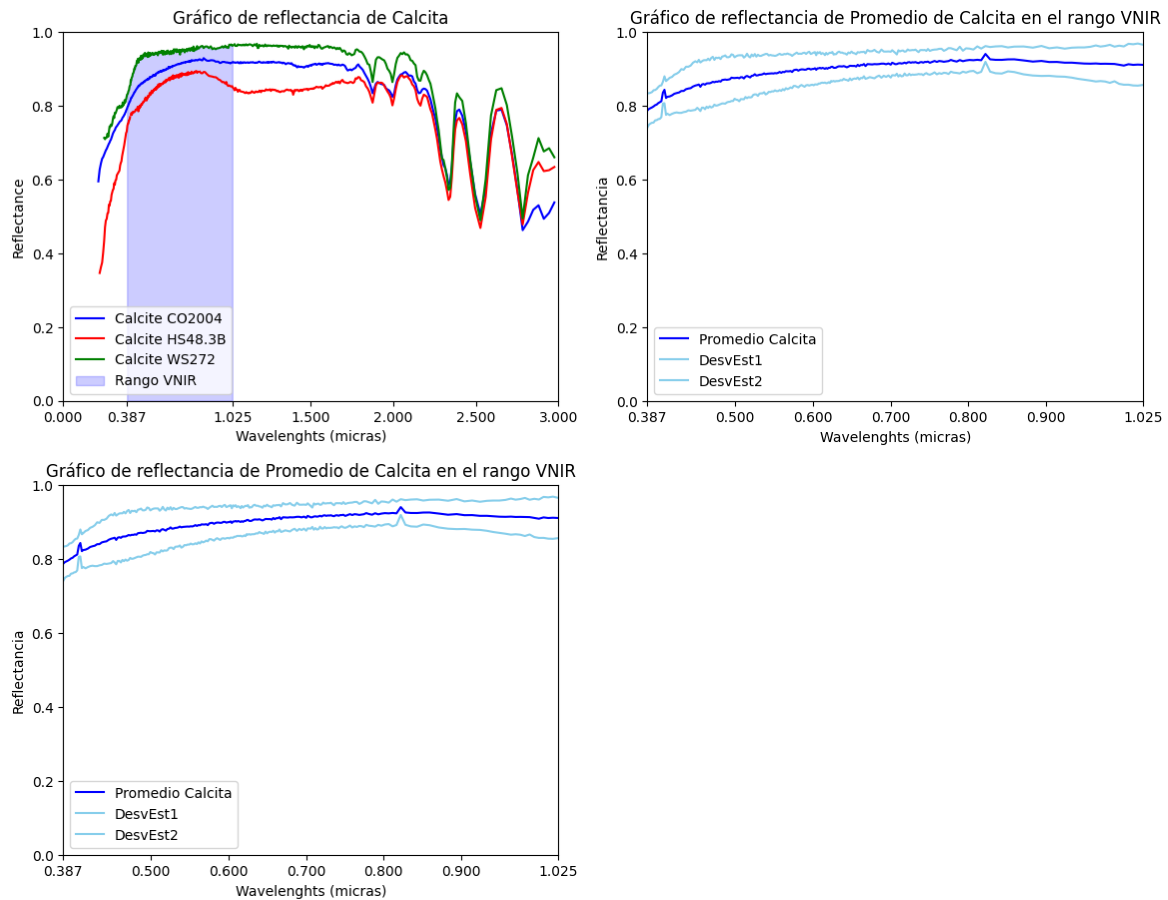


Figura 15. Gráficos de reflectancia para el mineral Calcita. Elaboración propia.

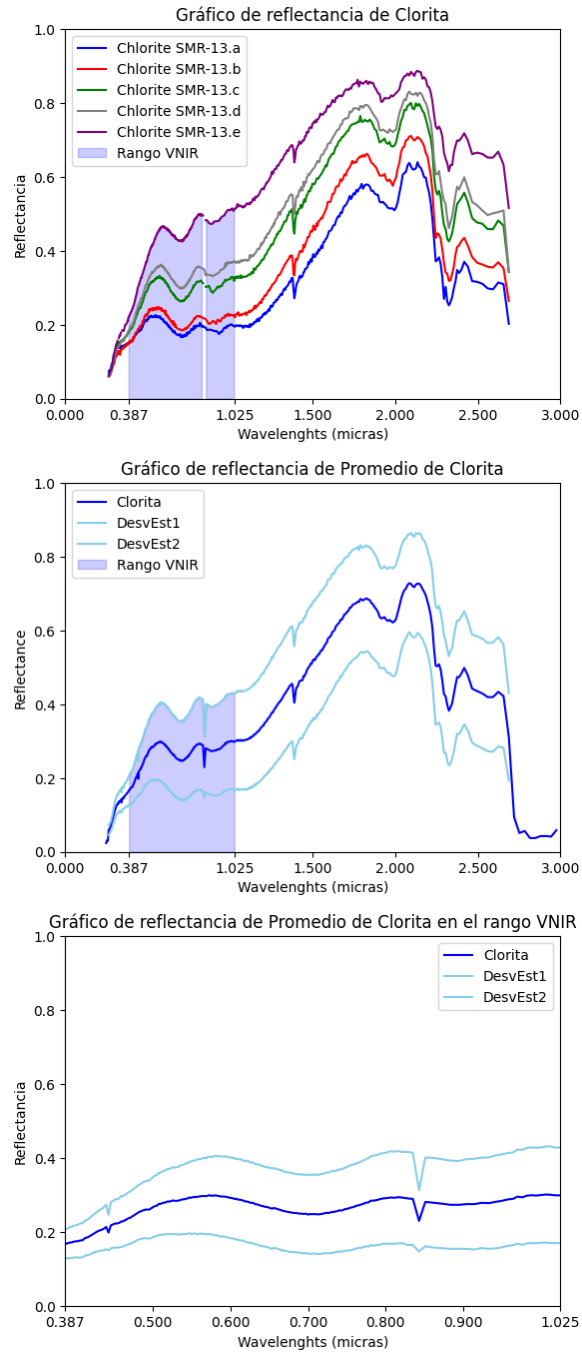


Figura 16. Gráficos de reflectancia para el mineral Clorita. Elaboración propia.

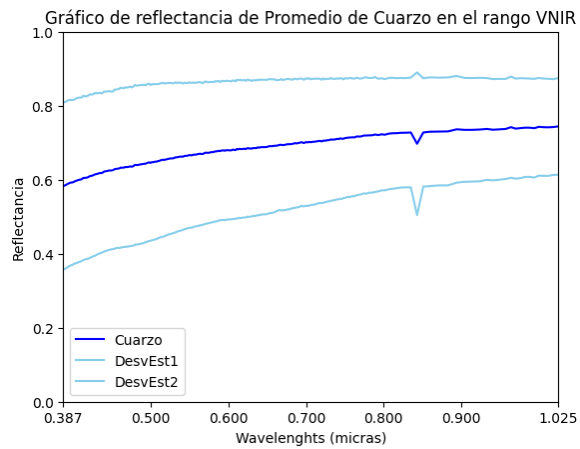
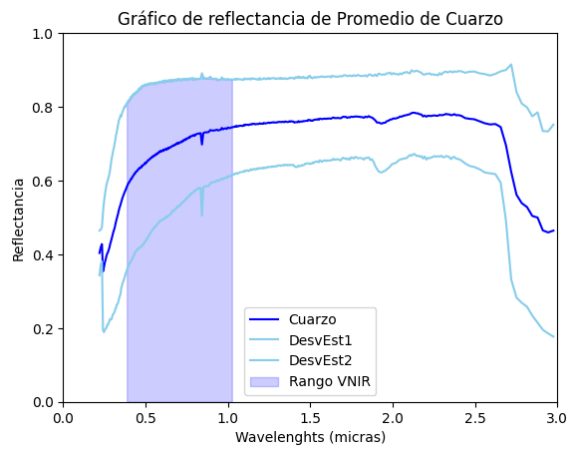
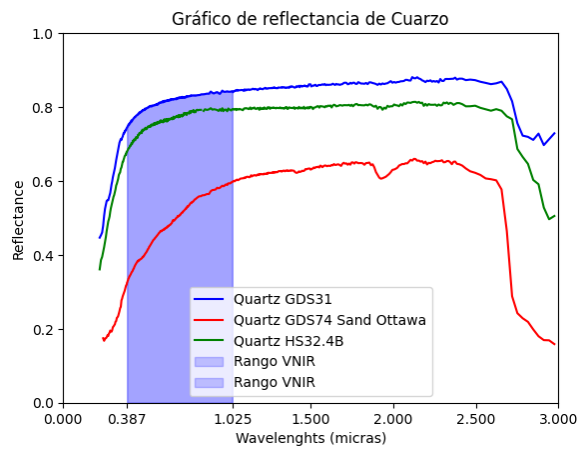


Figura 17. Gráficos de reflectancia para el mineral Cuarzo. Elaboración propia.

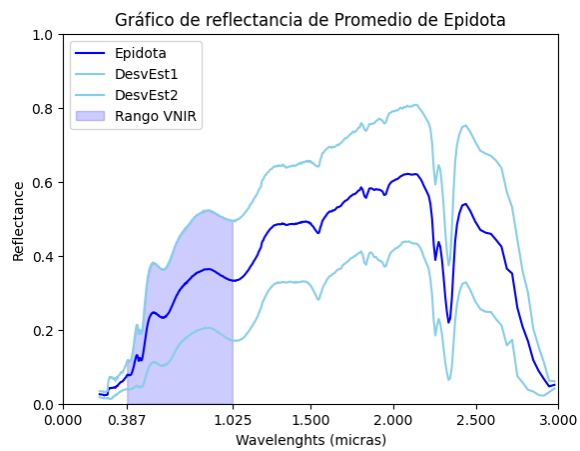
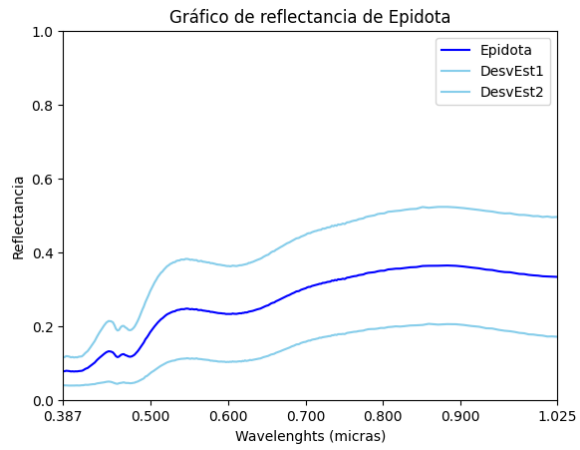
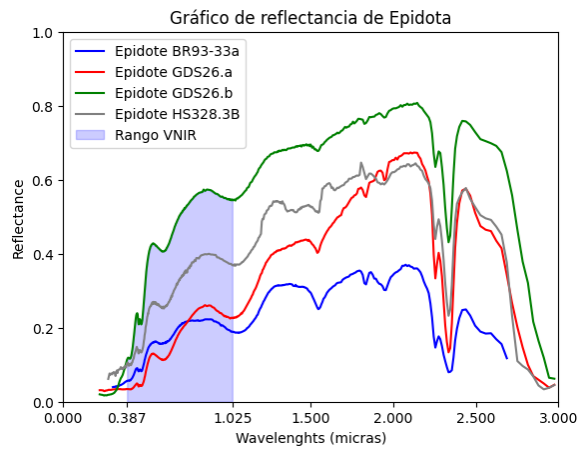


Figura 18. Gráficos de reflectancia para el mineral Epidota. Elaboración propia.

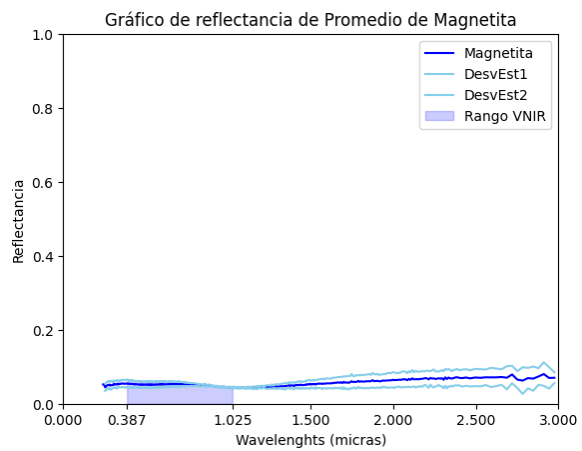
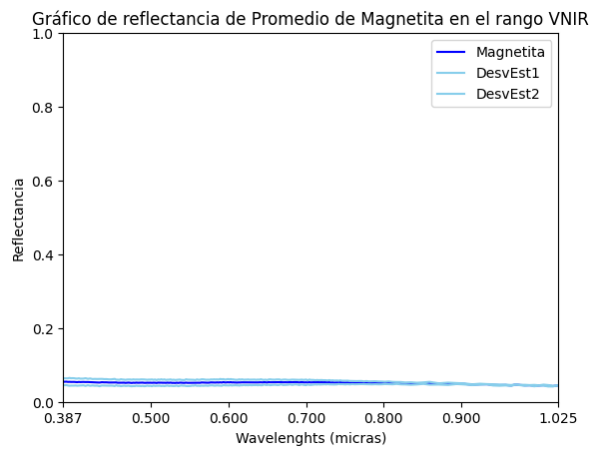
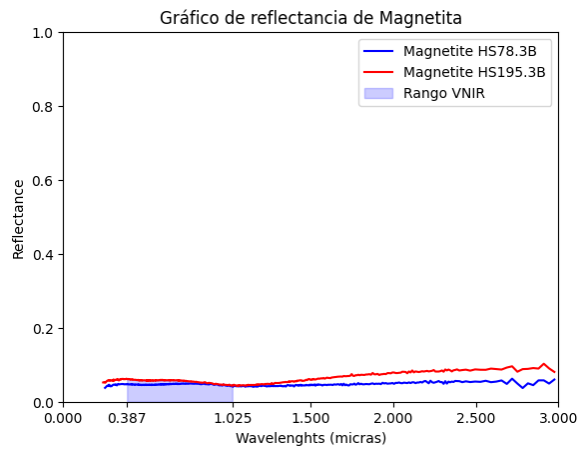


Figura 19. Gráficos de reflectancia para el mineral Magnetita. Elaboración propia.

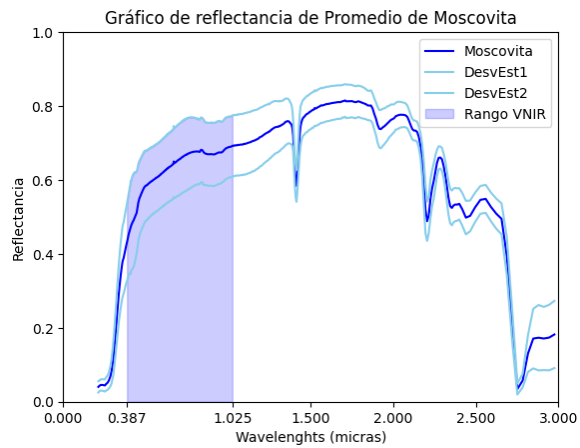
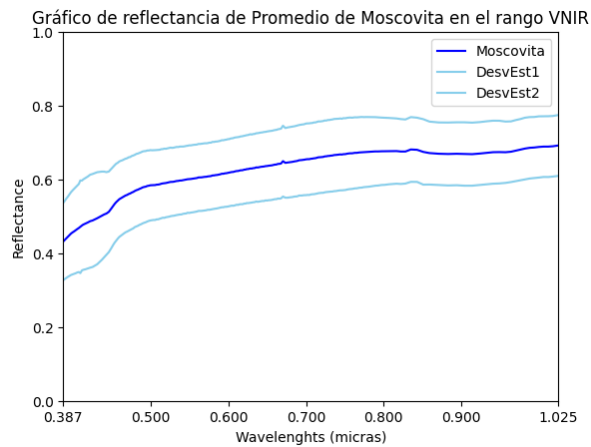
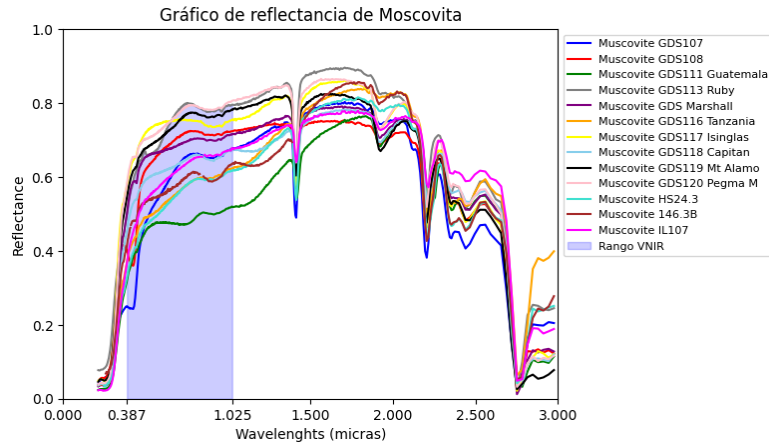


Figura 20. Gráficos de reflectancia para el mineral Moscovita. Elaboración propia.

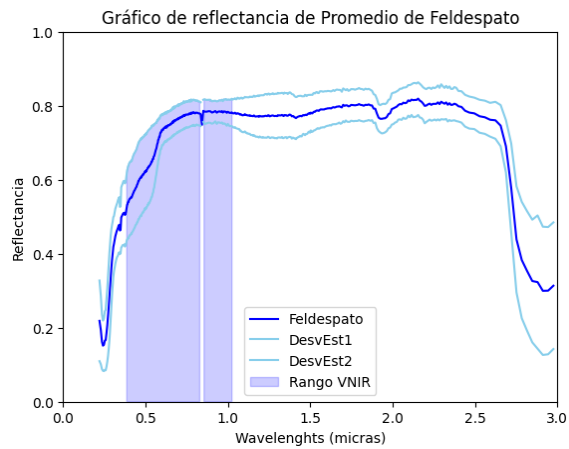
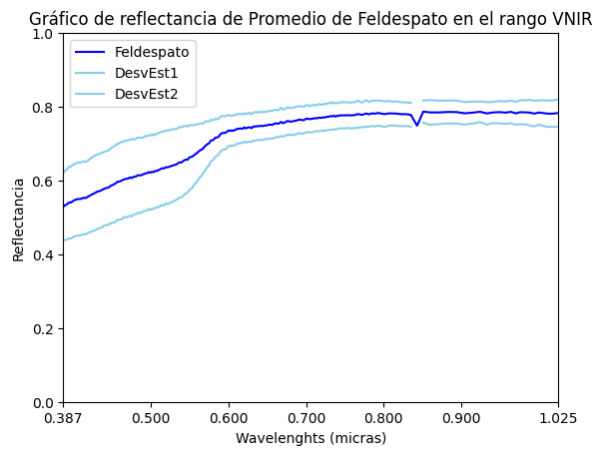
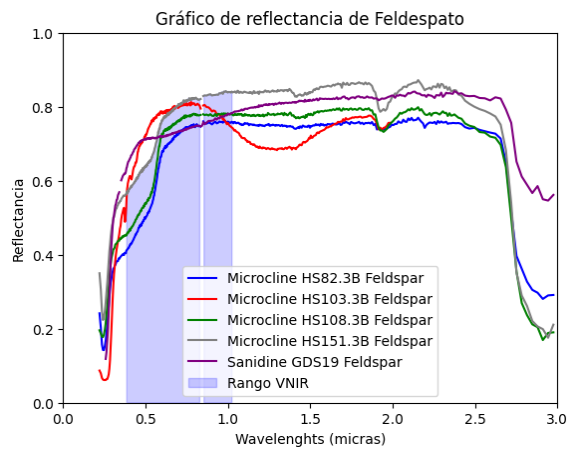


Figura 21. Gráficos de reflectancia para el mineral Feldespato. Elaboración propia.

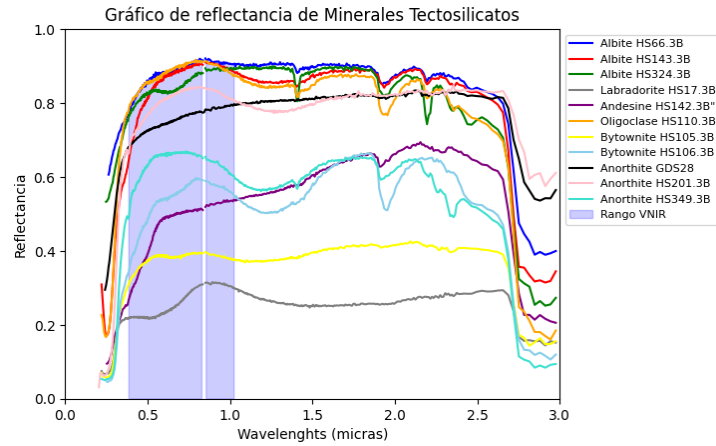


Gráfico de reflectancia de Promedio de Minerales Tectosilicatos en el rango VNIR

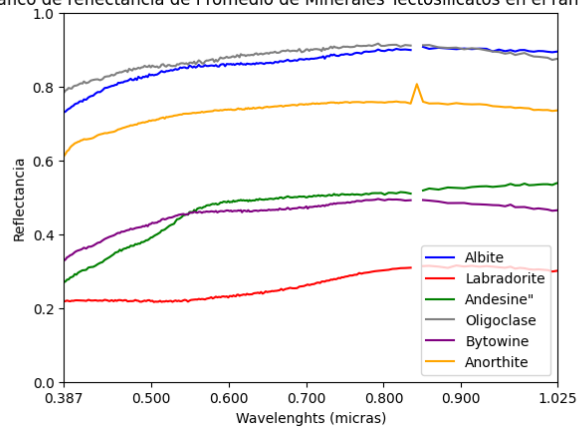


Gráfico de reflectancia de Promedio de Minerales Tectosilicatos

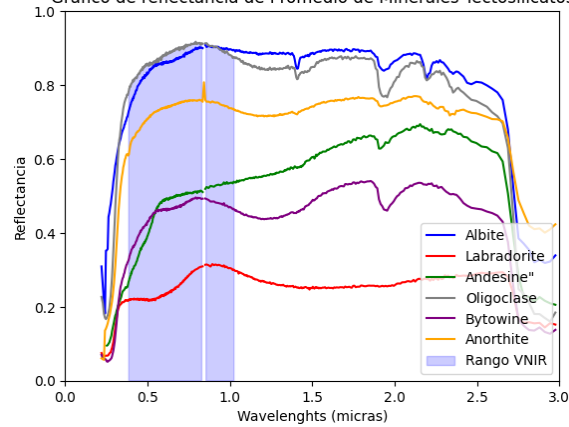


Figura 22. Gráficos de reflectancia para los minerales Tectosilicatos. Elaboración propia.