

Universidad Nacional de Río Negro

Sede Alto Valle – Valle Medio.

Localización General Roca

Trabajo Final de Grado

Licenciatura en Geología.

Determinación de los blancos de exploración en base a la respuesta espectral de los minerales de alteración hidrotermal en los alrededores del Establecimiento Ganadero Don Raúl, Macizo Nordpatagónico, Patagonia Argentina.

Autor: Pessoa Garcia, Marco Yoel

Director: González, Santiago Nicolás

Co-Director: Greco, Gerson Alan

## **RESUMEN:**

El sector nororiental del Macizo Nordpatagónico alberga mineralizaciones (Yacimiento San Martín, Proyecto San Roque, manifestaciones argentíferas) formadas durante las épocas metalogénicas Gondwanicas y Mesozoicas. Tres metalotectos son relevantes en estas épocas: i- granitos pérmicos, ii- ignimbritas triásicas y iii- lavas e ignimbritas jurásicas. Este estudio pretende contribuir a la exploración metalogénica de la región a través de la investigación de zonas con alteración hidrotermal aledañas al Establecimiento Don Raúl, ubicado entre Valcheta y Aguada Cecilio, provincia de Río Negro. Con este fin, se identificaron objetivos de alteración hidrotermal que potencialmente podrían conducir al descubrimiento de depósitos minerales.

El estudio se inició con la búsqueda de recursos bibliográficos y cartográficos sobre el tema de estudio. Posteriormente, se emplearon imágenes satelitales ASTER para identificar posibles áreas de alteración hidrotermal. Estas imágenes se sometieron a un preprocesamiento digital utilizando el software ENVI 4.7, aplicando correcciones a radiancia de las bandas de los subsistemas VNIR, SWIR y TIR. Para evaluar la presencia y distribución de minerales de alteración, se generaron diferentes índices (OH1a, ALI, CI swir, Cao), composiciones RGB (468, 654), así como también composiciones de cocientes RGB. A través de un análisis exhaustivo de la información obtenida de las imágenes satelitales ASTER y de la cartografía elaborada, producida por fotointerpretación y mapeo de campo, se definieron y localizaron objetivos de alteración hidrotermal localizados en afloramientos del metalotecto de lavas e ignimbritas jurásicas, pertenecientes al Complejo Volcánico Marifil. Los estudios petrográficos sugieren que los objetivos exhiben una paragénesis de alteración hidrotermal que consiste en cuarzo + micas blancas, caolinita, + Oxidos e hidróxidos de hierro. Esta paragénesis de minerales de alteración es congruente con alteraciones de tipo fílica y argílica supergénica superpuesta. Finalmente, utilizando toda la información disponible, se realizó un mapeo geológico y de alteración detallado del área de estudio.

Considerando la estrecha relación espacial de la alteración con las rocas del Complejo Volcánico Marifil, se propone una edad jurásica para la alteración fílica y argílica encontrada. El estudio de la alteración hidrotermal a partir de imágenes satelitales multiespectrales permite relacionar las diferentes alteraciones con los metalotectos que las alojan. En este trabajo, se logró vincular alteraciones hidrotermales con el metalotecto de lavas e ignimbritas jurásicas del área. A partir de los resultados obtenidos, y de los

trabajos realizados por otros autores dentro de la comarca, la metodología desarrollada en este trabajo resultaría aplicable en otros sectores del Macizo Nordpatagónico donde se encuentre expresado el metalotecto de las lavas e ignimbritas jurásicas. De la misma manera, esta metodología podría ser extrapolable a otras regiones que presenten metalotectos equivalentes, con el fin de definir o ampliar blancos de exploración.

## **ABSTRACT:**

The northeastern sector of the North Patagonian Massif hosts mineralization formed during the Gondwanic and Mesozoic metallogenic epochs. Three metalotects are relevant during these epochs: i- Permian granites, ii- Triassic ignimbrites, and iii- Jurassic lavas and ignimbrites. This study aims to contribute to the metallogenic exploration of the region through the investigation of hydrothermal alteration zones surrounding the Establecimiento Don Raúl, located between Valcheta and Aguada Cecilio, Río Negro province. With this purpose, alteration targets that could potentially lead to the discovery of commercially viable mineral deposits were identified.

The first step in research was to compile bibliographic and cartographic resources from the study area. Subsequently, ASTER satellite images were employed to identify potential hydrothermal alteration areas. These images were processed using ENVI 4.7 software, applying radiance corrections to the VNIR, SWIR, and TIR bands. To assess the presence and distribution of alteration minerals, different indices (OH1a, ALI, CI swir, Cao), RGB composites (468, 654) as well as RGB ratio composites were generated. Through a comprehensive analysis of the information obtained from the ASTER satellite images and the cartography, produced by photointerpretation and field mapping, hydrothermal alteration targets were defined and located in outcrops of the Jurassic lava and ignimbrite metalotect belonging to the Marifil Volcanic Complex. Petrographic studies suggest that the targets exhibit an alteration paragenesis consisting of quartz + white micas, kaolinite, + iron oxides and hydroxides. This paragenesis of alteration minerals is consistent with phyllic and argillic type alterations. Finally, using all the available information, detailed geological and alteration mapping of the study area was produced.

Since no further magmatic activity was registered in the area, and considering the close spatial relation of the alteration with the Marifil Volcanic Complex rocks, a Jurassic age is proposed for phyllic and argillic alteration founded. The value of multi-spectral

satellite imagery lies in its ability to identify various hydrothermal alteration zones and establish their connection to its host rocks (metallotect). In this study, a genetic association is suggested between the examined hydrothermal alterations and the Jurassic lavas and ignimbrites in the region. Based on the findings of this study, and taking into account previous research in the region, the methodology applied here could prove valuable in other areas of the North Patagonian Massif where Jurassic lavas and ignimbrites with metallotects potential are found. Likewise, this approach could be extended to other regions with similar metallotects characteristics, enabling the identification and expansion of explorations targets.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mis directores Santiago Gonzáles y Gerson Grecco, por confiar en mí y darme la oportunidad de realizar este TFG con su ayuda, por su predisposición a solventar mis dudas e inquietudes en todo momento, por su paciencia y su acompañamiento a lo largo de mi tesis.

A mis viejos y mi hermano no tengo palabras para expresar mi gratitud hacia ellos, bancándome cuando las cosas no salían, siendo parte de mis risas, alegrías, mis llantos y mis tristezas. Si no fuera por ellos creo que esto nunca podría haber sido posible.

A mis compañeros de la universidad, compañeros de estudio. A mi primer “facuamigo” Tomas Cuevas Zurita y a mis compañeros de estudio durante la pandemia Lucas Monsalve y Facundo Maidana, siempre preparando finales por discord. A mis compañeras de campaña Belu y Martina.

A los amigos de toda la vida que seguimos juntos a pesar de tantos años de amistad, me acompañaron durante el jardín, primaria e incluso secundaria. Siempre firmes al pie, apoyándome en absolutamente todo y dándome ese empujoncito para no aflojar durante todo el proceso. Mi primer amigo Santiago Gimenez que sé que vas a estar mirando la transmisión en vivo desde España.

A todos los profesores de la carrera no solo por transmitir todos los conocimientos necesarios para llegar a este momento, sino también, por hacerlo con pasión y dedicación.

También me gustaría agradecer a la Universidad Nacional de Rio Negro que me dio la posibilidad de estudiar esta hermosa carrera y formarme como profesional.

## **Índice General:**

<b>1. Introducción</b>	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
<b>2. Ubicación del área de estudio</b>	4
<b>3. Marco Geológico</b>	5
<b>4. Materiales y métodos</b>	8
4.1 Trabajos de gabinete previos al campo	8
4.2 Trabajo de campo	13
4.3 Trabajos de gabinete posteriores al campo	13
<b>5. Resultados</b>	14
5.1 Análisis visual de las imágenes ASTER	14
5.2 Identificación de la alteración hidrotermal	16
5.3 Análisis petrográfico	26
5.4 Cartografía en detalle	33
5.5 Paragénesis mineral de alteración	35
<b>6. Discusión</b>	36
6.1 Comparación de los resultados a diferentes escalas de trabajo	36
6.2 Origen, edad y condiciones físico – químicas de la alteración	37
<b>7. Conclusiones</b>	38
<b>8. Investigaciones a futuro</b>	39
<b>9. Referencias bibliográficas</b>	40

**10. Anexo I – Descripciones petrográficas de las secciones  
delgadas**

46

# 1 Introducción

En el sector nororiental del Macizo Nordpatagónico se encuentran mineralizaciones formadas durante los episodios metalogénicos gondwánicos y mesozoicos (Herrmann *et al.* 2007). Se reconocen tres metalotectos correspondientes a i- los granitos pérmicos, ii- ignimbritas triásicas y iii- lavas e ignimbritas jurásicas. El episodio gondwánico se caracteriza por presentar mineralizaciones de wolframio como es el caso del Yacimiento San Martín y mineralizaciones epitermales de metales base con anomalías de Au-Ag que se encuentran alojadas en los granitos Pérmicos pertenecientes al Complejo Plutónico Navarrete (Gozalvez 2009b, Herrmann *et al.* 2007). En los metalotectos mesozoicos, se distinguen dos dominios principales. El primero de ellos se encuentra asociado a las ignimbritas triásicas las cuales presentan vetas de cuarzo con mineralizaciones de sulfuros de metales base y Au - Ag, pertenecientes a la facies volcánicas del Complejo Volcánico Treneta (Caminos, 2001). El segundo metalotecto Mesozoico incluye mineralizaciones de fluorita, polimetálicas simples (Pb-Zn ± Ag) y epitermales polimetálicas con mineralizaciones de Indio (In-Cu-Pb-Zn ± Ag-Au) asociado a lavas e ignimbritas de edad jurásicas, como es el caso del proyecto San Roque (Herrmann *et al.* 2007, Dill *et al.* 2013, González *et al.* 2022b). Estas manifestaciones se encuentran alojadas en ignimbritas y lavas del Complejo Volcánico Marifil, así como también, en discontinuidades del basamento metamórfico (Herrmann *et al.* 2007). Manifestaciones argentíferas fueron documentadas recientemente (González *et al.* 2022b) y se encuentran localizadas en las cercanías del Establecimiento Ganadero Don Raúl, emplazadas en un dique riolítico cuya posición estratigráfica permite asignarlo al CVM del jurásico temprano.

Los yacimientos hidrotermales, como los correspondientes a los metalotectos pérmicos (Yacimiento San Martín) y mesozoicos (Proyecto San Roque) del Macizo Nordpatagónico oriental, se caracterizan por la formación de zonas de alteración hidrotermal. La alteración hidrotermal implica la transformación de la mineralogía original de la roca en una nueva asociación de minerales secundarios producto de la interacción de los fluidos calientes con la roca por donde circularon (Hedenquist *et al.*, 1996). Dichos fluidos son canalizados por las fracturas y fallas, generando zonas de

alteración hidrotermal y eventualmente mineralizaciones (Sibson 1987, Peacock 2001). Estas zonas de alteración suelen contener proporciones significativas de minerales arcillosos debido a la hidrólisis de sus feldspatos y minerales máficos, los cuales pueden ser identificados mediante imágenes multispectrales. Esto se debe a la absorción diferencial en cierto rango de longitudes de onda del espectro electromagnético por parte de estos minerales. Para llevar a cabo la detección remota de estos minerales arcillosos, se utiliza el sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), que proporciona una mayor resolución espectral en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR) del espectro electromagnético. Este subsistema está formado 6 bandas que se ubican aproximadamente entre los 1,600 - 2,430 micrones ( $\mu\text{m}$ ) de longitud de onda (ver Tabla 1).

En el presente trabajo, se analizarán las potenciales zonas de alteración hidrotermal y se definirán los tipos de alteración hidrotermal en base a la paragénesis mineral de alteración en el área de estudio que se encuentra ubicada en el sector oriental del Macizo Nordpatagónico, aproximadamente a unos 20 km al sureste de la localidad de Valcheta, Provincia de Rio Negro, Argentina (Fig 1). En este Trabajo Final de Licenciatura, nos apoyaremos en los sensores remotos y chequeos de campo para establecer su utilidad en la zona de estudio. Se decidió utilizar estos métodos debido a su bajo costo y efectividad a la hora de definir zonas con alteración hidrotermal. Además, se espera contribuir con información de detalle en la zona de estudio, realizando un análisis de las muestras recolectadas en el campo, definiendo y caracterizando los tipos litológicos mediante estudios petrográfico y confeccionando un mapa geológico y de alteración hidrotermal de la zona en particular.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo General:**

El objetivo general del presente trabajo es identificar nuevas áreas de exploración a través del uso de sensores remotos en el sector nororiental del Macizo Nordpatagónico, para poder extrapolarlo a otras regiones.

### **Objetivos específicos:**

- Realizar un análisis de interpretación visual y espectral basado en imágenes ASTER con la finalidad de poder definir diferentes zonas de alteración hidrotermal.
- Definir blancos de exploración para depósitos polimetálicos en base al reconocimiento de minerales de alteración hidrotermal.
- Confeccionar un mapa geológico de la zona de estudio.
- Realizar una caracterización de los tipos litológicos del área prestando particular atención a las paragénesis de alteración.

## 2 Ubicación del área de estudio

El Macizo Nordpatagónico es una provincia geológica de Argentina que abarca parte de los territorios provinciales de Río Negro y Chubut. Se encuentra limitando al norte con la Cuenca del Colorado y neuquina, al sur con la cuenca del Golfo San Jorge, al oeste con la Cordillera Patagónica y al este con el Mar Argentino. El área de estudio del presente trabajo final de licenciatura, se encuentra ubicada en el sector oriental del Macizo Nordpatagónico, aproximadamente a unos 20 kilómetros al sureste de la localidad de Valcheta, Provincia de Río Negro, Argentina (Fig. 1).

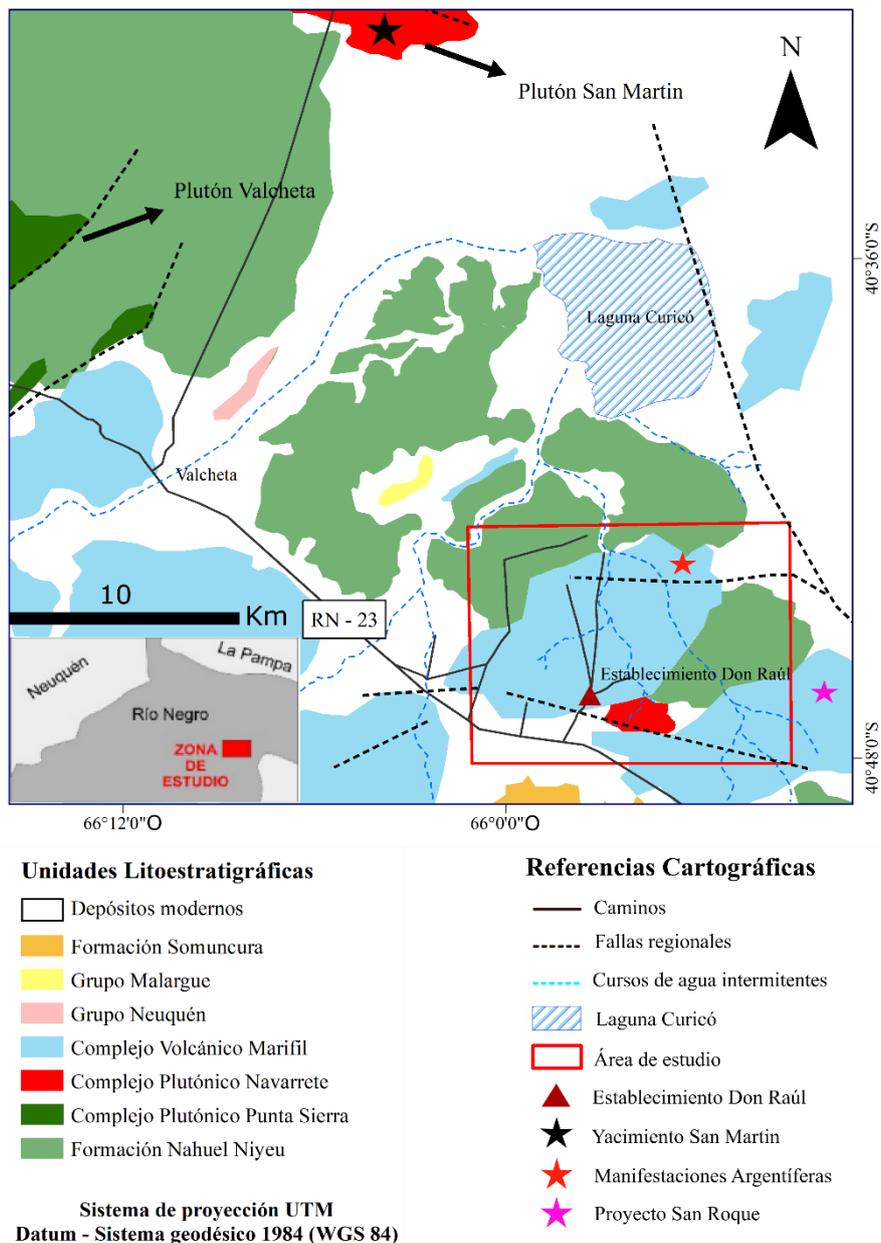


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio, modificado de Greco et al. 2015.

### 3 Marco Geológico:

El basamento del Macizo Nordpatagónico oriental se encuentra constituido por rocas metamórficas de bajo y alto grado e intrusivos asociados (Camino y Llambias 1984, Nuñez *et al.* 1975). En la zona de estudio el basamento se encuentra compuesto por rocas metamórficas de bajo grado agrupadas dentro de la Formación Nahuel Niyeu (Nuñez *et al.* 1975, Camino 1983). La misma se encuentra compuesta por filitas, pizarras, metagrauvas cuarzo feldespáticas y en menor medida metareniscas, metaconglomerados y rocas ígneas básicas (Greco *et al.* 2015). La edad máxima de sedimentación de los protolitos silicoclásticos fue establecida mediante los métodos SHRIMP U-Pb y LA-ICP.MS en circones detríticos en 516 Ma y 510 Ma (Pankhurst *et al.* 2006, Rapalini *et al.* 2013, Greco *et al.* 2017). También existen análisis por el método U-Pb SHRIMP U-Pb en circones de las rocas metaígneas de esta unidad que dieron un resultado de  $513 \pm 3,3$  Ma la cual fue interpretada como el límite superior para la depositación del protolito debido a que la cristalización de estos cuerpos ocurrió posteriormente de la consolidación de la secuencia sedimentaria (Greco *et al.* 2015). Por consiguiente, la edad de depositación del protolito correspondería a la Época 2 del Cámbrico (Greco *et al.* 2017). La estructura interna del basamento es compleja, donde se reconocieron fábricas producidas durante al menos cinco etapas de deformación comenzando en el Paleozoico y llegando tal vez hasta el Mesozoico (Greco *et al.* 2015, 2018, 2021).

El Complejo Plutónico Punta Sierra (i.e. Plutón Valcheta y equivalentes) de edad Ordovícica temprano – Silúrica intruye al basamento metamórfico (Busteros *et al.* 1998). Dicho complejo consiste en granitos biotítico – moscovíticos, leucogranitos, granodioritas y dioritas (Nuñez *et al.* 1975, López de Luchi *et al.* 2008, Gozalvez 2009a, Rapalini *et al.* 2013, Martínez Dopico *et al.* 2021, Grillo Vidal *et al.* 2022).

Por otro lado, el Complejo Plutónico Navarrete (i.e. Plutón Navarrete, Plutón San Martín, Plutón Don Raúl) que aflora en el área de Yaminué – Nahuel Niyeu – Valcheta fue definido por Rapela y Camino (1987) como un batolito compuesto del Paleozoico Tardío, que consiste en varios stocks e intrusiones menores con una composición que

varía entre tonalítica y granodiorítica con diques lamprófiro de microdiorita y espesartina (Camino 2001, González *et al.* 2014, Lopez De Luchi *et al.* 2020). Dataciones de U-Pb SHRIMP sobre zircones en granodioritas cerca del Puesto Navarrete arrojaron edades de cristalización de aproximadamente 281 Ma (Pankhurst *et al.* 2006). El Plutón Don Raúl deja en evidencia la actividad magmática Pérmica en la zona de estudio, la cual se encuentra compuesta por facies graníticas a granodioríticas que intruye a la Formación Nahuel Niyeu (Greco *et al.* 2022). La facies granodiorítica fue datada por el método U-Pb mediante LA- ICPMS determinando una edad de 270 Ma, la cual fue interpretada como la edad de cristalización del Plutón Don Raúl (Greco *et al.* 2022).

La Formación Puesto Piris se encuentra constituida por rocas sedimentarias que afloran en la zona de estudio, en las cuales se destacan conglomerados polimícticos, areniscas calcáreas, tobas y calizas (Nuñez *et al.* 1975, Strazzere *et al.* 2019). Dicha unidad, se apoya discordantemente sobre la Formación Nahuel Niyeu y se encuentra cubierta discordantemente por vulcanitas jurásicas de composición riolíticas, por lo que se le asignó una edad Triásica (Nuñez *et al.* 1975). Sin embargo, estudios recientes proponen una edad Jurásica temprana al reinterpretar la interdigitación de las rocas sedimentarias de la Formación Puesto Piris con las vulcanitas del Complejo Volcánico Marifil (CVM) (Strazzere *et al.* 2019).

El CVM de edad jurásica presenta una amplia distribución areal dentro de todo el Macizo Nordpatagónico Oriental (Malviccini y Ilambias 1974, Cortes 1981, Busteros *et al.* 1998). Consiste principalmente en rocas ígneas volcánicas y subvolcánicas, y piroclásticas con menor participación de rocas sedimentarias (Nuñez *et al.* 1975, Cortes 1981, Busteros *et al.* 1998, González *et al.* 2017), vinculadas tradicionalmente a procesos eruptivos generados por la actividad de grandes campos de calderas (Cicciarelli 1990, Aragón *et al.* 1996). Dicha actividad, a su vez, ha sido relacionada con la efusión de la Provincia Ígnea Chon Aike, asociada a la pluma del Karoo (Pankhurst *et al.* 1998, 2000). Las rocas ígneas y piroclásticas del CVM son de composición riolítica y dacítica, con menor participación de composiciones mesosilícicas, las cuales se apoyan sobre la Formación Puesto Piris y los granitoides del Complejo Plutónico Navarrete y se encuentran cubiertas discordantemente por el Grupo Neuquén. Las edades de dicha unidad fueron estimadas mediante su contenido fósil que permite asignarle una edad Jurásica inferior a media (Nuñez *et al.* 1975). Por otro lado, el CVM también fue datado

por diversos métodos radiométricos. Cortés (1981) mediante el método K-Ar en roca total obtuvo edades entre los 205 y 160 Ma, Rapela y Pankhurst (1993) y Pankhurst y Rapela (1995), utilizaron el método Rb-Sr y obtuvieron edades entre los 190 – 175 Ma. Existen dataciones en las proximidades al área de estudio realizadas mediante el método U-Pb en circones separados de fragmentos de pómez contenidos en una ignimbrita del CVM, en las cuales se obtuvieron edades de 184,4 Ma siendo interpretada como la edad de erupción y depositación de la misma (González *et al.* 2022a). Dataciones recientes realizadas mediante métodos de U-Pb en circones de un pórfido riolítico y flujos de lava han arrojado un rango temporal entre los 193 y 179 Ma (Chernicoff *et al.* 2017, Strazzere *et al.* 2019, González *et al.* 2022a). Esta unidad litoestratigráfica se destaca por su relevancia económica, dado que alberga manifestaciones metálicas presentes en sus rocas, integradas dentro del metalotecto de lavas e ignimbritas jurásicas (Herrmann *et al.* 2007). Dentro de esta unidad, se han identificado depósitos de interés económico, tales como yacimientos epitermales polimetálicos (Dill *et al.* 2013) y manifestaciones argentíferas recientemente documentadas (González *et al.* 2022b).

Representando al Cretácico Superior (Campaniano Superior – Maastrichtiano inferior?) se reconocen dos unidades, el Grupo Neuquén que aflora al noroeste de la zona de estudio y se encuentra compuesto por areniscas, conglomerados de tonalidades, limolitas de tonalidades rojizas y tobas con espesores de aproximadamente 50 metros (Camino 2001, Márquez *et al.* 2016). Por encima del Grupo Neuquén se ubica la Formación Arroyo Barbudo que se compone de arcilitas intercaladas con niveles de calizas y cubre discordantemente las rocas del CVM (Camino 2001, Márquez *et al.* 2016).

Coronando las unidades previas, se encuentra en la zona aflorando la Formación Somún Curá que consiste en mantos de basaltos olvínicos del Oligoceno medio a superior que cubren todas las rocas anteriormente descritas. Constituyen una meseta de aproximadamente 15.000 Km cuadrados (Márquez *et al.* 2016).

Finalmente, la estratigrafía de la zona de estudio se completa con los rodados patagónicos del Pleistoceno compuesto por conglomerados, gravas, areniscas y con los depósitos del Holoceno compuestos por depósitos aluviales, evaporíticos y eólicos-

## 4 Materiales y métodos

La metodología y técnicas empleadas para poder llevar a cabo el trabajo final de grado son las de uso frecuente en Cartografía geológica con un enfoque más profundo en la teledetección de minerales de alteración. Se desarrollara a continuación de manera detallada la cronología de las labores realizadas.

### 4.1 Trabajos de gabinete previos al campo

En los trabajos previos al campo se realizó la recopilación de antecedentes bibliográficos, cartográficos y metalogenéticos de la zona de estudio. Además se recopiló información sobre el preprocesamiento de imágenes ASTER y teledetección de minerales de alteración.

En el presente trabajo el uso de las imágenes ASTER fue de vital importancia para obtener un mapeo geológico preliminar y reconocimiento de minerales de alteración hidrotermal. Esta metodología fue utilizada por diversos autores con la finalidad de lograr la identificación de minerales de alteración hidrotermal, como es el caso de Ninomiya (2002, 2004) y Perez *et al.* (2010).

El sensor multiespectral ASTER consta de 14 bandas desde el visible al infrarrojo termal. Dicha región espectral se encuentra cubierta por tres telescopios para los subsistemas VNIR (*visible and near infrared*) con 3 bandas (1-3) (0,52 a 0,86  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 metros, SWIR (*short wave infrared*) con 6 bandas (4 – 9) (1,6 a 2,43  $\mu\text{m}$ ) y una resolución espacial de 30 metros y TIR (*termal infrared*) con 5 bandas (10 – 14) (8,125 a 11,65  $\mu\text{m}$ ) y una resolución espacial de 90 metros. Además, el sensor cuenta con un telescopio adicional que tiene una resolución espacial igual a la banda 3 y está orientado  $27,7^\circ$  hacia atrás, obteniéndose de este modo las bandas 3N (nadir) y 3B (hacia atrás) utilizadas para generar modelos de elevación digital (DEM).

Tabla 1: Características y espaciales del sensor ASTER.

Subsistema	Bandas	Rango espectral (micrómetro)	Resolución espacial (m)
VNIR	VNIR_Band 1	0,52 – 0,60	15
	VNIR_Band 2	0,63 – 0,69	
	VNIR_Band 3N	0,78 – 0,86	
	VNIR_Band 3B	0,78 – 0,86	

SWIR	SWIR_Band 4	1,600 – 1700	30
	SWIR_Band 5	2,145 – 2,185	
	SWIR_Band 6	2,185 – 2,225	
	SWIR_Band 7	2,235 – 2,285	
	SWIR_Band 8	2,295 – 2,365	
	SWIR_Band 9	2,360 – 2,430	
TIR	TIR_Band 10	8,125 – 8,475	90
	TIR_Band 11	8,475 – 8,825	
	TIR_Band 12	8,925 – 9,275	
	TIR_Band 13	10,25 – 10,95	
	TIR_Band 14	10,95 – 11,65	

Las imágenes satelitales ASTER se descargaron del servidor <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Una vez obtenida la escena de la imagen satelital, se procedió a realizar el preprocesamiento de la misma, utilizando del programa Envi 4.7. En dicha instancia se realizó la corrección de las bandas de los tres subsistemas a radiancia. La radiancia es el parámetro que mide el sensor y representa la energía recibida por unidad área y por ángulo sólido de medida (Fig. 2), siendo este último, un ángulo tridimensional que hace referencia a la sección completa de energía transmitida sobre la superficie del objeto detectado (Chuvieco 2008). Por lo tanto, esta medida depende del sensor que toma la imagen, en el momento que es tomada, el ángulo de incidencia de los rayos solares, entre otras. Una vez terminado este preprocesamiento, se llevó a cabo el remuestreo de las bandas, también conocido como “*layerstacking*” que consistió en apilar y remuestrear las bandas.

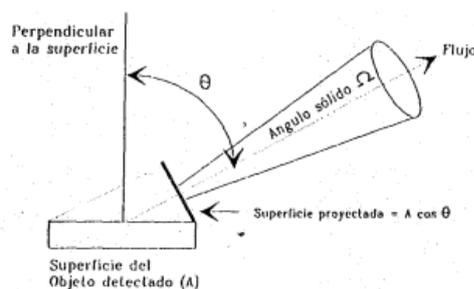


Figura 2: Diagrama de un ángulo sólido (tomado de Chuvieco 2008).

Para realizar la corrección de bandas se convirtieron los ND (números digitales) a valores de radiancia mediante la multiplicación de ND de los píxeles por un factor de corrección (tabla 2) mediante la siguiente fórmula

$$\text{Rad}_n = \text{Coef}_n \times (\text{ND} - 1)$$

Tabla 2: Unidades de coeficientes de conversión calculados (Abrams y hook, 2002).

Nº Banda	High Gain	Normal Gain	Low Gain 1	Low Gain 2
1	0.676	1.688	2.25	N/A
2	0.708	1.415	1.89	
3N	0.423	0.862	1.15	
3B	0.423	0.862	1.15	
4	0.087	0.2174	0.29	0.29
5	0.0348	0.0696	0.0925	0.409
6	0.0313	0.0625	0.083	0.39
7	0.0299	0.0597	0.0795	0.332
8	0.0209	0.0417	0.0556	0.245
9	0.0159	0.0318	0.0424	0.265
10	N/A	$6.822 \times 10^{-3}$	N/A	N/A
11		$6.780 \times 10^{-3}$		
12		$6.590 \times 10^{-3}$		
13		$5.693 \times 10^{-3}$		
14		$5.225 \times 10^{-3}$		

El análisis visual y el correspondiente procesamiento de la imagen se llevó a cabo utilizando el software Envi 4.7. Con dicho procesamiento se generaron distintas composiciones RGB, cocientes de bandas y composiciones de cocientes con la finalidad de identificar zonas de alteración.

Las composiciones RGB y composiciones de cocientes realizados que se utilizaron para detectar la alteración hidrotermal son:

- 468
- 654
- 4/5 4/6 4/7

- 4/5 4/6 4/8
- 6/5 7/5 8/5

Estas combinaciones fueron propuestas en diversos trabajos, como es el caso de la combinación RGB 468 (Marquetti 2005) utilizada para delimitar zonas de alteración hidrotermal (Fig. 4). Mientras la combinación RGB 654 (Pérez *et al.* 2010) se utilizó para la identificación de alteración. Finalmente se utilizaron los cocientes de bandas en combinaciones RGB con la misma utilidad mencionada anteriormente, como por ejemplo los cocientes 4/5 4/6 4/7, 4/5 4/6 4/8 (Ninomiya 2004) y 6/5 7/5 8/5 (Marquetti 2005).

Los tipos de alteración se clasifican en base a sus asociaciones minerales, por lo tanto, los minerales que definen las diferentes alteraciones hidrotermales se exponen a continuación en la tabla Tabla 3:

*Tabla 3: Tipos de alteraciones hidrotermales y mineralogía característica (tomado Corbett and Leach, 1998).*

Tipos de alteración	Minerales Característicos
Potásica	Feldespatos K, Biotita ± (Cuarzo ± Magnetita)
Calco – Sódica	Carbonatos, Diopsido, Actinolita, Epidoto, Zeolitas (Wollastonita ±± Clorita ± Fosterita)
Propolítica	Clorita, Calcita, Epidoto (Albita ± Pirita).
Fílica	Cuarzo, sericita (Clorita ± Illita ± Pirita)
Argílica intermedia	Caolinita (Esmectita ± siderita)
Argílica avanzada	Cuarzo, Caolinita, Pirofilita (Alunita ± Jarosita).

Los minerales de alteración pueden ser identificados teniendo en cuenta las características de absorción en determinadas regiones del espectro, coincidentes con algunas bandas del sensor “ASTER”. Ninomiya (2004) utilizó índices para reforzar la respuesta de las áreas con minerales de alteración.

Uno de los índices utilizados fue el OH1a (Ninomiya 2004) que detecta montmorillonita, muscovita, sericita, illita y es definido por la siguiente ecuación aplicándole un realce lineal del 2%.

$$OHIa = \frac{\text{banda 4} \times \text{banda 4}}{\text{banda 6} \times \text{banda 6}}$$

También se confeccionó el índice de la alunita (Ninomiya 2004) que presenta una absorción muy fuerte en la banda 8, que a su vez se le aplicó un realce lineal del 2%.

$$ALI = \frac{\text{banda 7} \times \text{banda 7}}{\text{banda 5} \times \text{banda 8}}$$

Otro de los índices generados fue el de la calcita también utilizada en (Ninomiya 2004) definido por la siguiente ecuación con un realce lineal del 2%:

$$CI_{swir} = \frac{\text{banda 6} \times \text{banda 9}}{\text{banda 8} \times \text{banda 8}}$$

Finalmente se confeccionó un índice para detectar caolinita (Kalinowski *et al.* 2004) definido por el siguiente cociente con un realce lineal del 2%:

$$Cao = \frac{\text{banda 5}}{\text{banda 7}}$$

Una vez obtenidos los resultados mencionados anteriormente y los índices para detectar alteración, se aplicó un filtro de valor de pixel de imagen a partir de la herramienta *Density slice* contenida en el programa Envi 4.7. La finalidad de esta herramienta es filtrar valores de pixel, buscando aquellos valores en los que los minerales de alteración puedan ser identificados en base a sus picos de absorción. Al encontrar una aglomeración de 4 o 5 pixeles (abarcando aproximadamente un área de 100 m), se procedía a marcar una zona de potencial alteración hidrotermal de interés.

El carteo geológico preliminar se realizó utilizando el programa ArcGis y usando como base las composiciones obtenidas anteriormente, principalmente la combinación RGB 741, la cual mostraba los mejores contrastes para distinguir las diferentes litologías (Fig. 3). Se analizaron los diferentes colores de respuesta espectral y se delimitaron utilizando polígonos a los cuales se les asignó una serie de atributos que permitieran identificarlos y separarlos a fin de asimilarlos a una unidad litoestratigráfica conocida. A su vez, se identificaron lineamientos y fallas (regionales y locales) en los alrededores del Establecimiento ganadero Don Raúl, por las cuales, los fluidos hidrotermales pueden ser encausados (Sibson 1987). Además, las fallas podrían actuar como canales para la circulación de fluidos hidrotermales. Con la información que se generó a partir del carteo y procesamiento de imágenes, se

seleccionaron las posibles zonas con alteración hidrotermal.

## **4.2 Trabajo de campo**

En el trabajo de campo se controló y ajustó el mapeo de las unidades geológicas estudiadas en gabinete. Posteriormente se visitaron cinco de los sitios definidos con potencial alteración hidrotermal donde se realizó la toma de muestra para completar la caracterización de los blancos de exploración. Además, se documentaron las unidades mediante fotos de afloramiento y se georeferenciaron con GPS los datos relevados en el campo.

## **4.3 Trabajos de gabinete posteriores al campo**

En el trabajo posterior al campo, se actualizó la cartografía geológica preliminar controlando las unidades litoestratigráficas definidas en la etapa previa. Además, se incluyeron los datos estructurales recolectados en el software ArcGIS. Se describieron las cinco muestras recolectadas en los puntos de interés, realizando un análisis en muestra de mano con lupa binocular y de mano, perteneciente al CVM. De estas mismas, se elaboraron cinco secciones delgadas, las cuales, fueron realizadas en el Instituto Superior de Correlación Geológicas de Tucumán (INSUGEO) y se describieron bajo un microscopio petrográfico con la finalidad de establecer la/s paragénesis de alteración.

Finalmente, con la interpretación de la teledetección de la alteración hidrotermal y el análisis petrográfico haciendo principal enfoque a la alteración hidrotermal de las muestras recolectadas durante la campaña, se confeccioné un mapa de alteraciones para el establecimiento ganadero Don Raúl y sus alrededores.

## 5 Resultados

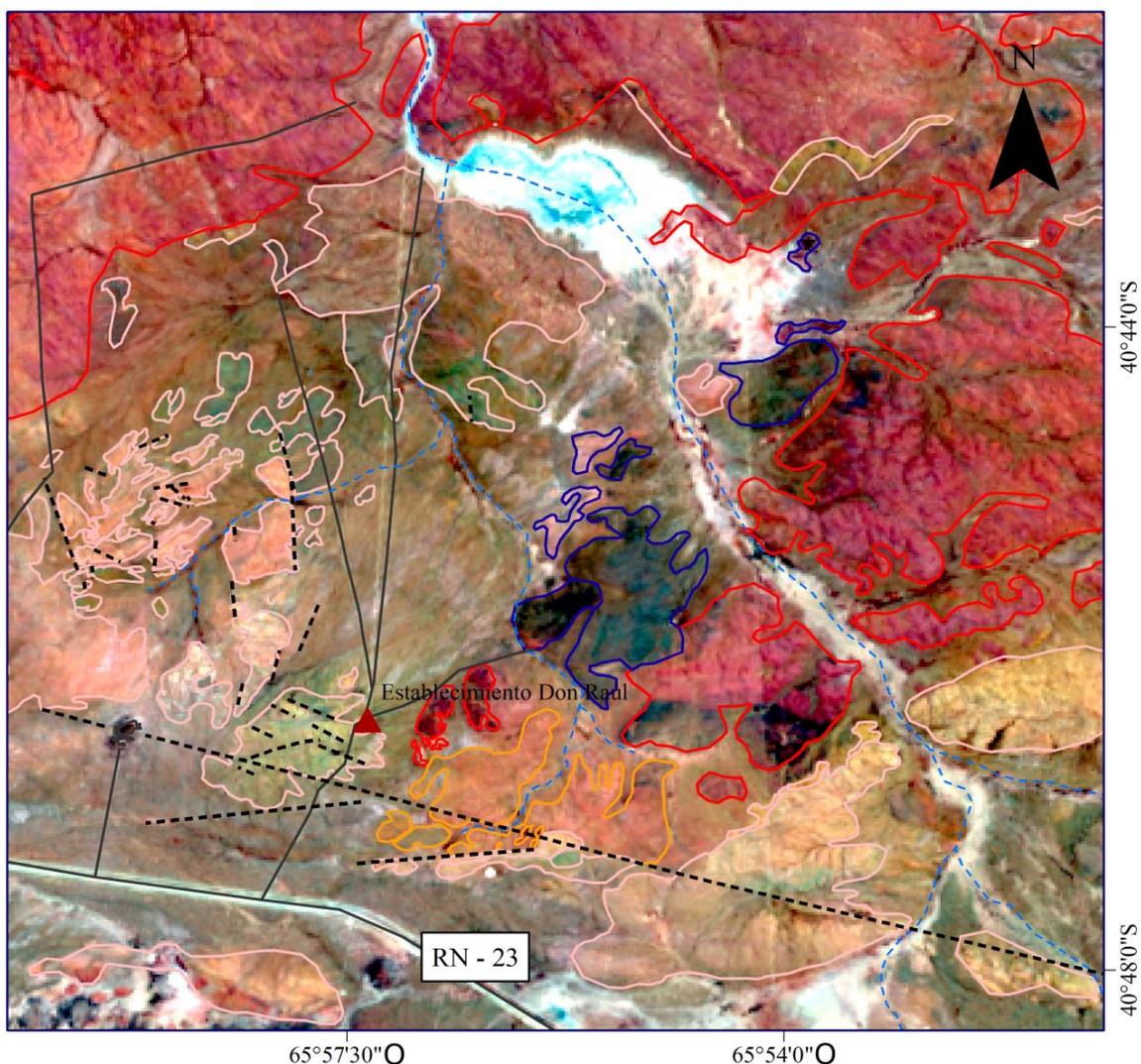
### 5.1 Análisis visual de las imágenes ASTER

Para llevar a cabo el análisis visual y lograr identificar y correlacionar las litologías del establecimiento ganadero Don Raúl, se utilizó la combinación RGB 741 (Fig 3).

Los distintos colores que se observan en la figura 3 corresponden a las respuestas espectrales de los minerales que constituyen las rocas, y por lo tanto, al tipo de roca resultante. De esta forma, considerando las unidades litoestratigráficas aflorantes en la zona de estudio (Véase tabla 4), es posible establecer una correlación entre la respuesta espectral en una combinación de bandas ASTER RGB y las unidades litoestratigráficas aflorantes en la zona de estudio. Estas interpretaciones fueron realizadas en base a las referencias bibliográficas y posterior comprobación de campo.

<b>Unidades litoestratigráficas</b>	<b>Color de respuesta espectral</b>
Formación Nahuel Niyeu	Rojo / Azul de tonalidad oscura
Complejo Volcánico Marifil	Rosado Verde de tonalidad clara Marrón de tonalidad clara
Granito Don Raúl	Naranja
Formación Somuncura	Negro
Formación Puesto Piris	Azul de tonalidad clara
Cubierta sedimentaria	Gris

Tabla 4: Interpretación de respuestas espectrales para las unidades litoestratigráficas observadas en la combinación ASTER RGB 741.



4 Km

### Unidades Litoestratigráficas

- Formación Somuncura
- Complejo Volcánico Marifil
- Formación Puesto Piris
- Granito Don Raúl
- Formación Nahuel Niyeu

**Sistema de proyección UTM**  
**Datum - Sistema geodésico 1984 (WGS 84)**  
**Imagen de fondo ASTER: RGB 741**

### Referencias Cartográficas

- Cursos de agua intermitentes
- Caminos
- Fallas inferidas
- ▲ Establecimiento Don Raúl



Figura 3: Combinación ASTER RGB 741 de la zona de estudio, utilizada para realizar la identificación de las unidades litoestratigráficas

## 5.2 Identificación de la alteración hidrotermal

Con el objetivo de establecer blancos de potenciales zonas con alteración hidrotermal se realizaron diferentes combinaciones de bandas, cocientes de bandas e índices para la identificación de minerales de alteración.

Al considerar la combinación de bandas ASTER RGB 468, los signos de alteración hidrotermal se observan en color magenta y se encuentran remarcados con líneas punteadas de color negro (Fig. 4).

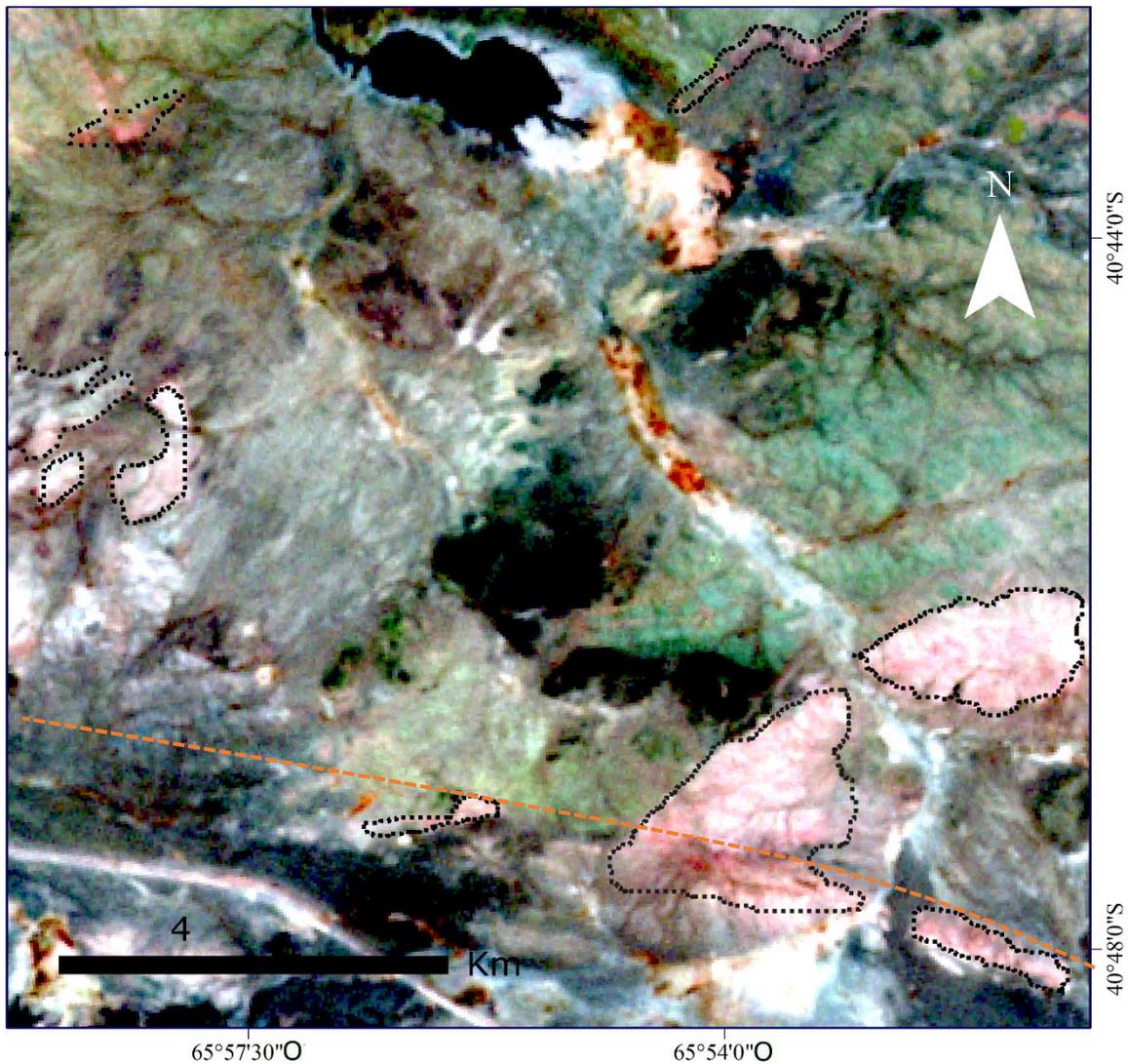


Figura 4: Combinación ASTER RGB 468, la respuesta espectral de minerales arcillosos puede visualizarse en colores magenta. En las líneas punteadas negras se marcan dichos sectores. En línea punteada naranja lineamiento E-O.

Para complementar la información obtenida se realizó la combinación de bandas ASTER RGB 654 (Fig. 5), donde la alteración hidrotermal se ve reflejada de color azul y celeste con tonalidades claras.

Como se puede observar en la Fig. 5, los cursos de agua intermitentes y caminos presentan los mismos colores de respuesta espectral que la alteración hidrotermal. Esto se debe por la respuesta espectral de los materiales que componen los mismos. La combinación aditiva de colores exhibe un color determinado según las bandas seleccionadas en cada canal RGB y la reflectancia de los materiales en dichos canales.

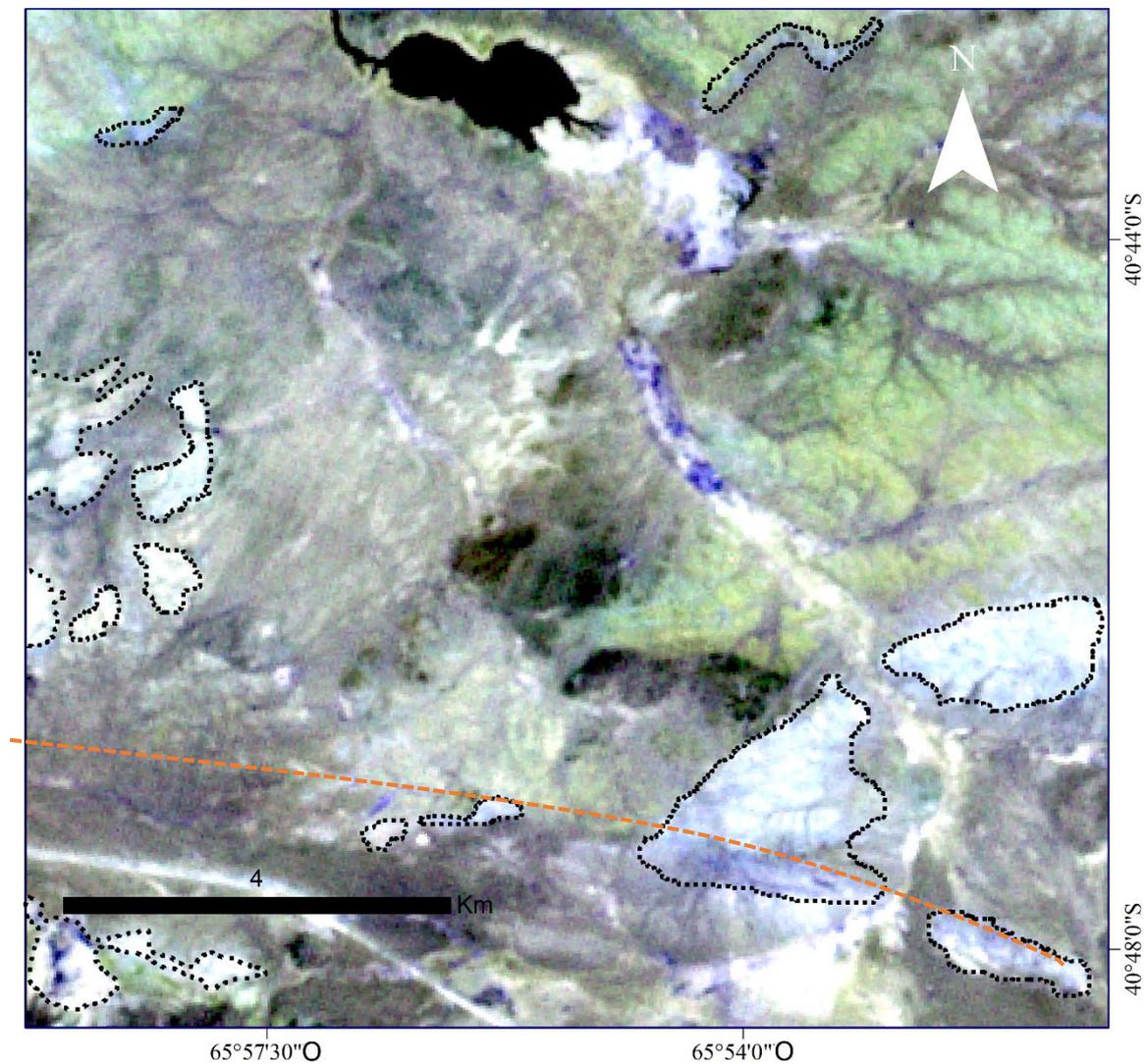


Figura 5: Combinación ASTER RGB 654, donde la teledetección de minerales arcillosos se puede apreciar en colores azules y azules con tonalidades claras remarcadas con líneas punteadas negras. En línea punteada naranja lineamiento E-O.

Las combinaciones de bandas ASTER antes mencionadas, permitieron detectar la presencia de minerales arcillosos típicos de alteración hidrotermal, en la zona. Esto se debe

a que las arcillas presentan un fuerte pico de absorción en las bandas 5, 6 e incluso 8 del sensor ASTER, debido a las vibraciones existentes en el enlace Al – OH de las mismas (Hunt y Salisbury 1970, Pontual *et al.* 1997, Pérez *et al.* 2010). Es por eso que las firmas espectrales de los minerales de alteración hidrotermal tienen bandas de absorción características en las bandas de SWIR como se puede observar a continuación en la figura 6.

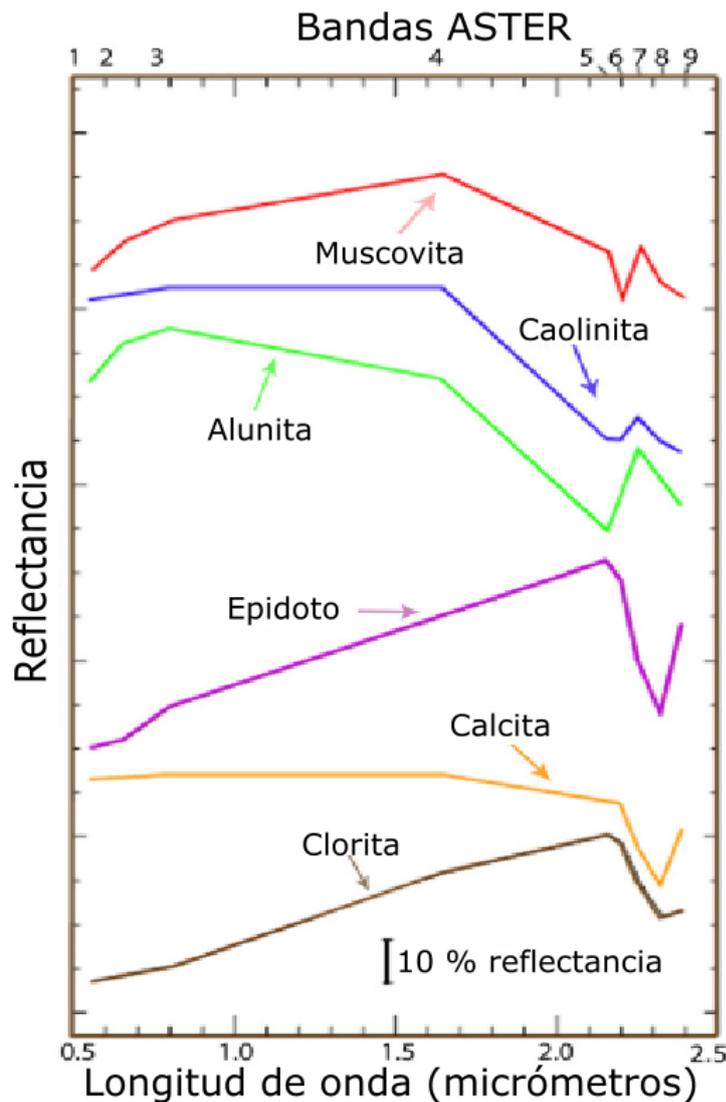


Figura 6: Firmas espectrales de minerales de alteración. Tomado de Pour y Hashim 2011.

La alunita y pirofilita presentan picos de absorción de 2,165μm (banda 5), mientras que la calcita y la clorita presentan picos de absorción a los 2,35μm (banda 8). La caolinita y dickita tienen doble pico de absorción uno a los 2,175μm y otro respectivamente a los

2,21 $\mu\text{m}$  (banda 5 y 6), mientras que la muscovita, montmorillonita, illita y esmectita presentan picos de absorción a los 2,20 $\mu\text{m}$  (banda 6).

Una vez establecidas las potenciales zonas con alteración hidrotermal se aplicaron los cocientes de bandas e índices de alteración a fin de acotar con mayor precisión el desarrollo y distribución areal de la alteración hidrotermal. Se confeccionaron al menos tres cocientes de bandas ASTER distintos para contrastar la información obtenida. Por ejemplo, los cociente de bandas ASTER en combinación RGB: 4/5 4/6 4/7, los blancos de alteración aparecen de color blanco o blanco con tonalidades verdosas como se aprecia en la Fig. 7.



Figura 7: Combinación de cocientes ASTER RGB 4/5 4/6 4/7, donde la alteración hidrotermal se ve en color blanco y blanco con tonalidades verdes y está marcada con líneas punteadas de color rojo. En línea punteada negra, lineamiento E-O.

Por otra parte, la combinación de cocientes ASTER RGB 6/5 7/5 8/5 (Fig. 8) evidencia las zonas con alteración en color verde – cian. Las alteraciones filicas son observadas en color verde, mientras que las alteraciones argílicas tienen una respuesta espectral de color cian (Marchetti 2005). Por otro lado, las respuestas de color rojo corresponden a la alteración propilítica. Sin embargo dicha respuesta, es interpretada como la mineralogía principal del basamento metamórfico (biotita, muscovita, clorita, cuarzo, plagioclasa, cordierita, andalucita, etc) y no corresponde a alteración de tipo hidrotermal como puede observarse en las Figs. 5, 6, 7, 9.

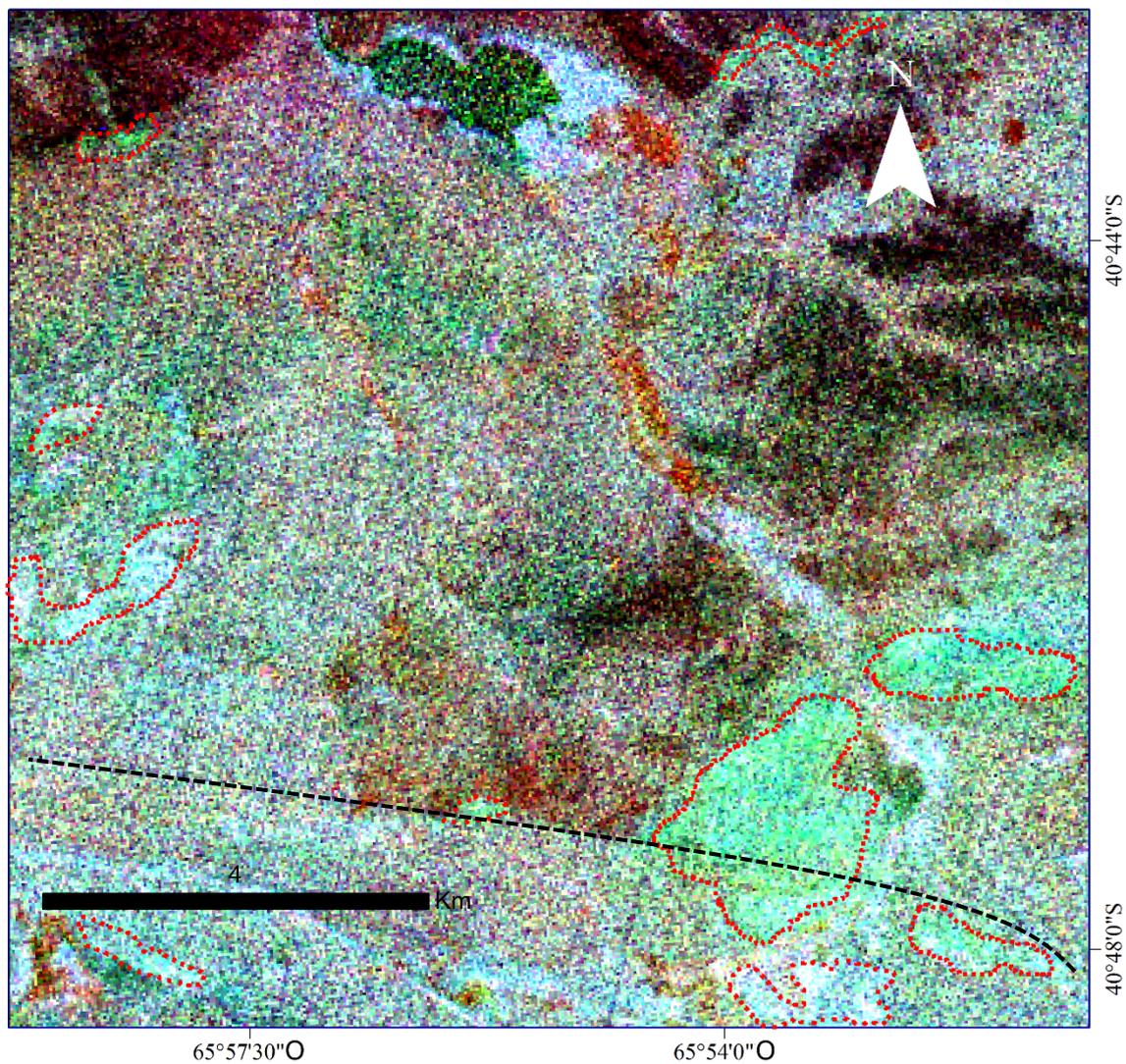


Figura 8: Combinación de cocientes ASTER RGB 6/5 7/5 8/5, donde las evidencias de minerales arcillosos se ven de color verde y cian. En líneas punteadas rojas se marcan las zonas con alteración hidrotermal. En línea punteada negra, lineamiento E-O.

Finalmente, los cociente de bandas ASTER RGB 4/5 4/6 4/8 (Fig. 9) tienen una respuesta espectral con colores blancos, amarillos y verdes con tonalidades claras para las zonas con alteración hidrotermal (Ninomiya, 2004). Existen zonas al norte, con una respuesta espectral similar que no fueron marcadas, debido a que son cursos de aguas intermitentes.

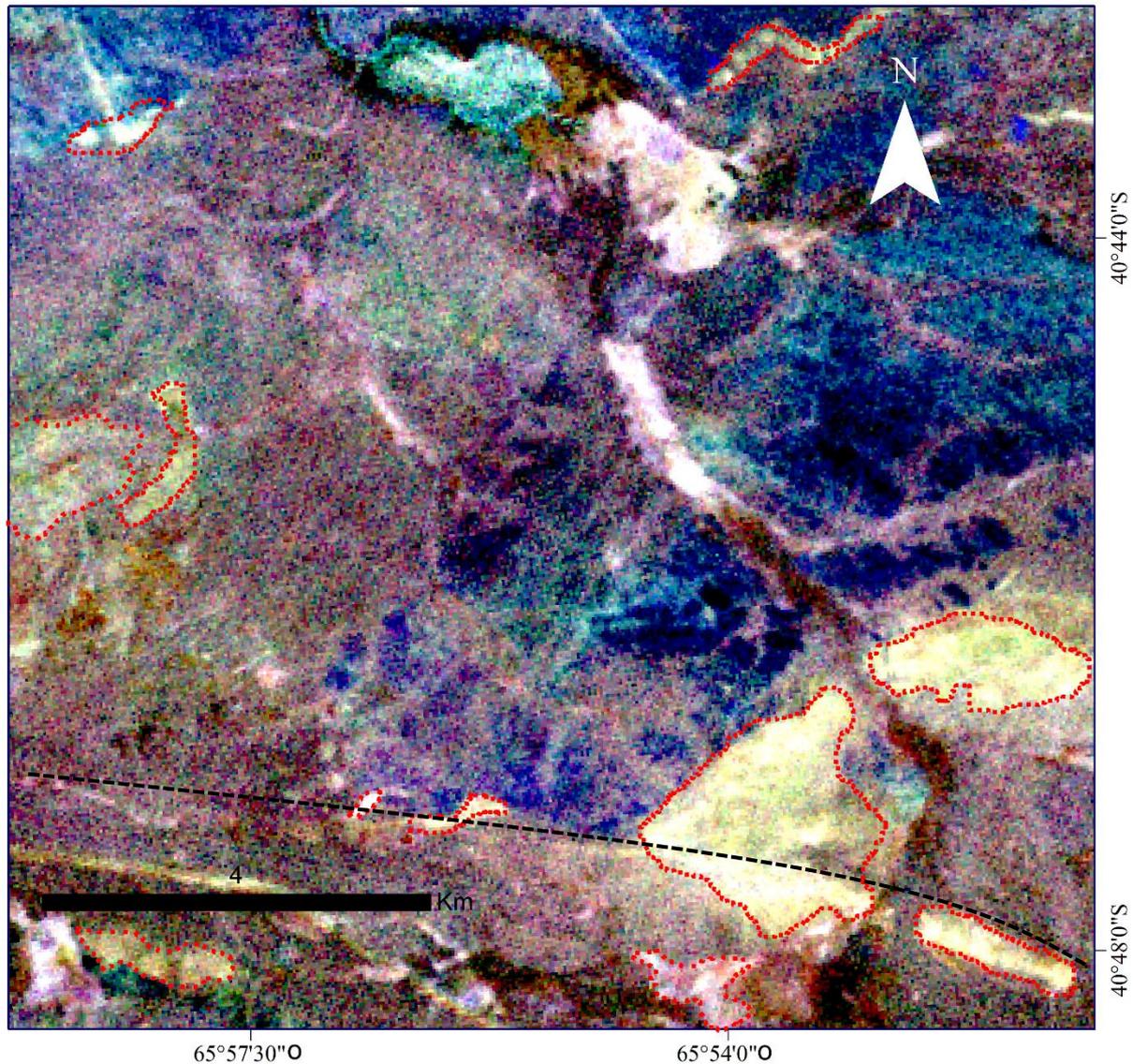


Figura 9: Combinación de cocientes ASTER RGB 4/5 4/6 4/8, donde la teledetección de minerales arcillosos se ve de color blanco y amarillos con tonalidades claras. Las líneas punteadas rojas marcan zonas con alteración hidrotermal. En línea punteada negra, lineamiento E-O. Los sectores blancos no marcados al norte del área corresponden a cursos de aguas intermitentes.

En cuanto a los índices utilizados para reforzar la respuesta de las zonas con alteración hidrotermal, se realizó el índice de OH1a que detecta principalmente montmorillonita, muscovita, sericita e illita (Fig. 10), debido a que el cociente realza el pico

de absorción en la banda 6. La respuesta obtenida para el índice OHIa se encuentra realizada mediante el comando *density slice* y se recomienda utilizarlo en rangos de 4 – 4,5 (Ninomiya 2004).

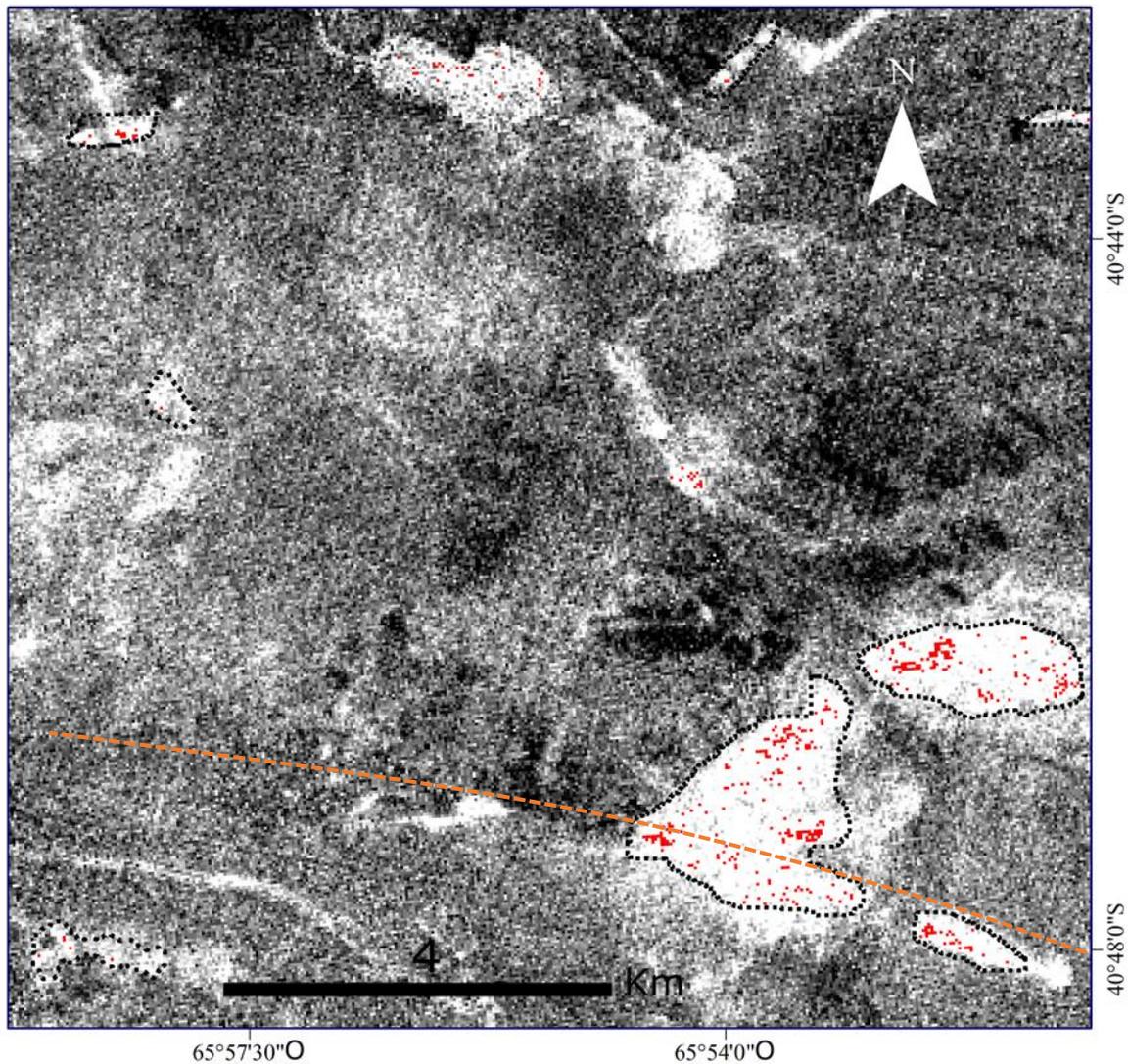


Figura 10: Índice de OHIa (Ninomiya 2004) donde se observa la distribución de los valores del mismo, resaltando en rojo los valores de los píxeles que se encuentran en un rango entre los 4 – 4,5, utilizado para la teledetección de montmorillonita, muscovita, sericita, illita. Las líneas punteadas negras marcan las zonas con posible alteración hidrotermal en la zona de estudio. En línea punteada naranja, lineamiento E-O. Los sectores blancos no marcados al norte del área corresponden a cursos de aguas intermitentes.

Las zonas con respuesta espectral coincidentes con alunita son reconocidas al sureste de la zona de estudio. Sin embargo, también puede detectarse en el margen noreste y noroeste (Fig. 11).

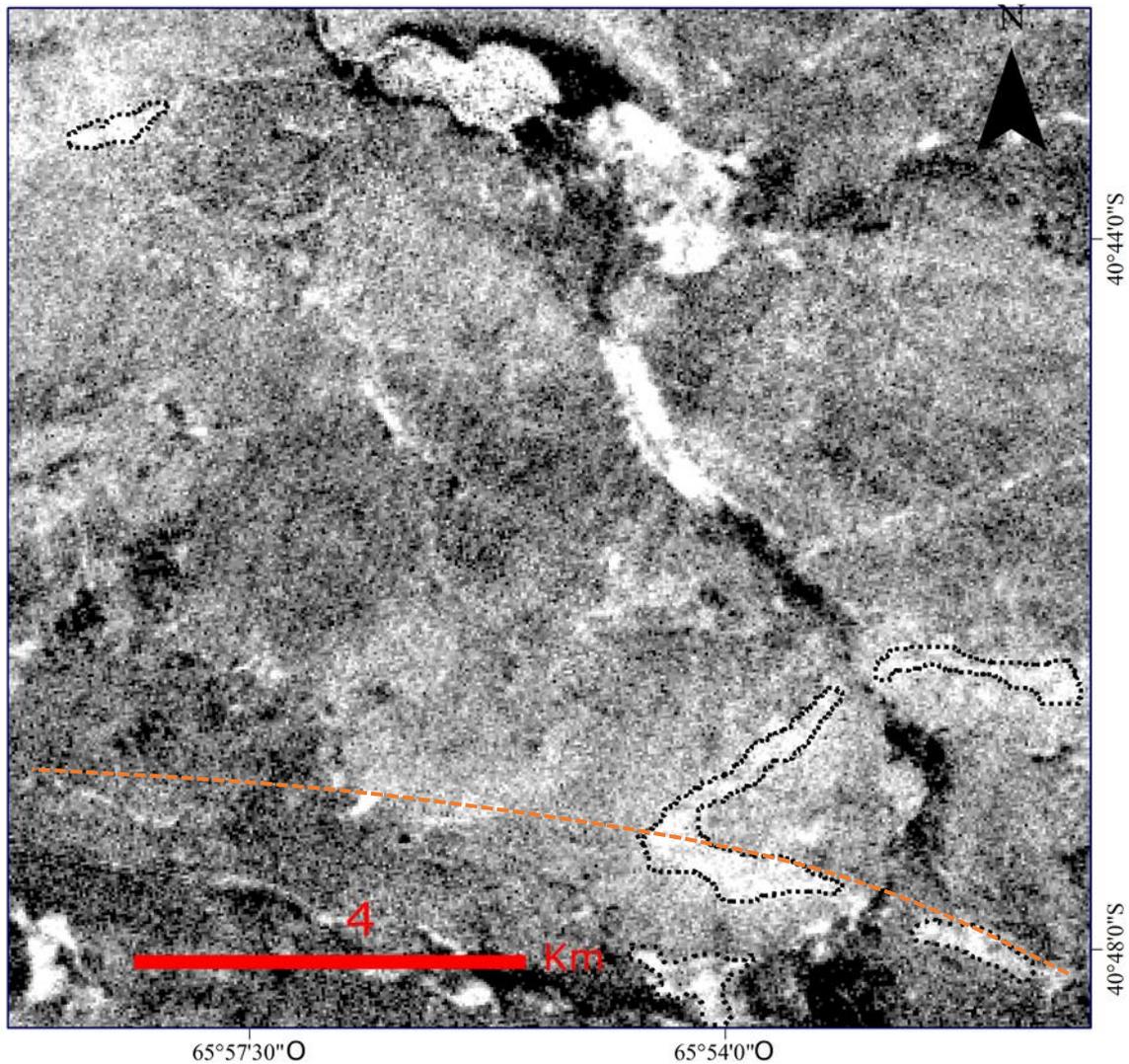


Figura 11: Índice para detectar Alunita, donde se observa la distribución con respuesta espectral favorable a Alunita, resaltando en líneas punteadas de color negro las zonas con potencial teledetección de dicho mineral en la zona de estudio. En línea punteada naranja, lineamiento E-O. Los sectores blancos no marcados al norte del área corresponden a cursos de aguas intermitentes.

El índice de Calcita (Ninomiya 2004) se muestra en la figura 12. En dicha figura el color negro representa la ausencia de Calcita en tanto que los colores blancos y grises indican un contenido variable de dicho mineral.

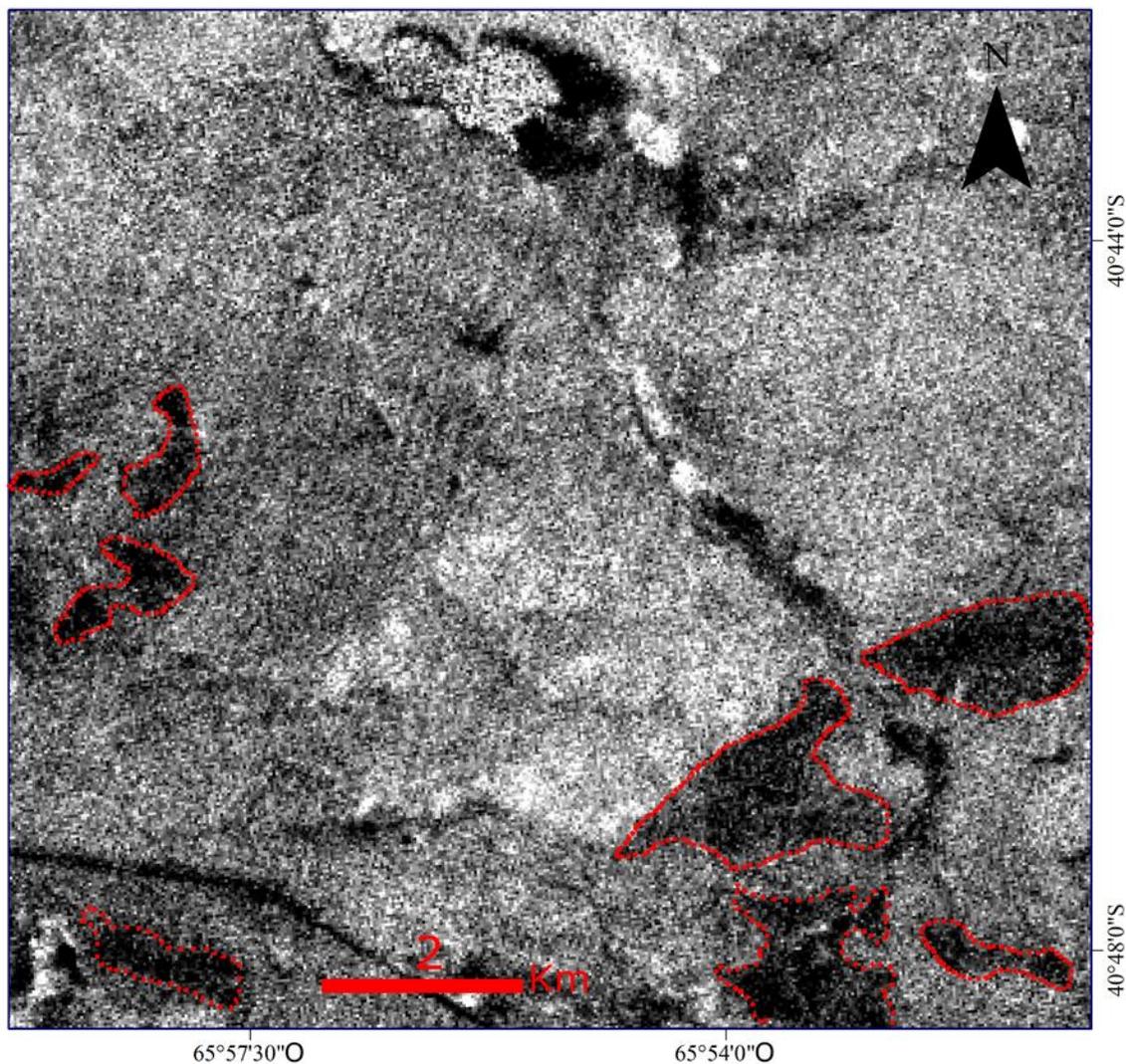
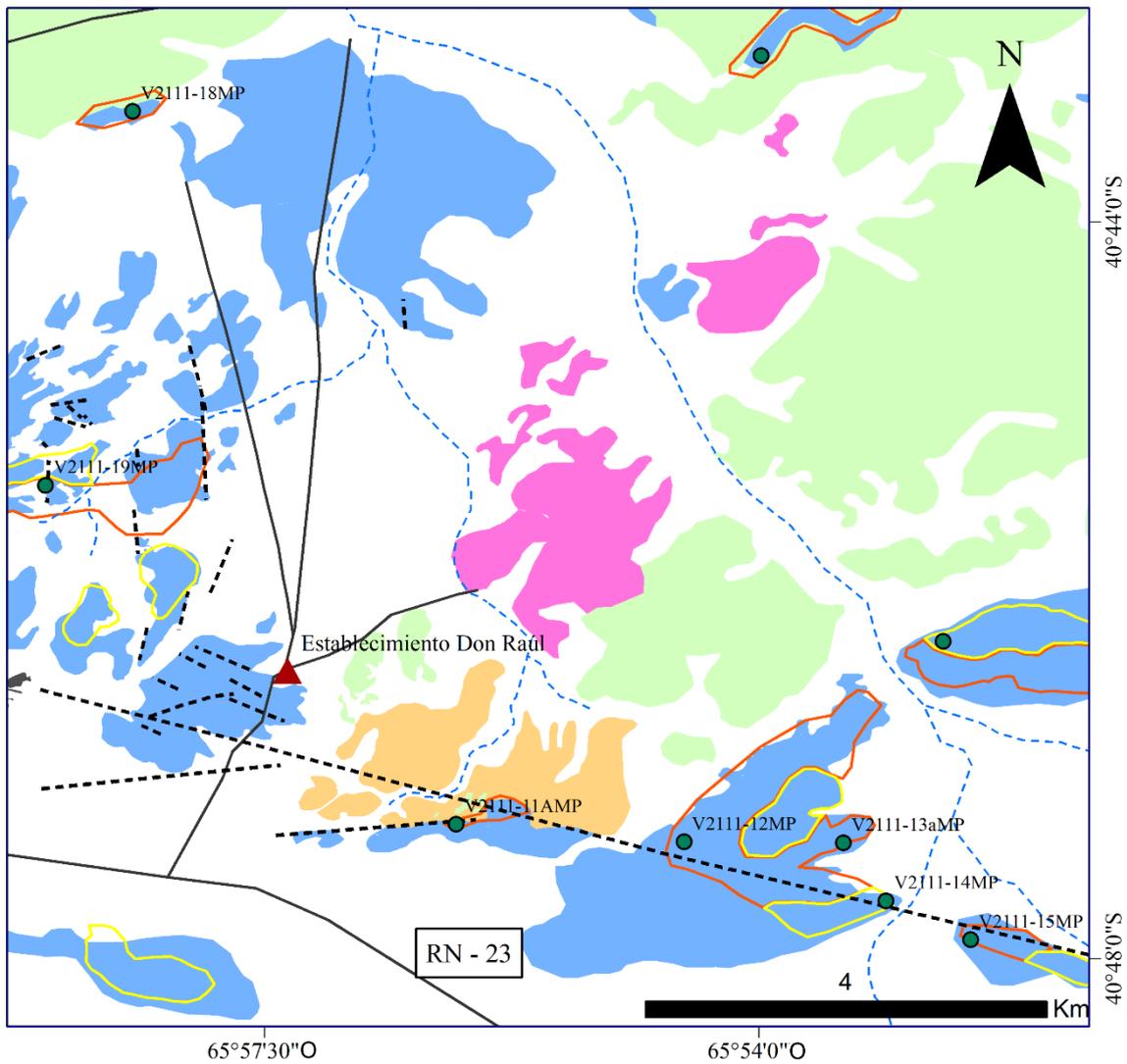


Figura 12: Índice para detectar Calcita. Las zonas remarcadas con líneas punteadas rojas representan la ausencia de teledetección espectral de dicho mineral en la zona de estudio. Los sectores negros no marcados al norte del área corresponden a cursos de aguas intermitentes.

A modo de síntesis de la información generada a partir de la identificación de la alteración hidrotermal, se confeccionó un mapa de alteración (Fig. 13). En este mapa se puede observar que las principales zonas de alteración hidrotermal corresponden a exposiciones de rocas del CVM, que en ocasiones muestran una relación con una falla en sentido este - oeste. Las alteraciones fílicas se encuentran marcadas con polígonos rojos y las alteraciones argílicas en polígonos amarillos.



### Unidades Litoestratigráficas

- Depósitos Modernos
- Formación Somuncura
- Complejo Volcánico Marifil
- Formación Puesto Piris
- Granito Don Raúl
- Formación Nahuel Niyeu

### Alteración

- Alteración Filica
- Alteración Argilica

**Sistema de proyección UTM**  
**Datum - Sistema geodésico 1984 (WGS 84)**

### Referencias Cartográficas

- Cursos de agua intermitentes
- Caminos
- Fallas inferidas
- Puntos de control
- Establecimiento Don Raúl



Figura 13: Mapa de alteración del Complejo Volcánico Marifil en los alrededores del establecimiento ganadero Don Raúl. Los círculos verdes representan los puntos de muestreo marcados en base a las fotointerpretaciones realizadas mediante las combinaciones ASTER RGB, cocientes ASTER e índices mostrados previamente.

Las respuestas espectrales observadas en las composiciones RGB y las composiciones RGB de cocientes se muestra en la tabla 5. Dicha tabla sintetiza y define de manera aproximada los tipos de alteración hidrotermal que se esperan encontrar en la zona de estudio al igual que la mineralogía asociada. En base a estos análisis y fotointerpretaciones se lograron reconocer dos tipos principales de posibles alteraciones hidrotermales en la zona de trabajo, siendo éstas Fílica y Argílica.

Tabla 5: Respuestas espectrales RGB de las composiciones realizadas.

	RGB 468	RGB 4/5 4/6 4/7	RGB 4/5 4/6 4/8	RGB 6/5 7/5 8/5	Mineralogía
Alteración Fílica	Color Magenta	Color blanco y verde de tonalidad clara	Color Blanco y amarillo con tonalidades claras	Color verde	Cuarzo, Mica blanca, Pirita, Illita
Alteración Argílica	Color Magenta	Color blanco y verde de tonalidad clara	Color blanco y amarillo con tonalidades claras	Color cian	Caolinita, Alunita, Illita, Esmeclita.

Las alteraciones fílicas y argílicas detectadas en las proximidades del área de estudio se sitúan en los afloramientos del CVM como se muestra en la Figura 13. Estas alteraciones probablemente se encuentren vinculadas a una falla regional E-O, marcada sobre la base del mapa con expansiones de la misma hacia el norte, posiblemente asociado a fallas que no se encuentran aflorando.

### 5.3 Análisis Petrográfico

El análisis mineralógico-textural se llevó a cabo en 5 muestras de diferentes litologías. La toma de muestras fue realizada en base a las respuestas espectrales obtenidas, donde se buscaba la aglomeración de píxeles mediante la función *density slice* utilizado en el índice OHIa (Fig 10) que resalta los minerales arcillosos. Esto permitió tener un rango de movimiento de 100m a la redonda del punto GPS. Una vez localizado el punto seleccionado se muestreo la zona que presentaba mayor alteración evidencia de alteración hidrotermal, como por ejemplo alteraciones pervasivas de coloración verde y rocas de composición

riolítica con intensa silicificación (Fig. 14).

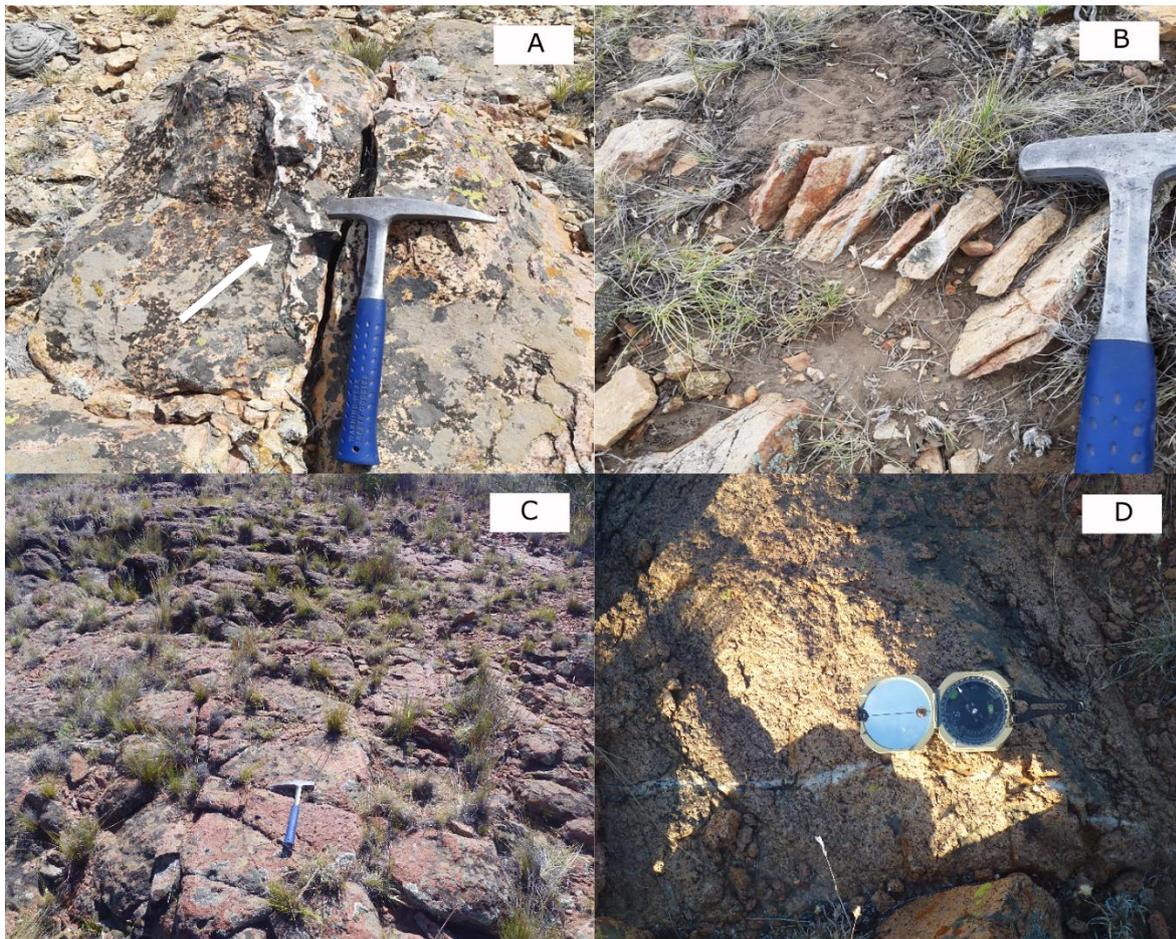


Figura 14. Fotografías de campo correspondientes a los afloramientos de las zonas con alteración hidrotermal. A. Vetilleo de cuarzo en lava riolítica silicificada perteneciente al CVM. B. Vetilleo de cuarzo en lava riolítica silicificada perteneciente al CVM. C. Intrusivo riolítico perteneciente al CVM (Muestra V2111-18MP). D. Detalle del intrusivo riolítico con presencia de vetilla de cuarzo afectada por fracturas verticales.

Dentro de los blancos de alteración se reconocieron dos tipos litológicos, rocas piroclásticas y rocas lávicas. Ambos tipos litológicos corresponden al CVM.

Dentro de las rocas piroclásticas se identificaron tobas lapillíticas de cristales y tobas lapillíticas vítreas (Fig. 15). Las mismas presentan texturas fragmentales, texturas eutaxíticas dadas por la orientación de los *fiammes* y de desvitrificación de tipo esferulítica. Son característicos los cristaloclastos de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y escasa muscovita. Los fragmentos líticos son principalmente de rocas volcánicas ácidas (riolitas) y de rocas metamórficas (filitas) con tamaños variables, generalmente mayores a 1cm. Dentro de los vitroclastos se encontraron esferulitas esféricas, fragmentos pumíceos que aún conservan su textura microvesicular y en otras ocasiones los mismos están aplastados (*fiammes*) compuestos por vidrio y cristales

muy pequeños de cuarzo e incluso algunos se observan sericitizados. Los mismos presentan coloraciones marrones claras e incluso con tonalidades oscuras (Fig. 16). Todos estos componentes generalmente se encuentran inmersos en una matriz de grano muy fino con texturas de flujo compuesto principalmente de cuarzo + sericita.

Los cristaloclastos de feldespato alcalino se encuentran argilizados. La matriz de estas rocas presenta una paragénesis de alteración definida por cuarzo + sericita + argilominerales con pirita diseminada. Algunos fragmentos líticos metamórficos también contienen argilominerales y carbonatos.



Figura 15. Fotografía de las rocas piroclásticas alteradas en muestra de mano correspondientes a tobas lapillíticas vítreas de composición riolítica (Punto de muestreo V2111 – 12DMP en Fig. 21).

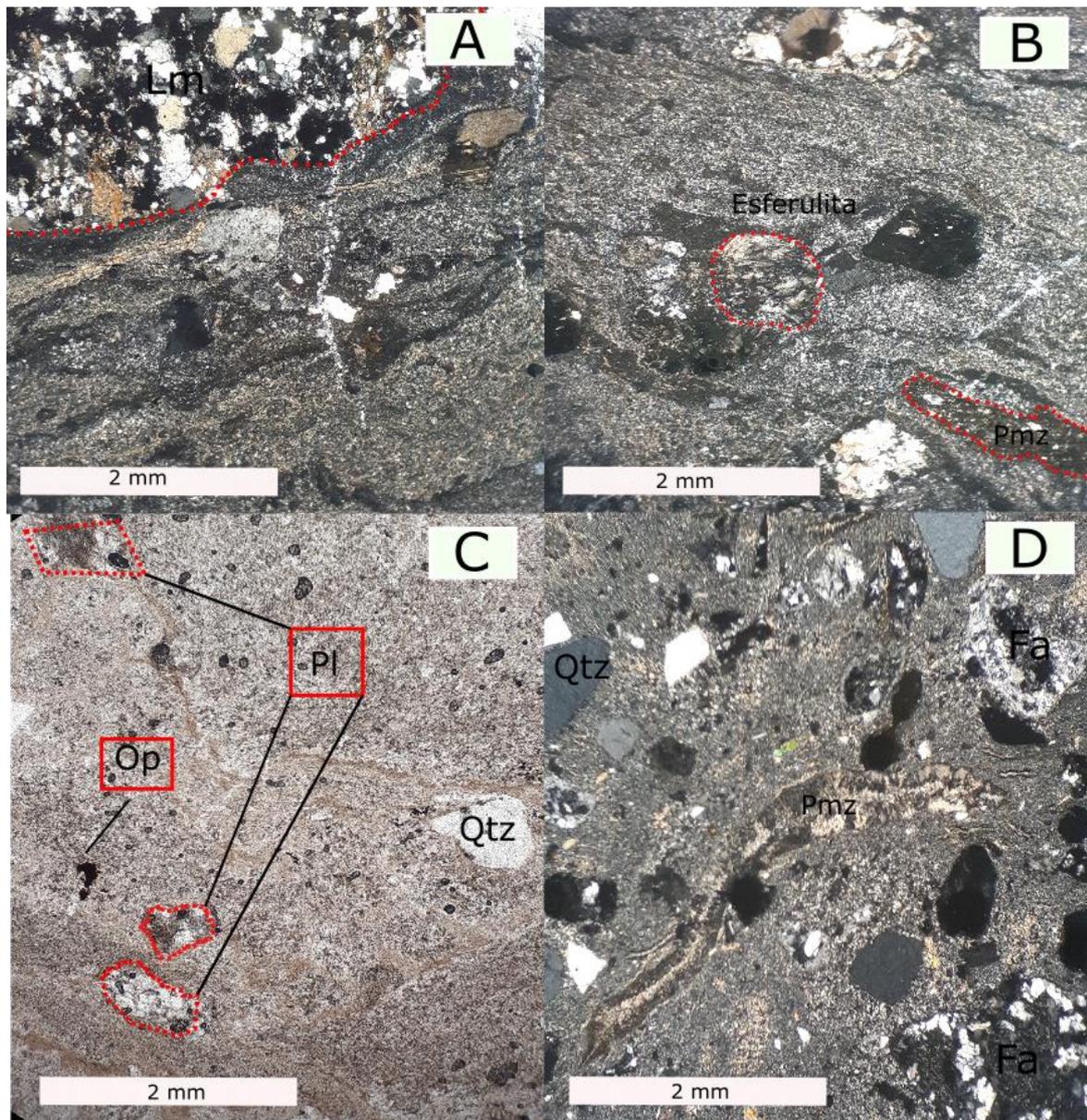


Figura 16. Fotografías a nicols cruzados A – B – D, donde se puede observar las texturas eutaxíticas (Pmz) y esferulíticas de las rocas piroclásticas, además de observarse los feldspatos alterados (Fa) a caolinita y los líticos metamórficos (Lm). Fotografías a nicols paralelos C, se observa los cristaloclastos de plagioclasas alterados (Pl), cristales opacos (Op) y de cuarzo (Qtz).

En cuanto a las rocas lávicas alteradas, estas se encuentran conformadas por mantos de lava y cuerpos subvolcánicos de composición riolítica. Las mismas se caracterizan por presentar una intensa silicificación. Se destaca la presencia de un cuerpo subvolcánico con evidencias de alteración hidrotermal, determinadas en el análisis con sensores remotos. Este intrusivo es elongado con rumbo NO-SE, destacando en el paisaje por su morfología positiva (Fig. 14 C - D). Se compone de una riolita color marrón de

tonalidad clara con textura porfírica y contiene vetillas de cuarzo de hasta 1 cm. Los fenocristales en muestra de mano son de cuarzo, feldespatos potásicos con hábito tabular de color rosado. Estos últimos presentan una alteración selectiva que deja como resultado una coloración verde de aspecto terroso sobre los cristales (Fig. 17).



Figura 17. Fotografía del intrusivo alterado en muestra de mano de composición riolítica (Punto de muestreo V2111 – 18MP en Fig. 21).

En sección delgada los fenocristales de cuarzo en su mayoría son anhedrales y se encuentran fracturados. En cuanto a los fenocristales de feldespato potásico están completamente argilizados a sericita. Se identificaron cristales de magnetita que son opacos y se encuentran diseminados a escala microscópica por toda la sección. La textura de la pasta es felsítica, con agregados muy fino de cuarzo, feldespato y argilominerales de bajo color de interferencia (Fig. 18). Por otro lado, las vetillas observadas en dicha sección están rellenas con cuarzo y argilominerales que reemplazan selectivamente los feldespatos.

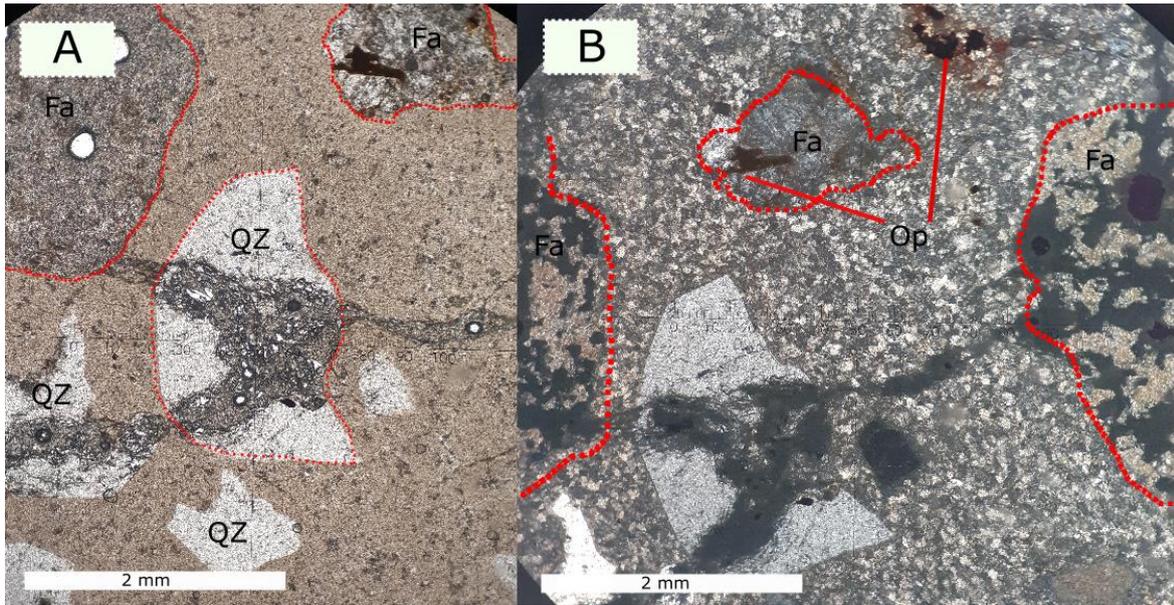


Figura 18. Fotografía de la muestra V2111-18MP a nicols paralelos A, se observan fenocristales fracturados y con bordes subangulosos de cuarzo (Qz) y fenocristales de feldspatos completamente argilizados (Fa) a sericita en una matriz de textura felsítica con presencia de cristales opacos con oxidación y argilominerales. B. Idem a imagen A.

Un caso especial es la muestra V2111-11MP, es una brecha que aflora paralelamente a una zona de falla de rumbo O-E (Fig. 3). La roca es una brecha de tipo *jigsaw* de color gris con tonalidades verdosas, rojizas y además, la misma se encuentra silicificada compuesta por fragmentos angulosos y sub redondeados de riolitas, cementados por un cuarzo de color gris macizo (Fig. 19).



Figura 19. Fotografía de la brecha de falla silicificada en muestra de mano (Punto de muestreo V2111-11MP en la Fig. 21).

En el análisis microscópico, la muestra presenta fragmentos subangulosos compuestos por un mosaico de grano muy fino de cuarzo, minerales arcillosos y cristales opacos con halos de oxidación, cementados por cuarzo microcristalino (Fig. 20; A – B). Se identificaron al menos 4 pulsos de cuarzo rellenando fracturas. El primer y segundo pulso de cuarzo identificado presenta texturas de mosaico muy fino y rellenos opacos (Fig. 20 D), mientras que el tercer pulso de cuarzo, desplaza de manera dextral los anteriores mencionados. Este pulso presenta una textura de cuarzo *comb* creciendo de manera perpendicular a las paredes de la fractura. Finalmente, el último pulso de cuarzo tiene una textura microcristalina similar a la del primer pulso (Fig. 20; C – D).

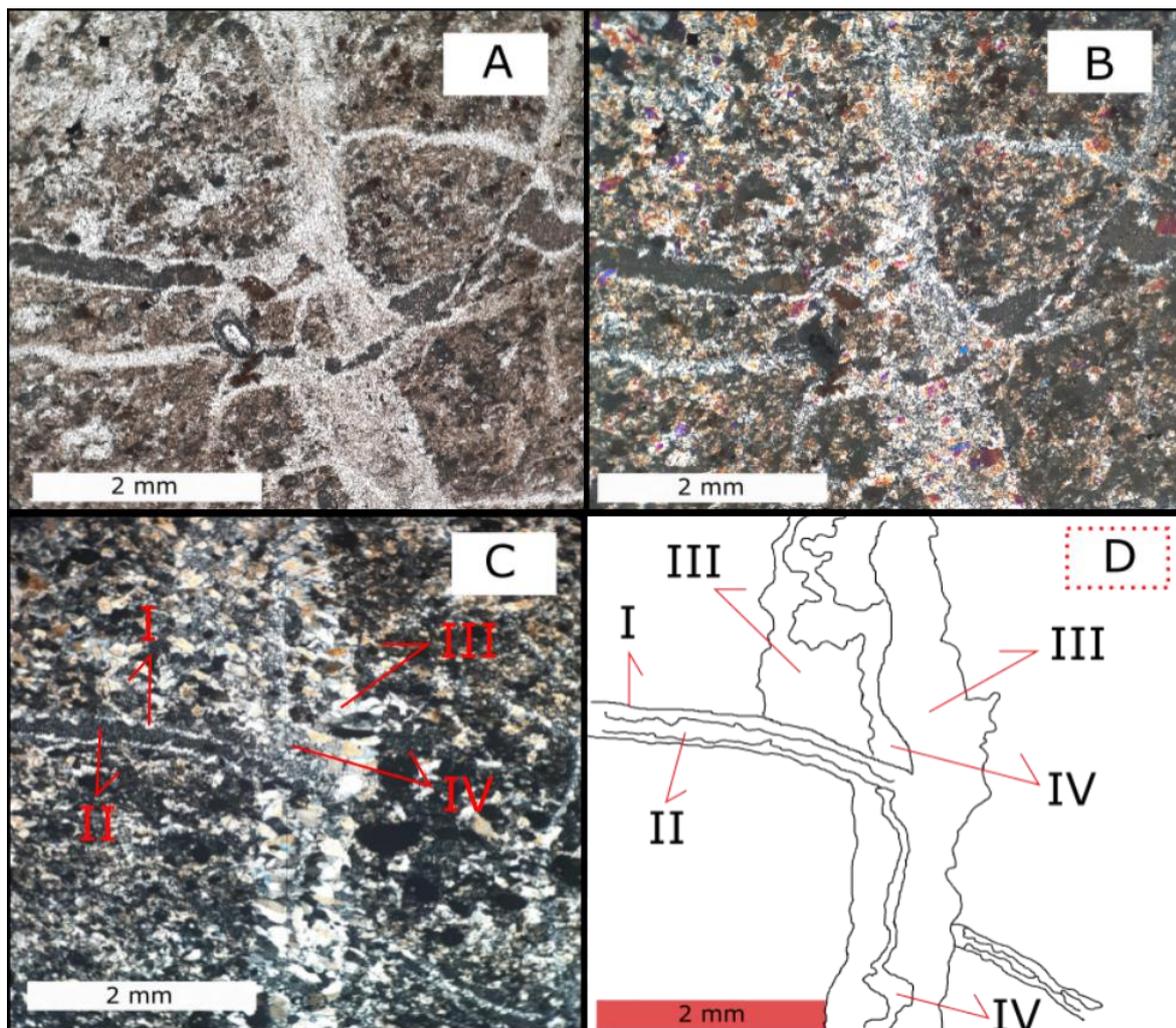
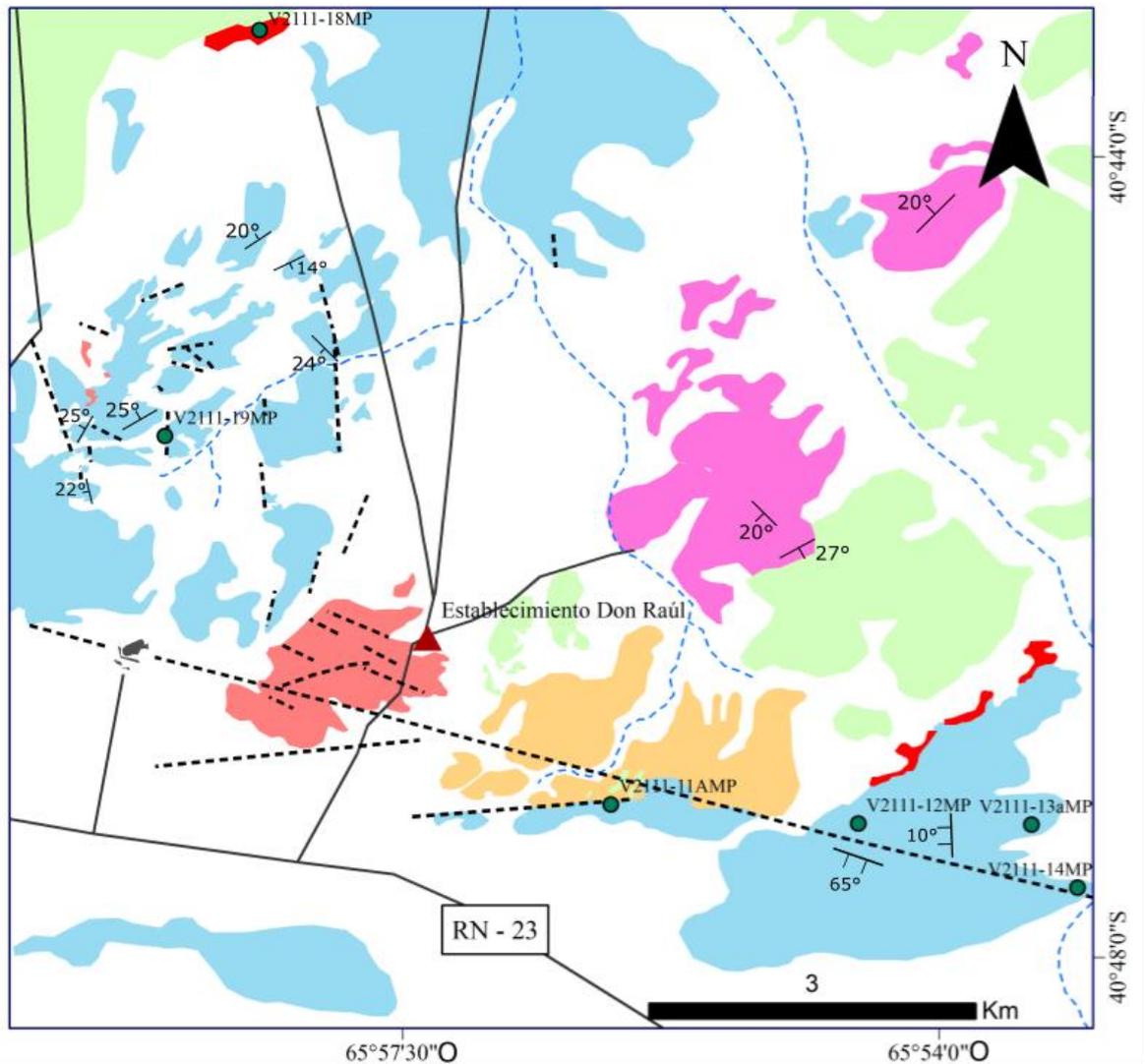


Figura 20. Imagen a nicoles paralelos A, se observan cristales de grano muy fino de cuarzo, opacos con oxidación y argilominerales, además se identificaron diversas fracturas rellenas de cuarzo y opacos. Imagen a nicoles cruzados B - C, se identificaron cristales de cuarzo de grano muy fino, los rellenos de las fracturas es principalmente de cuarzo con opacos en algunas ocasiones. D. Esquema que muestra los pulsos de cuarzo descritos para las venillas de cuarzo mostradas en la fotomicrografía de la Fig. 20 C.

#### 5.4 Cartografía geológica en detalle

Sobre la base del análisis espectral de los datos ASTER y el análisis visual de las imágenes realizado (Fig. 4) y en el control de campo, se elaboró un mapa geológico de detalle del Establecimiento Ganadero Don Raúl y sus alrededores (Fig. 21).



### Unidades Litoestratigráficas

- Depósitos modernos
  - Formación Somuncura
  - Lavas riolíticas
  - Intrusivo riolítico
  - Rocas volcániclasticas
  - Formación Puesto Piris
  - Granito Don Raúl
  - Formación Nahuel Niyeu
- } CVM

### Referencias Cartográficas

- Cursos de agua intermitentes
- Caminos
- Fallas inferidas
- Puntos de control
- Establecimiento Don Raúl
- Rumbo y buzamiento
- Foliación eutaxítica

**Sistema de proyección UTM**  
**Datum - Sistema geodésico 1984 (WGS 84)**



Figura 21: Mapa geológico en detalle del Establecimiento Ganadero Don Raúl y sus alrededores que muestra las principales unidades litoestratigráficas.

## 5.5 Paragénesis mineral de alteración

La paragénesis mineral reconocida en las muestras analizadas en el presente trabajo corresponde a Cuarzo + Micas blancas + Pirita, Caolinita + Óxidos de hierro. Se presentan reemplazando la matriz/pasta y feldespatos de las rocas volcánicas (como es el caso de los cuerpos subvolcánicos) y volcanoclásticas.

Identificar el tipo de alteración nos ayuda a comprender a que condiciones de pH y temperatura fueron sometidas las rocas del CVM en las cercanías del Establecimiento Ganadero Don Raúl e incluso establecer gradientes de temperatura si se complementa con otros estudios que permitan determinar variaciones composicionales y de cristalinidad.

En el presente trabajo final de licenciatura, se lograron definir los siguientes tipos de alteración hidrotermal en base a la paragénesis mineral observada en el análisis petrográfico y en muestra de mano de las rocas recolectadas:

- A. Filica: Cuarzo + Micas blancas en reemplazo de feldespatos, en matriz de las rocas y *fiammes* y pirita diseminada.
- B. Alteración supergénica: Caolinita sobre cristoclastos de feldespatos + Óxidos e hidróxidos de hierro.

La formación de arcillas identificadas podría tener dos posibles orígenes, considerando que la caolinita presente puede desarrollarse en diversos ambientes geológicos. Reconocer este mineral resulta importante no solo para determinar la paragénesis de alteración, sino también para lograr una clasificación precisa del tipo de alteración en cuestión.

En el contexto de la alteración argílica supergénica, la combinación de erosión y exposición de la pirita a procesos de meteorización y oxidación atmosférica conlleva a la generación de una acidez, caracterizada por elevadas concentraciones de  $H_2SO_4$  ( $pH < 1$ ). Este entorno es propicio para la formación de minerales como la caolinita a expensas de las micas blancas, jarosita y óxidos de los sulfuros de hierro, los cuales suelen manifestarse predominantemente en una zona vadosa (Hedenquist *et al.*, 2022).

## **6 Discusión e interpretaciones**

### **6.1 Comparación de los resultados a diferentes escalas de trabajo**

En base a los estudios realizados con los sensores remotos a nivel regional, sobre el área del Establecimiento Ganadero Don Raul y sus alrededores, es posible inferir la presencia de minerales de alteración hidrotermal sobre rocas del CVM. Las respuestas espectrales que mejores resultados aportaron para la teledetección de la alteración hidrotermal son aquellas observadas en las composiciones de cocientes RGB 4/5 4/6 4/8 y 6/5 7/5 8/5, y el índice AIOHa, debido a que el pico característico de absorción para la teledetección de minerales de alteración hidrotermal se da en la banda 6 de ASTER. Las alteraciones que responden a estos patrones son de tipo Fílica definida principalmente por la paragénesis Cuarzo + Micas blancas y Argílica (principalmente caolinita).

A escala de afloramiento, las tobas lapillíticas de cristales y vítreas pertenecientes al CVM, presentan una alteración de coloración verdosa con tonalidades blancas con pirita oxidada y vetillas de cuarzo. En cuanto a las rocas lávicas y cuerpo subvolcánicos del CVM presentan una alteración selectiva de los feldespatos, tanto en plagioclasas como en feldespatos potásicos con presencia de vetillas de cuarzo. La paragénesis observada para estas muestras es Cuarzo + Micas blancas + Pirita, Caolinita + Óxidos de hierro.

En el análisis petrográfico se pudo identificar que los feldespatos se hayan sericitizados e incluso algunos alterados a caolinita. La matriz de las rocas piroclásticas también se encuentran alteradas, ya que contienen agregados microcristalinos de cuarzo, feldespatos y sericita. Las tobas lapillíticas de cristales y vitreas también están alteradas, con cristaloclastos argilizados a caolinita, líticos con presencia de argilominerales y carbonatos (no vinculados genéticamente con la alteración) de grano muy fino en una matriz con texturas de flujo y esferulíticas.

La metodología utilizada y los resultados obtenidos en el presente trabajo final de grado permiten establecer de manera aproximada la presencia de minerales de alteración hidrotermal en las proximidades del Establecimiento Ganadero Don Raúl, pero no los ambientes de formación de los mismos. Por lo tanto, las herramientas de teledetección ASTER combinadas con análisis petrográficos son útiles para delimitar y diferenciar

sectores de alteración hidrotermal, siendo esta metodología de trabajo aplicable a cualquier otra zona de interés en la cual se quiera identificar alteración hidrotermal.

## **6.2 Edad y condiciones físico – químicas de la alteración hidrotermal**

La interacción existente entre la roca de caja – fluido y la composición riolítica de las rocas, son factores importantes para la paragénesis mineral resultante. El pH y la temperatura controlan el tipo de alteración hidrotermal. Para las alteraciones fílicas identificadas en la zona de estudio, la temperatura tuvo que haber sido mayor a los 250 °C (para la formación de muscovita) y con pH de rango 5 – 6 (Colbertt y Leach 1998). La alteración supergénica es causada por la erosión posthidrotermal y la oxidación de pirita, generando un líquido con pH 2-4 debido a la alta concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, formando en ocasiones caolinita e hidróxidos (Hedenquist *et al.*, 2022). La alteración hidrotermal analizada en la zona de estudio se encuentra restringida mayoritariamente a las cercanías de una falla E-O que afecta al CVM y no se visualizó alteración vinculada a otras unidades litoestratigráficas más jóvenes. La actividad hidrotermal posiblemente estuvo influenciada por la evolución de las fallas de la región, asociadas al magmatismo del CVM, desempeñando un papel crucial como zonas de permeabilidad para la circulación de fluidos hidrotermales.

De esta manera, se propone una edad Jurásica para las paragénesis de alteración hidrotermal reconocidas en el trabajo, posiblemente relacionadas a las manifestaciones hidrotermales de la región (Dill *et al.* 2013, Gonzalvez 2010, Gonzalez *et al.* 2022b) y vinculadas genéticamente con las rocas del CVM, pertenecientes al metalotecto de lavas e ignimbritas jurásicas.

## 7 Conclusiones

- ❖ Las imágenes satelitales ASTER son una buena herramienta para detectar alteración hidrotermal en el CVM.
- ❖ Las imágenes satelitales ASTER brindan utilidad para identificar varios tipos de alteración, sin embargo, la caracterización y asignación de un tipo u otro de alteración debe realizarse basándose tanto en espectroscopía de infrarojo, como en criterios de campo y laboratorio.
- ❖ Los productos obtenidos que mejores resultados arrojaron para la teledetección de alteración hidrotermal en la zona son las composiciones de cocientes RGB 4/5 4/6 4/8, 6/5 7/5 8/5, los índices OHIa, el índice de calcita y los RGB 654 e 468.
- ❖ La paragénesis de alteración es Cuarzo + Mica blanca + Caolinita + Pirita + Oxidos e hidróxidos de hierro.
- ❖ El origen de los minerales de alteración hidrotermal se encuentran asociados a fluidos calientes con temperaturas que superiores a 250°C y pH levemente ácido (5 – 6), siendo estos factores sumamente determinantes para su formación. En cuanto a la alteración argílica supergénica, su pH de formación es de 2-4 asociado a fluidos ácidos en una zona vadosa.
- ❖ La alteración hidrotermal identificada en el área del establecimiento ganadero Don Raúl, corresponden a alteraciones de tipo fílica y argílica supergénica.
- ❖ Los fluidos que alteraron al CVM en la zona de estudio son propios del mismo vulcanismo que originó dicha unidad litoestratigráfica, donde los mecanismos de transporte de fluidos se encuentra asociado a los sistemas de fallas que afectan al CVM y las características físicas que presentan éstas rocas.
- ❖ La edad propuesta para la alteración es Jurásica.
- ❖ El metalotecto sobre el cuál se identificó la alteración hidrotermal corresponde al de lavas e ignimibritas de edad Jurásica.

## **8 Investigaciones a futuro**

A partir de los resultados obtenidos de este TFG, se proponen nuevas líneas de estudio para profundizar y seguir trabajando con otros métodos y técnicas. Por un lado, se propone ampliar el muestreo de superficie. Realizar análisis de identificación mineral con métodos analíticos (MEB, DRX, PIMA) para establecer cambios en las asociaciones de minerales de alteración y cristalinidad que permitan establecer gradientes de temperatura.

Además, se podrían realizar análisis de inclusiones fluidas en los minerales de ganga (como el cuarzo) para determinar la salinidad y temperatura de los fluidos hidrotermales.

Por otro lado, se podría ampliar el muestreo a escala regional aplicando la misma metodología utilizada en este trabajo final de grado. De esta manera sería posible reconocer los efectos de cada metalotecto y además establecer paragénesis específicas y respuestas espectrales características para cada metalotecto (granitos permicos e ignimbritas triásicas).

Finalmente, considerando el análisis espectral de la alteración hidrotermal realizado en las inmediaciones del Establecimiento Ganadero Don Raúl, se podría progresar en la identificación de una posible conexión entre las mineralizaciones conocidas y las alteraciones estudiadas. En otras palabras, se busca determinar si las mineralizaciones fueron ocasionadas por los mismos fluidos responsables de la alteración en las lavas e ignimbritas jurásicas. Este enfoque permitiría, de manera indirecta, obtener información sobre la edad de la alteración hidrotermal.

## 9 Bibliografía

- Aragón E., Rodríguez Iñiguez A.M., Benialgo A., 1996.** A calderas field at the Marifil Formation, new volcanogenic interpretation, Norpatagonian Massif, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 9 (5/6): 321 – 328.
- Busteros A., Giacosa R., Lema H., Zubia M., 1998.** Hoja geológica Sierra Grande (4166 - IV), Provincia de Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 241, 85 pp. Buenos Aires.
- Caminos, R., 1983.** Descripción Geológica de las Hojas 39g, Cerro Tapiluke y 39h, Chipauquil, provincia de Río Negro. Servicio Geológico Nacional. 41 p. Buenos Aires. (inédito).
- Caminos, R., Llambías, E. J., 1984.** El basamento cristalino. Instituto de Geología y Recursos Naturales de la provincia de Río Negro. IX Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche. Relatorio I (2): 37-63.
- Caminos R., 2001.** Hoja Geológica 4166-I, Valcheta. Provincia de Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 310, 71 pp. Buenos Aires.
- Chernicoff C.J., Gozálvez M., Santos J.O., McNaughton N., 2017.** Edad U-Pb SHRIMP en circones y caracterización de la riolita Punta del Agua, sector centro-oriental de la Provincia de Río Negro, Argentina: nueva evidencia de la compresión jurásica inferior en la Patagonia oriental. XX Congreso Geológico Argentino, Actas: 14 – 15. San Miguel de Tucumán.
- Chuvieco Salinero, E. 2008.** Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (No. 528.8 CHU).
- Cicciarelli M.I., 1990.** Análisis estructural del sector oriental del Macizo Nordpatagónico y su significado metalogénico (Provincias de Río Negro y Chubut). Tesis Doctoral Inédita, Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata, 179 pp.

- Corbett, G. J., Leach, T. M. 1998.** Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization (No. 6). Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists.
- Cortés J.M., 1981.** El sustrato precretácico del extremo nordeste de la provincia del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 36 (3): 217 – 235.
- Dopico, C. I. M., Antonio, P. Y., Rapalini, A. E., de Luchi, M. G. L., Vidal, C. G. (2021).** Reconciling patagonia with Gondwana in early Paleozoic? Paleomagnetism of the valcheta granites, NE North Patagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 102970.
- Dill, H. G., Garrido, M. M., Melcher, F., Gomez, M. C., Weber, B., Luna, L. I., Bahr, A. 2013.** Sulfidic and non-sulfidic indium mineralization of the epithermal Au–Cu–Zn–Pb–Ag deposit San Roque (Provincia Rio Negro, SE Argentina)—with special reference to the “indium window” in zinc sulfide. *Ore Geology Reviews*, 51, 103-128.
- González S.N., Greco G.A., González P.D., Sato A.M., Llambías E.J., Varela R., Basei M.A.S., 2014.** Geología, petrografía y edad U-Pb de un enjambre longitudinal NO-SE de diques del Macizo Nordpatagónico oriental, Río negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (2): 174 – 18.
- González S.N., Greco G.A., Sato A.M., González PD., Llambías E.J., Díaz Martínez I., De Valais S., Serra Varela S., 2017.** Revisión estratigráfica del Complejo Volcánico Marifil. XX Congreso Geológico Argentino. Actas: 72 – 77. San Miguel de Tucumán.
- González, S. N., Greco, G. A., Galetto, A., Bordes, S., Basei, M. A., Parada, M. N., Pons, M. J. 2022a.** A multi-method approach to constrain the age of eruption and post-depositional processes in a Lower Jurassic ignimbrite from the Marifil Volcanic Complex, eastern North Patagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences*, 114, 103688.
- González, S. N., Greco, G. A., Pons, M. J., Ison, J. I., Parada, M. N., Arce, M., Giacosa, R. E. 2022b.** Caracterización preliminar de una manifestación argentífera en el macizo nordpatagónico oriental, Distrito Minero Valcheta.

- Gozalvez M.R., 2009a.** Petrografía y edad  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  de leucogranitos peraluminosos al oeste de Valcheta: Macizo Nordpatagónico (Río Negro). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64 (2): 285 - 294.
- Gozalvez, M. R. 2009b.** Caracterización del plutón San Martín y las mineralizaciones de wolframio asociadas, departamento Valcheta, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(3), 409-425.
- Greco G.A., González P.D., González S.N., Sato A.M., Basei M.A.S, Colombo Tassinari C.G., Sato K., Varela R., Llambías E.J., 2015.** Geology, structure and age of the Nahuel Niyeu Formation in the Aguada Cecilio area, North Patagonian Massif, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 62: 12 – 32.
- Greco, G. A., González, S. N., Sato, A. M., González, P. D., Basei, M. A., Llambías, E. J., Varela, R. 2017.** The Nahuel Niyeu basin: a Cambrian forearc basin in the eastern North Patagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 111-136.
- Greco, G. A., González, S. N., Giacosa, R. E., Serra Varela, S., Melo, M., Ison, J. I., 2018.** Estructuras de deformación del Paleozoico y Mesozoico en la Formación Nahuel Niyeu, basamento del este del Macizo Norpatagónico, Río Negro. XVII Reunión de Tectónica, La Rioja, Argentina.
- Greco G.A., González S.N., Giacosa R.E., Bordese S., Aguirre F.A., Ramos G.A., Rozzi N.E., 2022.** Plutón Don Raúl: evidencias de magmatismo pérmico entre Valcheta y Aguada Cecilio, Río Negro. XXI Congreso Geológico Argentino, Actas: 13 - 15. Puerto Madryn.
- Hedenquist, J. W. 1996.** Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. *Soc. Resource Geol, Spec Pub 1, Tokyo, 1.*
- Hedenquist, J. W., Arribas, A. (2022).** Exploration implications of multiple formation environments of advanced argillic minerals. *Economic Geology*, 117(3), 609-643.
- Herrmann, C. J., Gozalvez, M. R., Johanis, P. E., Palacio, M. D. B. 2007.** *Carta Minero-Metalogenética 4166-I Valcheta.* Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.

- López de Luchi M.G., Wemmer K., Rapalini A.E., 2008.** The cooling history of the North Patagonian Massif: first results for the granitoids of the Valcheta area, Río Negro, Argentina. En: 6th South American Symposium on Isotope Geology (Eds: Linares E., et al.). Abstracts, 33. San Carlos de Bariloche.
- López de Luchi M.G., Martínez Dopico C.I., Rapalini A.E., 2020.** The Permian to early Triassic granitoids of the Nahuel Niyeu – Yaminué area, Northern Patagonia: Igneous stratigraphy, geochemistry and emplacement conditions. *Journal of South American Earth Sciences* 106: 10 – 23.
- Malvicini L., Llambías E.J., 1974.** Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, provincia del Chubut. V Congreso Geológico Argentino, Actas II: 185 - 202. Buenos Aires.
- Marquetti, C. 2005.** Metodología y análisis de imágenes aster para la exploración mineral en un sector de la cordillera de Colangüil, San Juan, Argentina. En contribuciones técnicas proyecto geosat-ar JICA-SEGEMAR 33-40.
- Márquez M.J., Dalponte M.R., Fernández M.I., Korzeniewski L.I., 2016.** Los domos riolíticos portadores de thundereggs del Complejo Volcánico Marifil. Cerro Bandera- Laguna Curicó, Valcheta. Provincia de Río Negro. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales N° 39, 40 pp. Buenos Aires.
- Ninomiya, Y. 2002.** Mapping quartz, carbonate minerals, and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. In *Thermosense XXIV* (Vol. 4710, pp. 191-202).
- Ninomiya, Y. 2004.** Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, 5234(July), 180.
- Nuñez E., De Bachmann E., Ravazzoli I., Britos M., Franchi M., Lizuaín A., Sepúlveda E., 1975.** Rasgos geológicos del sector oriental del Macizo Somuncurá, provincia de Río Negro, República Argentina. II Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas IV: 247 - 266. Buenos Aires.
- Pankhurst R.J., Rapela C.R., 1995.** Production of Jurassic Rhyolite by anatexis of the lower crust of Patagonia. *Earth and Planetary Science Letters* 134: 23 – 36.

- Pankhurst R.J., Leat P.T., Sruoga P., Rapela C.W., Márquez M., Storey B.C., Riley T.R., 1998.** The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica; a silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 113 – 13.
- Pankhurst R.J., Riley T., Fanning C., Kelley S., 2000.** Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41: 605 – 625.
- Pankhurst R.J., Rapela C.W., Fanning C.M., Márquez M., 2006.** Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth-Science Reviews*, 76: 235 - 257.
- Peacock, D. C. P. (2001).** The temporal relationship between joints and faults. *Journal of Structural Geology*, 23(2-3), 329-341.
- Pérez, D. J., D'odorico Benites, P. E., Godeas, M. C. 2010.** Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del Río Santa Cruz (31° 40's), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), 623-633.
- Pour, A. B., Hashim, M. 2011.** Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6).
- Ramos G. A. 2022.** Caracterización geológica del área del establecimiento “Don Raúl”, departamento de Valcheta, provincia de Río Negro, Argentina. Universidad Nacional del Comahue, trabajo final de licenciatura. Neuquén.
- Rapalini A., López de Luchi M., Tohver E., Cawood P.A., 2013.** The South American ancestry of the North Patagonian Massif: geochronological evidence for an autochthonous origin? *Terra Nova*, 25 (4): 337 – 342.
- Rapela, C. and R. Caminos, 1987.** Geochemical characteristics of the Upper Paleozoic magmatism in the eastern sector of North Patagonian Massif. *Revista Brasileira de Geociencias*, 17 (4): 535- 543.

- Rapela C.W., Pankhurst R.J., 1993.** El volcanismo riolítico del noreste de la patagonia: un evento meso-jurásico de corta duración y origen profundo. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Explotación de Hidrocarburos, Actas IV: 179 - 188. Buenos Aires.
- Sibson, R. H. (1987).** Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, 15(8), 701-704.
- Strazzere L., Gregori D.A., Benedini L., Marcos P., Barros M.V., Geraldés M.C., Pavon Pivetta C., 2019.** The Puesto Piris Formation: evidence of basin-development in the North Patagonian Massif during crustal extension associated with Gondwana breakup. *Geoscience Frontiers*, 10: 299 – 314.
- Vidal, C. G., Dopico, C. I. M., de Luchi, M. L. (2022).** Geocronología del stock monzodiorítico-cuarzoso a tonalítico Musters, un intrusivo ordovícico del área Valcheta, Macizo Nordpatagónico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 79(3), 580-585.

## 10 Anexo I descripciones petrográficas de las secciones delgadas

### Muestra V2111 – 13a: Ignimbrita

La muestra corresponde a una roca con textura fragmental con presencia de cristaloclastos, vitroclastos y fragmentos líticos. La roca presenta una textura eutaxítica definida por la presencia de abundantes vitroclastos (25%) aplastados (*fiammes*), caracterizados por encontrarse alterados a sericita. Los cristaloclastos (45%) en su mayoría son de cuarzo anguloso y anhedrales, y en algunos casos se encuentran con crecimiento secundario y engolfamientos. Además, se identificaron muscovitas y feldespatos argilizados a caolinita. También se observaron líticos (10%) de rocas metamórficas (filitas), compuestos por biotita, opacos y cuarzo. La matriz representa el 20% del volumen total de la roca y se encuentra compuesta por un mosaico de grano muy fino de cuarzo y feldespatos producto de la desvitrificación, también como parte de la matriz se pudo identificar sericita. La roca es clasificada como una toba de cristales de composición riolítica con textura eutaxítica.

### Muestra V2111 - 12MP:

En muestra de mano la roca presenta un color verde con una textura fragmental con fragmentos líticos de hasta 1 cm con bordes angulosos y redondeados. También se puede observar a simple vitroclastos aplastados y deformados de color negro (*fiammes*), cristaloclastos de cuarzo y de plagioclasa en una matriz de grano muy fino.

En sección delgada la muestra presenta una textura eutaxítica con vitroclastos (35%) aplastados (*fiammes*). Los fragmentos de pómez tienen diferentes tonalidades, y oscuras como claras, siendo esta última, pómez que aún conservan su forma original con su textura microvesicular. Además se pudieron observar cristaloclastos (10%) de cuarzo con bordes angulosos, plagioclasas alteradas con maclas polisintéticas y minerales opacos diseminados en la sección. Se identificaron líticos (15%) volcánicos, líticos metamórficos con presencia de argilominerales y líticos de riolitas. La matriz de la roca representa el 40% del volumen total de la roca, formando un mosaico de grano muy fino compuesto por cuarzo y feldespatos producto de la desvitrificación. La muestra es una toba lapillítica vítrea de composición riolítica.

### **Muestra V2111 – 18MP**

La roca es de color marrón de tonalidad clara con una textura porfírica. Los fenocristales en muestra de mano son de cuarzo, feldespato potásico con hábito tabular de color rosado inmersos en una pasta de textura afanítica. Los mismos presentan una alteración selectiva moderada que deja como resultado una coloración verde sobre los fenocristales de feldespato. La roca está cortada por vetillas de cuarzo de hasta 1 cm.

En sección delgada, los fenocristales de cuarzo en su mayoría son anhedrales y se encuentran fracturados. En cuanto a los fenocristales de feldespato potásico anhedrales están completamente argilizados a sericita. Los óxidos con hábito cúbico y minerales opacos se encuentran diseminados a escala microscópica por toda la sección. La textura de la pasta es felsítica, compuesta por cristales de cuarzo, feldespatos y argilominerales. A su vez, se observaron vetillas de cuarzo cortando la roca. La roca es una Riolita con textura porfírica.

### **Muestra V2111 – 12CMP**

En muestra de mano la roca es de color rojo con textura fragmental. Se identificaron cristaloclastos de feldespatos potásicos de hábito tabular, plagioclasas y cuarzo. También se observaron cavidades vacías diseminadas por la roca perteneciente a un óxido con hábito cúbico que en ocasiones presentan halos de tonalidades más oscuras, en una matriz de grano fino que no se alcanza a visualizar ningún componente a lupa de mano. La roca está cortada por vetillas de cuarzo de hasta 7mm.

En sección delgada la muestra tiene una textura de flujo. Los cristaloclastos (25%) son de feldespato potásico con maclas de carsbald y plagioclasas argilizadas con maclas polisintéticas, cuarzo y óxidos diseminados por toda la muestra e incluso presencia de opacos en una matriz de grano muy fino con presencia de microcristales de cuarzo, feldespatos y sericita. Los fragmentos líticos (40%) se encuentran alterados y se logró establecer que provienen de rocas volcánicas ácidas y de rocas metamórficas. Los vitroclastos (10%) son muy escasos, se observaron texturas de desvitrificación y pómez argilizados. La matriz de la roca representa el 25% del volumen total de la roca y se encuentra compuesta por un mosaico de grano muy fino de cuarzo y argilominerales. La vetilla observada presenta bordes bien marcados y se encuentra rellena.

principalmente con cuarzo de aspecto lechoso. Se trata de una toba lítica de composición riolítica.