

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia**

**GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL PLUTÓN LLUTA, Y  
SU RELACIÓN CON LA MINERÍA METÁLICA Y NO  
METÁLICA DE LOS DISTRITOS PACHÍA Y PALCA,  
TACNA-PERÚ**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Edilber Antony Chipana Pari

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO**

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

## HOJA DE JURADO

TESIS

GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL PLUTÓN LLUTA, Y SU RELACIÓN CON LA  
MINERÍA METÁLICA Y NO METÁLICA DE LOS DISTRITOS PACHÍA Y  
PALCA, TACNA-PERÚ

Presentado por el bachiller Edilber Antony Chipana Pari  
Para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo-Geotécnico

Tesis sustentada y aprobada el 17 de julio del 2025 (RF N° 355-2025-FIAG/UNJBG) con el  
siguiente jurado:

**Presidente**

  
Mgr. Ing. FREDY CLETO CABRERA OLIVERA

**Miembro - Secretario**

  
Ing. JONATHAN FARAZ DAWIS ZAVALA CURASI

**Miembro - Accesitario**

  
Ing. JORGE PANTALEON BARRIGA GAMARRA

**Asesor de Tesis**

  
Dr. ANDRÉ STEENKEN

**CERTIFICADO DE SIMILITUD**

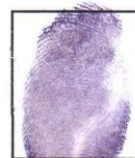
Yo, ANDRÉ STEENKEN, en mi condición de ASESOR (A) acreditado con Resolución de Facultad y/o Postgrado N° 111-2021-FIAG/UNJBG del 12 de marzo del 2021, de la tesis denominada: "GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL PLUTÓN LLUTA, Y SU RELACIÓN CON LA MINERÍA METÁLICA Y NO METÁLICA DE LOS DISTRITOS PACHÍA Y PALCA, TACNA-PERÚ". Presentado por el Bachiller Edilber Antony Chipana Pari. Para optar el grado académico y/o título profesional de INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 3%. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y/o trabajo enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 25 de junio del 2025.



-----  
FIRMA ASESOR  
Nombres y apellidos: André Steenken  
CE: 001734773



Huella dactilar



-----  
FIRMA AUTOR  
Nombres y apellidos: Edilber Antony Chipana Pari  
DNI: 70299930



Huella dactilar

## DEDICATORIA

A mis padres, Luis Chipana Limachi y Juana Pari Mamani, que siempre han creído en mí y me han apoyado a lo largo de mi trayectoria académica. Sin su amor, aliento y fe inquebrantable en mis habilidades, no estaría donde estoy hoy.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por las bendiciones que ha derramado en mí y mi familia. Su gracia y misericordia me han mantenido fuerte y enfocado durante este tiempo.

También agradezco a mis asesores, Dr. André Steenken y Mgr. Ing. Fredy Cleto Cabrera Olivera, por su invaluable guía y apoyo a lo largo de mi investigación. Su conocimiento, experiencia y dedicación fueron esenciales para mi éxito académico.

A mis padres, Luis Chipana Limachi y Juana Pari Mamani, por su amor, apoyo y motivación incondicional. Sin su amor, dedicación y sacrificio, no habría logrado llegar hasta aquí.

A mis docentes Mgr. Ing. Conrado Bedoya, Mgr. Ing. Gloria Choque, Mgr. Ing. Hismael Rodríguez Illachura e Ing. Jonathan Zavaleta Curasi, por el apoyo brindado durante la realización de esta investigación.

A mis colegas Julio, Roger, Víctor y Porfirio, quienes me han brindado su apoyo durante las exhaustivas campañas de campo.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, y al Instituto de Investigación (ININ), por su apoyo mediante el financiamiento del fondo Canon, Sobre canon y Regalías Mineras, en el marco del proyecto aprobado mediante R.R. N.º 8703-2021-UNJBG y al proyecto “El emplazamiento del batolito de la costa (segmento Toquepala) y la relación geodinámica con las placas oceánicas aluk, farallón y el macizo Arequipa con las formaciones del grupo Yura y Toquepala (Perú, 13°30’s-18°s y 69°w-73°w”.

Finalmente, agradezco a todos por su compromiso, amor y apoyo en mi trayectoria académica.

Que Dios les bendiga siempre.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTO .....	v
CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.1. DESCRIPCIÓN PROBLEMA.....	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	5
1.2.1. <i>Problema general</i> .....	5
1.2.2. <i>Problemas específicos</i> .....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.4 OBJETIVOS .....	7
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	7

Definir geológica y geoquímicamente al Plutón Lluta y su relevancia con el desarrollo de la minería metálica y no metálica de Pachía y Palca.....	7
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	7
1.5 HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	8
1.5.1 <i>Formulación de hipótesis</i> .....	8
1.5.2 <i>Variables</i> .....	8
CAPÍTULO II.....	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 ANTECEDENTES.....	10
2.2 BASES TEÓRICAS.....	14
2.2.1 <i>Geología local</i> .....	14
2.2.2 <i>Elementos de tierras raras (REE - Rare Earth Elements)</i> .....	22
2.2.3 <i>Diagramas spider</i> .....	24
2.2.4 <i>Diagramas de discriminación tectónica</i> .....	24
2.2.5 <i>Diagramas de fertilidad</i> .....	26
2.2.6 <i>Yacimientos tipo pórfido</i> .....	28
2.2.7 <i>Superunidades del Batolito de la Costa</i> .....	32
CAPÍTULO III.....	34
METODOLOGÍA.....	34
3.1 ETAPA PRECAMPO .....	34

3.2 ETAPA DE CAMPO .....	37
3.3 ETAPA POSCAMPO .....	42
CAPÍTULO IV .....	47
GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL PLUTÓN LLUTA.....	47
4.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD .....	47
4.1.1 UBICACIÓN .....	47
4.1.2 ACCESIBILIDAD.....	47
4.2 LITOLOGÍA .....	48
4.2.1 PLUTÓN LLUTA.....	48
4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	67
4.4 PETROGRAFÍA .....	73
4.4.1 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS DE DIORITA - CUARZO DIORITA.....	75
4.4.2 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS DE GRANODIORITA – TONALITA .....	80
4.4.3 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS GRANÍTICOS Y DIQUES FÉLSICOS.....	86
4.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	90
4.5.1 ANÁLISIS DRX DE MUESTRAS DE CANTERA DE SILICE .....	94
4.6 GEOQUÍMICA.....	97
4.6.1 GEOQUÍMICA DE ROCAS DEL PLUTÓN LLUTA .....	98
4.6.2 ELEMENTOS MAYORES.....	99

4.6.3 CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS.....	108
4.6.4 ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS.....	116
4.6.5 ANÁLISIS DE FERTILIDAD MAGMÁTICA .....	130
CAPÍTULO V.....	135
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	135
5.1 PETROGRAFÍA Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	135
5.2 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZAS .....	138
5.3 RELACIÓN DE LA MINERÍA METÁLICA Y NO METÁLICA CON EL PLUTÓN LLUTA.....	141
CONCLUSIONES .....	144
RECOMENDACIONES.....	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147
ANEXOS .....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Operacionalización de las variables.</i> .....	9
<b>Tabla 2</b> <i>Diagramas de discriminación tectónica.</i> .....	26
<b>Tabla 3</b> <i>Valores de condrito CI, Manto primitivo, N-MORB, E-MORB y OIB.</i> .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Mapa de ubicación del área de estudio.</i> .....	20
<b>Figura 2</b> <i>Mapa geológico del área de estudio.</i> .....	21
<b>Figura 3</b> <i>Columna estratigráfica de la zona de estudio.</i> .....	22
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de fertilidad Y vs Sr/Y y Yb vs La/Yb.</i> .....	28
<b>Figura 5</b> <i>Modelo de yacimientos Pórfido de Cobre y asociados.</i> .....	29
<b>Figura 6</b> <i>Relación entre la tectónica de los márgenes convergentes.</i> .....	31
<b>Figura 7</b> <i>Segmentos principales del Batolito de la Costa.</i> .....	33
<b>Figura 8</b> <i>Digitalización de información estructural.</i> .....	35
<b>Figura 9</b> <i>Cartografiado geológico del Plutón Lluta</i> .....	39
<b>Figura 10</b> <i>Cartografiado de rasgos estructurales del Plutón Lluta.</i> .....	41
<b>Figura 11</b> <i>Muestreo geoquímico de rocas plutónicas.</i> .....	42
<b>Figura 12</b> <i>Análisis petrográfico de las rocas intrusivas del Plutón Lluta.</i> .....	45
<b>Figura 13</b> <i>Mapa geológico del Plutón Lluta.</i> .....	49
<b>Figura 14</b> <i>Sección NE – SW, E-W del área de estudio.</i> .....	50
<b>Figura 15</b> <i>Esquema de la agrupación de stocks de diorita – cuarzo diorita.</i> .....	51
<b>Figura 16</b> <i>Contacto entre el Plutón Lluta y la Formación Socosani.</i> .....	52
<b>Figura 17</b> <i>Contacto entre el Plutón Lluta y el Grupo Yura.</i> .....	53
<b>Figura 18</b> <i>Gabrodiorita intruyendo concordantemente a la Formación Socosani.</i> .....	54
<b>Figura 19</b> <i>Afloramiento de rocas cuarzo dioríticas en el sector de la Quebrada Caplina.</i> .....	55
<b>Figura 20</b> <i>Vista macroscópica de los stocks de diorita – cuarzo diorita.</i> .....	56
<b>Figura 21</b> <i>Esquema de la agrupación de stocks de granodiorita - tonalita.</i> .....	57

<b>Figura 22</b> <i>Enclaves máficos en granodiorita.</i> .....	59
<b>Figura 23</b> <i>Xenolito de roca volcánica metamorfozada en stock de granodiorita.</i> .....	59
<b>Figura 24</b> <i>Afloramiento de rocas sedimentarias de la Formación Socosani, en la que han intruído concordantemente las rocas granodioríticas del Plutón Lluta.</i> .....	60
<b>Figura 25</b> <i>Vista macroscópica de los stocks de granodiorita - tonalita.</i> .....	61
<b>Figura 26</b> <i>Esquema de la agrupación de stocks de granito y diques félsicos.</i> .....	62
<b>Figura 27</b> <i>Vista macroscópica de los stocks de granito y diques félsicos.</i> .....	64
<b>Figura 28</b> <i>Dique félsico con orbículas de Turmalina.</i> .....	65
<b>Figura 29</b> <i>Pegmatita de composición granítica en stock de granodiorita.</i> .....	65
<b>Figura 30</b> <i>Afloramiento de granodiorita cortada por diques lamprófidos.</i> .....	66
<b>Figura 31</b> <i>Mapa de lineamientos estructurales.</i> .....	68
<b>Figura 32</b> <i>Histograma de frecuencias acumuladas a partir del azimut de los lineamientos mapeados.</i> .....	69
<b>Figura 33</b> <i>Clúster o dominios identificados por el método K-means.</i> .....	69
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de rosetas de los lineamientos estructurales mapeados.</i> .....	70
<b>Figura 35</b> <i>Estaciones estructurales realizadas en campo.</i> .....	72
<b>Figura 36</b> <i>Fotomicrografías de la muestra 19_PT_DR_150 en nicoles cruzados y paralelos.</i> .....	77
<b>Figura 37</b> <i>Fotomicrografías de la muestra 11_PT_DR_266 en nicoles cruzados.</i> .....	77
<b>Figura 38</b> <i>Fotomicrografías de la muestra 20_PT_GRDT_111 en nicoles cruzados y paralelos.</i> .....	78
<b>Figura 39</b> <i>Fotomicrografías de la muestra 14_PT_DR_84 en nicoles cruzados.</i> .....	78
<b>Figura 40</b> <i>Fotomicrografías de la muestra 8_PT_GRD_17 en nicoles cruzados.</i> .....	79

<b>Figura 41</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 07_PT_GRD_16 en nicoles cruzados.</i>	79
<b>Figura 42</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 09_PT_GRD_12 en nicoles cruzados.</i>	80
<b>Figura 43</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 5_PT_MZG_03 en nicoles cruzados.</i>	82
<b>Figura 44</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 10_PT_MZG_270 en nicoles cruzados.</i>	82
<b>Figura 45</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 04_PT_MZG_270 en nicoles cruzados.</i>	83
<b>Figura 46</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 17_PT_GRDT_199 en nicoles cruzados.</i>	83
<b>Figura 47</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 18_PT_GRDT_217 en nicoles cruzados y paralelos.</i>	84
<b>Figura 48</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 15_PT_GRDT_220 en nicoles cruzados.</i>	84
<b>Figura 49</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 2_PT_MZG_13 en nicoles cruzados.</i>	85
<b>Figura 50</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 3_PT_GRD_15 en nicoles cruzados.</i>	85
<b>Figura 51</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 1_GQ_APL_6 en nicoles cruzados.</i>	87
<b>Figura 52</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 12_PT_APL_269 en nicoles cruzados.</i>	88
<b>Figura 53</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 13_PT_APL_267 en nicoles cruzados.</i>	88
<b>Figura 54</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 16_GQ_APL_219 en nicoles cruzados.</i>	89
<b>Figura 55</b>	<i>Fotomicrografías de la muestra 06_PT_MZG_14 en nicoles cruzados.</i>	89
<b>Figura 56</b>	<i>Resultados de DRX de las muestras de los stocks de granodiorita – tonalita.</i>	91
<b>Figura 57</b>	<i>Resultados de DRX de las muestras de los stocks de diorita – cuarzo diorita.</i>	92
<b>Figura 58</b>	<i>Resultados de DRX de las muestras de los stocks de granito y diques félsicos.</i>	93
<b>Figura 59</b>	<i>Diagrama QAP para las muestras del Plutón Lluta a partir de datos de Difracción de Rayos X (DRX).</i>	94

<b>Figura 60</b> Resumen de la cuantificación por DRX de los minerales presentes en una muestra de la cantera de sílice de la Quebrada Tocuco (CZ_001). .....	95
<b>Figura 61</b> Difractograma de la muestra de la cantera en el sector de Tocuco (CZ_001). .....	96
<b>Figura 62</b> Diagramas de variación o Harker, para los óxidos principales. ....	107
<b>Figura 63</b> Diagrama $SiO_2$ vs $Na_2O + K_2O$ (n=22). ....	109
<b>Figura 64</b> Diagrama $SiO_2$ vs $Na_2O+K_2O$ (n=22). ....	110
<b>Figura 65</b> Diagrama $R1$ vs $R2$ (De La Roche et al., 1980). ....	112
<b>Figura 66</b> Diagrama $SiO_2$ vs ASI, representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos. ....	113
<b>Figura 67</b> Diagrama $SiO_2$ vs $K_2O/Na_2O$ , representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos. ....	114
<b>Figura 68</b> Diagrama $K_2O$ vs $SiO_2$ , representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos. ....	115
<b>Figura 69</b> Diagrama ternario $Na_2O+K_2O$ , $MgO$ , $FeO_T$ . ....	116
<b>Figura 70</b> Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G01. ....	118
<b>Figura 71</b> Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G02. ....	119
<b>Figura 72</b> Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a los datos de Acosta et al., 2011. ....	119
<b>Figura 73</b> Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G03. ....	120

<b>Figura 74</b> Diagrama REE normalizados al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989). .....	122
<b>Figura 75</b> Anomalía de $Eu/Eu^*$ vs $SiO_2$ , correspondiente a las agrupaciones G01, G02, G03 y los datos de Acosta et al., 2011. ....	122
<b>Figura 76</b> Diagrama Spider o multielemento ( $n=25$ ). .....	124
<b>Figura 77</b> Diagrama de clasificación Yb vs Ta para rocas intrusivas del Plutón Lluta. ....	127
<b>Figura 78</b> Diagrama de clasificación Y vs Nb para rocas intrusivas del Plutón Lluta. ....	128
<b>Figura 79</b> Diagrama de clasificación Y+Nb vs Rb para rocas intrusivas del Plutón Lluta. ....	129
<b>Figura 80</b> Diagrama $SiO_2$ vs $Eu_{(n)}/Eu$ . ....	131
<b>Figura 81</b> Diagrama Sc vs V/Sc. ....	133
<b>Figura 82</b> Diagrama Y vs Sr/Y. ....	134
<b>Figura 83</b> Sulfuros diseminados en muestra de cuarzo diorita 9_GQ_GRD_12. ....	136
<b>Figura 84</b> Diagrama de pastel del promedio mineralógico de los stocks graníticos-diques félsicos, stocks de granodiorita-tonalita y stocks de diorita-cuarzo diorita. ....	137
<b>Figura 85</b> Diagramas REE para las agrupaciones G01, G02, Acosta et al., 2011 y G03. ....	139
<b>Figura 86</b> Diagrama Y vs Sr/Y con las agrupaciones de muestras G01, G02, G03 y Acosta et al., 2011. ....	140
<b>Figura 87</b> Diagrama $SiO_2$ vs La/Yb, los espesores de corteza se han tomado de Haschke et al., 2002. ....	141
<b>Figura 88</b> Mapa de las concesiones mineras metálicas (de azul) y no metálicas (de color rojo). ....	143

## RESUMEN

Los batolitos son cuerpos de masa silicatada constituidos por varios plutones asociados en el espacio y en el tiempo. En la región costera de Sudamérica, el Batolito de la Costa se extiende desde Chile hasta Ecuador, y está compuesto principalmente por rocas de tipo granodiorita a tonalita, de edad Cenozoica-Mesozoica. En Perú, este batolito se divide en cinco segmentos (Piura, Trujillo, Lima, Arequipa y Toquepala). El Plutón Lluta forma parte de la super-unidad Yarabamba, ubicada dentro del segmento Toquepala. Se llevó a cabo un estudio detallado de la geología de la zona, que incluyó el mapeo geológico, análisis de roca total y elementos traza, mediante técnicas instrumentales como ICP-MS, microscopía óptica y difracción de rayos X (DRX). Los resultados mostraron que las rocas intrusivas que conforman el Plutón Lluta están compuestas por granodioritas, cuarzo dioritas, dioritas, granitos, diques aplíticos y diques lamprófidos, con una composición calco-alkalina rica en potasio, típica de un ambiente de subducción. La mineralización metálica y no metálica está relacionada con las rocas cuarzo dioritas de las zonas de Challata e Higuera, que presentan las razones más altas de Sr/Y, lo que indica una elevada fertilidad magmática. Los yacimientos no metálicos se asocian principalmente al metamorfismo de contacto entre los intrusivos del Plutón Lluta y las areniscas de la Formación Hualhuani, perteneciente al Grupo Yura. Este estudio permitió delimitar los cuerpos intrusivos

y reconocer posibles zonas de interés económico para futuras exploraciones. Los resultados geoquímicos han sido clave para determinar indicadores de la fertilidad de estos magmas.

***Palabras clave:*** Plutón Lluta, Geoquímica, Difracción de Rayos X, Microscopía Óptica, Super-unidad Yarabamba, Fertilidad Magmática.

## **ABSTRACT**

Batholiths are large silicic intrusive bodies composed of multiple plutons associated in space and time. Along the coastal region of South America, the Coastal Batholith extends from Chile to Ecuador and consists mainly of granodioritic to tonalitic rocks of Mesozoic–Cenozoic age. In Peru, it is divided into five segments (Piura, Trujillo, Lima, Arequipa, and Toquepala), with the Lluta Pluton forming part of the Yarabamba super-unit in the Toquepala segment. This study involved detailed geological mapping, whole-rock and trace element geochemical analyses using ICP-MS, optical microscopy, and X-ray diffraction (XRD). The Lluta Pluton consists of granodiorites, quartzdiorites, diorites, granites, aplite dikes, and lamprophyre dikes, exhibiting a high-K calc-alkaline composition typical of a subduction-related tectonic setting. Metallic and non-metallic mineralization is associated with quartzdiorites rocks in the Challata and Higuera zones, which exhibit the highest Sr/Y ratios, indicating high magmatic fertility. Non-metallic deposits, such as quartz and wollastonite, are primarily linked to contact metamorphism between intrusive rocks and the Hualhuani Formation sandstones of the Yura Group. This research helped define the boundaries of intrusive bodies and identify potential economically valuable zones. The geochemical results provided key indicators of the magmatic fertility within this segment of the Coastal Batholith.

***Keywords:*** Lluta Pluton, Geochemistry, X-ray diffraction, Optical microscopy, Yarabamba Super-unit, Magmatic Fertility.

## INTRODUCCIÓN

La composición promedio de la corteza continental es de naturaleza granodiorítica (Clarke, 1991), y en ciertos cinturones orogénicos, los granitos representan hasta un tercio de la superficie y son un componente fundamental de la corteza continental. Estos cinturones se presentan en forma de grandes extensiones que suelen abarcar cientos o incluso miles de kilómetros (Pitcher & Cobbing, 1985), sin embargo, cada cinturón se compone de cuerpos individuales que pueden variar en tamaño desde muy grandes hasta relativamente pequeños, y que son extremadamente complejos en su estructura y composición. Esto se ve reflejado en las rocas que componen al Plutón Lluta, que forma parte de los stocks de la superunidad Yarabamba, del Batolito de la Costa (Pitcher & Cobbing, 1985).

Con la incorporación de nuevos análisis de campo, geoquímicos y técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), se puede determinar las variaciones composicionales, indicios del modo de emplazamiento, relaciones de contacto, variaciones en la abundancia mineralógica, relación con la minería metálica y no metálica.

El presente trabajo aborda diversos aspectos relacionados con el Plutón Lluta, una zona geológica que ha sido someramente estudiada en investigaciones previas.

En el Capítulo I, se plantea el problema de investigación y se establecen los objetivos que se persiguen, proporcionando además una justificación viable.

En el Capítulo II, se presentan las bases teóricas necesarias para comprender los métodos empleados y se revisan los antecedentes relacionados con el área de estudio.

En el Capítulo III, se detalla la metodología empleada para llevar a cabo la investigación, la cual incluye una etapa inicial de precampo, seguida por la etapa de campo y la etapa de poscampo o gabinete.

En el Capítulo IV, se presentan los estudios realizados, los cuales incluyen el mapeo de las unidades intrusivas y de la roca encajonante, así como los estudios petrográficos y los análisis de Difracción de Rayos X. Asimismo, se abordan de manera detallada los estudios geoquímicos de elementos mayores y elementos traza, junto con los diferentes diagramas de clasificación utilizados para comprender los espectros petrogenéticos del Plutón Lluta. Finalmente, en el Capítulo V, se discuten los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Este trabajo se enfoca en proporcionar nuevos datos y conocimientos sobre el Plutón Lluta, mediante el uso de técnicas y metodologías modernas. El objetivo es contribuir a la comprensión de la geología de esta zona poco estudiada y sentar las bases para futuras investigaciones en el área de estudio.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN PROBLEMA**

Los batolitos son cuerpos de masa silicatada constituidos por varios plutones, asociados en el espacio y tiempo. La cantidad de plutones que integran un batolito está en relación directa con el tamaño de este. Los batolitos de gran extensión como el batolito de Sierra Nevada (EE.UU.) (Moore & Sisson, 2008) y el batolito de la Costa (Perú) (Beckinsale et al., 1985) están compuestos por más de 1000 plutones.

Más aún, es importante señalar que, a lo largo de la Cordillera de los Andes, tenemos la existencia de grandes batolitos, siendo uno de los más importantes el Batolito de la Costa de edad Cenozoica-Mesozoica cuya composición es predominantemente granodiorítica a tonalítica, y posee una distancia de aproximadamente 1600 km de largo y 60 km de ancho en Perú (Pitcher & Cobbing, 1985b), y si consideramos a los plutones aislados en Chile y Ecuador hacen un total de 2400 km de largo.

Además, en el Perú el Batolito de la Costa ha sido dividido por (Pitcher & Cobbing, 1985b) en cinco segmentos de norte a sur: Piura, Trujillo, Lima, Arequipa

y Toquepala; los cuales se subdividen en base a su relación temporal, espacial y composicional en super-unidades.

Por otra parte, en la región de Tacna estos cuerpos plutónicos del Batolito de la Costa se encuentran presentes, siendo los más importantes la superentidad Yarabamba y Challaviento que forman parte del segmento Toquepala, los cuales se encuentran separados por una brecha temporal y espacial.

Así mismo, se puede mencionar al Plutón Lluta, el cual pertenece a la superunidad Yarabamba (Wilson & García, 1962), que consiste en una serie de granitoides que afloran al NE de la ciudad de Tacna y que son responsables de la mineralización económica local.

Por otro lado, los estudios geológicos realizados en el Plutón Lluta, se encuentran a escalas pequeñas y se han realizado en base a reconocimiento de imágenes aéreas regionales, por lo cual los límites litológicos y cambios composicionales de este plutón son desconocidos; de la misma forma no se tiene datos geoquímicos suficientes de las rocas que conforman este plutón, que puedan ser estudiados estadísticamente, generando así un vacío en el conocimiento de la petrogénesis de este plutón y sus implicancias económicas, vinculadas a magmas tipo I, los cuales son responsables para la formación de yacimientos tipo pórfidos de Cu (-Mo, -Au), vetas polimetálicas, skarn, reemplazamiento en carbonatos, hospedado en sedimentos y epitermales de metales preciosos (Sillitoe, 2010).

Cabe señalar, que este desconocimiento se ha generado debido a que las instituciones encargadas de realizar esta labor no cuentan con los recursos suficientes y con la logística necesaria para poder realizar trabajos de detalle en la agreste zona donde afloran estas rocas, siendo suficiente para sus objetivos contar con información regional.

Finalmente, dentro de esta perspectiva se tendrá como consecuencia la pérdida de información relevante que puede resultar útil y atractiva para la inversión minera nacional y local, por parte del sector público y privado.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### ***1.2.1. Problema general***

¿Las características geológicas y geoquímicas del Plutón Lluta son relevantes para el desarrollo de la minería metálica y no metálica de los distritos Pachía y Palca?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Se conoce detalladamente las fronteras y las variaciones composicionales del Plutón Lluta?
- ¿Se conoce la firma geoquímica de las rocas del Plutón Lluta?
- ¿Qué relación guarda el Plutón Lluta con la minería metálica y no metálica?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Ante la falta de información a escala detallada sobre la geología y la geoquímica del Plutón Lluta, se ha generado un desconocimiento de su

petrogénesis; así como de las fronteras y las variaciones composicionales del Plutón Lluta.

Por consiguiente, uno de los aspectos importantes que nos brinda el conocer la geología detallada del Plutón Lluta, es su relación espacial con la roca encajonante y su interacción con la misma, para generar mineralización económica metálica y no metálica; otro aspecto importante, es poder clasificar composicionalmente las variaciones del Plutón Lluta; por último, conocer la firma geoquímica nos brindará información sobre la petrogénesis y la fertilidad del Plutón Lluta.

Es así como, la presente investigación generará un mapa geológico detallado, de igual manera los diagramas geoquímicos; basados en los nuevos datos obtenidos a partir del análisis químico de las muestras de roca, petrografía y trabajo de campo.

Asimismo, se busca proporcionar información geocientífica a través de mapas detallados y diagramas que serán útiles para poder dar a conocer el potencial económico minero metálico y no metálico asociado al Plutón Lluta, que es de suma importancia para el desarrollo de los distritos de Pachía y Palca, y por tanto de la región Tacna, al igual que la información geológica es base para las obras de ingeniería; además de proporcionar nueva información geoquímica de las rocas

plutónicas en los Andes centrales (Tacna, Perú) que servirá para estudios de investigación regionales de gran interés.

Finalmente, el presente trabajo tiene una utilidad metodológica, que podrá ser usado como base para investigaciones posteriores en otras super-unidades del Batolito de la Costa y que en consecuencia generará una visión amplia sobre la distribución espacial y la geoquímica de los plutones que los comprenden.

## **1.4 OBJETIVOS**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Definir geológica y geoquímicamente al Plutón Lluta y su relevancia con el desarrollo de la minería metálica y no metálica de Pachía y Palca.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- a) Elaborar un mapa actualizado de las litologías y variaciones composicionales del Plutón Lluta.
- b) Realizar análisis de roca total y de elementos trazas de las muestras de roca para determinar la firma geoquímica del Plutón Lluta.
- c) Determinar la relación entre el Plutón Lluta y la mineralización metálica y no metálica.

## **1.5 HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### ***1.5.1 Formulación de hipótesis***

#### ***a) Hipótesis General***

La geología y la geoquímica del Plutón Lluta está asociada con la mineralización metálica y no metálica en los distritos de Pachía y Palca.

#### ***b) Hipótesis específicas***

- El mapeo geológico actualizado permitió definir las fronteras y variaciones composicionales del Plutón Lluta.
- La geoquímica de roca total y de elementos trazas, definen la firma geoquímica del Plutón Lluta.
- El Plutón Lluta tiene relación con la minería metálica y no metálica en los distritos de Pachía y Palca.

### ***1.5.2 Variables***

- a) **Variables independientes:** Geología y geoquímica.
- b) **Variable dependiente:** Minería metálica y no metálica.

**Tabla 1**  
*Operacionalización de las variables.*

<b>Tipo de variable</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Tipo var. Cuantitativa</b>
<b>Variable independiente</b>	Geología	Litología	m <sup>2</sup>	Distribución espacial de la unidad litológica	Continua
		Petrografía	SD	Composición y textura	SD
	Geoquímica	Litogeoquímica	wt. %	Elementos mayores	Continua
			ppm	Elementos menores	Continua
			ppm	Elementos traza	Continua
<b>Variable dependiente</b>	Mineralización económica	Yacimiento mineral metálico	Adimensional (ratio)	Fertilidad magnética	Continua
		Yacimiento mineral no metálico	wt. %	Minerales de mena	Continua
			wt. %	Pureza	Continua
			ppm	Abundancia	Continua

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

##### **Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x) (Wilson & García, 1962)**

En Pachía-Palca, según la Comisión de la Carta Geológica Nacional y su Mapa Geológico del Perú a escala 1:100,000 (Wilson & García, 1962), es frecuente encontrar afloramientos de rocas intrusivas, especialmente plutones de granodiorita, así como pequeños "stocks" de monzonita, diorita y algunos diques o chimeneas de riolita. También se han identificado varios yacimientos metálicos y no metálicos de interés económico, siendo los de cobre los más comunes, seguidos por los de plomo. Los yacimientos no metálicos incluyen caliza y mármol.

##### **Geología minera del departamento de Tacna (Vargas, 1975)**

Se llevó a cabo la evaluación del potencial minero de 50 minas pequeñas y prospectos en Tacna, agrupados en 6 unidades con el fin de generar estudios de factibilidad y proponer el desarrollo de la minería en la región. En su informe, se detalla la Unidad Cercana, ubicada en el sector Lluta en Pachía, la cual cuenta con 15 minas de cobre y una de plomo (Vargas, 1975). Las estructuras mineralizadas se

encuentran en intrusivos granodioríticos y lutitas y calizas de la formación San Francisco. Los yacimientos principales son Cercanita y Cercana, donde se han realizado trabajos durante 22 años y se ha producido alrededor de 80,000 TM de mineral de cobre. Además, la mina Teresa X, ubicada en la parte baja del río Caplina, cuenta con dos vetas poco exploradas que tienen buenos valores de plata y plomo, lo que ha permitido definir reservas de 4,400 TM de Ag y Pb (Vargas, 1975).

***Chemical and Isotopic Evolution of the Coastal Batholith of Southern Peru (Boily et al., 1989)***

Los estudios isotópicos Sm/Nd y Rb/Sr para los granitoides del Batolito de la Costa, ubicado en los segmentos Toquepala y Arequipa, se determinó que se pueden dividir en tres grupos debido a las variaciones de  $\epsilon_{\text{NdCHUR}}$ ,  $\epsilon_{\text{SrUR}}$  y el fuerte enriquecimiento en elementos litófilos de ion grande (LILE) (Boily et al., 1989). El primer grupo consiste en intrusivos con valores positivos de  $\epsilon_{\text{NdCHUR}}$  (+2.4 a +0.4) y generalmente negativos en  $\epsilon_{\text{SrUR}}$  (-7.4 a +0.7) que se encuentran en el transecto Ilo-Moquegua, donde la presencia de rocas Pre-Cámbricas es escasa. El segundo grupo está formado por plutones con valores intermedios de  $\epsilon_{\text{NdCHUR}}$  (+0.5 a -2.2) y  $\epsilon_{\text{SrUR}}$  (+7.1 a +55.7) ubicados cerca de Arequipa y Tarata, donde hay numerosos afloramientos Pre-Cámbricos. El tercer grupo está formado por intrusivos que tienen valores negativos de  $\epsilon_{\text{NdCHUR}}$  (-4.4 a -8.0) y positivos de  $\epsilon_{\text{SrUR}}$  (+27.1 a +56.1), incluyendo una granodiorita anómala expuesta cerca de

Tarata y dos muestras recogidas en Arequipa cerca del contacto con el gneis Charcani. A partir de estos valores isotópicos y de la geoquímica, se propusieron tres modelos petrogenéticos para estos cuerpos intrusivos, siendo el más respaldado el que indica que los magmas máficos parentales de las suites plutónicas de cada super-unidad deben derivarse en última instancia de la cuña del manto isotópicamente agotada por encima de la zona de subducción, y que el grado relativamente pequeño de asimilación de la corteza durante la formación del Batolito Costero del sur del Perú se correlaciona con el régimen tectónico extensional durante el Mesozoico tardío.

***Geologic and Geochronologic Constraints on the Metallogenic Evolution of the Andes of Southeastern Peru (Clark et al., 1990)***

Se realizaron dataciones radiométricas mediante el método K-Ar, para definir cronológicamente las unidades intrusivas que se encuentran en las regiones de Tacna, Moquegua, Arequipa y Puno (Clark et al., 1990). En el sector de Lluta, se realizaron dataciones en muestras de monzodiorita y se obtuvieron dos edades: 60.33 Ma (SPATA-2) y 60.90 Ma (SPIT-1) para un pequeño cuerpo intrusivo que no fue mapeado por Wilson y García (1962) y que se encuentra a 7 km al noreste de Pachía. A partir de estas nuevas edades, se concluyó que la intrusión del Plutón Lluta ocurrió en el Paleoceno tardío, y que la mineralización asociada probablemente es de una edad similar. Además, las edades de estas intrusiones son similares a las de Toquepala (Clark et al., 1990).

**Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca Hojas 36-v y 36-x  
(Acosta et al., 2011)**

Se realizaron análisis basados en la bibliografía existente de la zona de estudio como parte de la actualización del Mapa Geológico del Perú a escala 1:50,000 del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Se describió de manera regional la super-unidad Yarabamba, a la que pertenece el Plutón Lluta, generando diagramas geoquímicos regionales y actualizando los mapas geológicos. Aunque no se realizaron nuevos ensayos de muestras para el Plutón Lluta, se llevaron a cabo estudios petrográficos en muestras de granodioritas en el sector de Tres Cruces-Pachía y el sector Los Olivares-Pachía (muestras Pa/III-15-03 y Pa/III-16-03, respectivamente) (Acosta et al., 2011a). Además, se realizaron estudios descriptivos de las principales ocurrencias minerales metálicas y no metálicas asociadas a los cuerpos intrusivos que comprenden la superunidad Yarabamba. Las principales ocurrencias minerales metálicas corresponden a la Mina Cercana (Cu-Ag) y la Mina Higuera (Cu), que están asociadas localmente con el Plutón Lluta. Por otro lado, las principales ocurrencias minerales no metálicas corresponden a areniscas y piedra laja, yacimientos de sílice (cuarzo) y yacimientos de calcita, aunque no se profundizó en su relación con los cuerpos intrusivos del Plutón Lluta.

**Sedimentary facies analysis of the Mesozoic clastic rocks in Southern Peru (Tacna, 18°S): Towards a paleoenvironmental Redefinition and stratigraphic Reorganization (Alván et al., 2018)**

Se estudiaron las facies sedimentarias de las rocas clásticas del Mesozoico en la región entre Pachía y Palca. Aunque no proporcionaron información adicional sobre el Plutón Lluta, el estudio sí cuenta con valiosa información sobre datos estructurales tomados en campo de las estructuras sedimentarias y fallas, así como el mapeo de diques y sills. Además, se considera importante la reconstrucción paleogeográfica de la cuenca Arequipa en Tacna, ya que se sostiene que esta se formó durante una etapa de syn-rift, lo que significa que el régimen dominante en esta cuenca era la extensión (Alván et al., 2018). Esto proporciona información valiosa sobre la tectónica dominante en esta región durante un período que abarcó desde el Triásico tardío hasta el Cretácico temprano.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### ***2.2.1 Geología local***

#### **2.2.1.1 Estratigrafía**

#### **TRIÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO INFERIOR**

Acosta et al. (2011), informan que, en el área de estudio, las rocas de edad corresponden a las Formaciones Chocolate inferior (unidad volcánica) y Chocolate superior (unidad sedimentaria). Asimismo, el Jurásico medio se compone

plenamente de la Formación Socosani y la parte inferior del Grupo Yura (Formación Puente y Cachíos). Finalmente, el Jurásico superior está conformado por la parte media del Grupo Yura (Formación Labra y Gramadal).

### **Formación Chocolate**

Jenks (1945), definió la formación en Yura-Arequipa, y Acosta et al., (2011) la dividió en dos miembros o unidades. La parte inferior está compuesta por sucesiones volcánicas con algunos niveles sedimentarios y anteriormente era conocida como Formación Junerata por Wilson y García (1962). La unidad superior, por su parte, está compuesta únicamente por unidades sedimentarias. Consiste en conglomerados con clastos de rocas volcánicas intercaladas con limonitas y, hacia su tope, presenta areniscas arcósicas. Esta unidad fue denominada Formación Pelado por Wilson y García (1962).

### **Formación Socosani**

La Formación Socosani fue estudiada por Wilson & García (1962), quienes la denominaron Formación San Francisco en sus investigaciones. Según Acosta et al. (2011), la formación está compuesta por conglomerados en su base, con clastos de calizas, seguidos de areniscas calcáreas de grano medio y limonitas grises, intercaladas con niveles de margas y calizas con ammonites.

## **Grupo Yura**

El Grupo Yura, según la clasificación de Acosta et al. (2011), está compuesto por las Formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani, las cuales son unidades sedimentarias que se formaron en la cuenca Arequipa durante el período syn-rift del Mesozoico, según Alván et al. (2018). Cabe destacar que Boekhout et al. (2013) y Boekhout et al. (2012) incluyen la Formación Socosani y la Formación Chocolate como parte del Grupo Yura, pero para la presente investigación se considerará la clasificación de Acosta et al. (2011).

### **Formación Puente-Cachíos**

Según Acosta et al. (2011), estas unidades están compuestas por areniscas cuarzo-feldespáticas de grano fino a medio, con laminaciones paralelas y oblicuas, intercaladas con limonitas y lutitas negras, y pequeños canales conglomerádicos. Es importante mencionar que ambas formaciones pueden ser correlacionadas con la Formación Ataspaca, descrita por Wilson y García (1962).

### **Formación Labra**

Acosta et al. (2011), describen esta unidad como compuesta por areniscas finas de color gris verdoso, cuarzosas y cuarzo feldespáticas, intercaladas con limoarcillas negras con laminaciones paralelas y rizaduras. Las limonitas se adelgazan hacia el tope y presentan paleocanales marginales. Wilson y García

(1962) la denominaron Formación Chachacumane, la cual es correlacionable con esta unidad.

### **Formación Gramadal**

Según Acosta et al. (2011), esta unidad está formada por cuarcitas intercaladas con calizas tipo grainstone, lutitas negras y areniscas cuarzosas con laminaciones oblicuas, rizaduras, huellas de gusanos y fragmentos de plantas.

### **Formación Hualhuani**

Acosta et al. (2011) describen esta unidad como compuesta de areniscas cuarzosas y cuarcitas de color gris blanquecinas de grano medio con laminaciones oblicuas curvas de canales y rizaduras, seguidas de una intercalación de areniscas cuarzosas, limonitas y lutitas. En su techo, hay cuarcitas de grano medio. Esta formación es correlacionable con la parte superior de la Formación Chachacumane descrita por Wilson y García (1962).

## **CRETÁCICO SUPERIOR-PALEÓGENO**

Este periodo está comprendido por el Grupo Toquepala.

### **Formación Chulluncane**

Según Acosta et al. (2011), esta unidad está compuesta por flujos de lava de color gris que contienen fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita dentro de una matriz feldespática, seguido de conglomerados con clastos de roca volcánica y, en

ocasiones, con clastos de rocas porfiríticas y cuarcitas con una dirección del canal hacia el W-SW.

### **Formación Quellaveco**

La unidad se compone de brechas y flujos lávicos de andesitas porfiríticas grises con tobas soldadas en la base, seguidas de lapilli gris claro y pómez en la parte media, y aglomerados riolíticos de color pardo amarillento en bancos gruesos en la parte superior (Acosta et al., 2011).

## **ROCAS INTRUSIVAS**

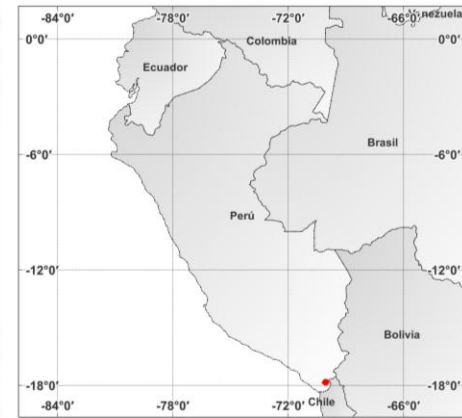
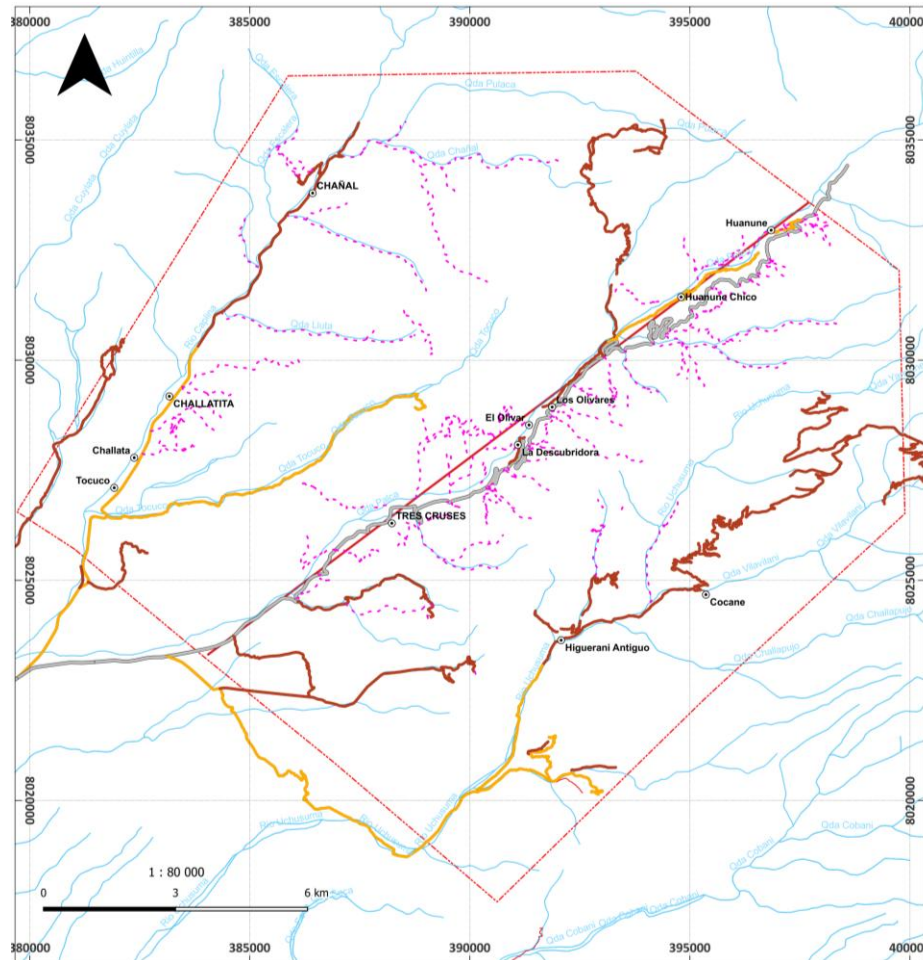
### **Super-unidad Yarabamba**

La super-unidad Yarabamba, nombrada por su localidad tipo en la Quebrada Yarabamba, está compuesta por granitoides que se extienden a lo largo de unos 200 km en dirección NW-SE entre Pachía y Vitor, con cuerpos tabulares y elongados (Acosta et al., 2011). Los primeros estudios de la región identificaron tonalitas y granodioritas con xenolitos máficos y alteraciones a sericita y arcillas en la Quebrada Yarabamba (Steward, 1968). Las rocas de la super-unidad suelen ser granodioritas con plagioclasa, ortosa, cuarzo, biotita y hornblenda de coloración gris claro a blanquecino, de grano grueso e hipidiomórficas con textura holocristalina inequigranular (Acosta et al., 2011).

### **2.2.1.2. Geología Estructural**

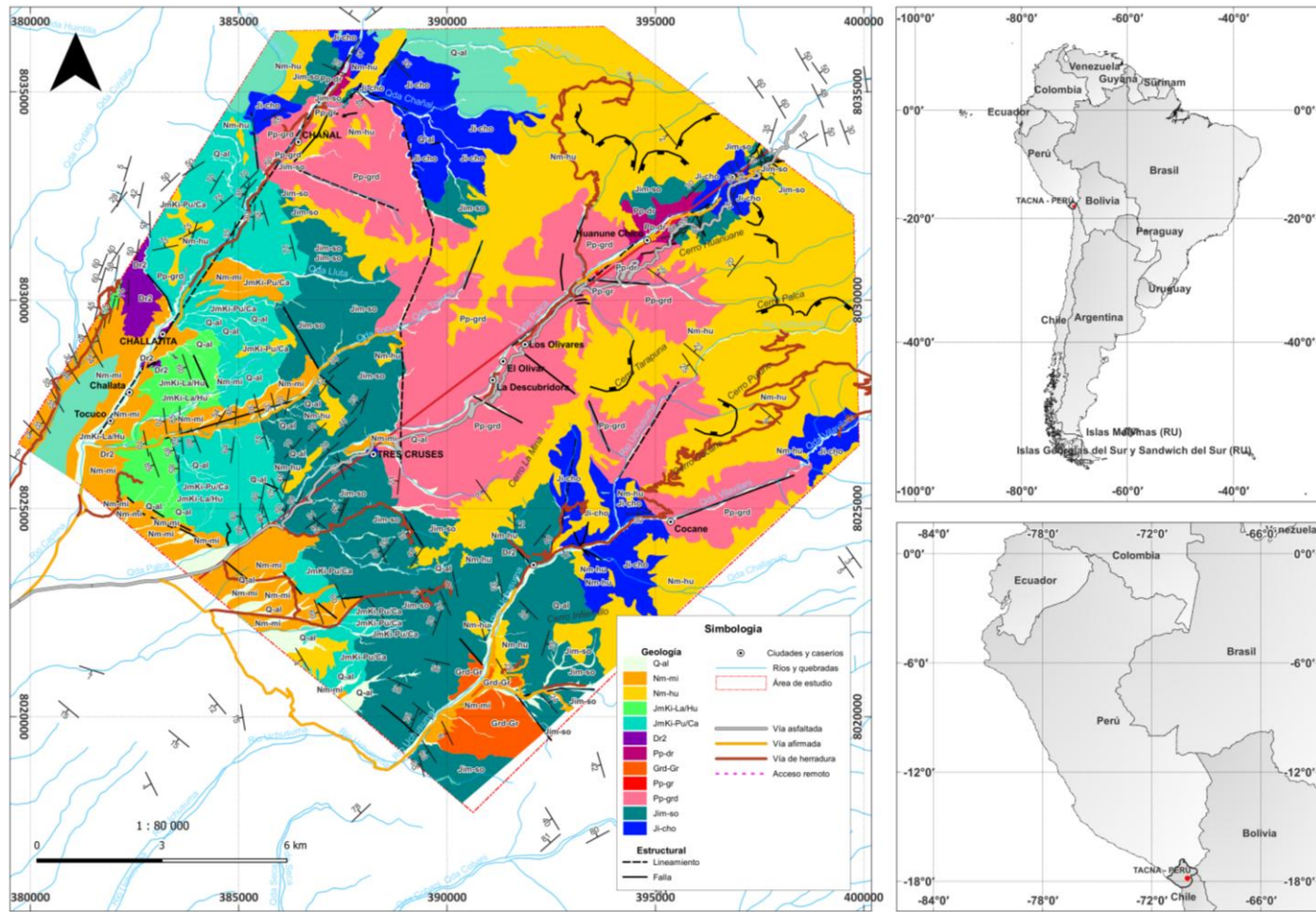
En la región de estudio se pueden identificar dos sistemas de fallas principales. El más destacado es el Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), con una dirección NW-SE. Esta falla es una característica importante en los Andes Centrales y es claramente observable en la zona. El segundo sistema de fallas se extiende en dirección promedio NE-SW, pero no es tan evidente como el primero, y en algunos casos coincide con la dirección de las quebradas. Estas características estructurales se pueden observar en la Figura 1.

**Figura 1**  
*Mapa de ubicación del área de estudio.*



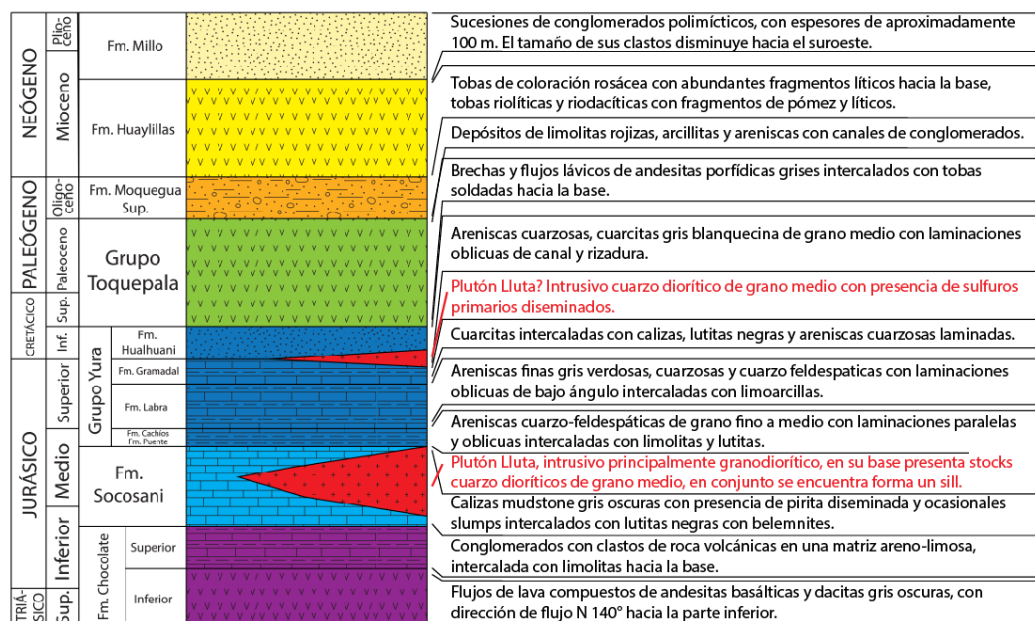
**Figura 2**

*Mapa geológico del área de estudio.*



**Figura 3**

*Columna estratigráfica de la zona de estudio.*



*Nota.* El gráfico mostrado corresponde a la simplificación de la columna estratigráfica levantada por Acosta et al. (2011).

### 2.2.2 Elementos de tierras raras (REE - Rare Earth Elements)

Los elementos de tierras raras son aquellos que conforman la serie de lantánidos y que tienen un número atómico que va desde 57 al 71, y se les suele incluir al elemento Y debido a su radio iónico similar al del elemento Ho. Esta clasificación se basa en el número atómico de los elementos. Los elementos con menor número atómico, desde La hasta Sm, se consideran tierras raras ligeras (LREE, light rare earths), mientras que los elementos con mayor número atómico,

desde Gd hasta Lu, se clasifican como tierras raras pesadas (HREE, heavy rare earths) (Rollinson & Pease, 2021).

Los elementos de tierras raras tienen un estado de oxidación +3 y, generalmente, sus radios iónicos disminuyen a medida que aumenta el número atómico. Debido a esta disminución en el radio iónico, las tierras raras pesadas tienen una mayor afinidad por las fases sólidas, lo que hace que coexistan con la fase líquida.

Los elementos de tierras raras suelen ser agrupados y presentados en diagramas, donde en el eje Y se muestra la concentración normalizada al condrito o manto primitivo, mientras que en el eje X se ubican los elementos desde el La hasta el Lu.

Es importante señalar que el agotamiento de los elementos de tierras raras pesadas en el fundido está relacionado con la presencia del mineral granate. En contextos de subducción intensa, como los que se observan en los Andes, puede ocurrir que la losa oceánica también se funda. En la losa se pueden encontrar facies eclogíticas, las cuales se identifican por la presencia de minerales como omfacita y granate, según ha señalado Winter, (2010).

Finalmente, estos diagramas de REE son utilizados ampliamente para analizar la petrogénesis de las rocas ígneas.

### ***2.2.3 Diagramas spider***

Los diagramas de multielementos, también conocidos como spider, se utilizan para agrupar elementos incompatibles con relación al manto primitivo o al condrito (Rollinson, 1993). A diferencia de los diagramas REE, los diagramas spider contienen otros elementos traza. En el estudio de rocas ígneas, estos diagramas se normalizan en tres formas: al manto primitivo, al condrito y al MORB. Aunque algunos elementos pueden ser considerados de interés personal, es importante usar valores universalmente aceptados (como los propuestos por Palme & O'Neill, 2007) para la normalización. En el estudio de rocas ígneas, se recomienda normalizar los diagramas spider con respecto al manto primitivo y al MORB.

### ***2.2.4 Diagramas de discriminación tectónica***

Los diagramas de discriminación tectónica se originaron de los estudios realizados por Pearce et al., (1984); Pearce & Cann, (1971, 1973) en los que se estableció la capacidad de distinguir los basaltos de distintos entornos tectónicos a partir de la composición química de sus magmas. Para emplear la discriminación de entornos tectónicos en la investigación de rocas ígneas, Rollinson, (1993) señala la necesidad de considerar tres aspectos: el uso de la técnica estadística del análisis discriminante, la evaluación rápida y precisa de los elementos traza que se consideran inmóviles en condiciones hidrotermales y la identificación de diversos entornos tectónicos.

**a) *Análisis discriminante***

En este caso, el propósito es identificar las variables que permiten clasificar de manera más precisa las muestras, las cuales se representan a través de las concentraciones de los elementos o de funciones discriminantes generadas a partir de ellas. De esta manera, se utilizan los discriminantes más significativos para definir los ejes en los diagramas bivariantes y triangulares (Rollinson, 1993).

**b) *Elementos trazas inmóviles***

Los avances en las técnicas de medición química, como la fluorescencia de rayos X (XRF), han permitido una medición más rápida y precisa de elementos trazas, incluyendo los HFSE (Ti, Zr, Hf, Y, REE, Nb, Ta y P), que son importantes para la discriminación tectónica. Los elementos traza inmóviles son particularmente útiles para construir diagramas de discriminación tectónica, ya que pueden ser usados en rocas alteradas hidrotermalmente y en rocas con bajo grado de metamorfismo (Rollinson, 1993).

**c) *Ambientes tectónicos***

Inicialmente, Pearce & Cann (1971, 1973) desarrollaron diagramas para identificar la firma química de rocas provenientes de arcos volcánicos, fondo oceánico e interior de placas. Actualmente, existen diagramas que permiten la discriminación tectónica en presencia de rocas graníticas y sedimentarias (Rollinson, 1993). En la Tabla 2, se presentan los diagramas más importantes

utilizados para la discriminación tectónica basados en los datos químicos de las rocas.

**Tabla 2**

*Diagramas de discriminación tectónica.*

<b>Granite types classified according to tectonic setting (after Pearce et al., 1984)</b>
<p><b>Ocean-ridge granites (ORG)</b>            Granites associated with normal ocean ridges            Granites associated with anomalous oceanic ridges            Granites associated with back-arc basin ridges            Granites associated with fore-arc basin ridges</p>
<p><b>Volcanic-arc granites (VAG)</b>            Granites in oceanic arcs dominated by tholeiitic basalt            Granites in oceanic arcs dominated by calc-alkali basalt            Granites in active continental margins</p>
<p><b>Within-plate granites (WPG)</b>            Granites in intracontinent ring complexes            Granites in attenuated continental crust            Granites in oceanic islands</p>
<p><b>Collisional granites (COLG)</b>            Syn-tectonic granites associated with continent-continent collision            Post-tectonic granites associated with continent-continent collision            Syn-tectonic granites associated with continent-arc collision</p>

*Nota:* El siguiente listado de gráficos permite determinar el entorno tectónico en el que se han formado rocas ígneas plutónicas. *Fuente:* Rollinson (1993).

### **2.2.5 Diagramas de fertilidad**

Los diagramas a los que se hace referencia en este texto están relacionados con el estudio de las rocas adakíticas, un término introducido por Defant & Drummond, (1990) y descrito por Kay, (1978) como una andesita rica en magnesio encontrada en la Isla de Adak en las Aleutianas. Las rocas adakíticas se caracterizan por tener un alto ratio La/Yb, lo que indica una alta proporción de elementos de

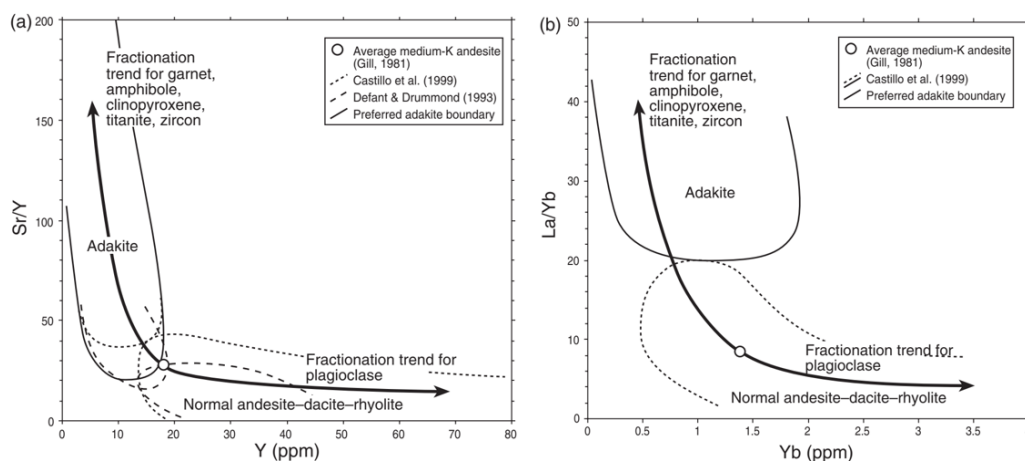
tierras raras ligeras en comparación con los elementos de tierras raras pesadas (LREE/HREE), así como altas concentraciones de Sr (~1800 ppm), y concentraciones relativamente altas en Mg, Cr y Ni en comparación con las andesitas normales. Estas rocas también tienen composiciones isotópicas de Pb y Sr no radiogénicos (Richards & Kerrich, 2007).

Según Chiaradia et al., (2012), los depósitos de tipo pórfido podrían estar relacionados con una alta relación de estroncio a itrio (Sr/Y), y es importante comprender la asociación entre las rocas ígneas con altos valores de Sr/Y y los depósitos de tipo pórfido para desarrollar modelos genéticos aplicables en la exploración de minerales.

Los diagramas de Sr/Y vs Y (Defant & Drummond, 1990) y La/Yb vs Yb (Castillo et al., 1999) son herramientas que pueden utilizarse para diferenciar entre rocas magmáticas productivas y no productivas (Fig. 4).

## Figura 4

Diagrama de fertilidad Y vs Sr/Y y Yb vs La/Yb.



*Nota:* Ambos diagramas permiten la discriminación entre rocas magmáticas fértiles y estériles mediante la identificación de los campos correspondientes a las lavas de adakita y de arco insular de andesita-dacita-riolita. Además, se ilustran las trayectorias típicas de diferenciación que resultan del fraccionamiento de varios minerales. *Fuente:* Richards y Kerrich (2007), Defant y Drummond (1993) y Castillo et al. (1999).

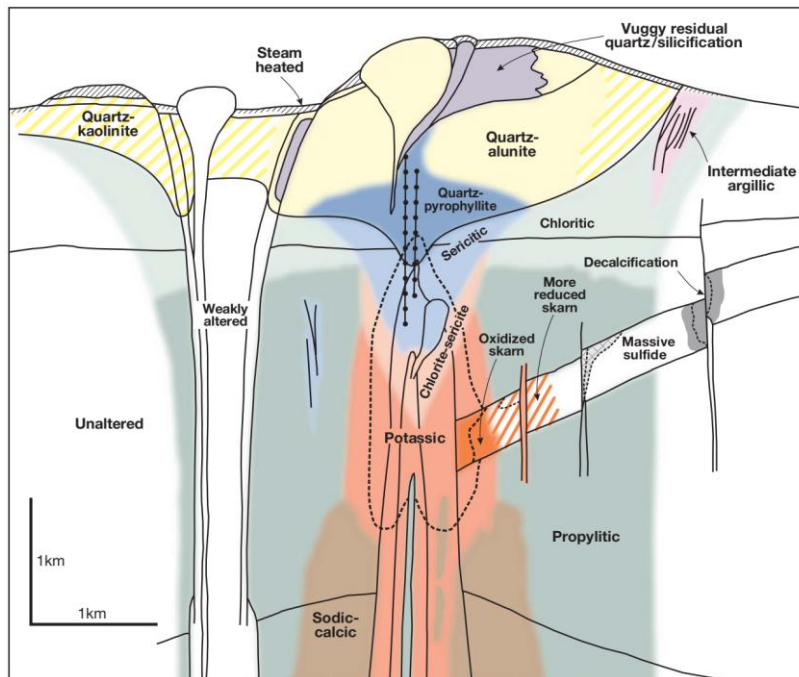
### 2.2.6 Yacimientos tipo pórfido

Los sistemas de pórfido de cobre son grandes volúmenes de roca alterada hidrotermalmente asociados a stocks. Los yacimientos típicos de pórfido de cobre hipogénicos presentan leyes promedio de cobre de 0,5 a 1,5 %, de molibdeno de <0,01 a 0,04 % y de oro de 0,0X a 1,5 g/t, aunque algunos yacimientos "solo de oro" contienen leyes de oro de 0,9 a 1,5 g/t, pero poco cobre (<0,1 %) (Sillitoe, 2010).

La mineralización y alteración en los depósitos de pórfidos de cobre se divide en varias zonas ascendentes, comenzando por la zona estéril y luego la zona

temprana sódica-calcárea, seguida por la zona potencialmente mineral potásica, la zona clorita-sericita y la zona sericita, hasta la zona avanzada argílica, la cual forma los litocaps y puede tener más de 1 km de espesor si no se ve afectada por la erosión (Sillitoe, 2010). Se puede observar esta división en la Figura 5.

**Figura 5**  
Modelo de yacimientos Pórfido de Cobre y asociados.



*Nota:* Patrón de zonificación de alteración-mineralización generalizado para yacimientos pórfido de Cu (-Mo) telescopados. *Fuente:* Sillitoe (2010).

### ***2.2.6.1 Control tectono-estructural en el desarrollo de yacimientos tipo pórfido***

Tosdal & Dilles, (2020) explican que el ambiente tectónico en el que se forman los pórfidos de cobre es poco o nada compresivo, y se da en una zona de subducción o colisión de placas.

Los estudios de Sillitoe, (1998) sugieren que el emplazamiento de magmas calco-alcalinos o alcalinos en la corteza superior durante la deformación compresiva, incluyendo la transpresiva, y el rápido levantamiento y desprendimiento tectónico son factores que favorecen el desarrollo de grandes yacimientos de pórfidos de cobre de alta ley debido a una combinación de razones.

De acuerdo con Clemens & Mawer, (1992), la compresión tectónica impide el ascenso del magma hacia la corteza superior, lo que resulta en cámaras magmáticas más grandes y poco profundas en comparación con las que se forman en entornos de arcos extensionales.

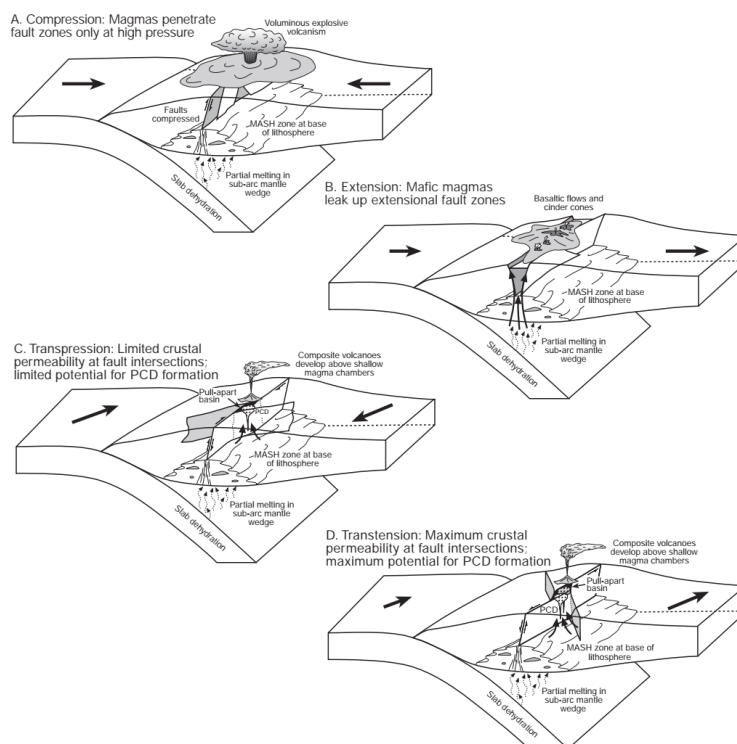
Se ha observado que las grandes cámaras magmáticas poco profundas fraccionan de manera más eficiente, lo que puede promover la liberación de grandes cantidades de fluidos metálicos y la saturación de volátiles. Esto se debe a que el tamaño de las cámaras magmáticas es un factor importante en el proceso de fraccionamiento, y las cámaras más grandes tienden a fraccionar de manera más completa que las más pequeñas. Esto, a su vez, puede contribuir a la formación de grandes yacimientos de pórfido de cobre de alta ley (Sillitoe, 1998).

Asimismo, la compresión reduce la cantidad de fallas escarpadas extensionales y, por lo tanto, potencialmente disminuye el número de stocks cilíndricos subvolcánicos de pórfidos que se forman en las partes superiores de las cámaras magmáticas principales (Sillitoe, 1998).

El relajamiento del esfuerzo de compresión en la litósfera puede permitir que los magmas asciendan más pasivamente impulsados por las fuerzas de flotación, en lugar de hacerlo violentamente por la sobrepresión magmática, y potencialmente formar yacimientos de tipo pórfido. Estos magmas tienden a ascender hasta la corteza poco profunda, donde pueden sufrir un mayor fraccionamiento e interacción con la corteza. Si bien el vulcanismo puede ocurrir, es más localizado y se forman discretos edificios directamente sobre las cámaras magmáticas someras. Esto se ilustra en la Figura 6 (Richards & Tosdal, 2001).

**Figura 6**

*Relación entre la tectónica de los márgenes convergentes.*



*Nota:* Representación gráfica de la relación entre la tectónica de los márgenes convergentes, las estructuras de las placas superiores y el magmatismo. *Fuente:* Richards & Tosdal, (2001).

### ***2.2.7 Superunidades del Batolito de la Costa***

La geología de rocas plutónicas, especialmente aplicada a batolitos cordilleranos como el Batolito Costero del Perú, el concepto de "super-unidad" se define como:

Una superunidad es una agrupación jerárquica de diversas unidades de rocas plutónicas que, aunque pueden estar distribuidas en múltiples plutones separados, presentan una clara relación o "parentesco" y están consistentemente asociadas en tiempo y espacio. Es un término análogo a "grupo" en la nomenclatura estratigráfica, mientras que una "unidad" es análoga a una "formación" (Cobbing, 1982). Los geólogos prefieren el término "super-unidad" para enfatizar esta progresión jerárquica, en lugar de otros como "suite" o "secuencia".

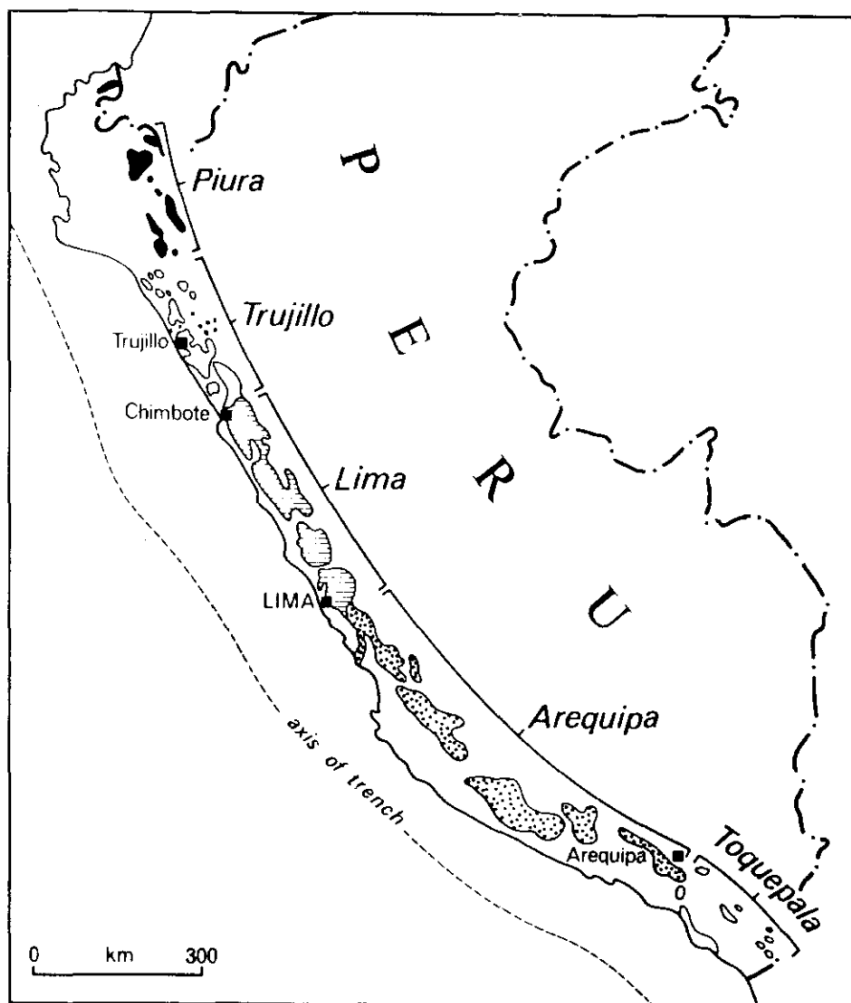
Los criterios clave para definir el "parentesco" dentro de una super-unidad incluyen:

- Asociación consistente espacial y temporalmente de todas las unidades constituyentes.
- Evolución progresiva de la mineralogía y de las interrelaciones texturales, particularmente del cuarzo y el feldespató potásico.
- Mantenimiento de una granulometría similar de los minerales que los componen.

Las superunidades suelen poseer características distintivas, incluso en detalles texturales, lo que sugiere que las condiciones de ascenso, diferenciación y

consolidación final de cada tipo de magma original fueron muy estereotipadas. Además, la llegada de los magmas a la corteza superior en diferentes momentos puede generar diacronismo magmático.

**Figura 7**  
*Segmentos principales del Batolito de la Costa.*



*Nota:* Cada segmento principal está comprendido por una serie de super-unidades, por ejemplo, el segmento Arequipa está compuesto de cinco superunidades: Tiabaya, Incahuasi, Pampahuasi, Linga y Patap.

*Fuente:* Cobbing, 1982.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 ETAPA PRECAMPO**

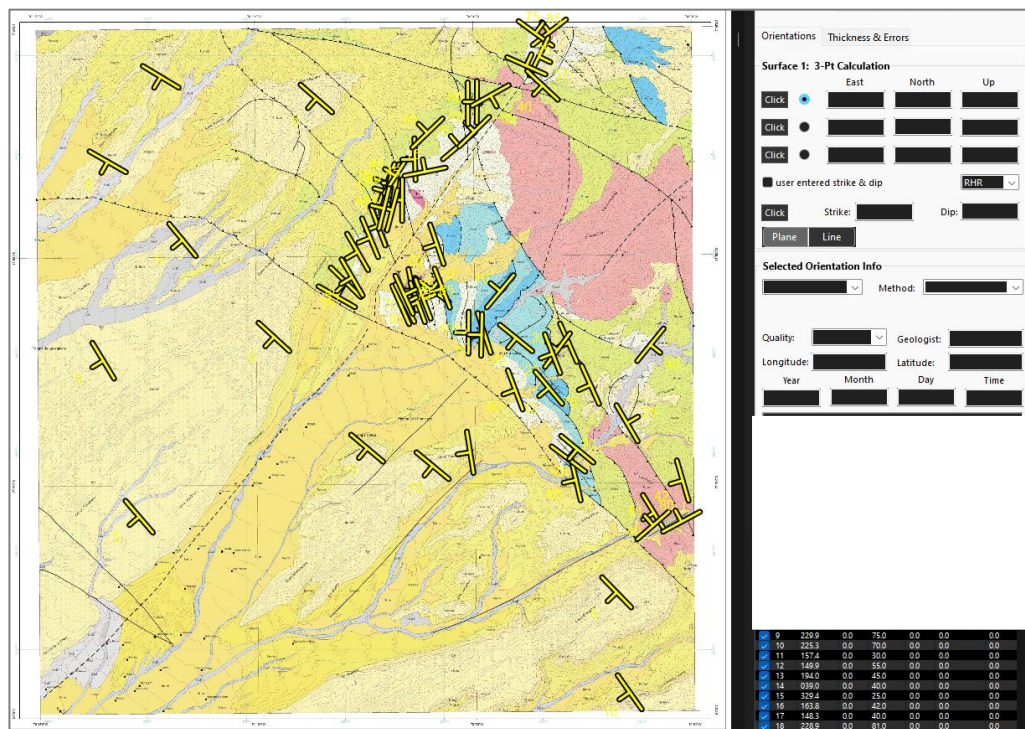
En la etapa de precampo, el primer paso consiste en recolectar información histórica que ha sido plasmada en trabajos realizados previamente por otros investigadores. Esta información es valiosa, ya que permite obtener datos relevantes para la investigación. Entre los datos que se pueden obtener se encuentran las edades absolutas de las muestras (a través de dataciones radiométricas), los datos geoquímicos de roca total y sedimentos, los estudios petrográficos, las mediciones de estructuras y otros tipos de información relevante para la investigación (ver Fig. 08).

Es importante destacar que la calidad de la información recopilada en esta etapa es fundamental para el éxito de la investigación. Por ello, es recomendable asegurarse de que los datos obtenidos sean fiables y estén respaldados por metodologías rigurosas y por investigadores reconocidos en el campo. Además, se debe realizar una revisión crítica de los datos, con el objetivo de verificar su precisión y relevancia para la presente investigación.

Una vez recopilada la información histórica en la etapa de precampo, se llevará a cabo un proceso de depuración y validación de los datos. Es importante

señalar que, a pesar de haber sido recopilados por investigadores reconocidos, existe la posibilidad de que algunos datos presenten inconsistencias o errores en su determinación, lo que podría afectar la calidad y la confiabilidad de la información obtenida.

**Figura 8**  
*Digitalización de información estructural.*



*Nota:* Registro y digitalización de información estructural mediante el software libre GMDE.

*Fuente:* El software empleado corresponde a Allmendinger, (2020).

Por esta razón, es necesario realizar un proceso riguroso de depuración de los datos, mediante el cual se identifiquen y eliminen aquellos que no cumplan con los criterios establecidos para su uso en la investigación. Luego, se llevará a cabo una validación de los datos depurados, con el fin de verificar su precisión y su

coherencia con los objetivos de la investigación. Este proceso permitirá asegurar que los datos utilizados en la investigación sean fiables y representativos de la realidad estudiada.

Por ejemplo, en el caso de datos geoquímicos históricos, resulta fundamental evaluar la metodología empleada por los investigadores, que incluye tanto el tipo de técnica instrumental utilizada como el tipo de digestión empleada (por ejemplo, digestión multiácida, digestión por agua regia o fusión con metaborato de litio). La elección de la técnica instrumental y la digestión adecuadas es crucial, ya que estas decisiones pueden afectar significativamente la concentración de los elementos químicos, lo que a su vez podría impactar en la interpretación de los datos. En consecuencia, es esencial conocer con precisión la metodología empleada para asegurar que la concentración de los elementos químicos refleje de manera aproximada su concentración real.

Finalmente, se utilizó una combinación de imágenes satelitales de alta resolución para obtener información preliminar sobre las estructuras y litologías presentes en el área de estudio. En concreto, se analizaron imágenes satelitales de alta resolución (BING Aerial), así como imágenes satelitales de alta resolución espectral (ASTER).

Es importante destacar que el análisis de imágenes satelitales de alta resolución es un proceso clave en la investigación, ya que proporciona información

útil para identificar zonas de interés y optimizar el trabajo en campo. Asimismo, es necesario realizar un análisis riguroso de los datos obtenidos a partir de las imágenes satelitales, con el objetivo de asegurar su fiabilidad y coherencia con los objetivos de la investigación.

### **3.2 ETAPA DE CAMPO**

Durante la etapa de campo, se llevó a cabo un levantamiento geológico detallado de la zona de estudio, centrándose especialmente en las unidades intrusivas que componen el Plutón Lluta. Para ello, se utilizó información de base proporcionada por mapas topográficos, que permitieron obtener una visión general de la zona y orientar el trabajo de campo de manera eficiente (ver Fig. 9).

Durante el levantamiento geológico, se registraron minuciosamente los contactos litológicos, los tipos de roca, las estructuras y otras características de los afloramientos, lo que permitió obtener información valiosa para la investigación. Además, se realizaron mediciones precisas de las características geológicas de la zona, utilizando instrumentos y técnicas especializadas para obtener datos precisos y confiables.

En la presente investigación, se ha empleado la metodología de mapeo por travesías o *traversing*, que consiste en recorrer una ruta previamente establecida en un mapa, registrando la geología que se encuentra a lo largo de la misma. Las travesías son una herramienta valiosa para controlar la densidad de las

observaciones y permiten obtener información detallada sobre la geología de la zona de estudio.

Para garantizar la eficacia de las travesías, es importante planificarlas cuidadosamente, de manera que atraviesen transversalmente la geología de la región en la que se está trabajando. En el caso del trabajo de reconocimiento, que es su uso principal, se pueden realizar varias travesías aproximadamente paralelas a través del área de estudio, a intervalos espaciados, de modo que los contactos y otros rasgos geológicos se puedan extrapolar entre ellas.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la metodología de mapeo por travesías puede presentar algunas complicaciones en las regiones donde las rocas tienen buzamientos suaves o donde las fallas de buzamiento moderado a alto son escasos. En estos casos, la fiabilidad de los datos obtenidos puede disminuir a medida que las estructuras se vuelven más complejas. En consecuencia, se deben tomar medidas adicionales para garantizar la precisión y la confiabilidad de los datos obtenidos en estas situaciones.

En su trabajo publicado en 2011, (Lisle et al., 2011) detallaron diversas metodologías de mapeo o cartografía geológico. Por esta razón, se recomienda realizar una revisión exhaustiva de su trabajo con el fin de obtener una comprensión más amplia sobre las diferentes metodologías empleadas en el mapeo geológico.

El trabajo de Lisle et al. (2011) proporciona información valiosa sobre las técnicas y herramientas utilizadas en el mapeo geológico, así como sobre los desafíos y limitaciones que se pueden encontrar en el proceso. Además, ofrece recomendaciones y buenas prácticas para el desarrollo de un mapeo geológico riguroso y preciso.

Es importante destacar que el cartografiado geológico, es una etapa crucial de la investigación, ya que proporciona información detallada y precisa sobre las características geológicas de la zona de estudio. Esta información es fundamental para la interpretación de los datos obtenidos en etapas anteriores y para la elaboración de modelos geológicos que permitan explicar la génesis y evolución de la zona. En consecuencia, se realizó un trabajo riguroso y detallado en el campo, con el objetivo de obtener la información más completa y precisa posible.

### **Figura 9**

*Cartografiado geológico del Plutón Lluta.*



*Nota:* A) Cartografiado geológico en campo. B) Reconocimiento de las unidades geológicas del Plutón Lluta a través de su mineralogía modal.

Para la obtención de datos estructurales se utilizó la regla de la mano derecha, también conocida por sus siglas en inglés como RHR (*Right Hand Rule*). Esta regla se basa en que el pulgar indica el rumbo y los otros dedos indican la inclinación. Dado que el pulgar se ubica a la izquierda de los demás dedos en la mano derecha, se debe sumar  $90^\circ$  al rumbo para obtener la dirección de inclinación correspondiente.

Esta metodología resulta ventajosa, ya que permite simplificar el tratamiento posterior de los datos, al utilizarse valores numéricos en lugar de alfanuméricos. Además, la regla de la mano derecha facilita la manipulación de los datos en software especializados como FaultKin, Stereonet, entre otros (Allmendinger et al., 2012; Cardozo & Allmendinger, 2013; Marrett & Allmendinger, 1990).

Cabe destacar que el uso de la regla de la mano derecha es una práctica común y ampliamente aceptada en el campo de la geología estructural. Su sencillez y eficacia hacen de ella una herramienta valiosa para la obtención de datos precisos y confiables en el análisis estructural de rocas y otros materiales geológicos (ver Fig. 10).

## Figura 10

*Cartografiado de rasgos estructurales del Plutón Lluta.*



*Nota:* A) Medición de la foliación de las flamas en las rocas de composición andesítica de la Formación Chocolate. B) Medición de trend y plunge de las lineaciones o estrías de falla en el plano, en rocas granodioríticas del Plutón Lluta.

El muestreo de rocas se ha llevado a cabo siguiendo un enfoque riguroso y representativo, basado en la selección de afloramientos que presentan poca alteración por efecto del intemperismo. Esta estrategia tiene como objetivo evitar la adición o pérdida de elementos móviles en las muestras, lo que podría afectar la calidad y la confiabilidad de los resultados.

En promedio, se ha obtenido una cantidad de muestra de 5 kg por cada espécimen, esto en función del tamaño de grano, utilizando herramientas especializadas para obtener fragmentos de grandes dimensiones. Para minimizar la contaminación, se ha retirado la cubierta superficialmente alterada de las muestras utilizando un martillo geológico, y se ha evitado colocar la muestra sobre restos de otras rocas o de suelo.

Las muestras óptimas se han almacenado en bolsas de muestreo, que se han sellado con bridas de plástico y etiquetado con el código correspondiente. Además,

se han registrado las coordenadas del punto de muestreo en unidades UTM WGS1984 y se han anotado en la libreta de campo, lo que garantiza la trazabilidad y la precisión geoespacial de las muestras.

Es importante destacar que el muestreo de rocas es una etapa crítica en la investigación geológica, ya que un correcto muestreo influye directamente en la precisión y la confiabilidad de los datos posteriores, tanto para la geoquímica como para los análisis por Difracción de Rayos X (DRX) (ver Fig. 11).

### **Figura 11**

*Muestreo geoquímico de rocas plutónicas.*



*Nota:* (A, B) Reducción del tamaño de muestra en campo, obtenida del afloramiento.

### **3.3 ETAPA POSCAMPO**

Una vez obtenidas y almacenadas las muestras de roca en bolsas debidamente aseguradas para evitar contaminación, se han destinado 20 muestras de roca al análisis químico al laboratorio de ALS, ubicado en Lima - Callao. Este

análisis tiene como objetivo determinar la composición química de las rocas y la abundancia de los elementos presentes en las mismas.

Para determinar la concentración de elementos en las rocas del Plutón Lluta, se han realizado análisis químicos utilizando dos técnicas especializadas: XRF (fluorescencia de rayos X) e ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente).

En el caso del análisis XRF, se ha utilizado el método de digestión total por fusión con borato de litio, que permite determinar la concentración de elementos mayores y menores en la roca ( $> 0.1 \%$ ). Por otro lado, el análisis ICP-MS se ha llevado a cabo mediante una digestión parcial por cuatro ácidos ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{HF}$  y  $\text{HCl}$ ), que permite determinar la concentración de elementos trazas ( $< 0.1 \%$ ), incluyendo elementos litófilos, calcófilos y siderófilos, evitando el efecto matriz, lo cual reduce la precisión y aumenta el límite de detección a diferencia de la digestión por fusión con borato de litio (Halley, 2020).

Para garantizar la calidad y la confiabilidad de los resultados, se ha optado por utilizar el paquete CCP-PKG03 de ALS Global, que cumple con los requisitos antes mencionados. En este sentido, se han analizado un total de 20 muestras de roca utilizando estas técnicas, lo que ha permitido obtener información detallada sobre la composición química de las rocas del Plutón Lluta.

Por otro lado, para el análisis petrográfico de las rocas que componen el Plutón Lluta, se han enviado 20 chips de roca de dimensiones 7 x 4 x 2 cm a un laboratorio externo ubicado en Lima, para su preparación y posterior análisis bajo el microscopio petrográfico. Este análisis ha sido llevado a cabo en el laboratorio petrográfico de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia (UNJBG), y corresponde a un análisis mineralógico modal que permite determinar las variaciones mineralógicas y texturales de las rocas del Plutón Lluta (ver Fig. 12).

Cabe destacar que los análisis químicos y petrográficos son esenciales en la investigación geológica, ya que permiten obtener información valiosa sobre las características y propiedades de las rocas y los materiales geológicos estudiados.

En la realización de los estudios petrográficos de las 20 muestras de roca del Plutón Lluta, se ha utilizado un microscopio de polarización de la marca MICROS AUSTRIA, modelo MICROS ACHRO. Este instrumento cuenta con un sistema óptico de alta calidad y una amplia gama de aumentos, lo que permite la observación detallada de las propiedades y características de los minerales presentes en las rocas.

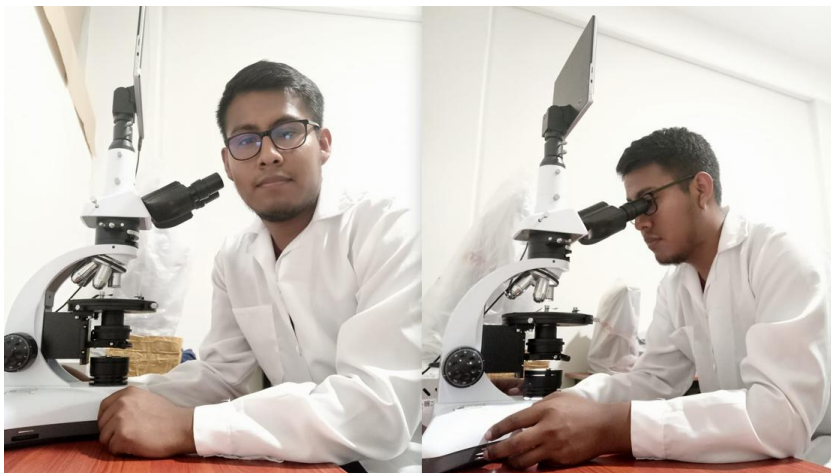
Para el reconocimiento de la mineralogía y las propiedades diagnóstico de los minerales, como el color, pleocroísmo, relieve, anisotropía, color de interferencia, birrefringencia, entre otros, se ha utilizado principalmente un objetivo

de 4x de aumento. En algunos casos puntuales, se ha utilizado un objetivo de 10x para una mejor visualización de las características de los minerales.

Además, en los estudios petrográficos se ha utilizado tanto nícoles cruzados como nícoles paralelos, con el objetivo de resaltar las características de los minerales y permitir su identificación precisa.

**Figura 12**

*Análisis petrográfico de las rocas intrusivas del Plutón Lluta.*



*Nota:* Estudio petrográfico en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia (ESGE).

Seguidamente, en un laboratorio externo ubicado en Cusco, se ha llevado a cabo un estudio de difracción de rayos X para analizar la mineralogía de las pulpas de rechazo resultantes de los análisis químicos realizados por ALS. Se ha utilizado una muestra de 60 gramos de estas pulpas, con una granulometría de 0.075 mm (malla #200), que ha sido pulverizada hasta alcanzar una granulometría de 0.045 mm (malla #325) para lograr una mejor precisión en los resultados.

Las muestras pulverizadas se han etiquetado y almacenado en sobres, y posteriormente se han prensado en briquetas de acero. Se ha rotulado cada briqueta para identificar la muestra y se ha introducido en el difractómetro de rayos X modelo D8 ENDEAVOR de la marca BRUKER. Este equipo utiliza rayos X de 3 kW generados por un tubo de cobalto y cuenta con un detector de 160 canales para obtener un difractograma preciso de la muestra.

Para el análisis cuantitativo, se ha utilizado el software DIFFRAC TOPAS, el cual previamente carga las fases minerales presentes y cuantifica la mineralogía a partir de los principales picos de difracción característicos de las fases minerales. Para garantizar la precisión de los resultados, se ha cumplido la condición fundamental del método de RIETVEL de obtener un valor de parámetro RWP (que se utiliza para evaluar la calidad del ajuste entre los patrones de difracción experimental y teórico) menor al 10 %.

Finalmente, los resultados obtenidos se han registrado en una hoja de Excel y se han adjuntado a los resultados químicos para su análisis e interpretación.

## **CAPÍTULO IV**

### **GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL PLUTÓN LLUTA**

#### **4.1 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD**

##### ***4.1.1 UBICACIÓN***

El área de estudio de la presente investigación se sitúa en el departamento de Tacna, en los distritos de Pachía y Palca. El área forma un polígono irregular de aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, además se encuentra situada en la Cordillera Occidental (ver Anexo 04).

##### ***4.1.2 ACCESIBILIDAD***

Para acceder al área de estudio, se puede realizar de manera terrestre desde la ciudad de Tacna, tomando la carretera Tacna-Collpa-La Paz, la cual se encuentra asfaltada, esta pasa por el distrito de Pachía y Palca. Además, podemos tomar los desvíos de trocha situados en la Quebrada Caplina y en el caserío de Pallagua. La duración del viaje es de aproximadamente una hora y media. En el Anexo 04, se muestra en detalle el plano de ubicación del área de estudio.

## **4.2 LITOLOGÍA**

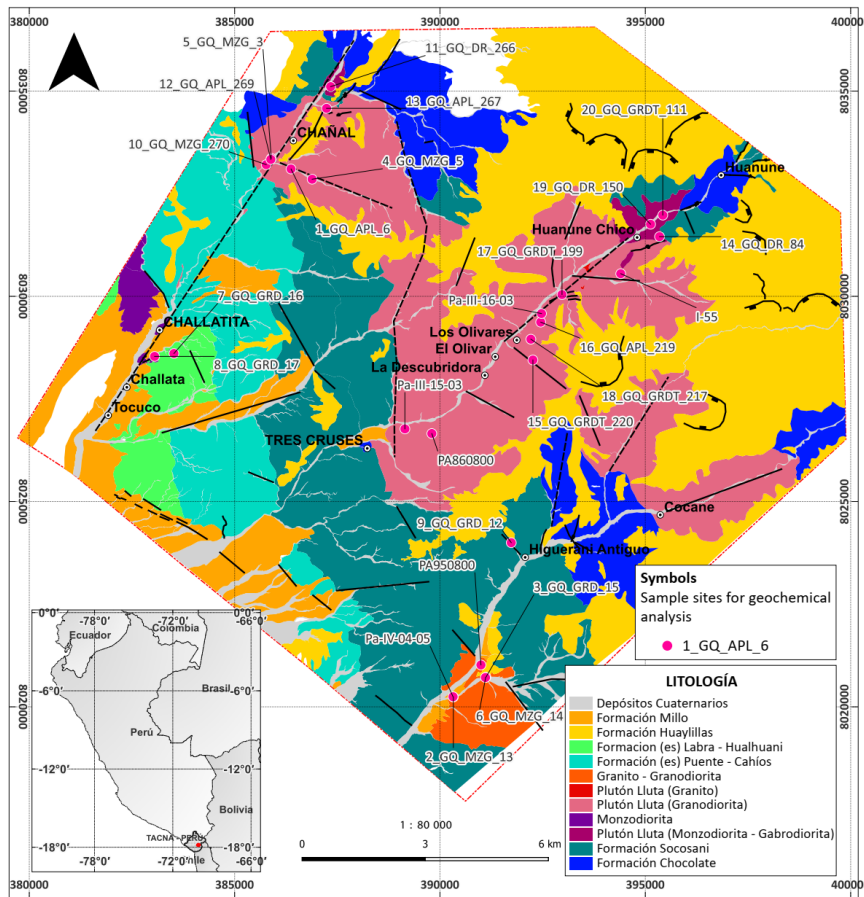
### **4.2.1 PLUTÓN LLUTA**

En el área de estudio, es común poder notar el dominio de los cuerpos intrusivos, los cuales en conjunto comprenden al Plutón Lluta. Estos cuerpos intrusivos son principalmente stocks de composición intermedia, gradando de stocks dioríticos a graníticos, en conjunto poseen una forma tabular concordante (sill) (Pino et al., 2004), tienen como roca encajonante a las rocas sedimentarias de la Formación Socosani (Toarciano – Bathoniano). Adicionalmente, en el área de estudio están presentes cuerpos de diques que corresponden a monzogranitos de schorl ( $\text{NaFe}^{++3}\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ ) de grano fino, intruyen principalmente a la granodiorita (en una etapa tardía), estos presentan orbículas de turmalina (schorl) de diámetro variado (5 mm – 5 cm), la turmalina presenta hábito radial, asociado a estos diques se pueden encontrar pequeños lentes de pegmatitas de composición granítica. Además, se ha observado en campo la presencia de diques tabulares que corresponden a diques lamprófidos o basálticos, de las etapas tardías en las fases intrusivas.

Es importante señalar la relación de cuerpos intrusivos con cuerpos vetiformes de sulfuros polimetálicos (Vargas, 1975), que se han explotado antiguamente y que actualmente solo algunas continúan su explotación, por medio de galerías.

En la Figura 13, se muestra la distribución de las rocas intrusivas que comprenden al Plutón Lluta, así como las muestras seleccionadas para los estudios petrográficos y geoquímicos. En la Figura 14, se puede observar la sección NE – SW, señalando el tipo de intrusión concordante con las rocas sedimentarias de la Formación Socosani. En mapa elaborado en la presente investigación se puede ver en el Anexo 05.

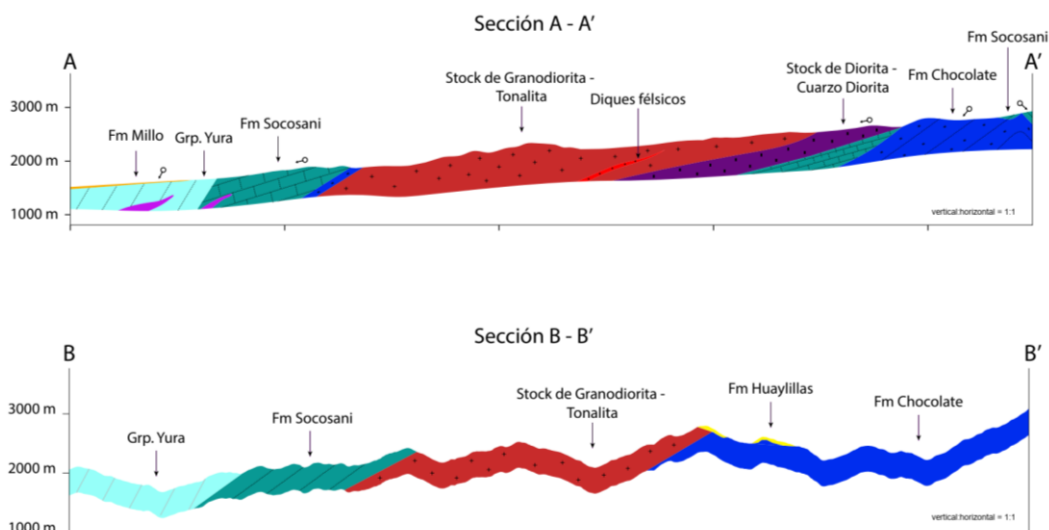
**Figura 13**  
*Mapa geológico del Plutón Lluta.*



*Nota:* Mapa geológico del Plutón Lluta elaborado en el presente estudio, con la ubicación de las muestras para análisis químico y petrográfico.

**Figura 14**

*Sección NE – SW, E-W del área de estudio.*



*Nota:* Las secciones muestran cómo se posiciona el Plutón Lluta con respecto de su roca caja.

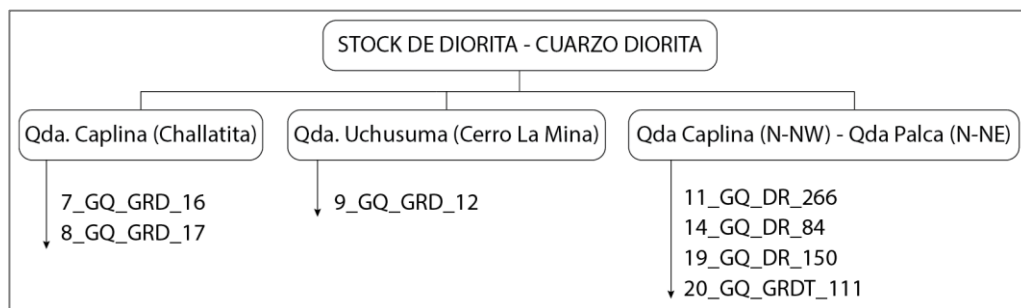
#### **4.2.1.1 STOCKS DE DIORITA – CUARZO DIORITA**

La distribución de estas rocas en el área de estudio se encuentra principalmente extendida en la parte NW y NE, entre la Quebrada Caplina y Chañal, y entre la Quebrada Palca a la altura del Cerro Huanuane (se resume en la Fig. 15), éstas rocas están en contacto con las rocas de la Formación Socosani (Jurásico medio), el contacto concordante es evidente en el sector del cerro Huanuane en la Quebrada Palca. Además, en este sector se han evidenciado, en la base de la quebrada, rocas intermedias con una apariencia máfica, que en un inicio se clasificó como rocas gabroicas (clasificación de campo) (Le Maitre et al., 2002). Macroscópicamente estas rocas poseen una textura fanerítica equigranular de grano

medio y se resalta la abundancia de anfíboles, así como la presencia de sulfuros diseminados que reemplazan a los minerales ferromagnesianos (ver Fig. 20). La segunda agrupación de estas rocas se ubica en las cercanías del caserío Challatita al W del área de estudio y otra en las faldas del Cerro La Mina cerca al antiguo caserío de Higuerañi, esto al SE del área de estudio, a diferencia de la primera agrupación, estas rocas presentan un tamaño de grano diferenciado. En el sector del cerro La Mina, el tamaño de grano es fino y presenta una alta presencia de sulfuros de hierro como piritita. En el sector del caserío Challatita, el tamaño de grano es medio, con la presencia de sulfuros de hierro y cobre diseminados.

**Figura 15**

*Esquema de la agrupación de stocks de diorita – cuarzo diorita.*



*Nota:* Resumen esquemático de las muestras representativas para los stocks de diorita – cuarzo diorita clasificadas por zonas del área de estudio.

Estas rocas en conjunto con las granodioritas forman una estructura tabular, que ha instruido concordantemente las rocas sedimentarias de la Formación Socosani, en los contactos se puede observar algunas gradaciones e intercalaciones

con cherts (e.g. Fig. 18), principalmente estas se pueden observar en la Quebrada Palca.

Además, en la Quebrada Palca, se observan contactos fallados y el contacto principal entre la Formación Socosani y las rocas dioríticas presenta algunas intercalaciones con los cherts en forma de sills (ver Fig. 16). Las dioritas presentan una coloración gris oscura y un diaclasamiento fuerte, esto producto de la Orogenia Andina. Estas rocas macroscópicamente presentan cristales anhedrales de plagioclasa y cuarzo menor, a simple vista se pueden observar los cristales de anfíboles que son abundantes en las muestras de mano.

### **Figura 16**

*Contacto entre el Plutón Lluta y la Formación Socosani.*



*Nota:* Afloramiento de diorita en contacto fallado con rocas de la Formación Socosani, ubicado en la Quebrada Palca.

Los contactos de estos stocks son concordantes y en los afloramientos se presenta como sills y en algunos casos locales como diques. En la zona norte del

área de estudio (Qda. Caplina y Qda. Palca), no se aprecia estructuras de inyección de magma forzada (ver Fig. 18), la intrusión se presenta de manera pasiva (concordante). Sin embargo, en las intrusiones de los sectores de Challatita (Qda. Caplina) y Cerro La Mina (Qda. Uchusuma) se observan deformaciones en la roca encajonante que corresponden a rocas del Grupo Yura / Formación Socosani, las cuales han sufrido metamorfismo de contacto y deformación (ver Fig. 17).

La diferencia en el modo de emplazamiento y otros rasgos físicos como la coloración son indicios de magmatismo en diferentes estadios, que se han emplazado en tiempo y espacio distintos, se sugiere la datación radiométrica por el método de U/Pb en zircones para la confirmación de esta hipótesis.

**Figura 17**

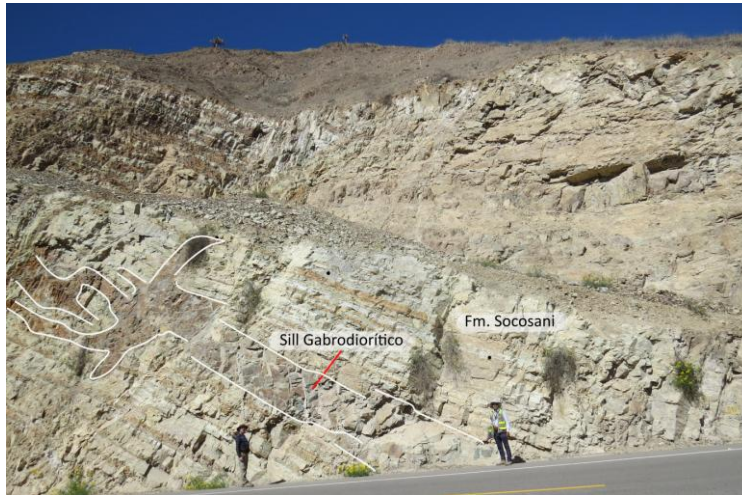
*Contacto entre el Plutón Lluta y el Grupo Yura.*



*Nota:* Afloramiento de rocas cuarzo dioríticas emplazadas en rocas sedimentarias del Grupo Yura, con estructuras de deformación producto del emplazamiento.

### **Figura 18**

*Gabrodiorita intruyendo concordantemente a la Formación Socosani.*



*Nota:* Representación de un dique de gabrodiorita intruyendo concordantemente las secuencias sedimentarias de la Formación Socosani.

En la Quebrada Caplina, estas rocas cuarzo dioríticas, afloran más arriba de la intersección entre la Quebrada Caplina y la Quebrada Chañal, estas rocas presentan una extensión mayor hacia el flanco izquierdo de la Quebrada Caplina (ver Fig. 19) y fuerte fracturamiento. Además, en la muestra de mano se puede observar la presencia de sulfuros de cobre diseminado en los minerales ferromagnesianos (principalmente a los anfíboles).

**Figura 19**

*Afloramiento de rocas cuarzo dioríticas en el sector de la Quebrada Caplina.*

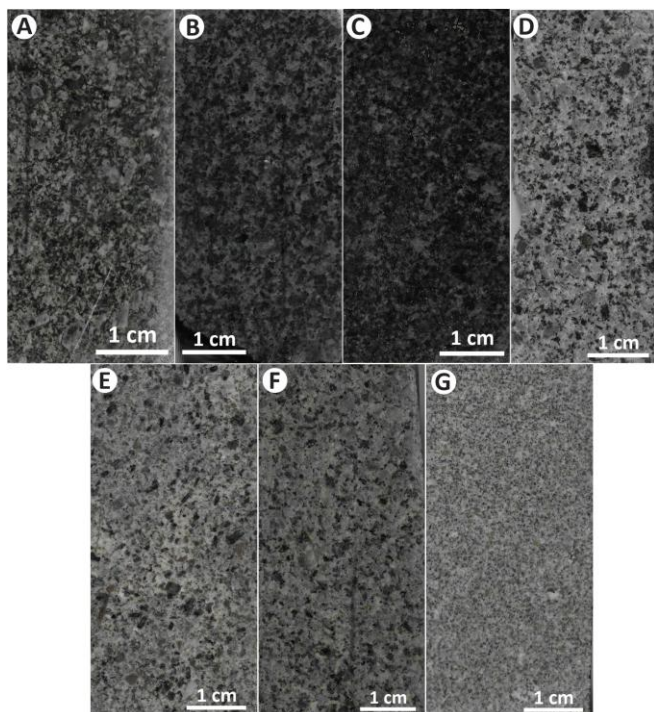


*Nota:* El afloramiento mostrado se ubica camino al Santuario de Pallagua.

Cronológicamente se ha realizado una datación U/Pb en zircones de las suites intermedias (dioritas – cuarzo dioritas) arrojando una edad de  $72.4 \pm 0.5$  Ma (Demouy et al., 2013), siendo la edad más antigua para esta suite plutónica intermedia, por otra parte, las rocas que afloran cerca al caserío de Challatita, tienen edades Ar-Ar en hornblenda de  $78.18 \pm 4.82$  Ma (Clark et al., 1990), aparentemente ambas edades presentan similitud, sin embargo no se tiene la ubicación precisa de la muestra datada por Demouy et al., 2013, por lo que es complicado realizar la afirmación de dicha hipótesis, esto ha limitado la posibilidad de generalizarlos.

**Figura 20**

*Vista macroscópica de los stocks de diorita – cuarzo diorita.*



*Nota:* a) Vista macroscópica muestra 11\_GQ\_DR\_266. b) Vista macroscópica muestra 14\_GQ\_DR\_84. c) Vista macroscópica muestra 19\_GQ\_DR\_150. d) Vista macroscópica muestra 20\_GQ\_GRDT\_111. e) Vista macroscópica muestra 7\_GQ\_GRD\_16. f) Vista macroscópica muestra 8\_GQ\_GRD\_17. g) Vista macroscópica muestra 9\_GQ\_GRD\_12.

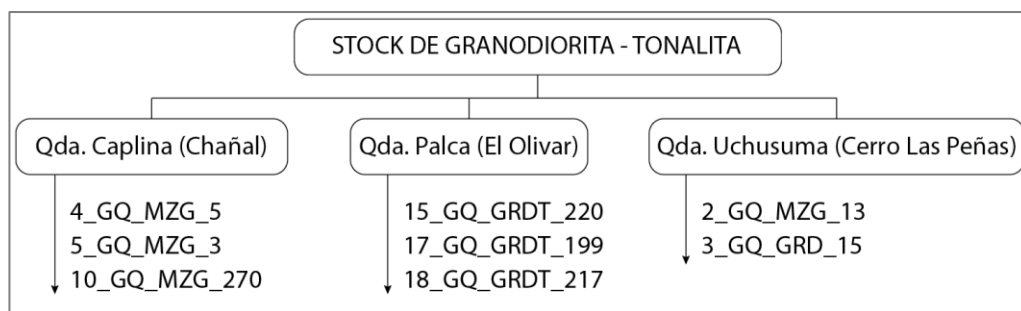
#### **4.2.1.2 STOCKS GRANODIORÍTICOS – TONALÍTICOS**

La distribución de estas rocas en el área de estudio se encuentra ampliamente extendida, presentándose extensos afloramientos en la Quebrada Palca, Caplina y Uchusuma (se resume en la Fig. 21), en conjunto representan más del 50 % de las rocas presentes en el Plutón Lluta, estas rocas se presentan como sills y son concordantes con las rocas de la Formación Socosani. En la Quebrada Caplina y Uchusuma presentan fuerte presencia de enclaves máficos (ver Fig 22).

La coloración de estas rocas es variable, presentando tonalidades grises principalmente y gradando a tonalidades grises claras en las suites de tonalíticas (ver Fig. 25).

**Figura 21**

*Esquema de la agrupación de stocks de granodiorita - tonalita.*



*Nota:* Esquema de las muestras representativas para los stocks de granodiorita – tonalita por zonas del área de estudio.

Los stocks de granodiorita – tonalita instruyeron concordantemente a las secuencias sedimentarias de la Formación Socosani en similitud con las suites intermedias antes expuestas. En el sector de la Quebrada Palca se puede observar su contacto con secuencias de calizas de la Formación Socosani, además localmente se puede notar xenolitos metamorfizados de las rocas volcánicas de la Formación Chocolate (ver Fig. 23). En la Quebrada Caplina en el sector el Chañal se puede observar la presencia de enclaves máficos presentes en las rocas granodioríticas (ver Fig. 22), estos enclaves en su mayoría presentan una geometría circular a elipsoidal, además en la Quebrada Palca estos enclaves se presentan en menor proporción. En el mismo sector la presencia de sill y diques en el flanco derecho de

la Quebrada Caplina evidencia el modo de emplazamiento pasivo sin deformación de la roca caja (ver Fig. 24). Por otra parte, en el sector del Cerro Las Peñas en la Quebrada Uchusuma, están presente estas rocas, de las cuales no se ha podido observar su techo, no se evidencia rasgos de intrusión forzada sin embargo tampoco se ha observado diferencias en su mineralogía.

Es importante resaltar el metamorfismo de contacto de baja temperatura producto del emplazamiento del stock de granodiorita. En el sector de El Chañal (Qda. Caplina), se puede observar en la quebrada aledaña una fuerte epidotización de la roca caja sedimentaria. En la misma quebrada en el sector del Cerro Cactus inclusive se puede observar zonas de metamorfismo con la presencia de skarns de piroxenos y fuerte dolomitización de la roca caja compuesta de calizas. En la Quebrada Palca también se puede observar una fuerte epidotización del techo de la roca encajonante sedimentaria.

**Figura 22**

*Enclaves máficos en granodiorita.*



*Nota:* El afloramiento mostrado se ubica en el flanco izquierdo de la Quebrada Caplina.

**Figura 23**

*Xenolito de roca volcánica metamorfizada en stock de granodiorita.*



*Nota:* El afloramiento mostrado se ubica en la Quebrada Palca.

Macroscópicamente estas rocas poseen una textura fanerítica equigranular de grano medio, presentan enclaves máficos y además presentan pequeños lentes de pegmatitas graníticas posteriores. Es importante señalar que, en la zona sur del área de estudio, estas rocas hospedan las vetas polimetálicas que han sido explotadas antiguamente (Vargas, 1975).

Estructuralmente se evidencia nuevamente el control estratigráfico en el emplazamiento de las rocas granodioríticas – tonalíticas, las fallas han sido aprovechadas para alimentar los horizontes favorables, y en muchos casos se evidencia mineralización metálica asociada posterior. Estas rocas presentan un fuerte fracturamiento asociado por el cual han descendido fluidos meteóricos alterando así en muchos casos la roca fresca.

**Figura 24**

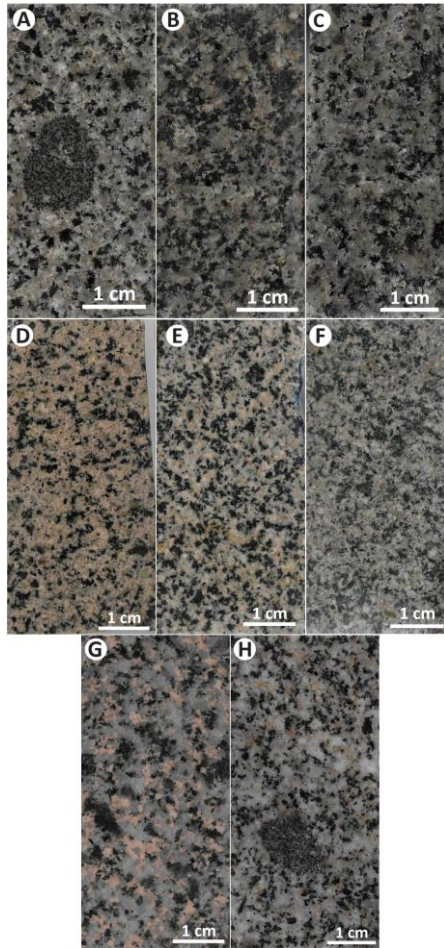
*Afloramiento de rocas sedimentarias de la Formación Socosani, en la que han intruído concordantemente las rocas granodioríticas del Plutón Lluta.*



*Nota:* El afloramiento se ubica en la Quebrada Caplina.

**Figura 25**

*Vista macroscópica de los stocks de granodiorita - tonalita.*



*Nota:* a) Vista macroscópica muestra 15\_GQ\_GRDT\_220. b) Vista macroscópica muestra 17\_GQ\_GRDT\_199. c) Vista macroscópica muestra 18\_GQ\_GRDT\_217. d) Vista macroscópica muestra 04\_GQ\_MZG\_5. e) Vista macroscópica muestra 05\_GQ\_MZG\_3. f) Vista macroscópica muestra 10\_GQ\_MZG\_270. g) Vista macroscópica muestra 2\_GQ\_MZG\_13. h) Vista macroscópica muestra 3\_GQ\_GRD\_15.

Se han realizado estudios geocronológicos a estos stocks por el método U/Pb en zircones (Demouy et al., 2013), y han arrojado edades de  $62.8 \pm 0.4$  y  $62.0 \pm 0.4$  Ma, edades que coinciden con el magmatismo regional del Batolito de la Costa

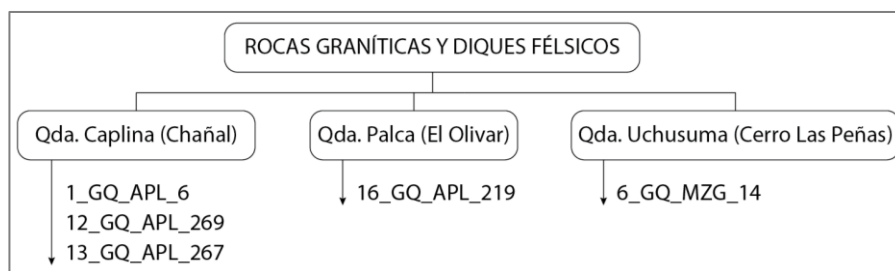
denominado super-unidad Yarabamba. Clark et al., 1990, ha realizado dataciones de estos stocks (en el sector de la Quebrada Tocuco y en las cercanías de la mina Cercana) por el método K-Ar en biotita arrojando edades de  $60.33 \pm 1.30$  Ma,  $60.90 \pm 1.83$  Ma y  $62.12 \pm 1.94$  Ma.

#### 4.2.1.3 ROCAS GRANÍTICAS Y DIQUES FÉLSICOS

La distribución de los diques félsicos (de composición granítica) en el área de estudio se encuentra hospedada principalmente en la suite de rocas granodioríticas - tonalíticas, se presentan como estructuras tabulares que cortan con un buzamiento fuerte a dichas rocas, es importante mencionar que estos diques no presentan márgenes de enfriamiento o deformaciones en los contactos, por lo cual se infiere que el emplazamiento de estos diques se ha dado durante las etapas finales de enfriamiento de la cámara magmática y corresponde por su composición textural, mineralógica y geoquímica a los estadios tardíos de la evolución de la cámara magmática.

**Figura 26**

*Esquema de la agrupación de stocks de granito y diques félsicos.*



*Nota:* Esquema de las muestras representativas para los diques félsicos y stocks graníticos por zonas del área de estudio.

Se resalta su presencia en la Quebrada Palca y Caplina (se resume en la Fig. 26), presentándose en la primera como diques de potencia considerable en las cercanías de la cantera de agregados usada para la construcción de la carretera Tacna – Palca, un rasgo característico de estos diques es la presencia de cristales de turmalina con un hábito radial, de dimensiones centimétricas (ver Fig. 28).

En la misma quebrada se pueden observar además la presencia de pegmatitas de dimensiones menores (entre 30 a 80 cm), de composición granítica (ver Fig. 29). Estas pegmatitas están asociadas a los diques graníticos. No se han observado estas pegmatitas en las quebradas Uchusuma y Caplina, por lo que se infiere que el ápice de inyección de estos diques se ubica en la Quebrada Palca a la altura del sector El Olivar.

La forma de estos diques es irregular, en muchos casos se ha visto que los diques toman formas curvadas e irregulares en continuidad, los espesores son en muchos casos constantes (entre 5 a 15 cm), pero en el sector del El Olivar estos espesores son mayores (>2 m) y es donde se presentan las orbículas de turmalina de un mayor diámetro (5 a 15 cm).

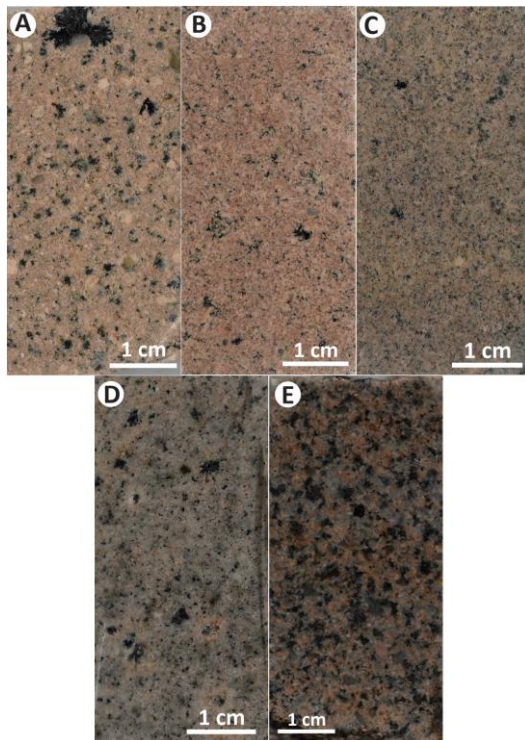
Por otra parte, en el sector del Cerro las Peñas en la Quebrada Uchusuma, se ha observado la presencia de un stock de dimensiones moderadas, que presenta tonalidades claras rosáceas, la cual se ha clasificado como un stock granítico. Este stock es de grano medio, equigranular y en muchos casos se encuentra alterado (ver

Fig. 27). No se ha podido determinar su extensión, pero en base a los estudios de campo se ha determinado que se restringe a esta zona del área de estudio.

Se recomienda su datación, por las características distintivas, se plantea la hipótesis de que pueda corresponder a un pulso magmático distinto a los observados en la Quebrada Palca y Caplina. Además, los diques félsicos antes expuestos no han sido datados, sin embargo, por relaciones de corte se infiere que ha sido posterior al emplazamiento de los stocks granodioríticos, durante su etapa de enfriamiento.

### Figura 27

*Vista macroscópica de los stocks de granito y diques félsicos.*



*Nota:* a) Vista macroscópica muestra 15\_GQ\_GRDT\_220. b) Vista macroscópica muestra 17\_GQ\_GRDT\_199. c) Vista macroscópica muestra 18\_GQ\_GRDT\_217. d) Vista macroscópica muestra 04\_GQ\_MZG\_5. e) Vista macroscópica muestra 05\_GQ\_MZG\_3. f) Vista macroscópica muestra 10\_GQ\_MZG\_270. g) Vista macroscópica muestra 2\_GQ\_MZG\_13. h) Vista macroscópica muestra 3\_GQ\_GRD\_15.

**Figura 28**

*Dique félsico con orbículas de Turmalina.*



**Figura 29**

*Pegmatita de composición granítica en stock de granodiorita.*



#### 4.2.1.4 DIQUES LAMPRÓFIDOS

La distribución de estos diques en el área de estudio se concentra principalmente en la Quebrada Palca, a la altura del sector de Huanune Chico, estos diques se encuentran cortando principalmente al stock de rocas granodioríticas – graníticas (ver Fig. 30), se presentan como estructuras tabulares con un buzamiento fuerte. No se ha evidenciado en el resto de los afloramientos (en las quebradas aledañas), por lo que su presencia es localizada al sector de la Quebrada Palca.

#### **Figura 30**

*Afloramiento de granodiorita cortada por diques lamprófidos.*



Estas rocas no han deformado la roca encajonante, además en los bordes no se han evidenciado reacciones por algún tipo de metamorfismo. No presentan estructuras internas como foliaciones, su presencia es homogénea, con una coloración gris oscura, debido a la alta presencia de minerales ferromagnesianos.

Presentan fracturamiento intenso al igual que la roca caja, no se ha evidenciado desplazamientos importantes en los afloramientos en donde se encuentra presente.

Se recomienda su datación, debido a sus características distintivas, se plantea la hipótesis de que pueda corresponder a un evento posterior regional de inyección primitiva en la superunidad Yarabamba.

#### **4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

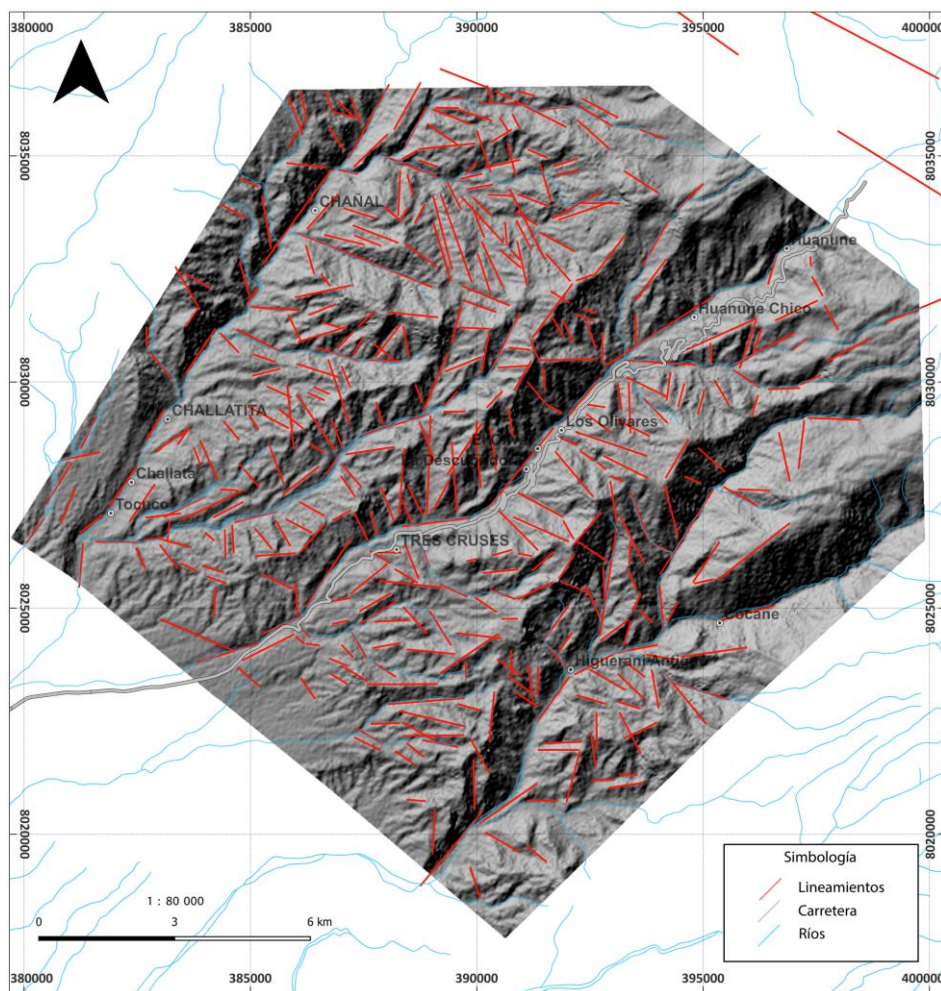
En el área de estudio se han identificado 3 dominios estructurales a partir de análisis de lineamientos realizados en un Digital Elevation Model (DEM) de 12 m de resolución, se ha realizado la validación en campo corroborando la existencia de los tres dominios.

Las rocas presentes han sido sometidas a variables campos de esfuerzos, es por ello por lo que las fallas preexistentes han sido reactivadas en varias ocasiones, por lo tanto, es complicado poder medir su cinemática original dominante en el período de emplazamiento del Plutón Lluta.

En la Fig. 31, se muestra el análisis cinemático realizado en el DEM de 12 m de resolución. Los lineamientos se han trazado de color rojo para una mejor visualización. Además, los datos lineales se han ploteado en un diagrama de rosetas con la finalidad de identificar la familia de lineamientos a partir de su rumbo (ver Fig. 34).

**Figura 31**

*Mapa de lineamientos estructurales.*

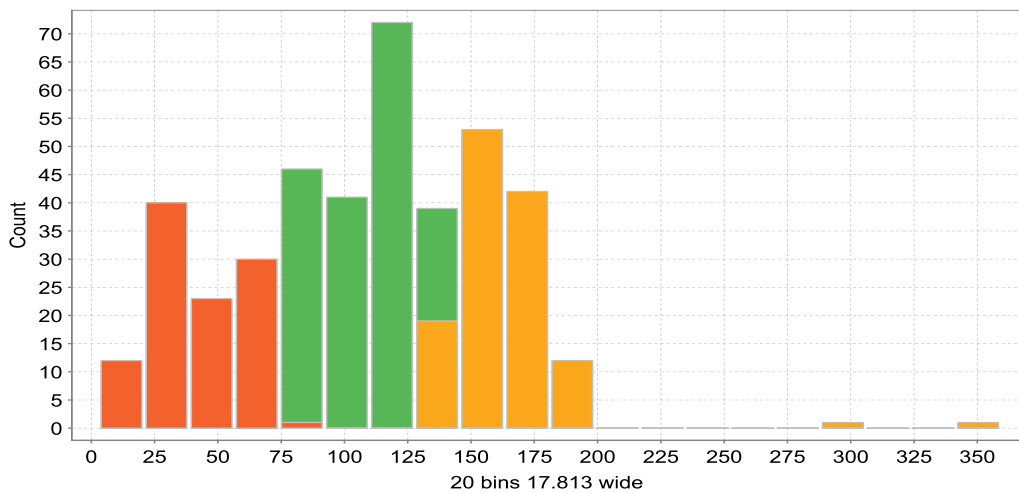


Nota: El mapeo de lineamientos se ha realizado en una imagen DEM de 12 m de resolución.

Se han trazado un total de 350 lineamientos, asociados a estructuras lineales (no litológicas), las cuales se han representado en un histograma de frecuencias (ver Fig. 32) evidenciando tres familias de estructuras. Con ayuda de la técnica de agrupamiento K-means se ha podido definir con mejor claridad estas tres familias de estructuras o clusters (ver Fig. 33).

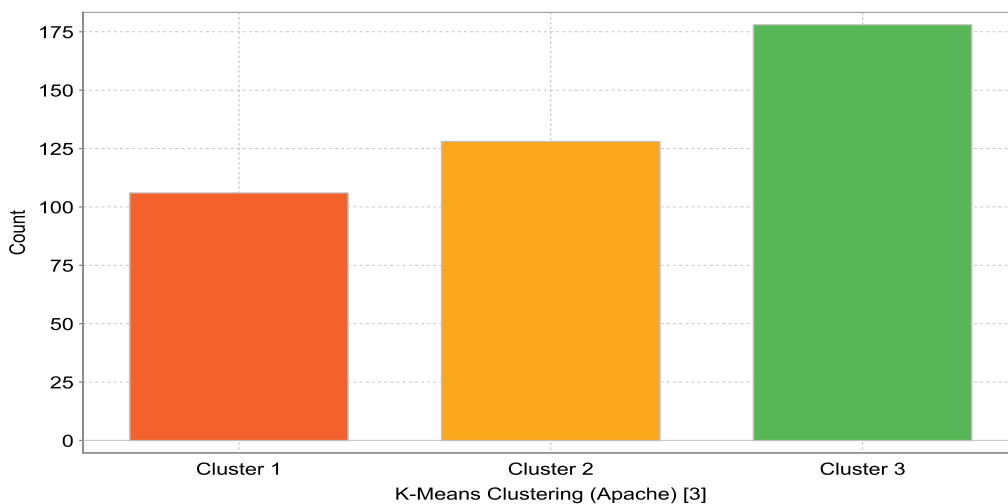
**Figura 32**

*Histograma de frecuencias acumuladas a partir del azimut de los lineamientos mapeados.*



**Figura 33**

*Clúster o dominios identificados por el método K-means.*



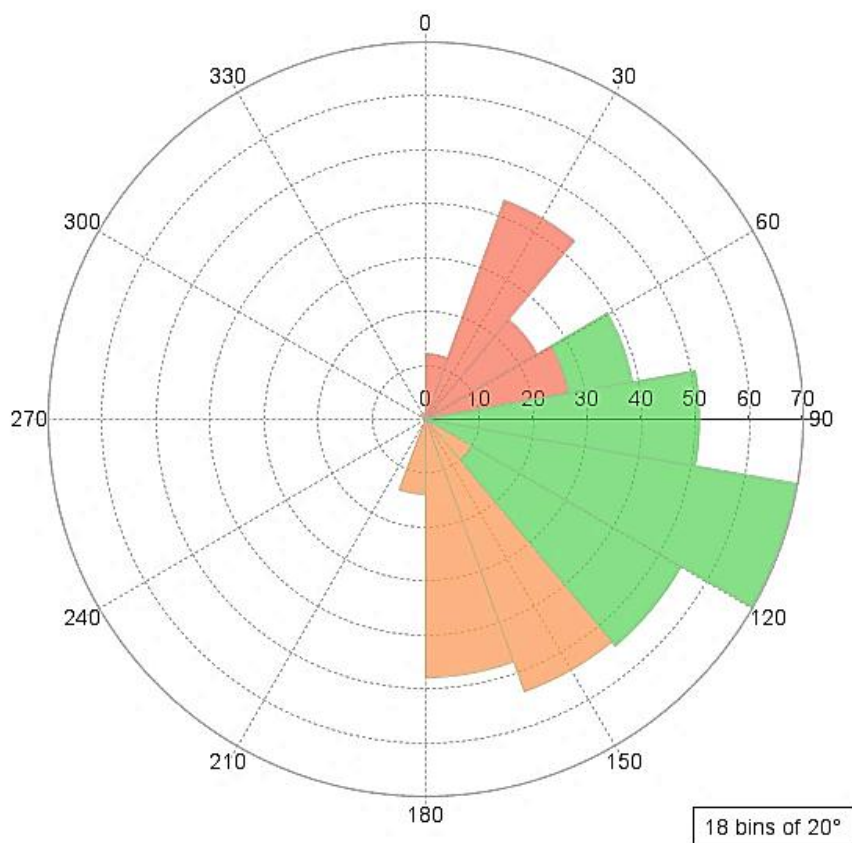
Nota: El detalle de las direcciones determinadas por K-Means se detalla en el texto.

Los dominios identificados corresponden a las direcciones promedio: 30° NE, 110° SE y 160° SE, los dos últimos dominios presentan similitud sin embargo

su dominio en campo hace necesaria esta subdivisión. Los tres dominios se han representado en un diagrama de rosetas (ver Fig. 34).

**Figura 34**

*Diagrama de rosetas de los lineamientos estructurales mapeados.*



Las estructuras presentes en el dominio 02 (110° SE), están asociadas principalmente al Sistema de Fallas Incapuquio (SFI), estas estructuras de buzamiento subhorizontal, cortan todas las rocas presentes en el área de estudio, especialmente en el sector del Chañal en donde las rocas granodioríticas presentan un fuerte lineamiento que divide y forma una quebrada de flancos subverticales.

Además, se han realizado estaciones estructurales localizadas al N del área de estudio por su facilidad de acceso y exposición, identificando que estos lineamientos corresponden a fallas en su mayoría del tipo normal con una componente menor de rumbo dextral (ver Fig. 35). En la actualidad estas estructuras en el sector de Calientes corresponden a fallas activas.

Por otra parte, las estructuras en el dominio 03 (160° NE) se presentan cerca del contacto entre el Plutón Lluta y las rocas de la Formación Socosani al NW del área de estudio. Estas cortan también a los cuerpos intrusivos sin embargo no se parecía que hayan afectado a las rocas de la Formación Huaylillas, por tanto, se postula que los dominios 02 y 03 correspondan a estructuras que han dominado durante/posterior al emplazamiento del Plutón Lluta.

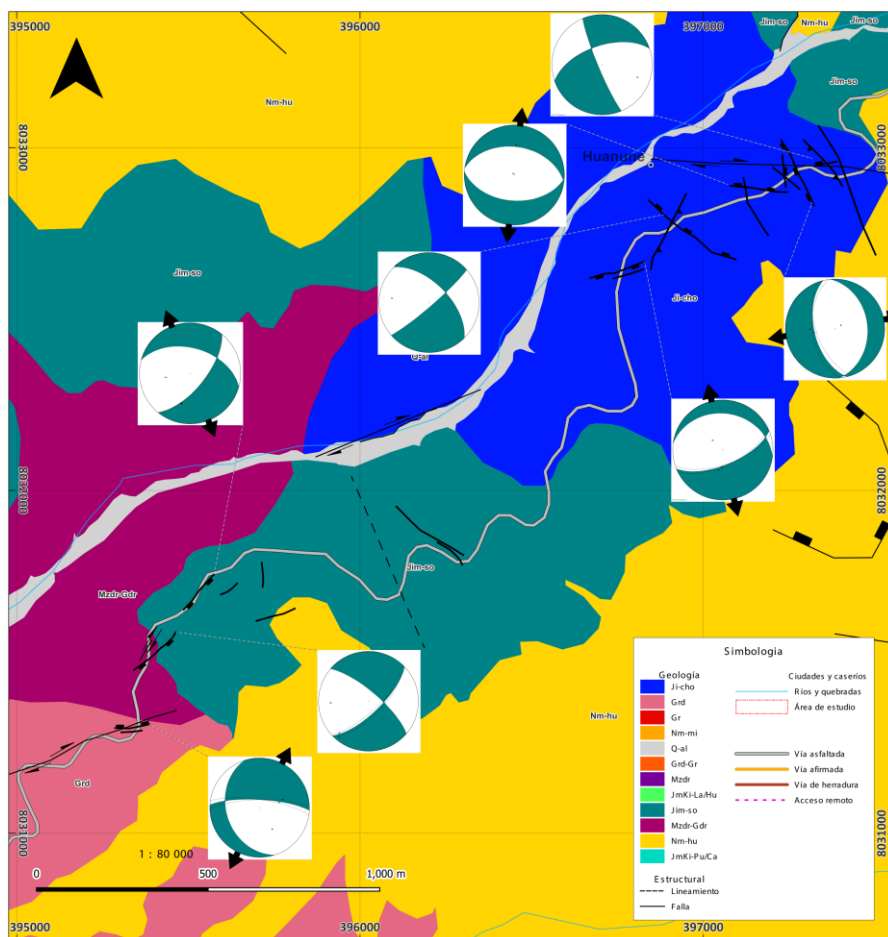
Con respecto al dominio 01, este presenta cualidades singulares como: es dominante en la dirección de las quebradas/valles principales del Río Caplina, Quebrada Palca y Río Uchusuma. Wilson y García (1962) han descrito a este rasgo estructural como el Sistema de Fallas de Chucchuco, presentándose sus rasgos principales al E del área de estudio. Los autores han identificado que estas estructuras cortan a las Formaciones Moquegua y Huaylillas y es por falta de afloramientos que restringen su influencia más allá del Grupo Yura.

A partir de estaciones estructurales localizadas en la Quebrada Palca (por su mejor exposición) (ver Fig. 35), se han identificado fallas de rumbo dextral

dominantes, con una componente normal. Al parecer estas fallas presentes parecen que han controlado la formación de estos valles extensos y rectilíneos.

**Figura 35**

*Estaciones estructurales realizadas en campo.*



*Nota:* El presente análisis estructural se ha realizado en la zona de mayor intensidad de cinemática identificada en campo.

Finalmente, los tres dominios han contribuido al desarrollo de la geomorfología actual y han modelado los valles y quebradas presentes, lo que en la actualidad discurren las principales fuentes de agua a la ciudad de Tacna. Además,

han expuesto rocas del Jurásico y controlado el emplazamiento sintectónico del Plutón Lluta.

#### **4.4 PETROGRAFÍA**

En este apartado se describirán los estudios petrográficos realizados en las diferentes unidades intrusivas que conforman el Plutón Lluta. Estos estudios abarcan la identificación de las características ópticas. También se incluyen las características estructurales, tales como el tamaño, la morfología, el clivaje, las maclas y el zoneamiento.

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de las características ópticas de las muestras, incluyendo su color y las variaciones en el color bajo luz polarizada. Se ha evaluado el pleocroísmo, el relieve y la anisotropía de las muestras, y se ha registrado el color de interferencia y la extinción bajo el microscopio. Además, se ha estudiado la textura y la microestructura de las muestras, así como las características estructurales que incluyen el tamaño y la morfología de los cristales, el clivaje, las maclas y el zoneamiento.

Las muestras utilizadas en el estudio petrográfico son las mismas que se seleccionaron para el análisis químico. Por lo tanto, los puntos de muestreo corresponden exactamente a los puntos de muestreo geoquímico. Estos puntos de muestreo se encuentran ubicados en las quebradas Caplina, Palca y Uchusuma, donde se pueden encontrar exposiciones de afloramientos de las unidades intrusivas

más representativas de la zona. Además, estas muestras presentan una alteración débil en el mejor de los casos, lo que garantiza la integridad de la información obtenida a partir de ellas.

El proceso de selección de muestras se llevó a cabo con el objetivo de obtener una representación adecuada de las diferentes unidades intrusivas que conforman el Plutón Lluta. Se tomaron en cuenta las características geológicas de la zona, así como la accesibilidad y seguridad de las ubicaciones de muestreo.

Las quebradas Caplina, Palca y Uchusuma ofrecen una excelente oportunidad para el estudio de las unidades intrusivas en el Plutón Lluta. Estas áreas presentan exposiciones de afloramientos de las diferentes unidades intrusivas, lo que permite una recolección adecuada de las muestras.

Para complementar los estudios petrográficos, se han llevado a cabo análisis por Difracción de Rayos X, los cuales se describen detalladamente al final de este capítulo. El objetivo de estos análisis ha sido proporcionar un panorama completo de la mineralogía de las muestras, desde un punto de vista de cuantificación precisa. Esto, a su vez, ha permitido interpretaciones más precisas de los datos obtenidos.

La combinación de los estudios petrográficos y los análisis de difracción de rayos X ha permitido una caracterización más completa de las unidades intrusivas del Plutón Lluta. Los estudios petrográficos proporcionan información sobre las características ópticas y estructurales de las muestras (cualitativas), lo que permite

una interpretación de su evolución. Por otro lado, los análisis de difracción de rayos X brindan información detallada sobre la abundancia mineral de las muestras (cuantitativa), lo que facilita una cuantificación precisa y una interpretación más completa de la mineralogía.

Para una mejor comprensión se ha subdividido en las agrupaciones del capítulo anterior (ver Figs. 15, 21 y 26), por tipo de stock y por zona (ubicación espacial).

#### ***4.4.1 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS DE DIORITA - CUARZO DIORITA***

Las muestras 11\_PT\_DR\_266, 14\_PT\_DR\_84, 19\_PT\_DR\_150 y 20\_PT\_GRDT\_111 corresponden a stocks dioríticos a cuarzo dioríticos de hornblenda, estas rocas muestran una textura granular alotriomórfica, inequigranular de grano medio. Presentan cristales esenciales de cuarzo anhedral de grano medio. Asimismo, se observa la presencia de cristales esenciales de plagioclasa de grano medio y en algunos casos grano fino. Estos cristales de plagioclasa presentan en su mayoría maclamiento polisintético característico. También se ha podido determinar la presencia de feldespatos potásicos en menor proporción, los cuales se presentan como cristales subhedrales con una alteración incipiente a sericita. Es importante señalar que la matriz de la muestra presenta una alteración débil a sericita y en algunos casos a arcillas.

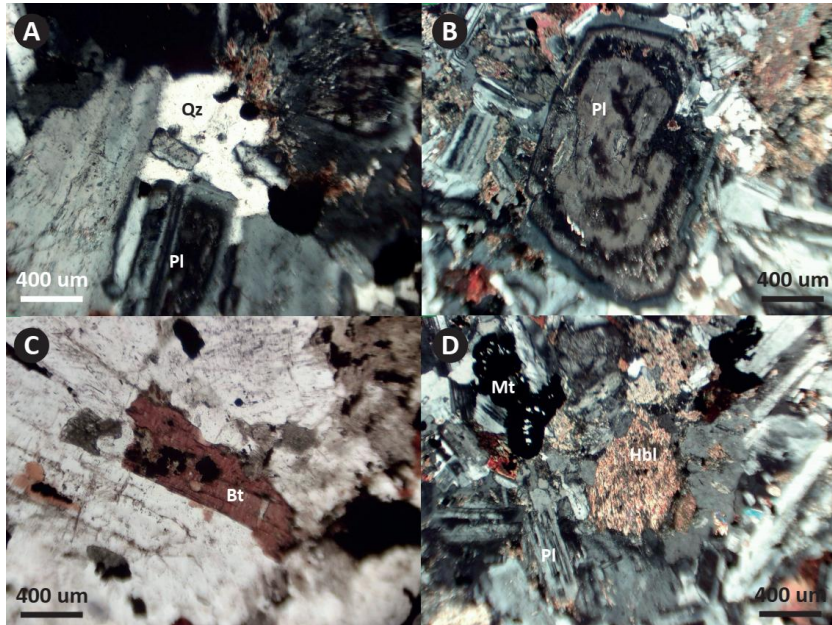
Estas muestras presentan además cristales anhedrales de biotita fresca, la alteración es incipiente a cloritas. Un rasgo distintivo de estas rocas es la abundante presencia de anfíboles y la presencia de minerales opacos distribuidos entre los minerales ferromagnesianos.

Por otra parte, las muestras 7\_PT\_GRD\_16, 8\_PT\_GRD\_17 y 9\_PT\_GRD\_12, corresponden a cuarzo dioritas, presentan características distintivas a las muestras antes expuestas. Estas rocas están compuestas de cristales esenciales de cuarzo anhedral de grano fino, también presentan cristales esenciales de plagioclasas euhedrales a subhedrales, con maclamiento polisintético característico, la presencia de cristales de feldespato potásico subhedral es reconocida por sus rasgos “sucios” característicos. A diferencia de las muestras 11\_PT\_DR\_266, 14\_PT\_DR\_84, 19\_PT\_DR\_150 y 20\_PT\_GRDT\_111, estas muestras presentan una mayor alteración a sericita y arcillas y abundante presencia de minerales opacos como sulfuros de hierro. Además, presenta minerales accesorios en considerables proporciones de anfíboles subhedrales a anhedrales.

A continuación, se presenta fotomicrografías de las muestras representativas expuestas:

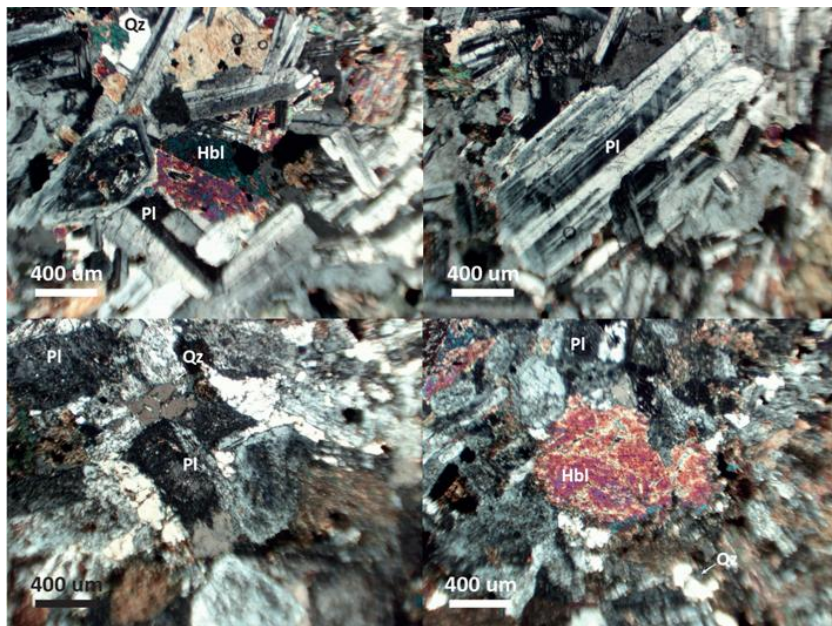
**Figura 36**

*Fotomicrografías de la muestra 19\_PT\_DR\_150 en nicoles cruzados y paralelos.*



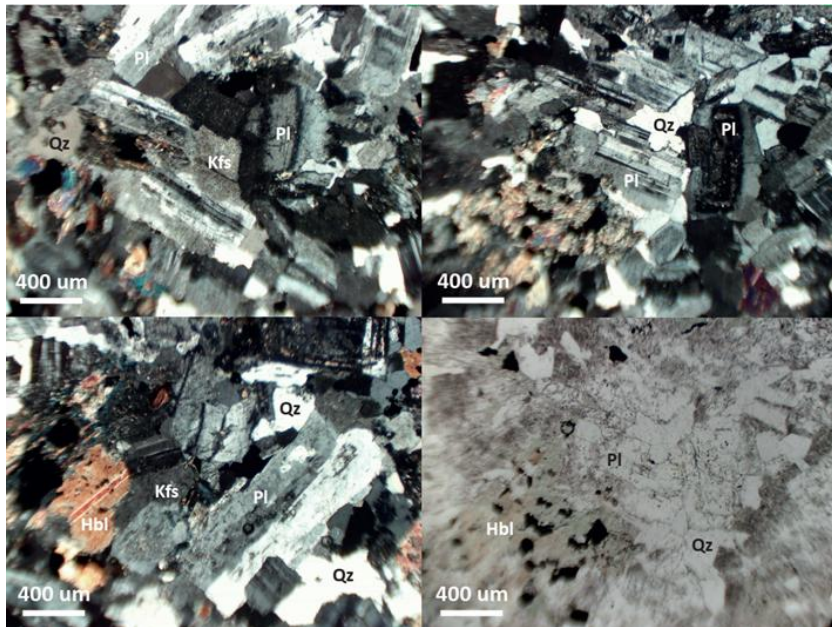
**Figura 37**

*Fotomicrografías de la muestra 11\_PT\_DR\_266 en nicoles cruzados.*



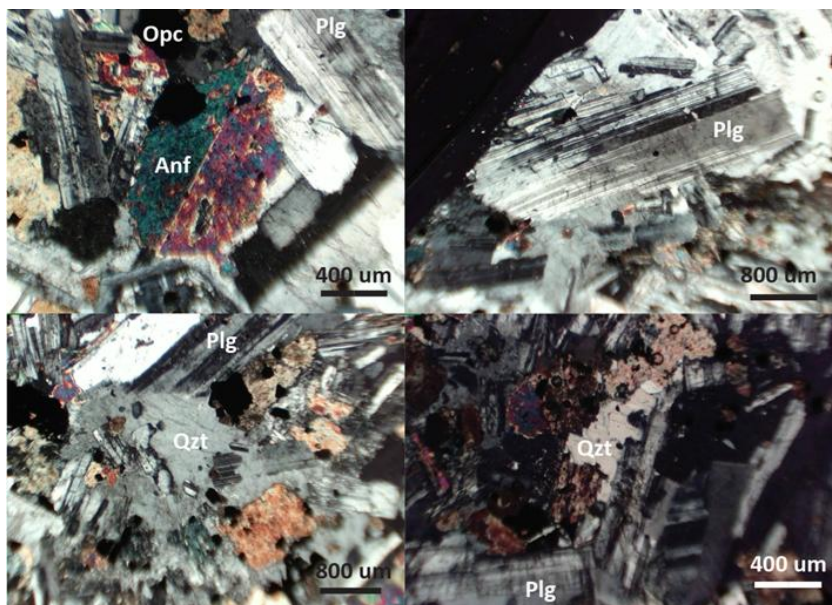
**Figura 38**

*Fotomicrografías de la muestra 20\_PT\_GRDT\_111 en nicoles cruzados y paralelos.*



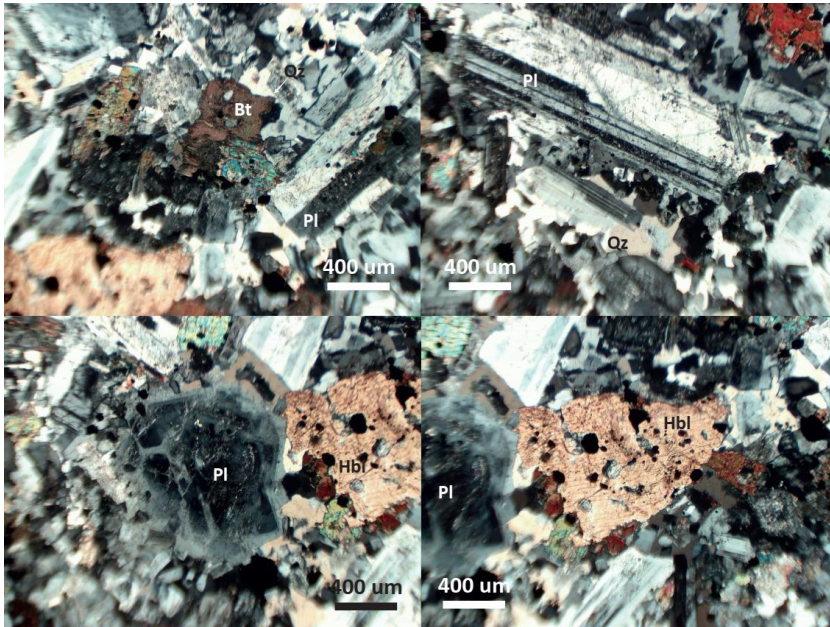
**Figura 39**

*Fotomicrografías de la muestra 14\_PT\_DR\_84 en nicoles cruzados.*



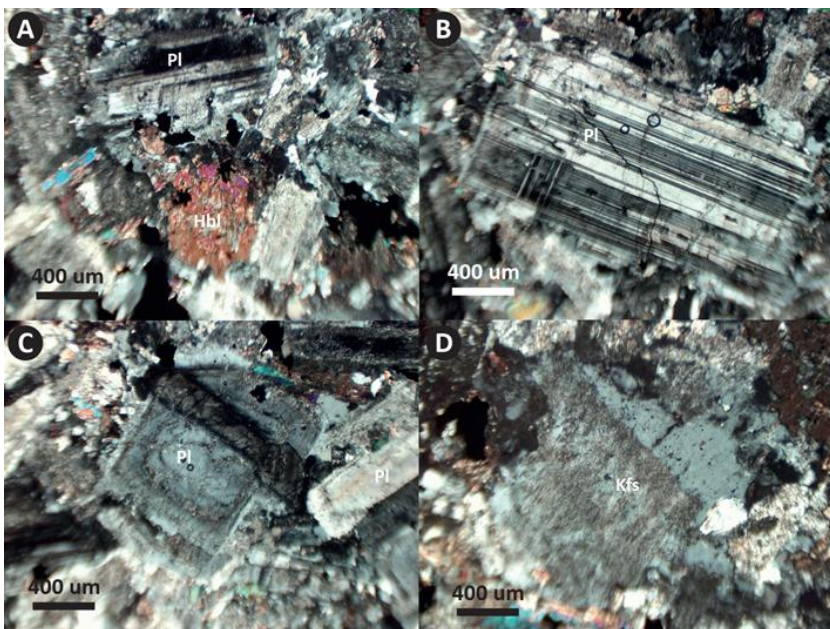
**Figura 40**

*Fotomicrografías de la muestra 8\_PT\_GRD\_17 en nicoles cruzados.*



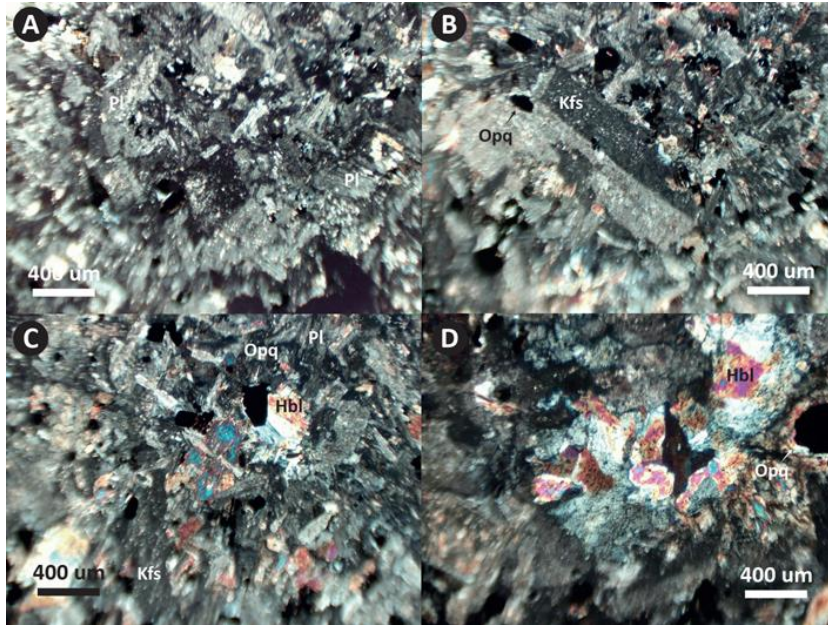
**Figura 41**

*Fotomicrografías de la muestra 07\_PT\_GRD\_16 en nicoles cruzados.*



**Figura 42**

*Fotomicrografías de la muestra 09\_PT\_GRD\_12 en nícoles cruzados.*



#### **4.4.2 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS DE GRANODIORITA – TONALITA**

Las muestras 4\_PT\_MZG\_5, 5\_PT\_MZG\_3, 10\_PT\_MZG\_270, 15\_PT\_GRDT\_220, 17\_PT\_GRDT\_199, 18\_PT\_GRDT\_217, 2\_PT\_MZG\_13 y 3\_PT\_GRD\_15 corresponden a stocks granodioríticos, las características ópticas presentan gran similitud, es por ello por lo que se ha sintetizado la descripción microscópica. Estas rocas muestran una textura granular, hipiomórfica, inequigranular, holocristalina de grano medio a grueso, compuesta de cristales esenciales de plagioclasa subhedral con su característica macla polisintética, estos cristales presentan zoneamiento debido a las diferencias en su composición, en su núcleo está compuesto principalmente de plagioclasa cálcica y hacia los bordes de plagioclasa sódica. La identificación de los cristales de plagioclasa es una tarea fácil

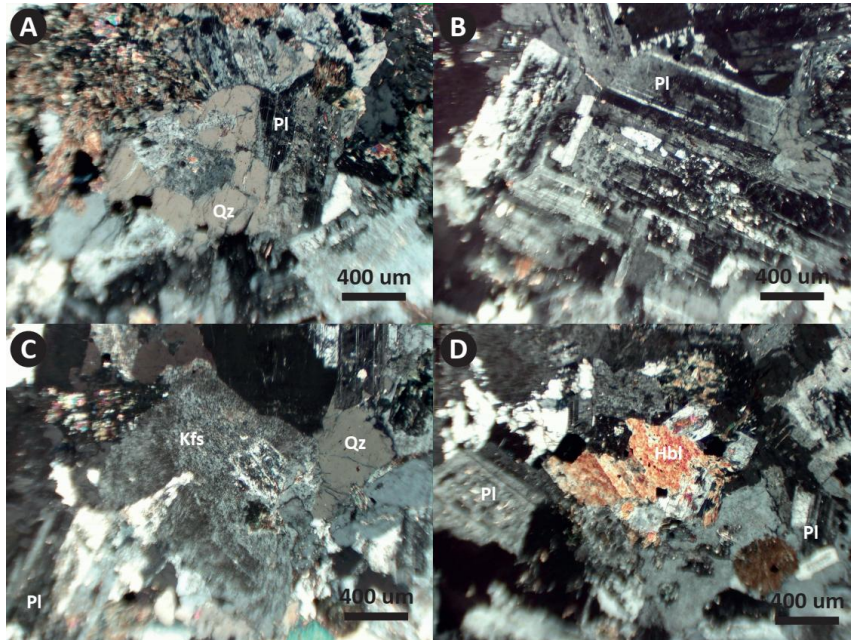
debido a que presenta colores de interferencia de primer orden y maclamiento característico. Además, estas rocas presentan cristales esenciales de cuarzo de grano medio con microfracturamiento. Como tercer cristal esencial están presentes los feldespatos potásicos con su característico aspecto sucio o turbio, los cristales tienen formas subhedrales y presentan alteración débil a sericita y arcillas. Como minerales accesorios están presentes los anfíboles con formas subhedrales a anhedrales. Bajo el microscopio se ha podido identificar por sus colores de interferencia de primer a segundo orden y por presentar pleocroísmo amarillo verdoso a verde oscuro.

Finalmente, estas rocas presentan minerales opacos como magnetita y algunos sulfuros, sin embargo, su abundancia difiere de las rocas dioríticas – cuarzo dioríticas antes expuestas.

A continuación, se presenta fotomicrografías de las muestras representativas expuestas:

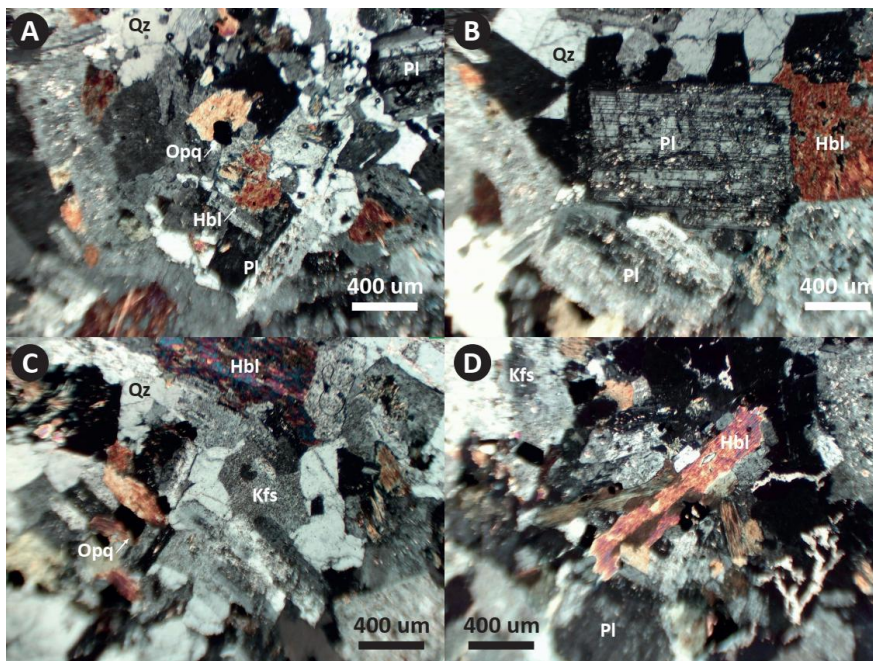
**Figura 43**

*Fotomicrografías de la muestra 5\_PT\_MZG\_03 en nicoles cruzados.*



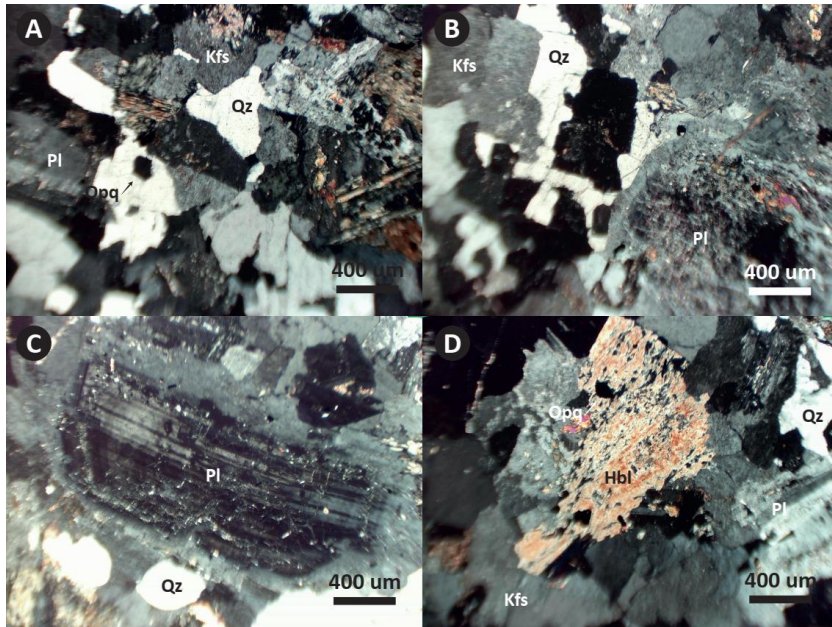
**Figura 44**

*Fotomicrografías de la muestra 10\_PT\_MZG\_270 en nicoles cruzados.*



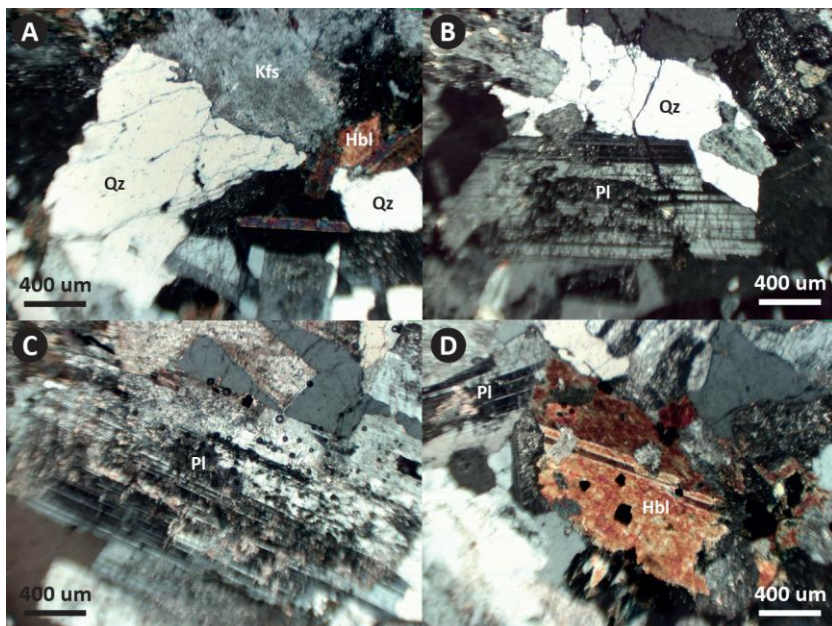
**Figura 45**

*Fotomicrografías de la muestra 04\_PT\_MZG\_270 en nicoles cruzados.*



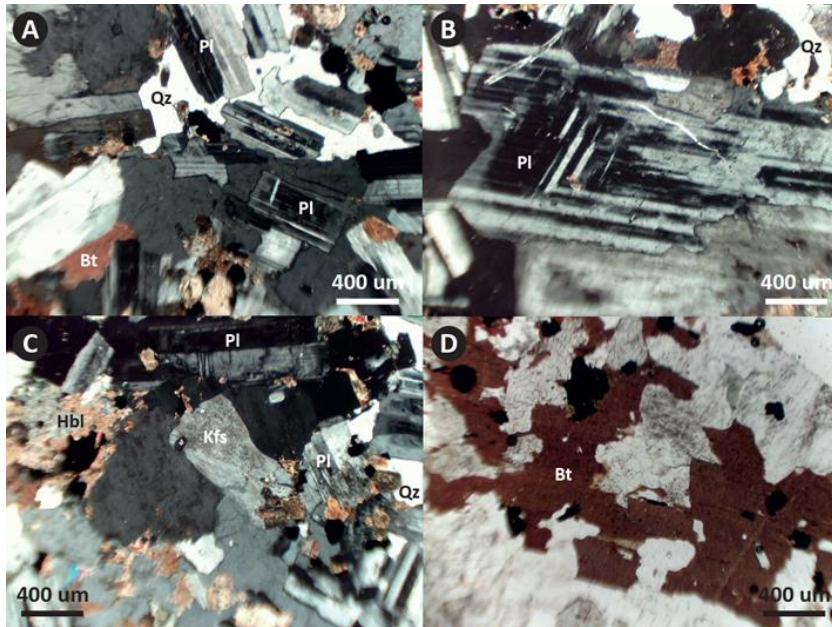
**Figura 46**

*Fotomicrografías de la muestra 17\_PT\_GRDT\_199 en nicoles cruzados.*



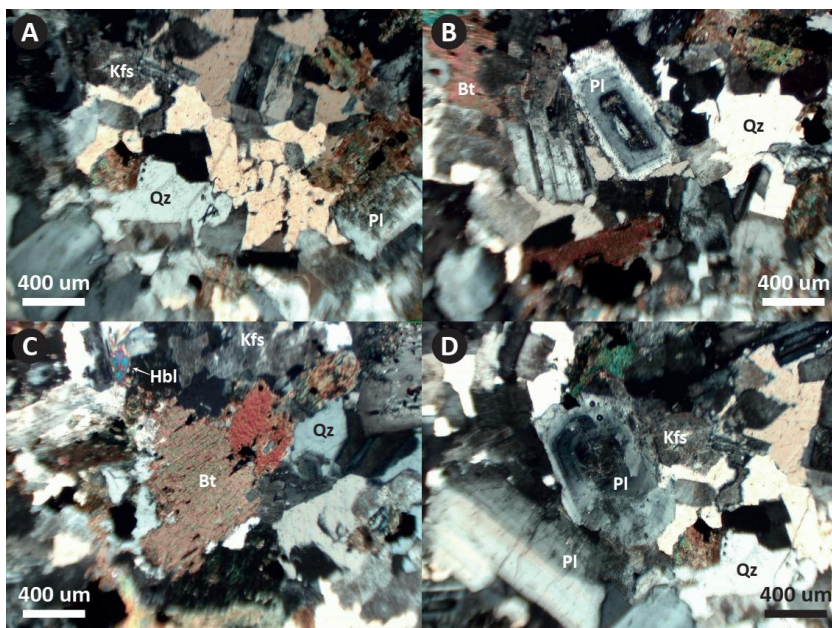
**Figura 47**

*Fotomicrografías de la muestra 18\_PT\_GRDT\_217 en nicoles cruzados y paralelos.*



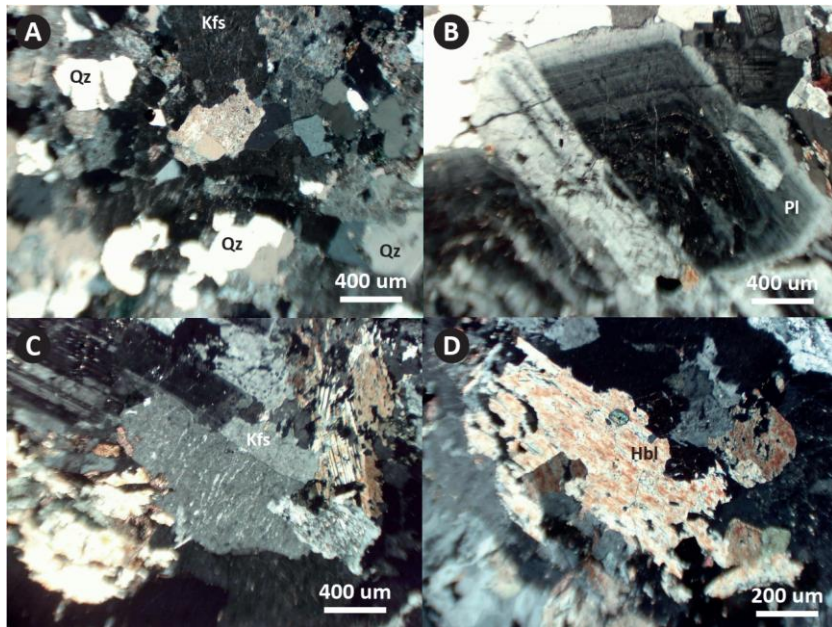
**Figura 48**

*Fotomicrografías de la muestra 15\_PT\_GRDT\_220 en nicoles cruzados.*



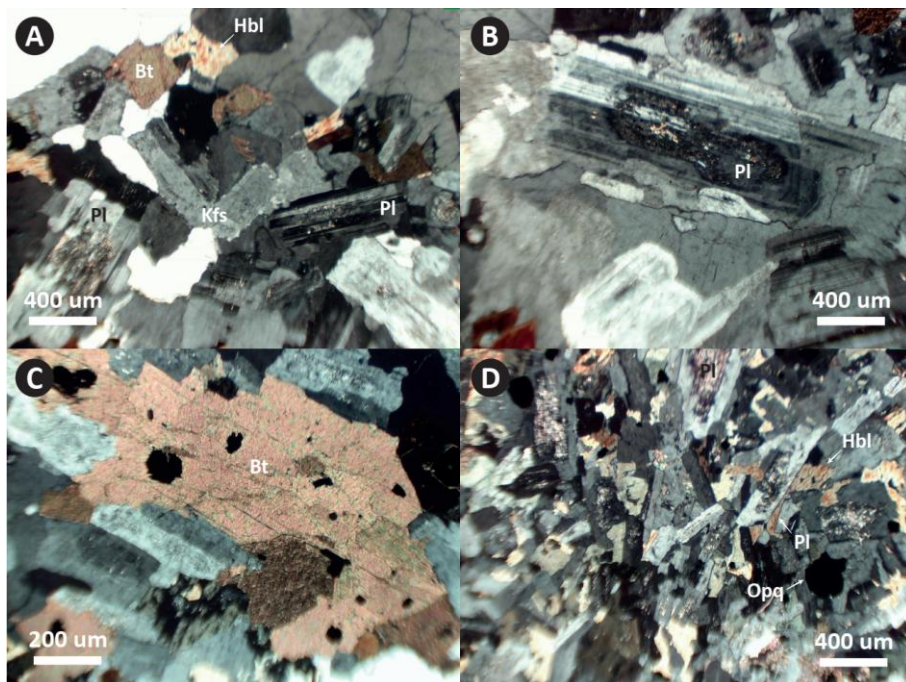
**Figura 49**

*Fotomicrografías de la muestra 2\_PT\_MZG\_13 en nicoles cruzados.*



**Figura 50**

*Fotomicrografías de la muestra 3\_PT\_GRD\_15 en nicoles cruzados.*



#### ***4.4.3 PETROGRAFÍA DE LOS STOCKS GRANÍTICOS Y DIQUES FÉLSICOS***

Las muestras 1\_PT\_APL\_6, 12\_PT\_APL\_269, 13\_PT\_APL\_267 y 16\_PT\_APL\_219 corresponden a diques aplíticos de grano fino, petrográficamente se han clasificado como monzogranito de schorl, corresponden a rocas de textura granular hipidiomórfica, equigranular, holocristalina. Está compuesta de minerales esenciales de cuarzo de grano fino anhedral (< 5 mm) con presencia de microfracturas, feldespato potásico subhedrales de grano medio-fino con macla de Carlsbad que se alteran débilmente a sericita y en menor proporción de plagioclasa con macla polisintética. Estos diques presentan minerales accesorios particulares como turmalina (schorl) y anfíboles en menor proporción. La turmalina es característica de estas rocas y se ha identificado principalmente por sus propiedades ópticas.

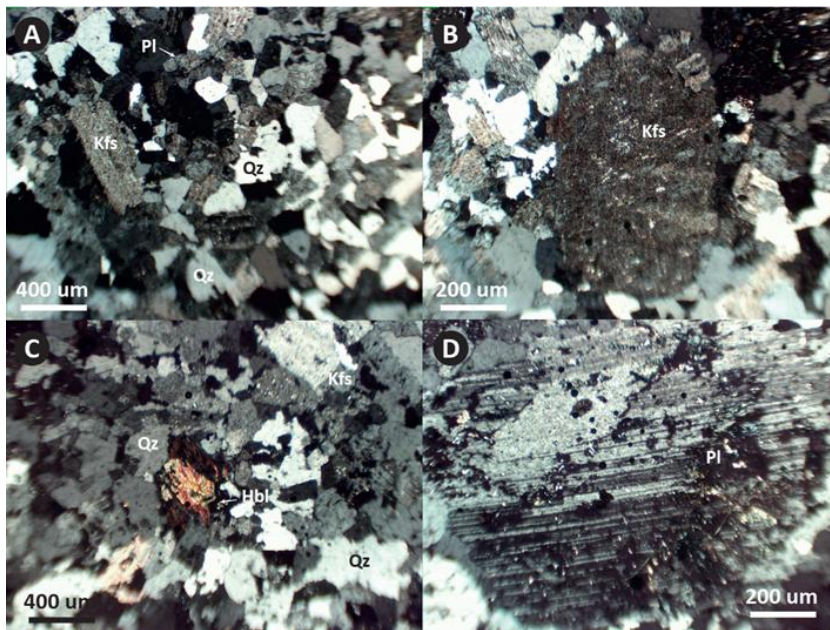
Por otra parte, la muestra 6\_PT\_MZG\_14, se ha clasificado petrográficamente como monzogranito de hornblenda. Esta muestra presenta una textura granular hipidiomórfica inequigranular, holocristalina de grano medio. Está compuesta de minerales esenciales de cuarzo anhedral de grano medio con presencia de microfracturamiento, feldespatos potásicos subhedrales de grano medio con maclamiento de tipo Carlsbad, los cuales presentan una alteración débil a sericita. Los cristales de plagioclasa son subhedrales y presentan un maclado polisintético, estos cristales presentan una alteración casi nula a arcillas, la cual se restringen únicamente a los bordes del cristal. Otro rasgo importante de los cristales

de plagioclasa es su zoneamiento, al girar la platina se ha observado nucleación de las plagioclasas, este efecto se debe principalmente a las gradaciones en composición de la plagioclasa, que va de un núcleo más cálcico a bordes más sódicos.

A continuación, se presenta fotomicrografías de las muestras representativas expuestas:

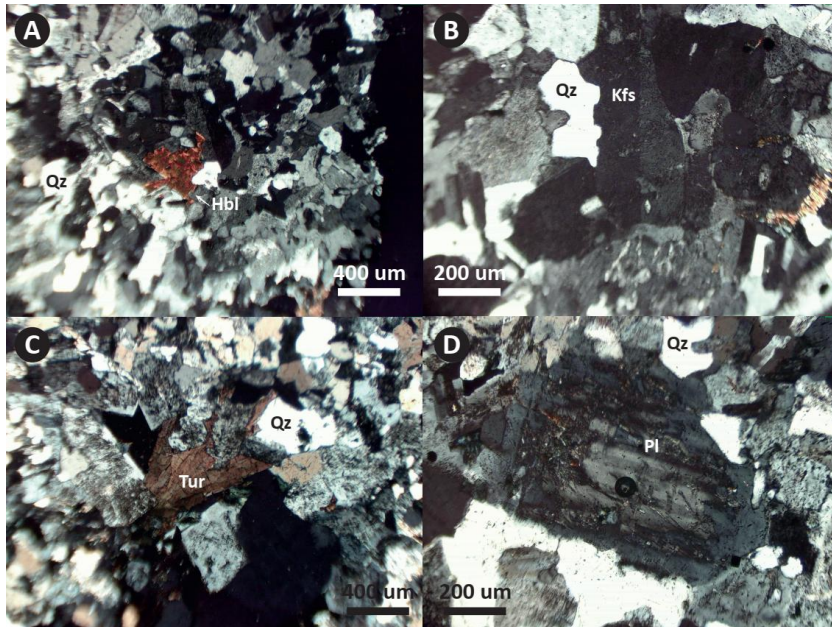
**Figura 51**

*Fotomicrografías de la muestra 1\_GQ\_APL\_6 en nicoles cruzados.*



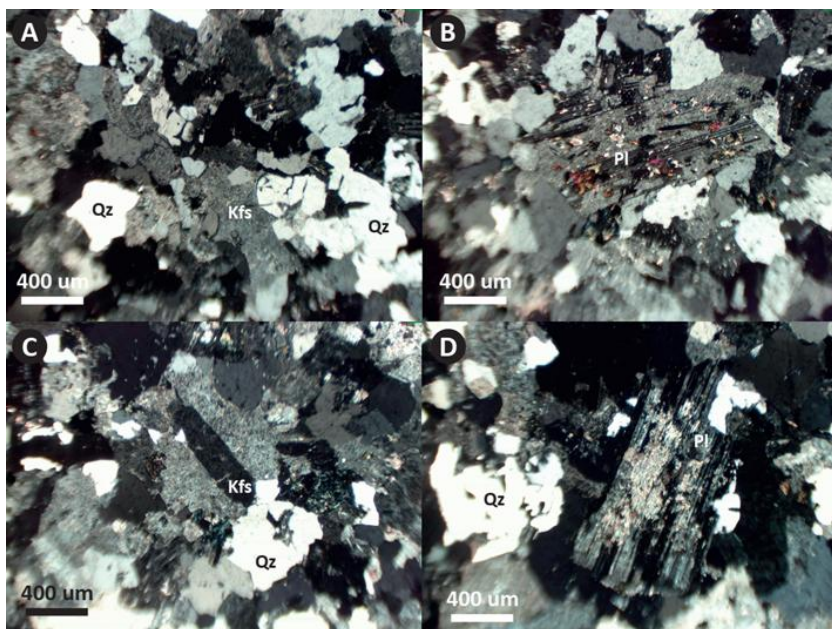
**Figura 52**

*Fotomicrografías de la muestra 12\_PT\_APL\_269 en nicoles cruzados.*



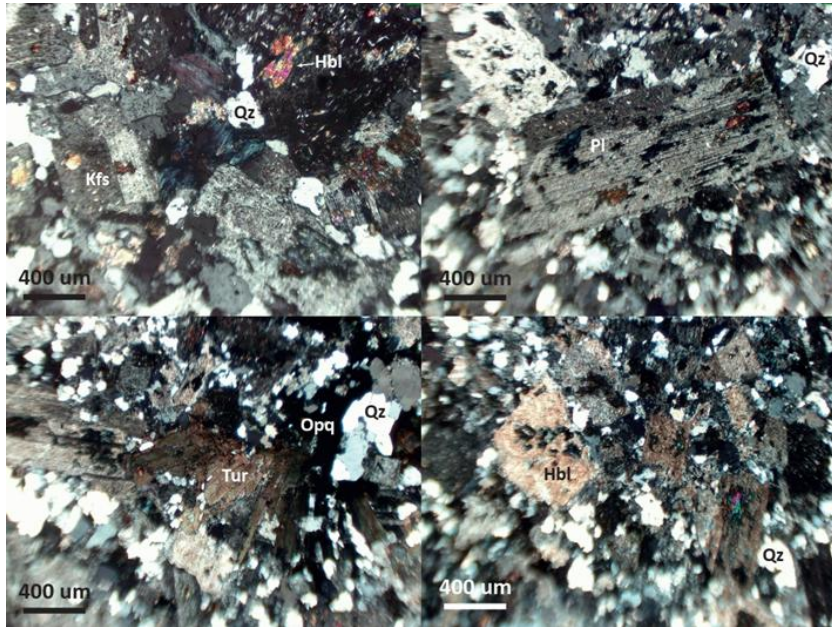
**Figura 53**

*Fotomicrografías de la muestra 13\_PT\_APL\_267 en nicoles cruzados.*



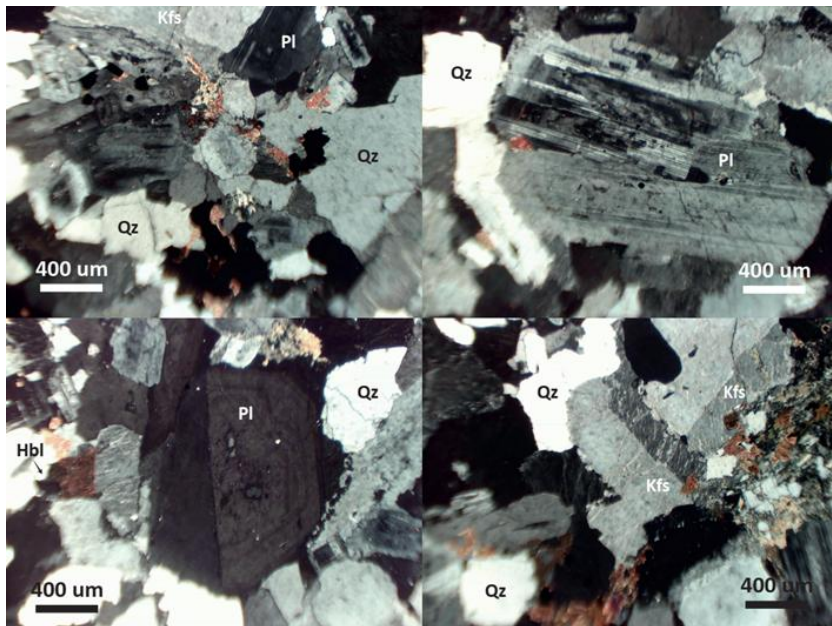
**Figura 54**

*Fotomicrografías de la muestra 16\_GQ\_APL\_219 en nicoles cruzados.*



**Figura 55**

*Fotomicrografías de la muestra 06\_PT\_MZG\_14 en nicoles cruzados.*



#### 4.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

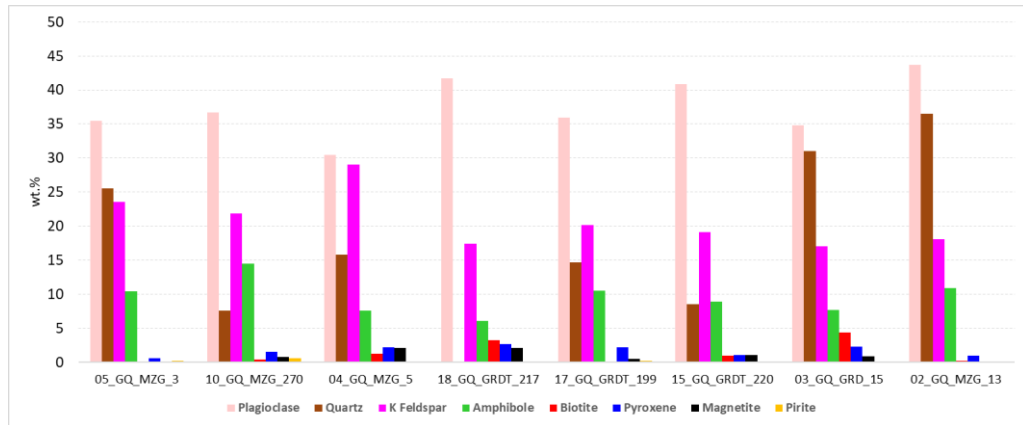
En el contexto petrográfico, la Difracción de Rayos X (DRX) se utiliza para analizar minerales específicos presentes en una muestra por medio de un difractograma, así como determinar sus propiedades cristalográficas. Por otra parte, nos permite conocer de manera cuantitativa la presencia de las fases minerales presentes en la muestra, algo que es muy limitado y subjetivo de realizar con las técnicas clásicas de microscopía óptica.

En la Figura 56, se muestran los resultados de cuantificación mineralógica por el método de Rietveld para las muestras de los stocks de granodiorita – tonalita. Debido a aplicaciones prácticas se muestra la abundancia en porcentaje en peso de abundancia (wt. %) de minerales como: plagioclasas, feldespato K, cuarzo, anfíboles, biotita, piroxeno, magnetita y pirita, estos últimos por ser minerales accesorios encontrados en muestra de mano.

Se puede notar que la plagioclasa (35 a 43 wt. %), el cuarzo (8 a 37 wt. %) y el feldespato potásico (23 a 28 wt. %) son los minerales dominantes, seguido de los anfíboles (6 a 14 wt. %) y en menores proporciones (<5 wt. %) minerales como la biotita, piroxenos, magnetita y pirita. Como se ha podido observar, los resultados de DRX demuestran una abundancia de minerales como el anfíbol, esto refuerza la hipótesis de que el magmatismo precursor que ha dado lugar a los stocks del Plutón Lluta corresponde a magmas hidratados, debido a que los anfíboles, en su estructura molecular posee agua en forma de OH.

**Figura 56**

*Resultados de DRX de las muestras de los stocks de granodiorita – tonalita.*

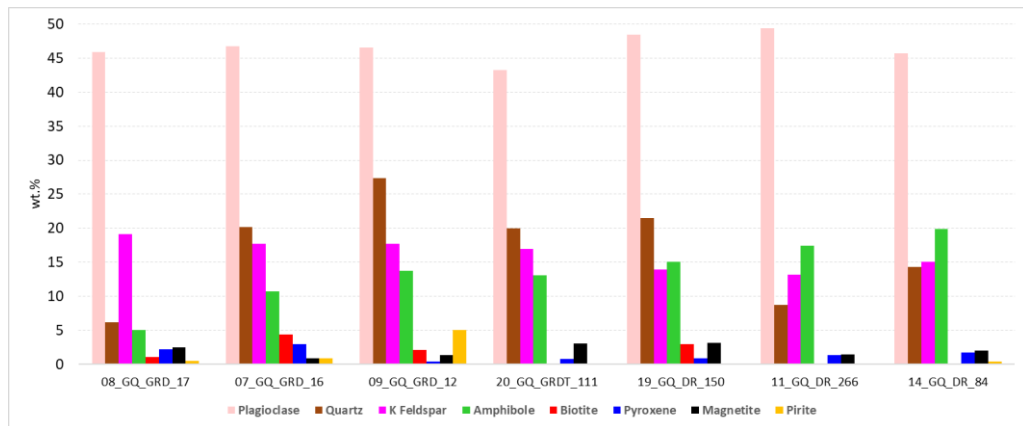


Seguidamente, los resultados de DRX de las muestras de los stocks de diorita – cuarzo diorita (ver Fig. 57), poseen minerales dominantes como plagioclasa (>40 wt. %), cuarzo (6 a 27 wt. %) y feldespato potásico (13 a 19 wt. %), de igual manera se ha determinado la presencia de anfíboles en cantidades significativas que va de 5 a 20 wt. %, finalmente se encuentran minerales accesorios como biotita, piroxenos, magnetita y pirita en cantidades <5 wt.%.

Un rasgo significativo es el contenido de 5 wt. % de pirita en la muestra 09\_GQ\_GRD\_12, en la que se ha evidenciado la presencia de sulfuros de manera diseminada y con una alteración sericítica en la matriz.

**Figura 57**

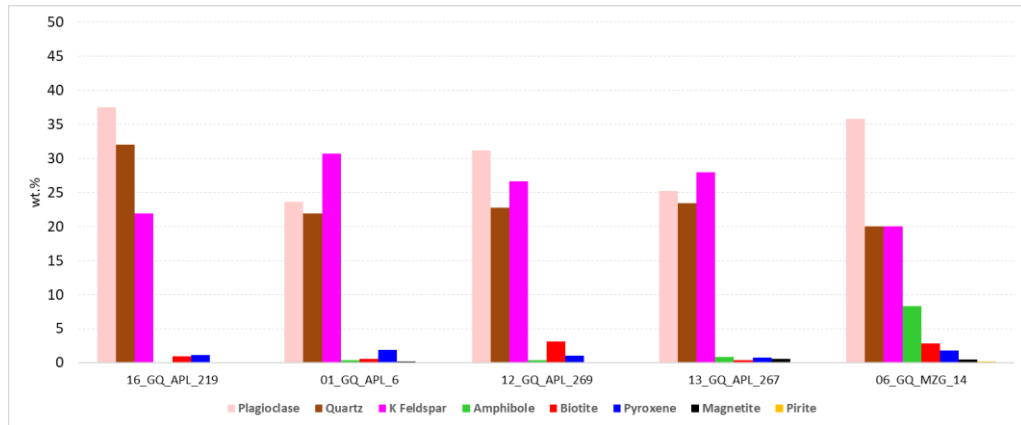
*Resultados de DRX de las muestras de los stocks de diorita – cuarzo diorita.*



Por otra parte, los resultados de DRX para los stocks graníticos y diques félsicos se resumen en la Figura 58. Estas muestras están dominadas principalmente por plagioclasas (23 a 37 wt. %), feldespato potásico (20 a 31 wt. %) y cuarzo (20 a 32 wt. %). A diferencia de los stocks granodioríticos y dioríticos, estas muestras no poseen anfíboles en cantidades significativas, excepto la muestra 06\_GQ\_MZG\_14, la cual corresponde a un stock granítico ubicado en la Quebrada Uchusuma. El resto de las muestras corresponde a los diques aplíticos presentes en las quebradas Caplina y Palca.

**Figura 58**

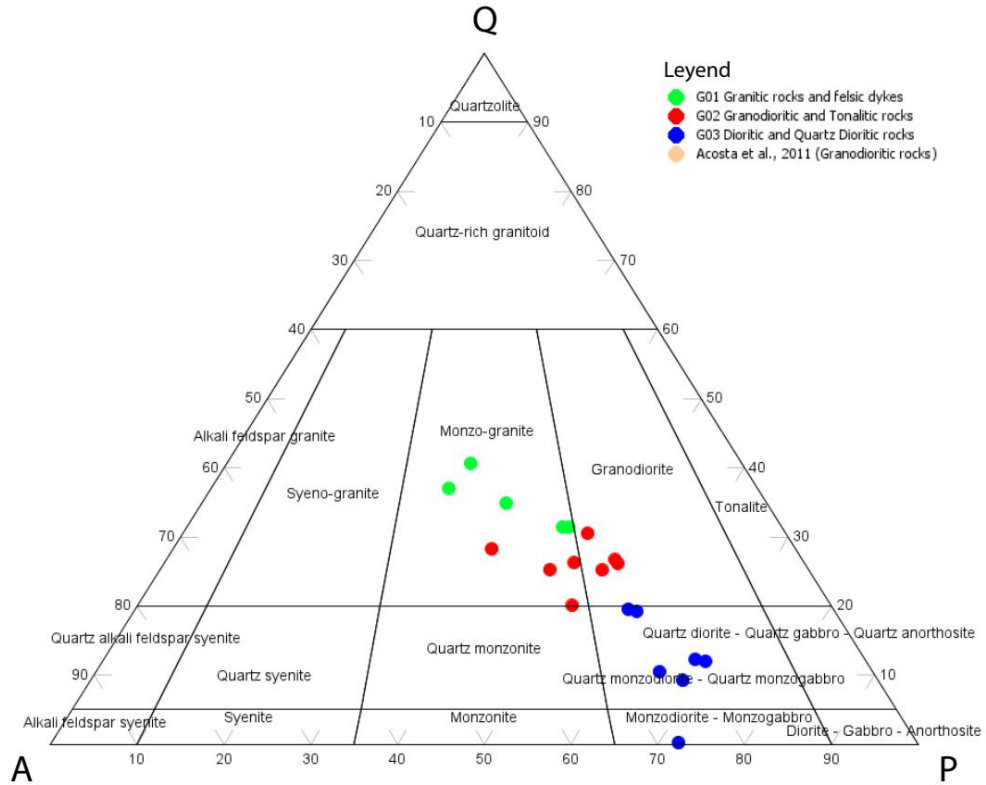
*Resultados de DRX de las muestras de los stocks de granito y diques félsicos.*



Finalmente, con los resultados obtenidos de DRX, se ha plotado en el diagrama de Streckeisen, (1976) o Quartz, Alkali feldspar, Plagioclase (QAP) para determinar el tipo de roca por la moda mineral, la Figura 59, muestra la distribución de las muestras en los campos de los granitos, cuarzo dioritas y granodioritas. Para apoyar esta clasificación, se usaron datos geoquímicos expuestos en el capítulo posterior.

**Figura 59**

*Diagrama QAP para las muestras del Plutón Lluta a partir de datos de Difracción de Rayos X (DRX).*



#### **4.5.1 ANÁLISIS DRX DE MUESTRAS DE CANTERA DE SILICE**

Se ha realizado análisis de DRX a una muestra que proviene de la cantera de sílice en la Quebrada Tocuco, que actualmente se encuentra en explotación. A partir de las visitas en campo, se ha determinado que estos horizontes de sílice se han formado por metamorfismo de contacto entre el stock cuarzo-diorítico presente en la base de la quebrada y las rocas sedimentarias ricas en cuarzo del Grupo Yura (Fm. Hualhuani).

Los estudios mineralógicos evidencian el dominio de minerales silicatados como cuarzo (33 wt. %), wollastonita (29 wt. %), diópsido (17 wt. %) y minerales accesorios (<10 wt. %) como plagioclasas, ortoclasa, calcita, escapolita, hornblenda y anhidrita (ver Fig. 60) a partir de su difractograma (ver Fig. 61). La wollastonita Ca (SiO<sub>3</sub>) es un silicato de calcio, muy común de zonas de metamorfismo de contacto, depende de la roca encajonante si es una roca rica en calcio.

**Figura 60**

*Resumen de la cuantificación por DRX de los minerales presentes en una muestra de la cantera de sílice de la Quebrada Tocuco (CZ\_001).*

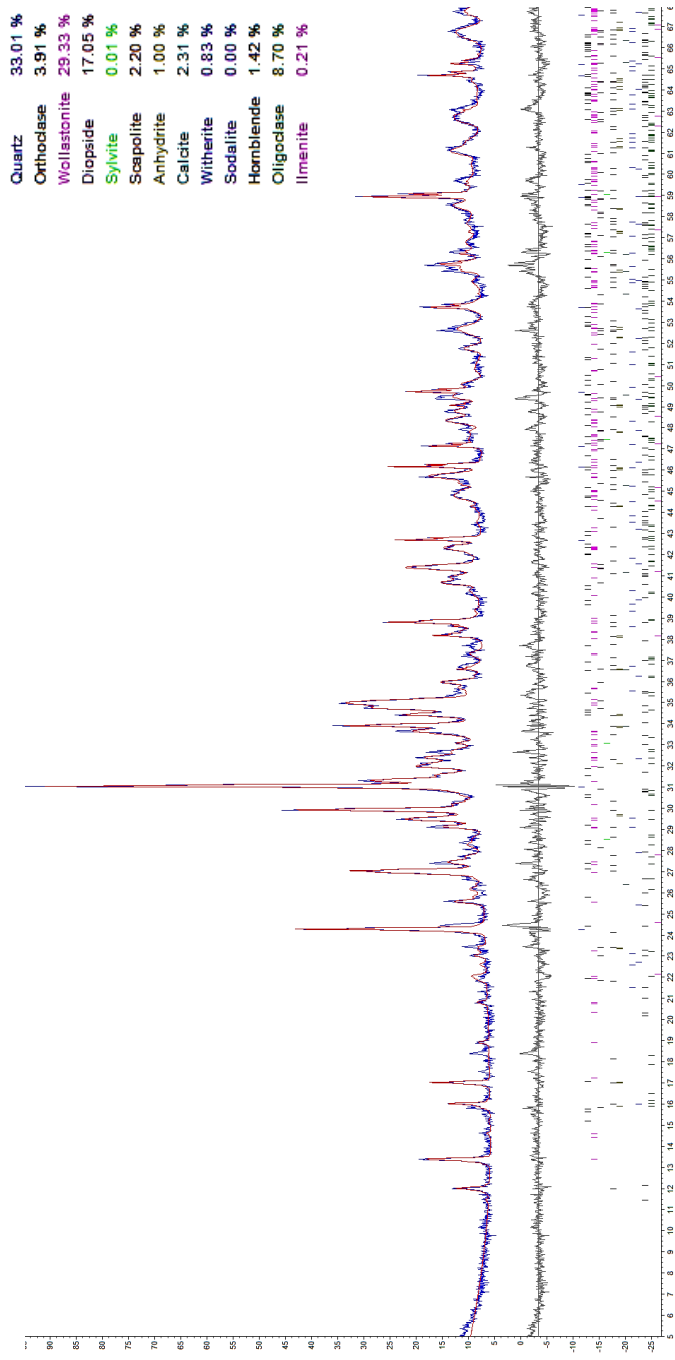
Análisis Cuantitativo - Rietveld (DRX)			
CZ_001			
Tipo	Mineralogía	%	%CuT Calc.
GANGA	Quartz	33.01	
	Wollastonite	29.33	
	Diopside	17.05	
	Plagioclase	8.70	
	Orthoclase	3.92	
	Calcite	2.31	
	Scapolite	2.20	
	Hornblende	1.42	
	Anhydrite	1.00	
	Witherite	0.83	
	Ilmenite	0.21	
	<b>TOTAL</b>	100.00	0.00

*Nota:* El análisis cuantitativo se ha realizado por el método Rietveld.

Finalmente podemos inferir a partir de los estudios de DRX, que en las canteras de sílice se explota mineral mixto compuesto de cuarzo y wollastonita principalmente. El metamorfismo de contacto ha dado lugar a la formación de estos horizontes favorables para que sean explotados como yacimientos no metálicos en Tacna.

**Figura 61**

*Difractograma de la muestra de la cantera en el sector de Tocuco (CZ\_001).*



## 4.6 GEOQUÍMICA

En el presente apartado se examinan los elementos u óxidos mayores y los elementos traza, cuyo análisis estadístico permitirá una comprensión de la génesis de las rocas que comprenden al Plutón Lluta, así como una mejor comprensión tectónica del ambiente de formación de estas rocas, además el análisis de fertilidad magmática. La ubicación de las muestras se resume en el Anexo 03 y Anexo 06.

En la primera parte se discutirán los elementos mayores tales como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , que se han utilizado principalmente para la clasificación de rocas, para la construcción de diagramas de variación y para su clasificación desde un punto de vista químico. En la segunda parte se discutirán los elementos traza (de concentración menos al 0.1 wt. % o 1000 ppm), que son más susceptibles a los distintos procesos geoquímicos a diferencia de los elementos mayores, lo que permitirá diferenciar entre la amplia gama de posibles procesos petrológicos.

Seguidamente, en base al análisis de elementos mayores y traza se ha realizado la clasificación del ambiente tectónico de las rocas del Plutón Lluta, con la finalidad de tener una mejor comprensión, del origen de estas rocas.

Finalmente, se ha realizado un análisis de fertilidad magmática, de las suites de rocas en base a la información de la química de las muestras, basándose en principalmente en elementos inmóviles.

#### **4.6.1 GEOQUÍMICA DE ROCAS DEL PLUTÓN LLUTA**

Los análisis geoquímicos de Acosta et al., 2011 (n=5), se combinaron con los análisis de este estudio (n=20) (ver Anexo 02). Esto se ha realizado con la finalidad de elaborar los diagramas de variación o Harker (Harker, 1909) con una mayor data, para establecer tendencias geoquímicas y así determinar las relaciones presentes entre los diversos tipos de rocas con la evolución magmática, sin embargo, es importante señalar la presencia de alteración hidrotermal y supergénica sobreimpuesta en las rocas que comprenden el Plutón Lluta, no obstante, el efecto sobre los resultados obtenidos son aceptables, debido a que se ha muestreado afloramientos con la mínima alteración posible.

Los análisis químicos fueron realizados por ALS, se ha utilizado el método PREP-31, para la etapa de chancado, cuarteo y pulverizado; para el análisis químico se ha utilizado el paquete CCP-PKG03, el cual consiste en analizar los óxidos principales o mayores por Fluorescencia de Rayos X FRX (ME-XRF26), que se han fundido con borato de litio. Los elementos trazas se analizaron por ICP-MS con una fusión con borato de litio. Los metales base fueron analizados por ICP-AES con una digestión de 4 ácidos (ácido perclórico, nítrico, fluorhídrico y clorhídrico); los elementos volátiles fueron analizados por ICP-MS con una digestión con agua regia. Finalmente, el S y C fueron analizados por Espectroscopia Infrarroja LECO. Los resultados son resumidos en el Anexo 02. Las unidades de medida para los

óxidos mayores están dadas en porcentaje en peso (*wt. %*) y los elementos traza en unidades de partes por millón (*ppm*).

#### **4.6.2 ELEMENTOS MAYORES**

Los diagramas de variación o diagramas de Harker para los óxidos mayores ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) se han planteado en la Figura 62, y estas son discutidas líneas abajo.

##### **4.6.2.1 Fierro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$ ) vs Silica ( $\text{SiO}_2$ )**

En la Figura 62A, se observa el  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$  ( $n=25$ ), en donde está bien definida una correlación negativa entre ambos óxidos mayores ( $R^2 = 0.92$ ). Se observa que los mayores valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$  van en un rango de 6.5 a 10 wt.% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$ , corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Dioritas – Cuarzo dioritas)(e.g. 9\_GQ\_GRD\_12, 14\_GQ\_DR\_84, 19\_GQ\_DR\_150, 7\_GQ\_GRD\_16, 11\_GQ\_DR\_266, 20\_GQ\_GRDT\_111 y 8\_GQ\_GRD\_17), los valores intermedios van en un rango de 2.75 a 6.75 wt.% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$ , corresponden a las rocas félsicas - intermedias agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011) y los valores bajos van en un rango de 1.75 a 3.25 wt.% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$ , corresponden a rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267,

1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de SiO<sub>2</sub> de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación negativa entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan fierro en su estructura cristalina (e.g. olivino, piroxeno, anfíbol, biotita, magnetita, entre otros), desde las etapas tempranas, hasta las últimas etapas, debido a procesos de fraccionación en la cámara magmática, evidenciados por los estudios petrográficos.

#### **4.6.2.2 Óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) vs sílica (SiO<sub>2</sub>)**

En la Figura 62B, se observa el SiO<sub>2</sub> vs TiO<sub>2</sub> (n=25), en donde se define una correlación negativa entre ambos óxidos mayores (R<sup>2</sup> = 0.77). Se observa que los mayores valores de TiO<sub>2</sub> van en un rango de 0.75 a 1.15 wt.% de TiO<sub>2</sub>, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Dioritas – Cuarzo Diorita)(e.g. 8\_GQ\_GRD\_17, 7\_GQ\_GRD\_16, 20\_GQ\_GRDT\_111, 19\_GQ\_DR\_150, 11\_GQ\_DR\_266, 14\_GQ\_DR\_84 y 9\_GQ\_GRD\_12), los valores intermedios van en un rango de 0.53 a 0.86 wt.% de TiO<sub>2</sub>, corresponden a las rocas intermedias - félsicas agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011) y los valores bajos van en un rango de 0.20 a 0.39 wt.% de TiO<sub>2</sub>, corresponden a

rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de SiO<sub>2</sub> de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación negativa entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan titanio en su estructura cristalina (e.g. titanomagnetita, zircón, etc.), principalmente como minerales accesorios y en algunos casos como en la biotita incorpora titanio como elemento traza.

#### **4.6.2.3 Óxido de magnesio (MgO) vs sílica (SiO<sub>2</sub>)**

En la Figura 62C, se observa el SiO<sub>2</sub> vs MgO (n=25), en donde está bien definida una correlación negativa entre ambos óxidos mayores ( $R^2 = 0.70$ ). Se observa que los mayores valores de MgO van en un rango de 2.5 a 4.05 wt.% de MgO, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Diorita – Cuarzo Diorita)(e.g. 8\_GQ\_GRD\_17, 7\_GQ\_GRD\_16, 20\_GQ\_GRDT\_111, 19\_GQ\_DR\_150, 11\_GQ\_DR\_266, 14\_GQ\_DR\_84 y 9\_GQ\_GRD\_12), los valores intermedios van en un rango de 1.79 a 2.53 wt.% de MgO, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por

Acosta et al., 2011) y los valores bajos van en un rango de 0.32 a 0.95 wt.% de MgO, corresponden a rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de SiO<sub>2</sub> de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación negativa entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan magnesio en su estructura cristalina (e.g. piroxenos, anfíbol, etc.), es evidente que el contenido de magnesio está fuertemente controlado por los minerales ferromagnesianos presentes en las rocas intermedias del Plutón Lluta.

#### **4.6.2.4 Óxido de calcio (CaO) vs silica (SiO<sub>2</sub>)**

En la Figura 62D, se observa el SiO<sub>2</sub> vs CaO (n=25), en donde está bien definida una correlación negativa entre ambos óxidos mayores ( $R^2 = 0.85$ ). Se observa que los mayores valores de CaO van en un rango de 5 a 7.6 wt.% de CaO, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Diorita – Cuarzo Diorita)(e.g. 8\_GQ\_GRD\_17, 7\_GQ\_GRD\_16, 20\_GQ\_GRDT\_111, 19\_GQ\_DR\_150, 11\_GQ\_DR\_266, 14\_GQ\_DR\_84 y 9\_GQ\_GRD\_12), los valores intermedios van en un rango de 3.5 a 4.63 wt.% de CaO, corresponden a las rocas intermedias - félsicas agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15,

10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011) y los valores bajos van en un rango de 0.75 a 2.40 wt.% de CaO, corresponden a rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de SiO<sub>2</sub> de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación negativa entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan calcio en su estructura cristalina (e.g. Plagioclasa-Ca principalmente), la notable abundancia de calcio en las rocas máficas y la disminución de esta en las rocas félsicas están controladas por la presencia de plagioclasa cálcica.

#### **4.6.2.5 Óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) vs silica (SiO<sub>2</sub>)**

En la Figura 62E, se observa el SiO<sub>2</sub> vs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (n=25), en donde está bien definida una correlación negativa entre ambos óxidos mayores ( $R^2 = 0.86$ ). Se observa que los mayores valores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> van en un rango de 16.2 a 17.44 wt.% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Diorita – Cuarzo Diorita)(e.g. 8\_GQ\_GRD\_17, 7\_GQ\_GRD\_16, 20\_GQ\_GRDT\_111, 19\_GQ\_DR\_150, 11\_GQ\_DR\_266, 14\_GQ\_DR\_84 y 9\_GQ\_GRD\_12), los valores intermedios van en un rango de

14.34 a 15.56 wt.% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , corresponden a las rocas intermedias - félsicas agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011) y los valores bajos van en un rango de 12.31 a 15.07 wt.% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , corresponden a rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de  $\text{SiO}_2$  que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de  $\text{SiO}_2$  de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación negativa entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan aluminio en su estructura cristalina (e.g. plagioclasas y minerales ferromagnesianos), se puede inferir entonces, que la abundancia de aluminio está principalmente relacionada a la cristalización y abundancia de minerales ferromagnesianos en las rocas máficas del Plutón Lluta.

#### **4.6.2.6 Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) vs sílica ( $\text{SiO}_2$ )**

En la Figura 62F, se observa el  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Na}_2\text{O}$  (n=25), en donde los datos muestran una débil correlación negativa ( $R^2 = 0.10$ ), no obstante, la mejor correlación entre ambos óxidos está dada por el G01 (Granitos y diques félsicos) dando un valor de  $R^2 = 0.52$ . Se observa que los mayores valores de  $\text{Na}_2\text{O}$  van en un rango de 3.07 a 4.76 wt.% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , entre las rocas intermedias agrupadas y

denominadas en este estudio como G03 (Diorita - Cuarzo Diorita)(e.g. 8\_GQ\_GRD\_17, 7\_GQ\_GRD\_16, 20\_GQ\_GRDT\_111, 19\_GQ\_DR\_150, 11\_GQ\_DR\_266, 14\_GQ\_DR\_84 y 9\_GQ\_GRD\_12), las rocas intermedias – félsicas agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011) y las rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones tan dispersas, se dan en función al aumento del contenido de SiO<sub>2</sub> que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de SiO<sub>2</sub> de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta débil correlación negativa entre ambos óxidos está controlado principalmente a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan sodio en su estructura cristalina (e.g. plagioclasa-Na y minerales ferromagnesianos).

#### **4.6.2.7 Óxido de potasio (K<sub>2</sub>O) vs Sílica (SiO<sub>2</sub>)**

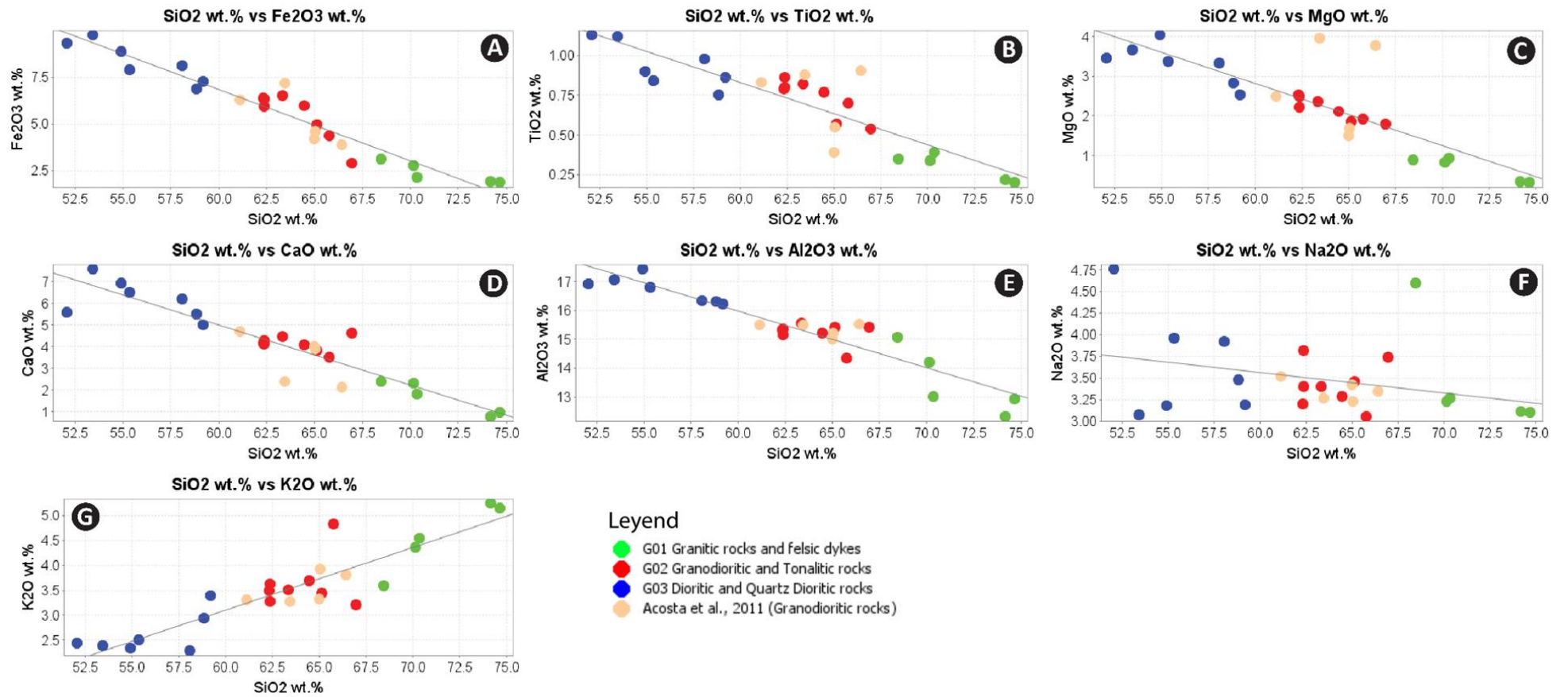
En la Figura 62G, se observa el SiO<sub>2</sub> vs K<sub>2</sub>O (n=25), en donde se define una correlación positiva entre ambos óxidos mayores ( $R_2 = 0.80$ ). Se observa que los menores valores de K<sub>2</sub>O van en un rango de 2.28 a 3.40 wt.% de K<sub>2</sub>O, corresponden a las rocas intermedias agrupadas y denominadas en este estudio como G03 (Diorita – Cuarzo Diorita)(e.g. 9\_GQ\_GRD\_12, 14\_GQ\_DR\_84, 19\_GQ\_DR\_150, 7\_GQ\_GRD\_16, 11\_GQ\_DR\_266, 20\_GQ\_GRDT\_111 y 8\_GQ\_GRD\_17), los

valores intermedios van en un rango de 3.20 a 4.83 wt.% de  $K_2O$ , corresponden a las rocas intermedias - félsicas agrupadas y denominadas como G02 (Granodiorita – Tonalita) (e.g. 4\_GQ\_MZG\_5, 3\_GQ\_GRD\_15, 10\_GQ\_MZG\_270, 15\_GQ\_GRDT\_220, 17\_GQ\_GRDT\_199, 5\_GQ\_MZG\_3 y 18\_GQ\_GRDT\_217, incluyendo las muestras analizadas por Acosta et al., 2011), este grupo posee la mayor dispersión de los datos, y los valores altos van en un rango de 3.59 a 5.25 wt.% de  $K_2O$ , corresponden a rocas félsicas denominadas G01 (Granitos y diques félsicos)(e.g. 12\_GQ\_APL\_269, 13\_GQ\_APL\_267, 1\_GQ\_APL\_6, 6\_GQ\_MZG\_14 y 16\_GQ\_APL\_219), estas variaciones se dan en ese orden en función al aumento del contenido de  $SiO_2$  que va en un rango de 52 a 74.75 wt.% de  $SiO_2$  de la suite que comprenden al Plutón Lluta.

Esta correlación positiva entre ambos óxidos corresponde a la cristalización fraccionada de minerales que incorporan potasio en su estructura cristalina (e.g. feldespato-K), por tanto, se infiere que el control de la abundancia del contenido de potasio está controlado por la presencia de las rocas félsicas con abundancia de feldespato K, las cuales corresponden a granitos.

**Figura 62**

*Diagramas de variación o Harker, para los óxidos principales.*



### **4.6.3 CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS**

Existen diversos diagramas para la clasificación de rocas plutónicas en función a la química de las rocas, de las cuales el diagrama Total Alcalis vs Silica o TAS para rocas ígneas plutónicas (Middlemost, 1985 y Wilson 1984) y el diagrama normativo Q-Or-Ab (Thompson, 1984) para granitoides, son los más representativos. Para efecto de este estudio se ha realizado la clasificación en base al diagrama de Middlemost, 1985, Wilson 1984 y el diagrama R1 vs R2 (De La Roche et al., 1980).

Para el uso de estos y otros diagramas basados en los elementos u óxidos mayores, es necesario realizar una normalización sobre una base anhidra o libre de volátiles (loss on ignition LOI), la cual tiene como fórmula:

$$wt.\% \text{ Óxido } i_{norm} = \frac{100 \text{ wt.\%} \times \text{Óxido } i}{\sum \text{Óxidos} - \text{LOI}}$$

#### **4.6.3.1 Diagrama de clasificación TAS para rocas plutónicas**

El presente diagrama es una adaptación del conocido diagrama de TAS (Total Alkalis vs Silica) diseñada para rocas volcánicas. El uso de este diagrama presenta algunas dificultades, debido a que solo consideras 3 óxidos mayores y deja de lado los otros componentes mayoritarios de las rocas.

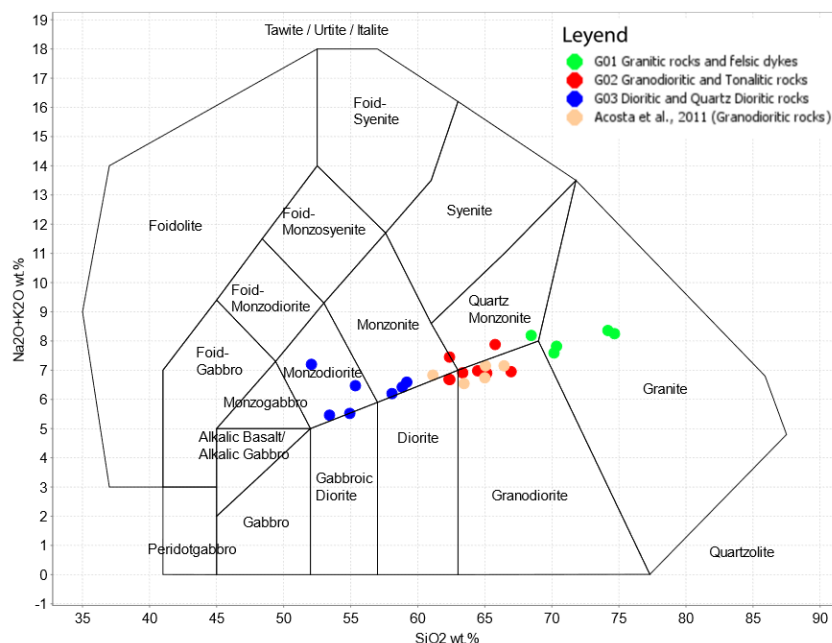
La distribución de las muestras en el siguiente diagrama corresponden principalmente a los campos de monzodioritas, dioritas y monzonitas para las rocas

del grupo G03 o rocas intermedias. Seguidamente las rocas del grupo G02 caen en el grupo de las granodioritas y cuarzo monzonitas. Finalmente, las rocas del grupo G01 caen en su mayoría en el campo de los granitos (ver Fig. 63).

Se hace incapié en el uso de este diagrama, resaltando su uso con mucho cuidado, debido a que ignora otros componentes mayoritarios de estas rocas, y su uso puede provocar confusiones en la clasificación de las rocas. Otra desventaja es al momento de clasificar cuarzo dioritas, granodioritas y tonalitas, esto no será posible debido a las limitaciones antes mencionadas.

**Figura 63**

Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  ( $n=22$ ).



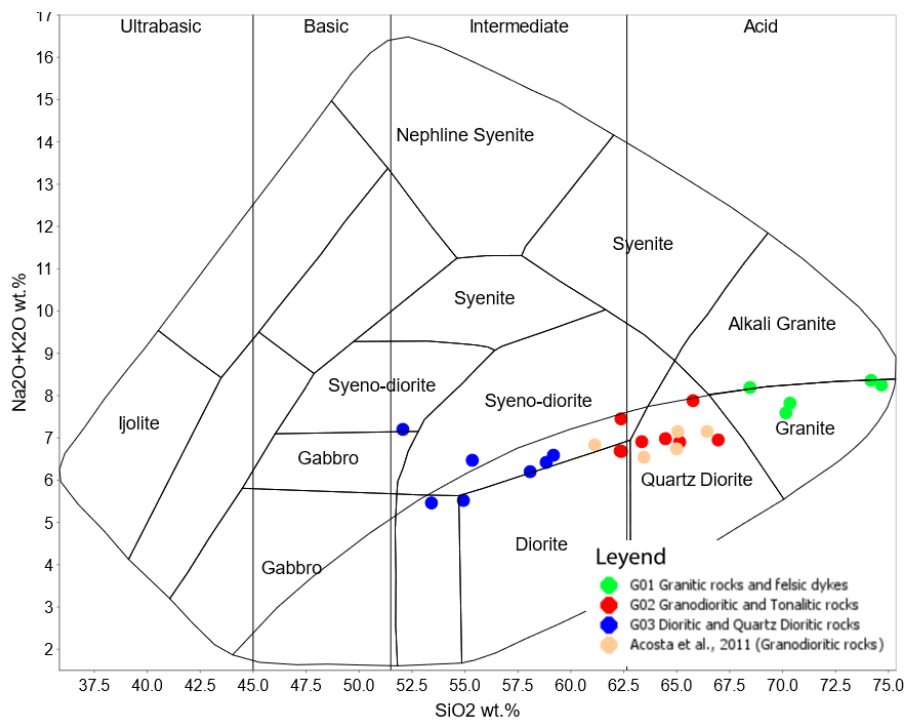
Otro diagrama utilizado para la clasificación de rocas intrusivas en función al contenido de  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (ver Fig. 64), es el diagrama adaptado por

Wilson, (1989). Este diagrama adicionalmente subclasifica a las rocas en 4 campos: ultrabásica, básica, intermedia y ácida, en función principalmente al contenido de SiO<sub>2</sub>. Además este diagrama, clasifica en el campo de las rocas subalcalinas a las dioritas, cuarzo dioritas y granitos, sin embargo no es posible clasificar con este diagrama a las granodioritas, las cuales son abundantes en nuestra área de estudio.

En conclusión el empleo de diagramas de clasificación mediante SiO<sub>2</sub> vs Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O es muy limitado debido principalmente a las dificultades para clasificar a las rocas alcalinas de las subalcalinas, no coincidiendo en muchos casos entre ellas y con lo estudios petrográficos.

**Figura 64**

*Diagrama SiO<sub>2</sub> vs Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O (n=22).*



#### **4.6.3.2 Diagrama de clasificación R1 VS R2 para rocas plutónicas**

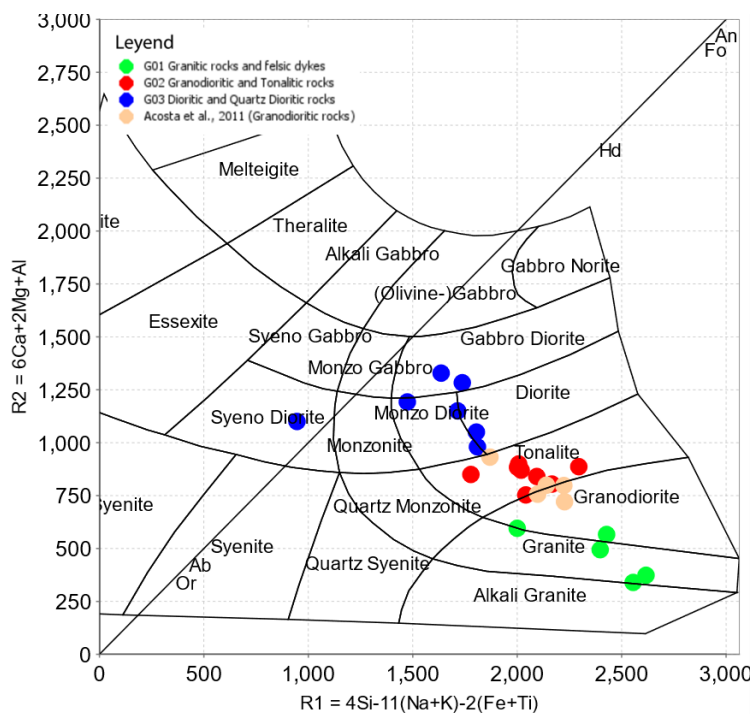
El diagrama R1 vs R2 (De La Roche et al., 1980) o diagrama multicatiónico, posee mayor robustez con respecto a otros diagramas como TAS, debido a que considera todos los componentes esenciales combinados en dos ejes. Además, es posible representar los minerales formadores de rocas y establecer comparaciones paragenéticas reales.

Como se puede observar en la Figura 65, las rocas del grupo G01 (granitos y diques félsicos), caen principalmente en el campo de los granitos, algo demostrado por los estudios petrográficos. Seguidamente, las rocas del grupo G02 (granodioritas – tonalitas), caen en los campos de tonalitas y granodioritas, demostrado también por los estudios petrográficos. Por otra parte, las rocas del grupo G03 (dioritas – cuarzo dioritas) caen en los campos de monzodiorita, diorita, gabro diorita y sienita diorita, como se ha podido notar, la agrupación G03 es la que quizá menor semejanza tiene con la clasificación petrográfica, debido quizá a que no considera un campo para el cuarzo dioritas.

Sin embargo, pese a estas limitaciones es el diagrama que mejor ha clasificado a las rocas de nuestra área de estudio y es a partir de estos resultados que se han ajustado mejor los resultados petrográficos.

**Figura 65**

*Diagrama R1 vs R2 (De La Roche et al., 1980).*



#### 4.6.3.3 Clasificación geoquímica – magmática del Plutón Lluta

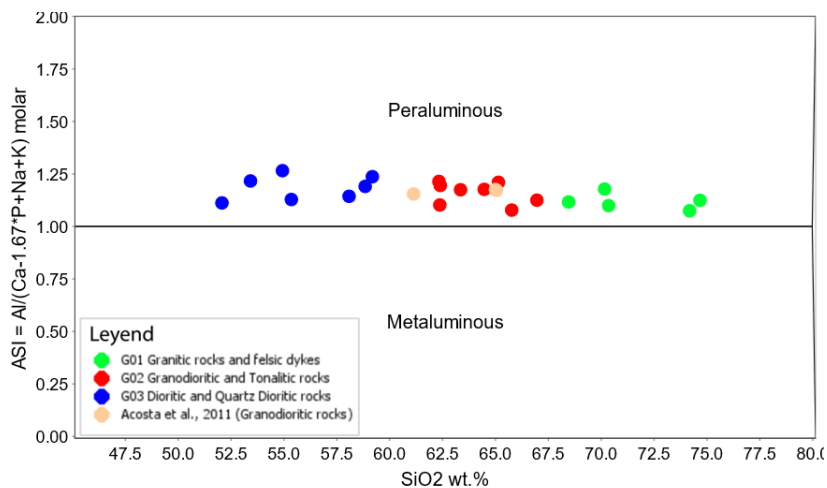
Las rocas intrusivas presentes entre Pachía y Palca y que comprenden el Plutón Lluta pueden ser divididas en base a su contenido de SiO<sub>2</sub> o contenido de silicio. Estas son Dioritas a Cuarzo Dioritas (50 % - 58,5 %), Granodioritas - tonalitas (58,5 % - 65,5 %) y Granitos (65,5 % - 75 %), para este estudio se han clasificado en tres grupos, para fines prácticos, en base a su química, petrografía y estudios de difracción de rayos X, estas son:

- G01 – Granitos (n=5)
- G02 – Granodioritas – Tonalitas (n=8)
- G03 – Dioritas – Cuarzo dioritas (n=7)
- Acosta et al., 2011 (n=5)

Las rocas que han sido analizadas por Acosta et al., 2011, han sido clasificadas como granodioritas (Pa/III-15-03, Pa-IV-04-05 y Pa/III-16-03), a excepción de las muestras PA950800 y PA860800, las cuales no se indica en su estudio su correspondiente clasificación. Todas las rocas poseen SiO<sub>2</sub> menor a 75 % y todas son peraluminosas (Frost y Frost 2008) (ver Fig. 66), con una razón K<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub>O bajo (menor a 1.7) (ver Fig. 67), además poseen elevado contenido de anfíboles (mayor a biotita) y magnetita. Estas características son propias de granitoides tipo I según la clasificación de White y Chappell 1983.

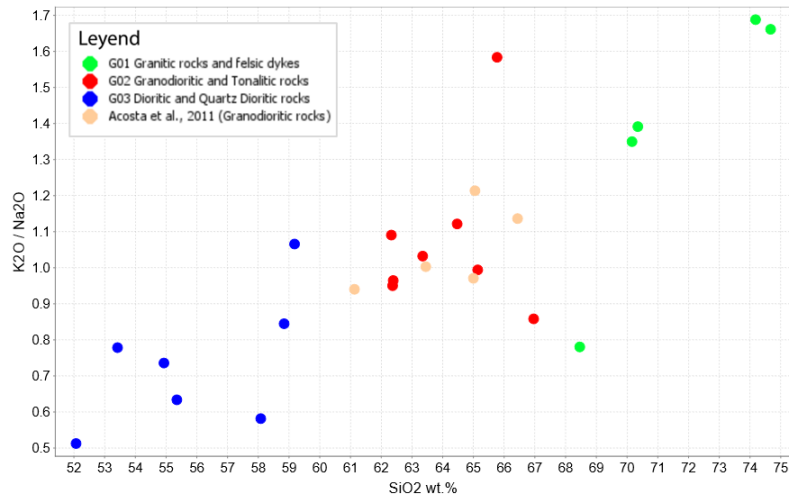
**Figura 66**

*Diagrama SiO<sub>2</sub> vs ASI, representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos.*



**Figura 67**

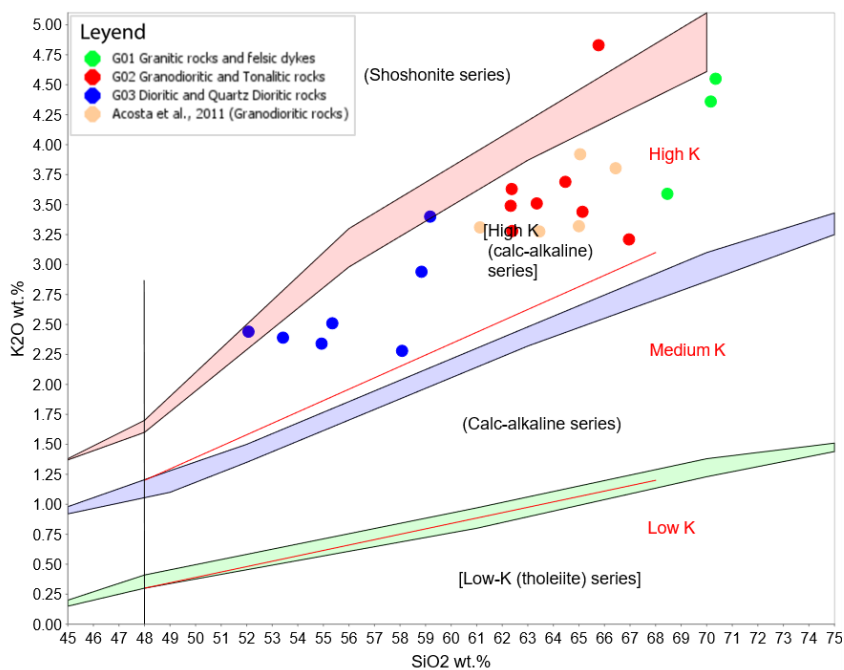
*Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos.*



Como se ha mencionado líneas arriba, las rocas plutónicas presentes en nuestra área de estudio poseen características de magmas tipo I. Para reforzar esta afirmación, se ha realizado la clasificación en función de la subdivisión de las rocas subalcalinas (entre toleíticas, calco alcalinas y shoshoníticas) usando los óxidos mayores  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{SiO}_2$  (ver Fig. 68). A partir de ello, podemos observar que nuestros resultados (i.e. G01, G02, G03 y los datos de Acosta et al., 2011) se encuentran ubicados en la serie calco alcalina alta en potasio (high K), sin embargo, la muestra 4\_GQ\_MZG\_5, se encuentra ubicada en el campo de la serie Shoshonítica, debido a un contenido mayor de  $\text{K}_2\text{O}$ . Estos resultados se discutirán más adelante.

**Figura 68**

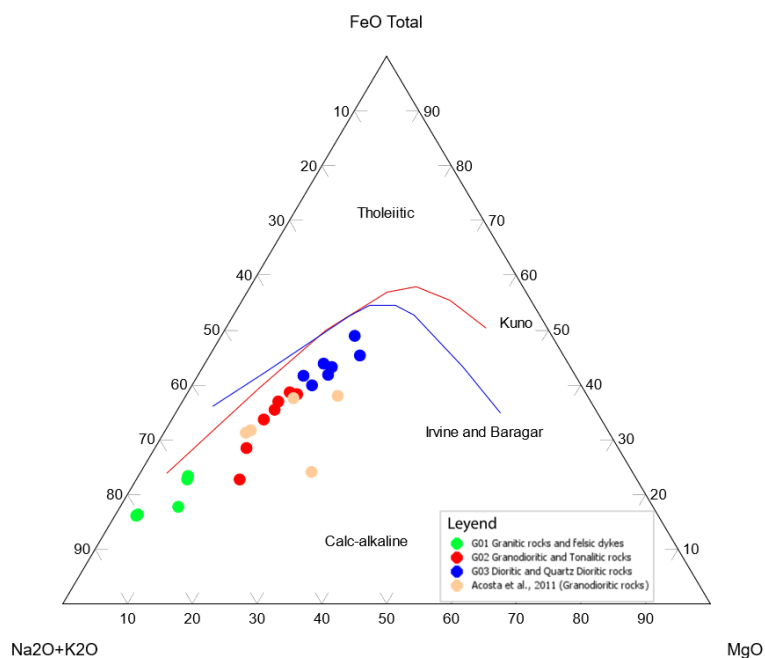
*Diagrama  $K_2O$  vs  $SiO_2$ , representado de colores las muestras del Plutón Lluta, en los campos respectivos.*



Finalmente, se ha realizado la clasificación magmática entre el magmatismo calco alcalino y toleítico, empleando el diagrama ternario AFM ( $FeO_T$ ,  $Na_2O + K_2O$  y  $MgO$ ) (ver Fig. 69), incluyendo las curvas que dividen estos campos entre ambos tipos de magmas (Irvine & Baragar, 1971; Kuno, 1968). Todos nuestros datos se ubican en el campo de la serie calco alcalina, evidenciando, además, el grado de diferenciación de las rocas, dividida por grupos (G01, G02, G03 y las muestras de Acosta et al., 2011).

**Figura 69**

*Diagrama ternario  $Na_2O+K_2O$ ,  $MgO$ ,  $FeO_T$ .*



#### **4.6.4 ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS**

##### **4.6.4.1 Diagramas de tierras raras o REE**

Para la elaboración de los diagramas REE o de tierras raras (La a Lu), se ha normalizado, con respecto al N-MORB de (Sun & McDonough, 1989)(ver Tabla 03). Se ha usado estos valores debido a que son apropiados para las rocas félsicas de la corteza continental, las andesitas, basaltos de arco y basaltos evolucionados (Rollinson & Pease, 2021). Ya que se asume que el MORB podría ser el material parental, para la formación de las suites ígnea en nuestra área de estudio. Los diagramas REE fueron elaborados de manera separada en primera instancia para las agrupaciones G01, G02, G03 y las muestras analizadas por Acosta et al., 2011, con

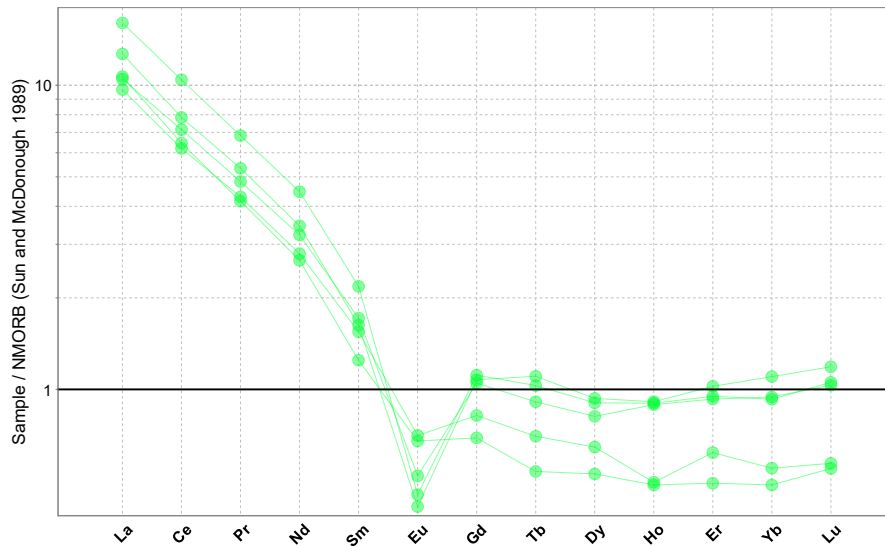
la finalidad de analizar de manera individual los cambios en los perfiles REE, en segunda instancia se ha elaborado un diagrama REE, que compila toda la información de manera conjunta, para una comparación entre las agrupaciones antes mencionadas (ver Fig. 74).

En líneas generales, la distribución de elementos de tierras raras ligeras o LREE (La - Sm) y las tierras raras pesadas o HREE (Gd - Lu), muestran un comportamiento o tendencias distintas en estos diagramas. Las tierras raras ligeras muestran un enriquecimiento y una pendiente pronunciada hasta llegar al elemento Eu, a partir de ese elemento la pendiente disminuye de manera considerable, así como la abundancia de las tierras raras pesadas, formando en algunos grupos una forma curvada hacia abajo. Esta primera pendiente pronunciada se repite para las agrupaciones G01, G02, G03 y las muestras analizadas por Acosta et al., 2011, sin embargo, en el elemento Eu, observamos una fuerte anomalía negativa en las agrupaciones G01, G02 y los datos de Acosta et al., 2011.

Las agrupaciones del G01, presenta dos agrupaciones y se evidencia además en las anomalías negativas de Eu, siendo estas de 0.28 a 0.40 para las muestras 01\_GQ\_APL\_6, 12\_GQ\_APL\_269 y 13\_GQ\_APL\_267 y de 0.625 a 0.73 para las muestras 16\_GQ\_APL\_219 y 6\_GQ\_MZG\_14 (ver Fig. 70 y 75). Las tierras raras ligeras, presentan un enriquecimiento o una mayor presencia y van decreciendo hasta llegar al Eu. Las tierras raras pesadas, presentan un empobrecimiento constante en el fundido.

**Figura 70**

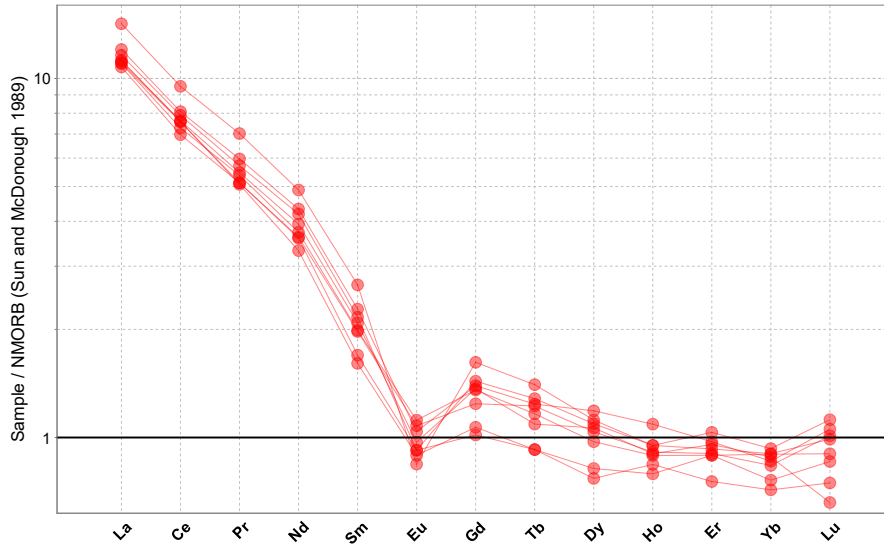
*Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G01.*



La agrupación G02, incluido los datos de Acosta et al., 2011, presentan anomalías negativas de Eu, que van de 0.52 a 0.725. Representando anomalías negativas intermedias, evidenciando la fraccionación de plagioclasa en el fundido (ver Fig. 71 y 75). De igual manera que la agrupación G01, las tierras raras ligeras muestran un enriquecimiento respecto al MORB y las tierras raras pesadas muestran un ligero agotamiento enriquecimiento y posterior empobrecimiento constante conforme se acercan al elemento Lu, a diferencia de las muestras de Acosta et al., 2011, donde las tierras raras pesadas muestran un agotamiento con respecto al MORB (ver Fig. 72).

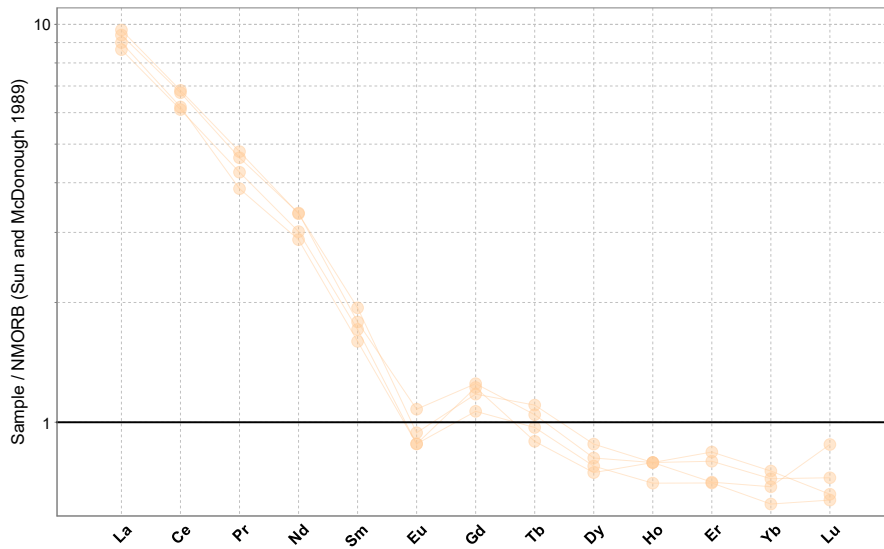
**Figura 71**

Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G02.



**Figura 72**

Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a los datos de Acosta et al., 2011.

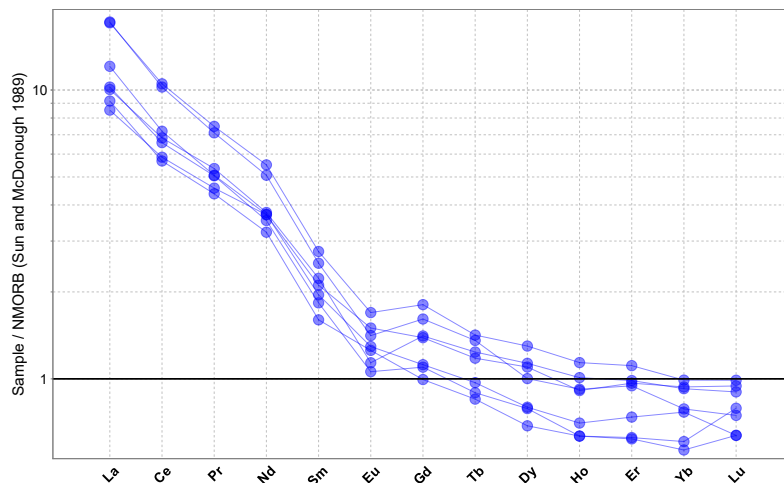


La agrupación G03, presentan anomalías negativas de Eu, que van de 0.64 a 1.00. Esta anomalía negativa marcada en el elemento Eu, sin embargo, es débil o muy ligera en la agrupación G03 (con tendencia a 1), que comprende las rocas máficas de la suite del Plutón Lluta (ver Fig. 73 y 75). Esta anomalía está vinculada a la cristalización fraccionada de plagioclasa, que en este caso no ha cristalizado en proporciones significativas en el fundido, esto puede deberse a la presencia de H<sub>2</sub>O molecular que se puede hallar en la hornblenda (hasta 20 %), en consecuencia, el reemplazo del Ca por Eu, no se ha dado en estas rocas a diferencia de las otras agrupaciones.

De manera similar a la agrupación G02, las tierras raras ligeras están enriquecidas a diferencia de las tierras raras pesadas que están agotadas de manera decreciente (de Gd a Lu).

**Figura 73**

*Diagrama REE normalizado al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989), correspondiente a la agrupación G03.*



**Tabla**

*Valores de condrito C1, Manto primitivo, N-MORB, E-MORB y OIB.*

Element	C1 chondrite <sup>a</sup>	Primitive mantle <sup>a</sup>	N-type MORB	E-type MORB	OIB
Cs	0.188	0.032 <sup>b</sup>	0.007	0.063	0.387
Tl	0.14	0.005	0.0014	0.013	0.077
Rb	2.32	0.635	0.56	5.04	31
Ba	2.41	6.989	6.3	57	350
W	0.095	0.02	0.01	0.092	0.56
Th	0.029	0.085	0.12	0.6	4
U	0.008	0.021	0.047	0.18	1.02
Nb	0.246	0.713	2.33	8.3	48
Ta	0.014	0.041	0.132	0.47	2.7
K	545	250	600	2100	12000
La	0.237	0.687	2.5	6.3	37
Ce	0.612	1.775	7.5	15	80
Pb	2.47	0.185 <sup>b</sup>	0.3	0.6	3.2
Pr	0.095	0.276	1.32	2.05	9.7
Mo	0.92	0.063	0.31	0.47	2.4
Sr	7.26	21.1	90	155	660
P	1220	95	510	620	2700
Nd	0.467	1.354	7.3	9	38.5
F	60.7	26	210	250	1150
Sm	0.153	0.444	2.63	2.6	10
Zr	3.87	11.2	74	73	280
Hf	0.1066	0.309	2.05	2.03	7.8
Eu	0.058	0.168	1.02	0.91	3
Sn	1.72	0.17	1.1	0.8	2.7
Sb	0.16	0.005	0.01	0.01	0.03
Ti	445	1300	7600	6000	17200
Gd	0.2055	0.596	3.68	2.97	7.62
Tb	0.0374	0.108	0.67	0.53	1.05
Dy	0.254	0.737	4.55	3.55	5.6
Li	1.57	1.6	4.3	3.5	5.6
Y	1.57	4.55	28	22	29
Ho	0.0566	0.164	1.01	0.79	1.06
Er	0.1655	0.48	2.97	2.31	2.62
Tm	0.0255	0.074	0.456	0.356	0.35
Yb	0.17	0.493	3.05	2.37	2.16
Lu	0.0254	0.074	0.455	0.354	0.3

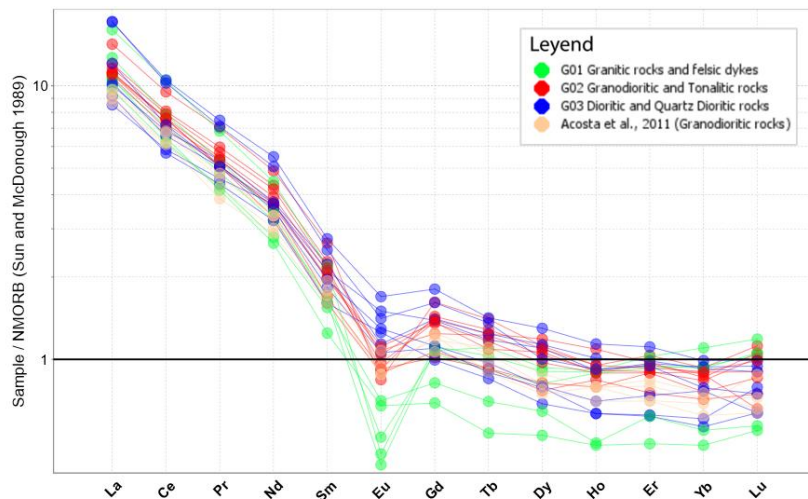
<sup>a</sup> Las composiciones del condrito C1 y el manto primitivo son de *McDonough & Sun*.

Los valores para MORB y OIB de tipo N y tipo E se basan en una encuesta bibliográfica y en la consistencia interna de las proporciones elementales.

<sup>b</sup> Para los diagramas normalizados del manto, los valores de normalización recomendados para el plomo y el cesio son 0,071 y 0,0079, respectivamente.

**Figura 74**

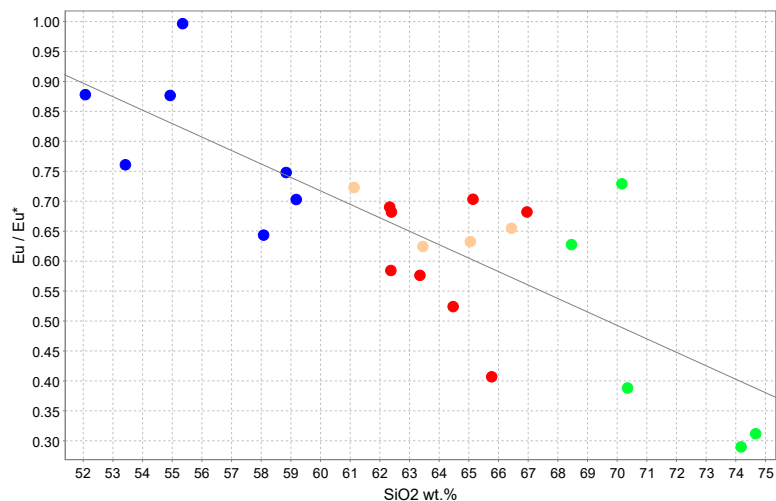
Diagrama REE normalizados al NMORB (valores de NMORB tomados de Sun & McDonough, 1989).



*Nota:* Las rocas correspondientes a la agrupación G01 están ploteados de color verde claro, la agrupación G02 están ploteados de color rojo, la agrupación G03, están ploteados de color azul y la agrupación de rocas de Acosta et al., 2011, están ploteados de color rosado claro.

**Figura 75**

Anomalía de  $Eu/Eu^*$  vs  $SiO_2$ , correspondiente a las agrupaciones G01, G02, G03 y los datos de Acosta et al., 2011.



*Nota:* Los datos muestran una tendencia negativa, que disminuye marcadamente en la agrupación G01.

#### 4.6.4.2 Diagramas Spider

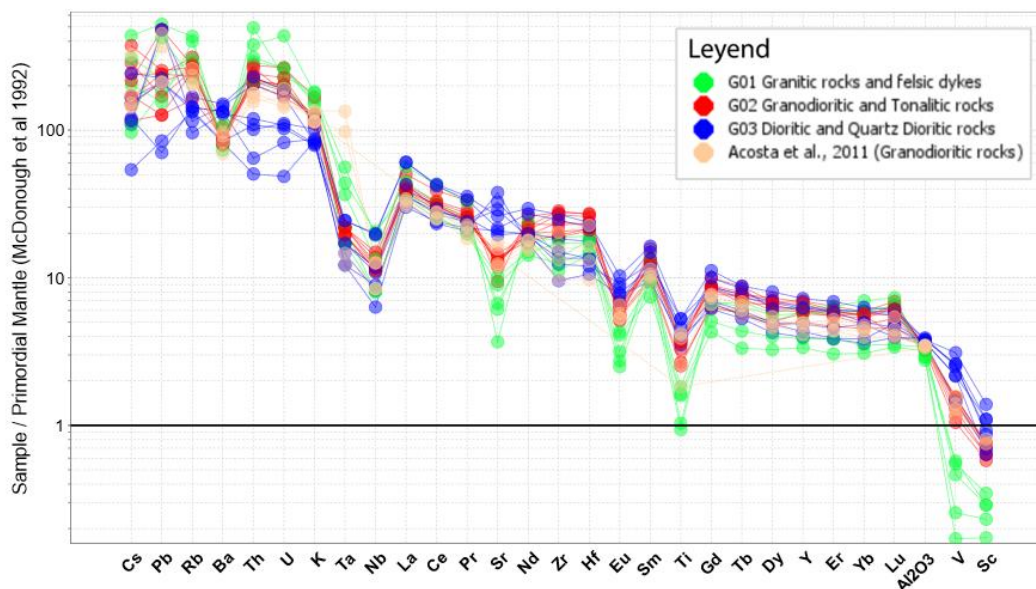
Para la elaboración de estos diagramas, además de incrementar el número de elementos químicos, se ha normalizado con respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989)(ver Tabla 03). En este caso, se han usado los valores del manto primitivo, para identificar las variaciones con respecto a la composición de la tierra, antes de su diferenciación, antes de la formación de cualquier corteza continental (Rollinson & Pease, 2021).

Se ha elaborado un diagrama spider que resume los resultados de las agrupaciones G01, G02, G03 y las muestras analizadas por Acosta et al., 2011, con la finalidad de analizar grupalmente las tendencias de ellos, así como los cambios en los perfiles spider, que pueden indicar procesos distintos.

A partir de estos diagramas podemos observar, en términos generales, que los elementos menos compatibles (elementos agrupados hacia la izquierda) o LILE (large ion lithophile elements), poseen concentraciones hasta 100 x PM (Primitive Mantle), disminuyendo progresivamente para los elementos HSFE que son más compatibles, los cuales, además, muestran concentraciones cercanas a las del PM (<10 x PM).

**Figura 76**

*Diagrama Spider o multielemento (n=25).*



En la Figura 76, se muestra las concentraciones de los elementos trazas y el  $Al_2O_3$ , normalizados al PM. Se puede visualizar, que los elementos del grupo LILE corresponden a los más incompatibles (hasta 100 x PM), esto corresponde a todas las agrupaciones de rocas del Plutón Lluta, con excepción del Eu, el cual se encuentra en concentraciones  $<10$  x PM y de similar manera para el Sr ( $<100$  x PM). Se puede observar, además, que los elementos del grupo LILE no muestran un patrón homogéneo, sino más bien un patrón más disperso. Los elementos HFSE, muestra un aumento en la compatibilidad, de izquierda a derecha, no evidenciando diferencias en la forma del patrón para las agrupaciones de rocas que comprenden al Plutón Lluta. Los elementos que comprenden a los LREE (La, Ce, Pr y Nd), muestran concentraciones que van de 10 x PM hasta 70 x PM, correspondiendo a

las mayores concentraciones a la agrupación G03, las concentraciones intermedias a la agrupación G02 y los datos de Acosta 2011 y las menores concentraciones a la agrupación G01. Los elementos que comprenden a los MREE (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy y Ho), presentan valores  $<20 \times \text{PM}$ , estos se evidencian en la Figura 76 de manera descendente. Además, es posible observar, que las mayores concentraciones corresponden a las muestras de la agrupación G03 y los menores valores corresponden a la agrupación G01.

Finalmente, los elementos que comprenden a los HREE (Er, Tm, Yb, Lu y Y), presentan valores  $<10 \times \text{PM}$ , muestran un patrón homogéneo que desciende suavemente a sub-horizontal. De igual manera que los elementos LREE y MREE, los HREE los mayores valores corresponden a las rocas máficas de la agrupación G03, los valores intermedios  $7 \times \text{PM}$  a  $3 \times \text{PM}$ , corresponden a las rocas intermedias de la agrupación G02 y las de Acosta 2011 y los valores bajos  $<3 \times \text{PM}$ , corresponden principalmente a las rocas félsicas de la agrupación G01. Los elementos V, Ti y Sc, que comprenden a la agrupación de los metales de transición, muestran patrones descendentes, y podemos observar que estos elementos se encuentran empobrecidos principalmente en las rocas félsicas de la agrupación G01.

#### **4.6.4.3 Diagramas de clasificación tectónica**

Los primeros intentos de clasificar las rocas intrusivas se remontan a los trabajos de Pearce et al., 1984, determinaron que los elementos Y, Yb, Rb, Ba, K,

Nb, Ta, Ce, Sm, Zr y Hf podrían discriminar correctamente entre granitos de dorsal oceánica (ORG), arco volcánico (VAG), intra-placa (WPG) y sin-colisional (S-COLG). Sin embargo, los últimos trabajos de Verma et al., 2012, han determinado que los granitos de dorsal oceánica (ORG) no se pueden clasificar por esta metodología.

Si obviamos la información geoquímica de los granitos de dorsal oceánica (ORG) podemos clasificar en función de los elementos Yb-Ta a los granitos intraplaca (WPG) sin error, a los granitos de arco volcánico (VAG) con un 11 % de incertidumbre y a los granitos sin colisión con un 25 % de incertidumbre. Otro diagrama Y-Nb clasifica exitosamente a los granitos WPG (con un 18 % de incertidumbre) y a los granitos VAG + S-COLG (con un 4 % de incertidumbre) (Verma et al., 2012).

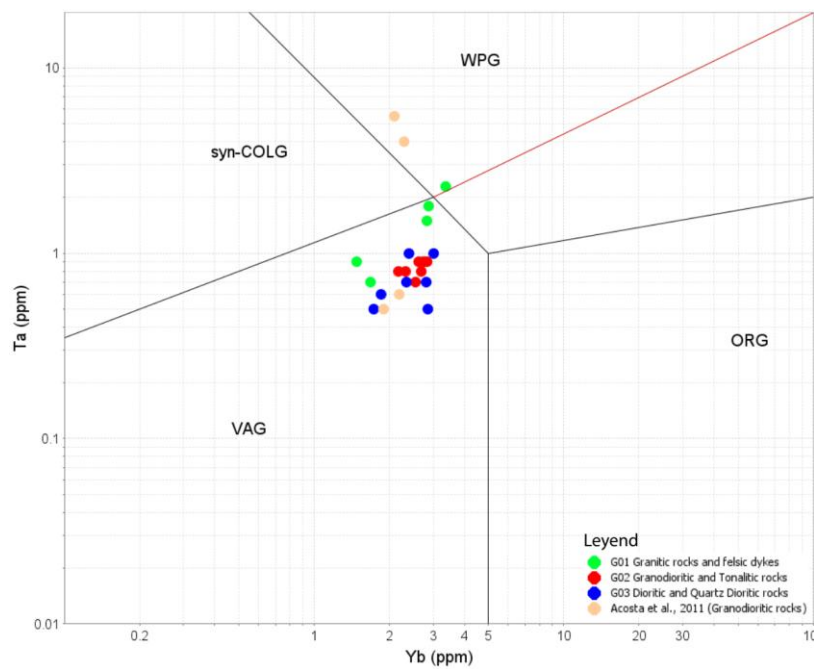
#### ***4.6.4.3.1 Diagramas Yb vs Ta, Y vs Nb***

A partir del diagrama de clasificación Yb vs Ta (ver Fig. 77), se han plotado las muestras del Plutón Lluta. En la que se puede observar que los tres grupos G01, G02 y G03 caen en el campo del arco volcánico. Sin embargo, hay muestras de Acosta et al., 2011, que caen en el campo de granitos intraplaca (WPG), sin embargo, por el contexto geológico en el que nos encontramos (Andes Centrales), esta hipótesis no se sostiene, se presume que ocurrió algún error en la medición del elemento Ta en el espectrómetro de masas que haya conducido a estos resultados.

Pero es un error aceptable debido a que la información para la clasificación de granitos de arco volcánico posee una incertidumbre del 11 %.

**Figura 77**

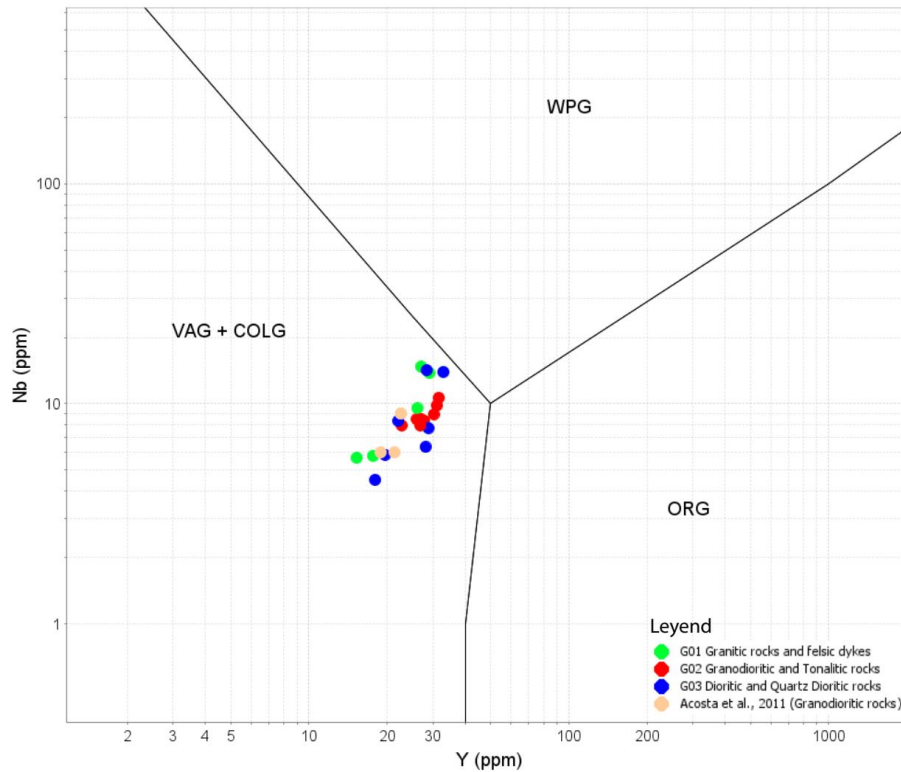
*Diagrama de clasificación Yb vs Ta para rocas intrusivas del Plutón Lluta.*



El diagrama Y vs Nb, discrimina con una incertidumbre menor a las rocas intrusivas de arco volcánico + colisión, como se puede observar en la Figura 78, es claro que nuestras rocas en el contexto en el que nos encontramos no corresponden a granitos sin-colisión, por tanto, se asume que los elementos Y y Nb son efectivos al momento de clasificar granitos de arco volcánico (con una incertidumbre del 4 %). Las tres agrupaciones se plotean en el campo de los granitos de arco volcánico.

**Figura 78**

*Diagrama de clasificación Y vs Nb para rocas intrusivas del Plutón Lluta.*

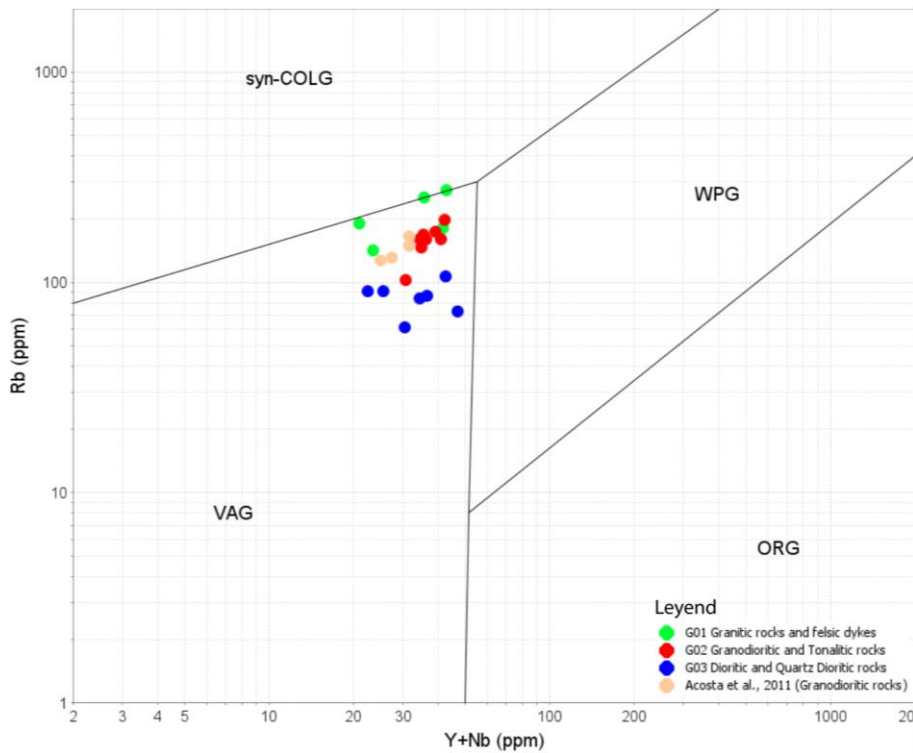


#### **4.6.4.3.2 Diagrama Y+Nb vs Rb**

En el presente diagrama los datos de los grupos G01, G02 y G03 plotean en el campo de los granitos de arco volcánico (VAG), en consecuencia, la clasificación tectónica es efectivo para su uso en las rocas del plutón Lluta y esto puede extenderse a la super-unidad Yarabamba. El Rb es un elemento incompatible en fundidos primitivos, pero es compatible en fundidos félsicos con presencia de biotita.

**Figura 79**

*Diagrama de clasificación Y+Nb vs Rb para rocas intrusivas del Plutón Lluta.*



Por tanto, las rocas intrusivas presentes en el Plutón Lluta corresponden a intrusivos de arco volcánico (VAG) (ver Fig. 79). Esto se refuerza por la ubicación espacial, y su vínculo con la super-unidad Yarabamba, además de la geocronología U/Pb y K-Ar realizada por Demouy et al., 2013 y Clark et al., 1990 respectivamente.

#### **4.6.5 ANÁLISIS DE FERTILIDAD MAGMÁTICA**

Para el análisis de fertilidad magmática se han considerado los elementos litófilos, con énfasis en los elementos inmóviles debido a su casi nula reacción con los efectos de alteración supergénica.

La presente investigación ha considerado que la data de roca total cumpla con los siguientes requisitos para el análisis de fertilidad magmática, basándose en dos estudios aceptados (Chen 2023 y Louck 2021):

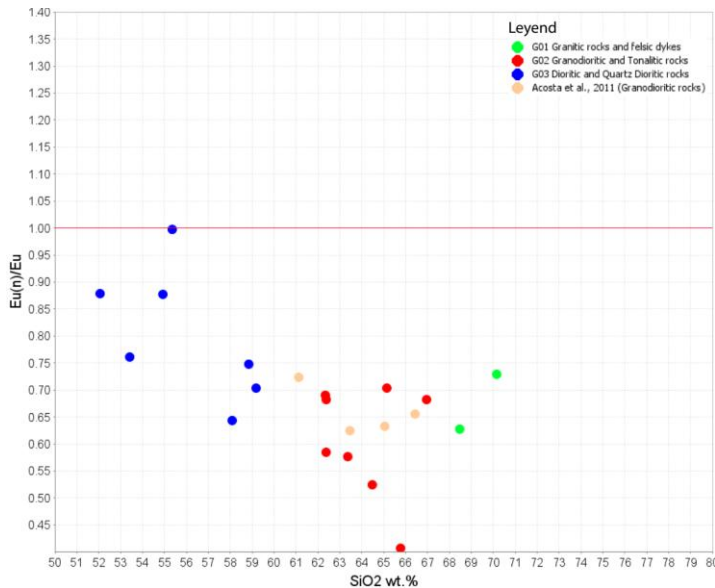
- Pérdida por ignición (LOI) <3,5 %, para evitar los efectos significativos de la alteración supergénica.
- Ausencia de alteración destructiva de plagioclasa, evidenciado por estudios petrográficos.
- No se debe tener evidencia significativa de la presencia de cúmulos cristalinos en los análisis. Por tanto, no debería existir anomalías positivas de Eu/Eu mayores a 1.3, ni concentraciones >20 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que es característico de los cúmulos de plagioclasa (Wu et al., 2021, 2022).
- Los datos de los análisis de roca total deben pertenecer a la serie de magmas toleítica o calcoalcalina de bajo K a alto K (Irvine & Baragar, 1971 y por Peccerillo & Taylor, 1976).

#### 4.6.1 Diagrama SiO<sub>2</sub> vs Eu<sub>(n)</sub>/Eu

El presente diagrama SiO<sub>2</sub> vs Eu<sub>(n)</sub>/Eu (ver Fig. 80), nos representa la variación de la compatibilidad del Eu respecto al tipo de roca clasificados en G01, G02 y G03. Las rocas más diferenciadas o G01 presentan valores bajos de la ratio Eu<sub>(n)</sub>/Eu, lo que significa que el Eu se ha agotado por el reemplazo de este elemento por el Ca. Por el contrario, las rocas menos diferenciadas representadas por la agrupación G03 presentan valores cercanos a 1, lo que significa que en estas rocas el Eu no ha sustituido al Ca en la plagioclasa.

**Figura 80**

Diagrama SiO<sub>2</sub> vs Eu<sub>(n)</sub>/Eu.



*Nota:* El diagrama mostrado representa a las agrupaciones G01, G02 y G03 del Plutón Lluta.

#### 4.6.2 Diagrama Sc vs V/Sc

El presente diagrama propuesto por Halley, 2020, propone que, en magmas reducidos, la relación V/Sc permanece constante en torno a 7:1 desde

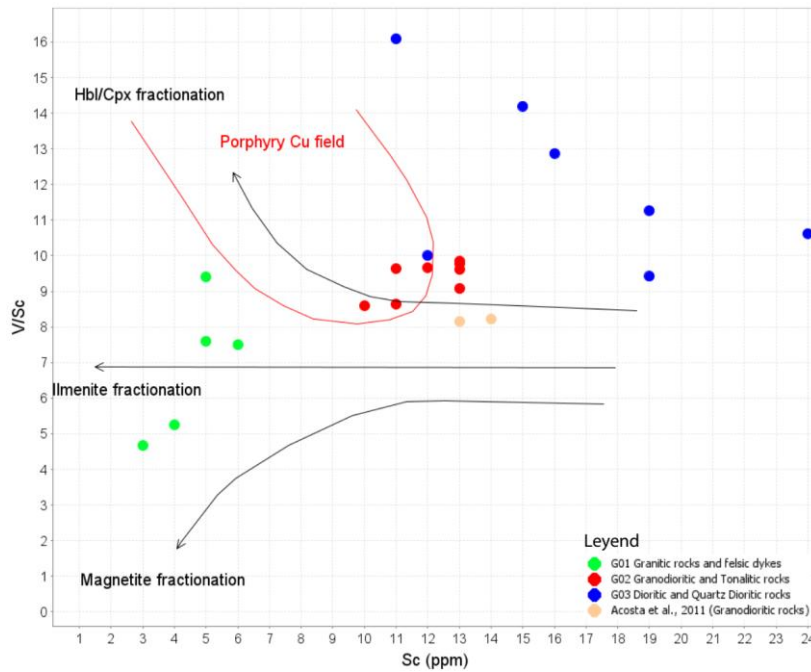
composiciones máficas hasta félsicas (Li y Lee, 2004). En magmas más oxidados, el ion  $V^{4+}$  tiene una afinidad muy fuerte por la magnetita (Shervais, 1982; Iveson et al., 2018). La cristalización fraccionada de la magnetita causa un agotamiento de V en relación con Sc. En consecuencia, la disminución de V/Sc con el aumento de  $SiO_2$  (o con la disminución de Sc) se interpreta como un reflejo de la cristalización fraccional de la magnetita (ver Fig. 81). Esta es una característica omnipresente en los fundidos de la serie de la magnetita (como muchos de los stocks del Batolito de la Costa).

Las rocas de la agrupación G01 poseen una tendencia descendente de V/Sc, dominado por la presencia de magnetita en estas rocas, así como la agrupación G02, confirmado por las observaciones de campo y los estudios petrográficos. La agrupación G03 sin embargo muestra una tendencia de V/Sc creciente.

Los magmas fértiles de pórfido de Cu muestran una tendencia de aumento de V/Sc con el aumento de  $SiO_2$  (Loucks, 2014). Loucks argumenta que el efecto de aumentar el contenido de agua en un fundido es promover la cristalización de la hornblenda muy por delante de la magnetita. El V actúa de forma incompatible en magmas fuertemente oxidados, mientras que el escandio sigue siendo compatible en clinopiroxeno y hornblenda (Toplis y Corgne, 2002). Por lo tanto, en los fundidos oxidados e hidratados, la cristalización de hornblenda y clinopiroxeno disminuye la Sc en el fundido, pero V/Sc aumenta progresivamente, como sucede con las rocas de la agrupación G03.

**Figura 81**

*Diagrama Sc vs V/Sc.*



*Nota:* El diagrama mostrado representa las agrupaciones G01, G02 y G03 del Plutón Lluta.

#### 4.6.3 Diagrama Y vs Sr/Y

El presente diagrama Y vs Sr/Y, es quizá uno de los diagramas más ampliamente utilizados para la determinación de la fertilidad de magmas para la formación de yacimientos Pórfido de Cu (Richards y Kerrich, 2007).

Se ha ploteado las rocas del Plutón Lluta en el presente diagrama, evidenciando valores altos para las rocas de la agrupación G02, G01 y algunas muestras del G03, sin embargo, podemos notar un contraste para la agrupación G03 en términos del ratio Sr/Y, cuyos valores ascienden hasta 45 ( $Sr/Y = 45$ ), aunque esta tendencia podría no representar una diferencia estadísticamente significativa,

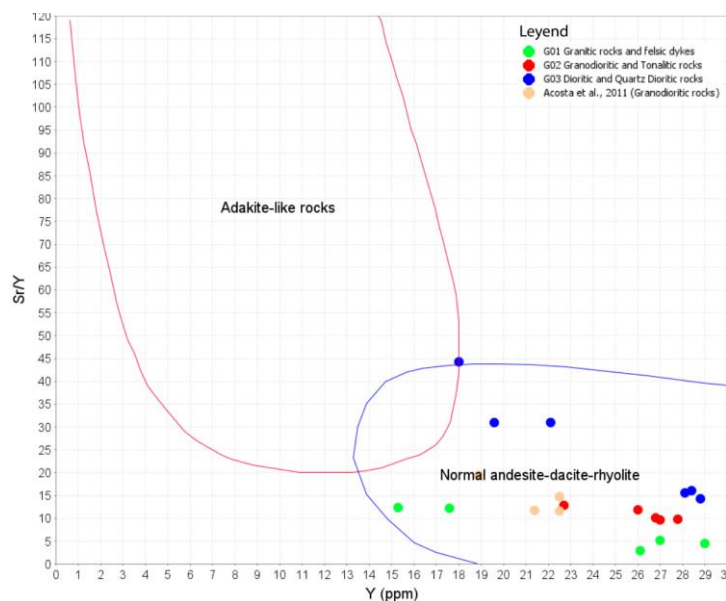
sí respalda la posibilidad de que estos intrusivos resulten de interés para la exploración geológica (ver Fig. 82).

El agotamiento de Y y REEs medios a pesados se interpreta como resultado del fraccionamiento de granate y hornblenda (incluso titanita). El alto contenido en Sr en magmas de composición intermedia es típico de fundidos hidratados en los que la cristalización de plagioclasa sódica se suprime hasta después de la aparición de hornblenda y clinopiroxeno.

Finalmente, las muestras con un alto valor de la ratio Sr/Y, corresponden a las rocas cuarzo dioríticas presentes en la Quebrada Caplina en el sector de Challatita, así como del sector de Higuerani antiguo.

### Figura 82

Diagrama Y vs Sr/Y.



Nota: El diagrama mostrado representa a las agrupaciones G01, G02 y G03 del Plutón Lluta.

## **CAPÍTULO V**

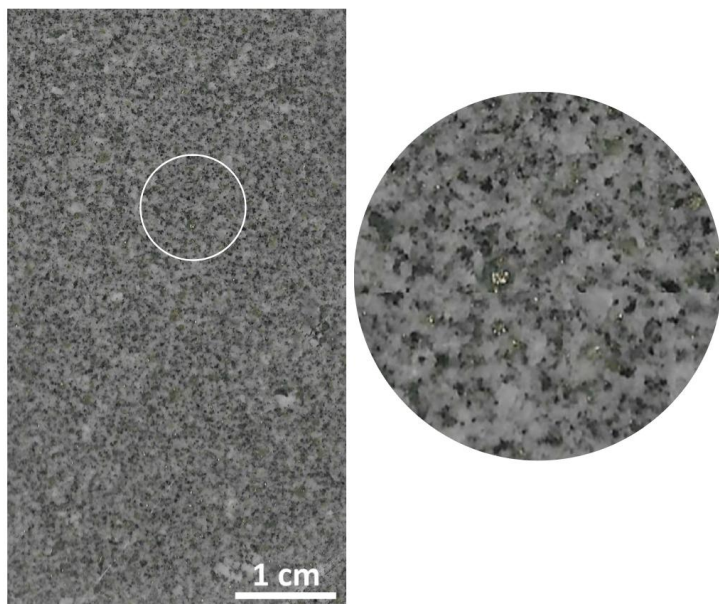
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **5.1 PETROGRAFÍA Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Los estudios de microscopía óptica y difracción de rayos X permitieron determinar las características ópticas y la abundancia mineralógica de las rocas del Plutón Lluta. Se dividió los intrusivos en tres agrupaciones: G01, G02 y G03. La agrupación G01 corresponde a las suites félsicas del Plutón Lluta, que se presentan en forma de diques en el campo y como stocks aislados en el sector de la Quebrada Uchusuma. La agrupación G02 es la más abundante en el área de estudio y está compuesta principalmente por granodioritas de grano medio, aunque en algunos casos presentan grano fino. Finalmente, la agrupación G03 se compone de suites máficas, como monzodioritas y dioritas. Las monzodioritas afloran en la parte NW del área de estudio, mientras que las dioritas se encuentran principalmente en los caseríos de Challata e Higuera, vinculadas a la presencia de vetas o venas de metales base, así como sulfuros diseminados (ver Fig. 83).

**Figura 83**

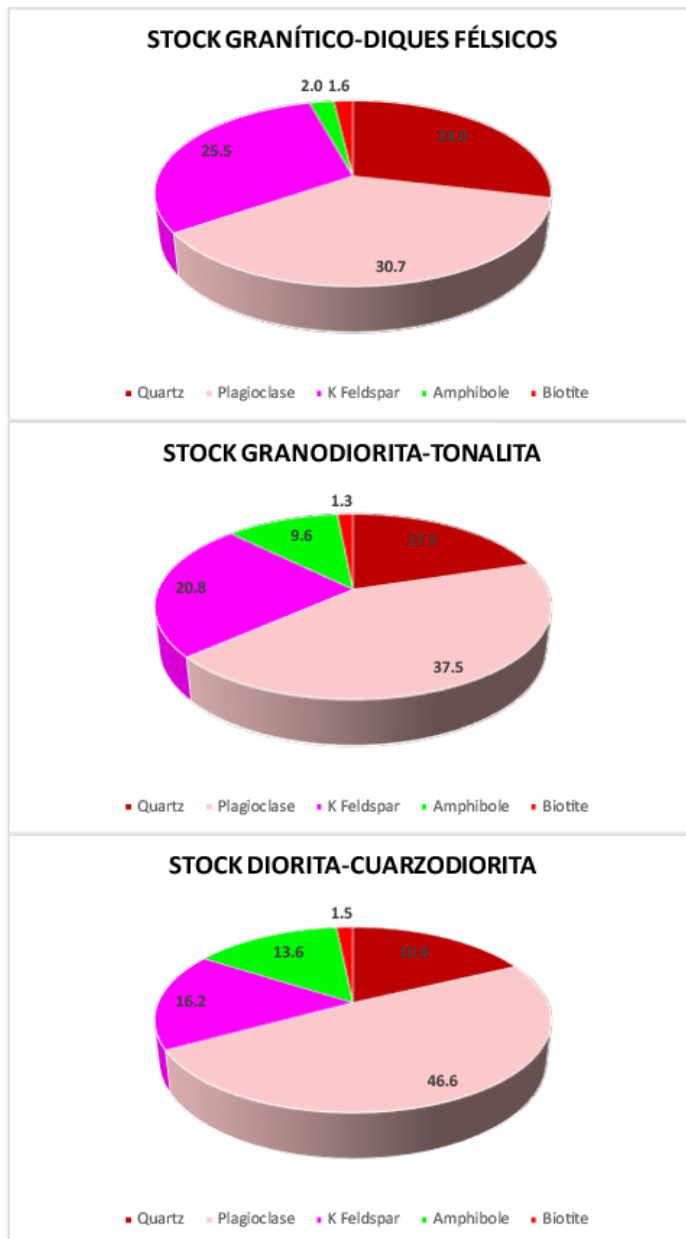
*Sulfuros diseminados en muestra de cuarzo diorita 9\_GQ\_GRD\_12.*



Los primeros estudios realizados por Wilson y García en 1962, en las rocas intrusivas del Plutón Lluta en la determinación de la mineralogía modal de las rocas granodioríticas por técnicas microscópicas difieren de nuestros resultado, se ha determinado que las fases minerales principales tiene una sobre estimación (plagioclasa) y la determinación modal de la fases minerales como el cuarzo y feldespato potásico poseen una sub estimación, en el caso de la biotita esta se encuentra sobre estimada con respecto a nuestros resultados (de 22 wt.% a 4 wt.% en nuestros análisis), esto se debe principalmente a la diferencia de técnicas utilizadas para la determinación de la mineralogía modal, siendo los estudios de DRX más robustos a comparación de las técnicas clásicas de microscopía óptica (ver Fig. 84).

**Figura 84**

*Diagrama de pastel del promedio mineralógico de los stocks graníticos-diques félsicos, stocks de granodiorita-tonalita y stocks de diorita-cuarzo diorita.*



*Nota:* Los datos corresponden a la cuantificación modal por la técnica de Difracción de Rayos X.

Un aspecto importante es la presencia de fases minerales con OH en su estructura cristalina (e.g. anfíboles), la cual es un factor mineralógico importante y está vinculada a la fertilidad magmática en intrusivos de los Andes (Loucks, 2014).

## **5.2 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZAS**

Los análisis químicos de elementos mayores y trazas mediante técnicas instrumentales como FRX y ICP-MS, permitió determinar la composición química de los diferentes tipos de rocas en las tres agrupaciones G01, G02 y G03. Los resultados indican que las rocas dioríticas, cuarzo dioríticas, granodioríticas y graníticas son predominantemente intermedias a félsicas y tienen una composición calco-alcalina rica en K, esto coincide con los resultados de Acosta et al., 2011, en donde ha determinado que el magmatismo de los intrusivos de la super-unidad Yarabamba poseen esta composición calco-alcalina rica en K, por tanto se concluye que el magmatismo que ha dado lugar a los stocks del Plutón Lluta, corresponden a una extensión de la super-unidad Yarabamba.

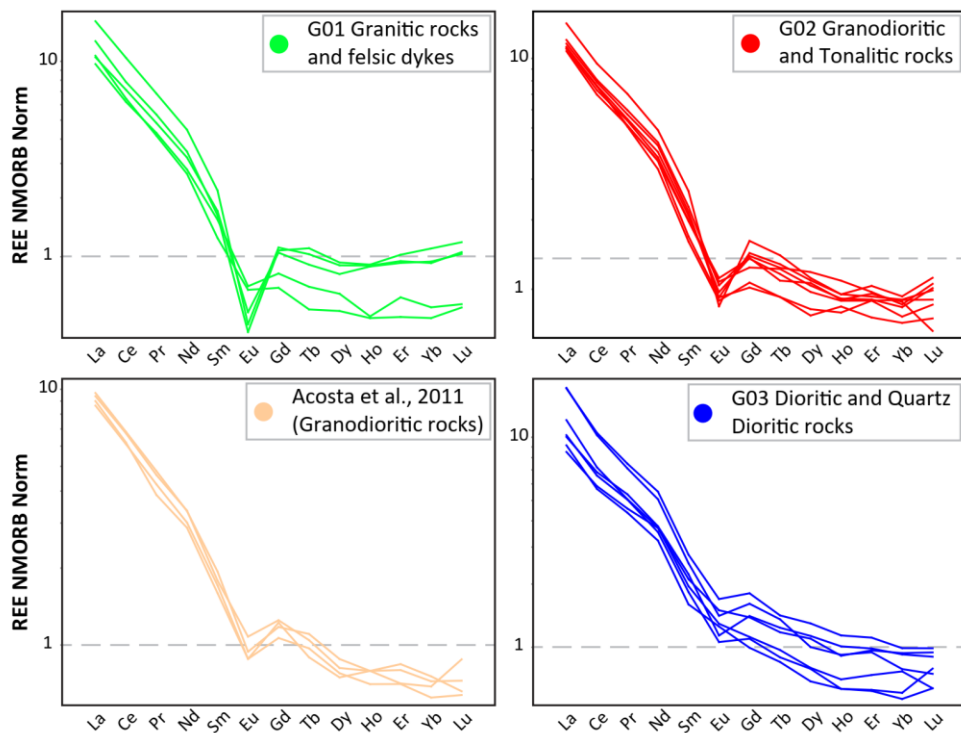
Los elementos mayores ploteados en el diagrama de variación o Harker demuestran procesos de cristalización fraccionada, dominada inicialmente por minerales ferro magnesianos ricos en Fe, Ca y Mg en función al contenido de SiO<sub>2</sub>.

Los elementos trazas sin embargo nos han brindado información adicional que se ha utilizado para poder comprender los procesos metalogénicos adicionales de estos cuerpos intrusivos, como la fertilidad magmática responsable de la

mineralización económica en el área de estudio. Es posible evaluar lo mencionado anteriormente empleando elementos traza, evaluando los diagramas REE, dando como resultado que las rocas intermedias a félsicas como: G01, G02 y las de Acosta et al., 2011 han fraccionado plagioclasa (fuerte anomalía negativa de Eu) a diferencia de G03 que posee débiles anomalías de Eu, indicando procesos magmáticos favorables para la metalogenia en la zona de estudio (ver Fig. 85).

**Figura 85**

*Diagramas REE para las agrupaciones G01, G02, Acosta et al., 2011 y G03.*

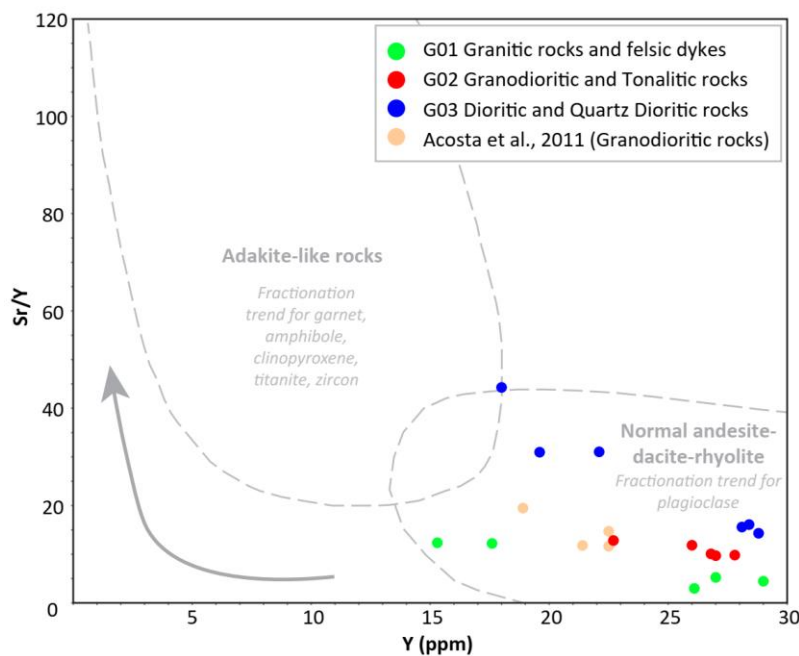


*Nota:* La diferencia en las anomalías de Eu indicador del fraccionamiento de plagioclasa a escala de corteza somera.

Se determinó que las granodioritas y dioritas están relacionadas con la mineralización de metales base, las dioritas de la zona de Challata e Higuera presentan las más altas razones Sr/Y, lo cual indica una alta fertilidad magmática y una posible relación con los depósitos de metales base en la zona (Richards y Kerrich, 2007) (ver Fig. 86).

**Figura 86**

Diagrama Y vs Sr/Y con las agrupaciones de muestras G01, G02, G03 y Acosta et al., 2011.

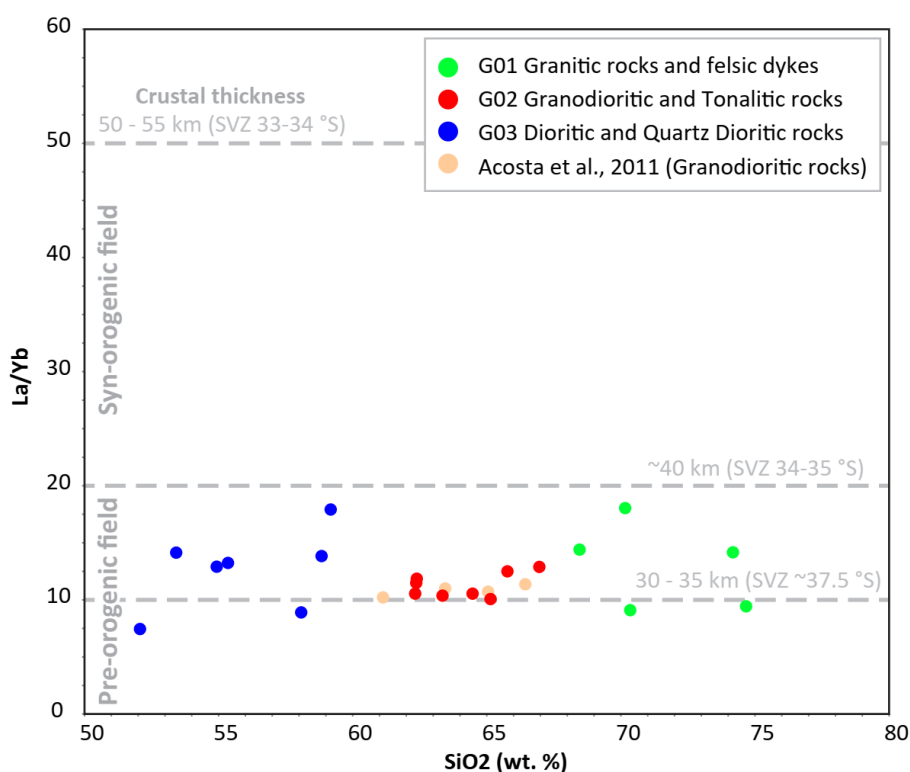


Además, mediante el uso de los diagramas de clasificación tectónica se ha podido determinar la afinidad tectónica a la que corresponden los cuerpos intrusivos del Plutón Lluta, todas las muestras analizadas corresponden a intrusivos de arco volcánico, esto confirma nuestras observaciones de campo y las investigaciones

regionales realizadas por otros autores (Demouy et al., 2013, Pino et al., 2005 y Acosta et al., 2011) (e.g. Fig. 87).

**Figura 87**

Diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{La/Yb}$ , los espesores de corteza se han tomado de Haschke et al., 2002.



### 5.3 RELACIÓN DE LA MINERÍA METÁLICA Y NO METÁLICA CON EL PLUTÓN LLUTA

Los resultados de la presente investigación, sustentados mediante las técnicas instrumentales de alta resolución y los trabajos de campo han demostrado la relación que existe entre la mineralización metálica y no metálica de los distritos Pachía y Palca.

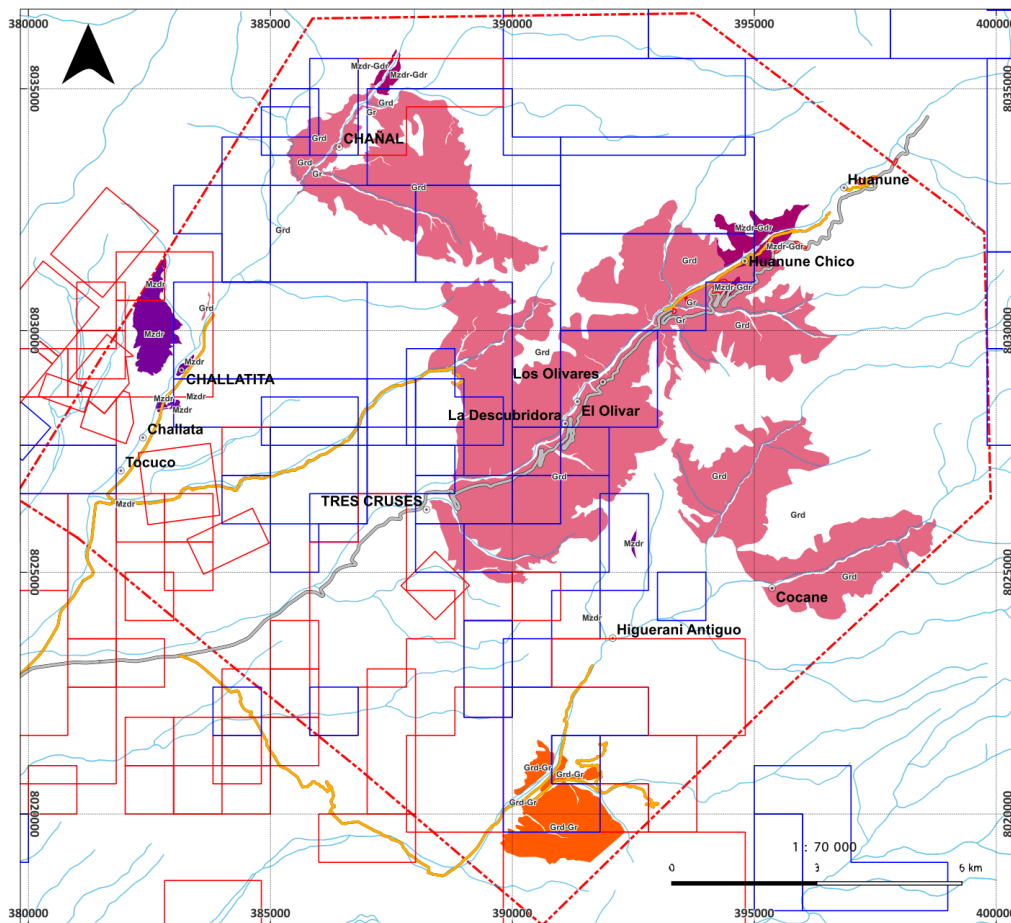
Los estudios descriptivos realizados por Vargas 1975, refuerzan nuestros resultados obtenidos, los estudios geoquímicos han demostrado que los cuerpos intrusivos que comprenden al Plutón Lluta poseen características de fertilidad magmática, que han producido la mineralización en forma de vetas, por el escape de fluidos/vapores mineralizantes para ser depositados en las fracturas. Además, se resalta el potencial de los cuerpos cuarzo dioríticos de la zona de Challatita e Higuera, debido a que son estos intrusivos que muestran una afinidad geoquímica favorable, por tanto, son cuerpos intrusivos prospectables que necesitan ser estudiados y explorados con más detalle.

Por otra parte, la relación entre el Plutón Lluta y la minería no metálica radica en que debido a los procesos de metamorfismo de contacto entre las rocas sedimentarias del Grupo Yura y el Plutón Lluta se han formado horizontes favorables para albergar silicatos que son actualmente explotados, como se evidencia en el sector de Tocuco en el distrito de Pachía.

Finalmente, otra forma indirecta que evidencia la estrecha relación entre el Plutón Lluta y la minería metálica y no metálica es la presencia de concesiones mineras, independientemente de la vigencia en la Fig. 88, se muestra las concesiones metálicas y no metálicas otorgadas por el INGEMMET (ver Anexo 07).

**Figura 88**

*Mapa de las concesiones mineras metálicas (de azul) y no metálicas (de color rojo).*



*Nota:* La información de catastro minero fue obtenida del portal web de INGEMMET GEOCATMIN.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en la presente investigación se puede concluir en lo siguiente:

El levantamiento geológico y la cartografía detallada del Plutón Lluta permitieron elaborar un mapa actualizado, en el cual se identificaron tres agrupaciones litológicas principales (G01, G02 y G03). Estas unidades muestran variaciones mineralógicas, texturales y composicionales, lo que evidencia la complejidad del sistema intrusivo y permite delimitar los contactos litológicos y estructuras geológicas relevantes.

El análisis geoquímico de elementos mayores y traza definió una signatura calcoalcalina de alto potasio para las rocas del Plutón Lluta, característica de magmas formados en un ambiente de subducción continental. Los diagramas spider y de tierras raras (REE) revelaron patrones de fraccionamiento típicos de magmas evolucionados, con anomalías negativas de Eu. La agrupación G03 mostró valores elevados de Sr/Y ( $>40$ ), lo que indica fertilidad magmática asociada a la posible formación de yacimientos tipo pórfido o vetas.

La relación entre el Plutón Lluta y la mineralización metálica y no metálica fue determinada con base en criterios petrográficos, geoquímicos y estructurales. Las mineralizaciones metálicas, especialmente de cobre, están asociadas a los cuerpos cuarzo dioríticos de la agrupación G03 (como en Challatita e Higuera), mientras

que los depósitos no metálicos, como cuarzo y wollastonita, se relacionan con procesos de metamorfismo de contacto entre los intrusivos y las areniscas de la Formación Hualhuani.

Estos resultados permiten proponer zonas con potencial económico para la exploración minera en los distritos de Pachía y Palca. La caracterización geoquímica del Plutón Lluta brinda información valiosa tanto para la exploración de recursos minerales como para futuras investigaciones regionales sobre la evolución magmática y metalogénica del segmento Toquepala del Batolito de la Costa.

## RECOMENDACIONES

Basándonos en los resultados de la presente investigación, se recomienda llevar a cabo un programa de prospección enfocado en las dioritas presentes en la zona de Pachía, específicamente en la Quebrada Caplina y el pueblo antiguo de Higuera, donde se han identificado depósitos de sulfuros de cobre primarios. Es importante destacar que esta zona ha mostrado un alto potencial para la mineralización de cobre, por lo que se sugiere una evaluación exhaustiva de la zona para determinar el alcance y la extensión del posible yacimiento.

Se recomienda realizar nuevas dataciones por el método U/Pb en zircones a los cuerpos cuarzo dioríticos para ubicarlas con precisión en el intervalo de tiempo metalogenético regional, además de datar las unidades graníticas aisladas ubicadas en la Quebrada Uchusuma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Oviedo, M., & Rodríguez, J. (2011a). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca Hojas 36-v y 36-x. *Boletín N° 139 Serie A Escala 1: 50 000*, 101.
- Allmendinger, R., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms Vectors and Tensors*.
- Allmendinger, R. W. (2020). GMDE: Extracting quantitative information from geologic maps. *Geosphere*, 16(6), 1495–1507. <https://doi.org/10.1130/GES02253.1>
- Alván, A., Jacay, J., Caracciolo, L., Sánchez, E., & Trinidad, I. (2018). Sedimentary facies analysis of the Mesozoic clastic rocks in Southern Peru (Tacna, 18°S): Towards a paleoenvironmental Redefinition and stratigraphic Reorganization. *Journal of South American Earth Sciences*, 84(November 2017), 399–421. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.014>
- Beckinsale, R., Cobbing, E., Pitcher, W., & Atherton, M. (1985). *Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes* (W. Pitcher, Ed.; 1st ed.). Glasgow (Blackie) and New York (Halsted Press).
- Boily, M., Brooks, C., Ludden, J. N., & James, D. E. (1989). Chemical and isotopic evolution of the Coastal Batholith of southern Peru. *Journal of Geophysical Research*, 94(B9).
- Cardozo, N., & Allmendinger, R. W. (2013). Spherical projections with OSXStereonet. *Computers and Geosciences*, 51, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.021>
- Castillo, P. R., Janney, P. E., & Solidum, R. U. (1999). Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1), 33–51. <https://doi.org/10.1007/s004100050467>

- Chiaradia, M., Ulianov, A., Kouzmanov, K., & Beate, B. (2012). Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas? *Scientific Reports*, 2. <https://doi.org/10.1038/srep00685>
- Chen N., Mao J., Zhang Z., Duan Z., Santos S., Li H., (2023) Arc magmatic evolution and porphyry copper deposit formation under compressional regime: A geochemical perspective from the Toquepala arc in Southern Peru, *Earth-Science Reviews*, Volume 240, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104383>.
- Clark, A., Farrar, E., Kontak, D., Langridge, R., Arenas, M., France, L., McBride, S., Woodman, P., Wasteneys, H., Sanderman, H., & Archibald, D. (1990). Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. *Economic Geology*, 85(7), 1520–1583. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.7.1520>
- Clemens, J. D., & Mawer, C. K. (1992). Granitic magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics*, 204(3–4), 339–360. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90316-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90316-X)
- Cobbing, E. J. (1982). The Segmented Coastal Batholith of Peru: Its Relationship to Volcanicity and Metallogenesis. *Earth-Science Reviews*, 18 (1982) 241-251.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grande Claude, P., Marchal, M., (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses: Its relationships and current nomenclature. *Chemical Geology* 29, 183–210.
- Defant, M. J., & Drummond, M. S. (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294), 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Demouy S., Benoit M., De Saint-Blanquat M., Paquette J. (2013) *Geochronological and geochemical constraints on the construction of the Lluta Pluton, Tacna (Peru)* Goldschmidt 2013 Conference Abstracts Mineralogical Society; London; GBR; United Kingdom, 2013.

- Frost, B.R., Frost, C.D., 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49, 1955–1969.
- Halley, S. (2020). Mapping Magmatic and Hydrothermal Processes from Routine Exploration Geochemical Analyses. *Economic Geology*, 115(3), 489–503. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4722>
- Haschke, M., Siebel, W., Günther, A., Scheuber, E., 2002. Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in North Chile (21–26 S). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 107 (B1). <https://doi.org/10.1029/2001JB000328>. ECV 6-1-ECV 6-18.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523–548.
- Iveson, A.A., Rowe, M.C., Webster, J.D., and Neill, O.K., (2018) Amphibole-, clinopyroxene- and plagioclase-melt partitioning of trace and economic metals in halogen-bearing rhyodacitic melts: *Journal of Petrology*, v. 59, no. 8, p. 1579-1604.
- Jenks, J. F. (1945). La geología de Arequipa y sus alrededores. *Informaciones y Memorias Sociedad de Ingenieros Del Perú*, 46(9), 1–104.
- Kay, R. W. (1978). Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1–2), 117–132. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90032-X)
- Kuno, H., 1968. *Differentiation of basalt magmas*. In: Hess, H.H., Poldervaart, A. (eds.), *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*. Interscience, New York. 2: 623–688.
- Le Maitre, R., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M., Bonin, B., & Bateman, P. (Eds.). (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511535581

- Li, Z.X.A., and Lee, C.T.A., (2004) The constancy of upper mantle fo through time inferred from V/Sc ratios in basalts: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 228, no. 3-4, p. 483-493.
- Lisle, R. J., Brabham, P. J., & Barnes, J. W. (2011). *Basic Geological Mapping* (Fifth Edition). Wiley-Blackwel.
- Loucks R.R. (2014) *Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas*, *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, 61:1, 5-16, DOI: 10.1080/08120099.2013.865676
- Loucks, R.R., 2021. Deep entrapment of buoyant magmas by orogenic tectonic stress: its role in producing continental crust, adakites, and porphyry copper deposits. *Earth Sci. Rev.* 220, 103744 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103744>.
- Marrett, R., & Allmendinger, R. W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data. In *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, Issue 8.
- Middlemost, E.A.K., (1985). *Magmas and magmatic rocks*. Longman, London.
- Moore, J. G., & Sisson, T. W. (2008). Igneous phenocrystic origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks from the Sierra Nevada batholith. *Geosphere*, 4(2), 387–400. <https://doi.org/10.1130/GES00146.1>
- Palme, H., & O'Neill, H. S. C. (2007). Cosmochemical Estimates of Mantle Composition. In *Treatise on Geochemistry*, Vols. 2–9, pp. 1–38. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/02177-0>
- Pearce, J. A., & Cann, J. R. (1971). Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y. *Earth and Planetary Science Letters*, 12(3), 339–349. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90220-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90220-2)
- Pearce, J. A., & Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2), 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5)

- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., & Tindle, A. G. (1984). *Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks*. <http://petrology.oxfordjournals.org/>
- Peccerillo A. & Taylor S. R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63-81.
- Pino, A.; Sempere, T.; Jacay, J. & Fornari, M. (2004) - *Estratigrafía, paleogeografía y paleotectónica del intervalo Paleozoico superior – Cretáceo inferior en el área de Mal Paso – Palca (Tacna)*. En: Jacay, J. & Sempere, T., eds. *Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial, 5, p. 15-44.
- Pitcher, W., & Cobbing, E. (1985a). Phanerozoic plutonism in the Peruvian Andes. In W. S. Pitcher (Ed.), *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes* (1st Edition ed., p. 325). Blackie & Son Ltd.
- Richards, J. P., & Kerrich, R. (2007). Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4), 537–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Rollinson, H., & Pease, V. (2021). *Using Geochemical Data To Understand Geological Processes*.
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation interpretation* (1st Edition ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- Shervais, J.W., (1982) Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 59, no. 1, p. 101-118.
- Sillitoe, R. (1998). Major regional factors favouring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of Porphyry Copper Deposits. *Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*, 21–34.

- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42(1), 313–345.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Thompson, R.N., (1984). *Dispatches from the basalt front. 1. Experiments*. Proceedings of the Geological Association 95, 249–262.
- Tosdal, R. M., & Dilles, J. H. (2020). Creation of Permeability in the Porphyry Cu Environment. In J. V Rowland & D. A. Rhys (Eds.), *Applied Structural Geology of Ore-Forming Hydrothermal Systems* (pp. 173–204).  
<https://doi.org/10.5382/rev.21.05>
- Toplis, M.J., and Corgne, A., (2002). *An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium*: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 144, no. 1, p. 22-37.
- Vargas, A. (1975). Geología minera del departamento de Tacna. *Boletín de La Sociedad Geológica Del Perú*, 46, 187–204.
- Verma, S.P., (2012). *Statistical evaluation of bivariate, ternary and discriminant function tectonomagmatic discrimination diagrams*. Turkish Journal of Earth Sciences 19, 185–238.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W. (1983) *Granitoid Types and Their Distribution in the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia*. Geological Society of America Memoirs, 159, 21-34. <http://dx.doi.org/10.1130/MEM159-p21>
- Wilson, J., & Garcia, W. (1962). *Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x)*.
- Wilson, M., (1984). *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London.

- Winter, J. (2010). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Pearson Education Limited 2014.
- Wu, C., Chen, H., Lu, Y., (2021). Magmatic water content and crustal evolution control on porphyry systems: insights from the Central Asian Orogenic Belt. *J. Petrol.* 62 (2) <https://doi.org/10.1093/petrology/egab021> egab021.
- Wu, C., Chen, H., Lu, Y., (2022). Crustal structure control on porphyry copper systems in accretionary orogens: insights from Nd isotopic mapping in the Central Asian Orogenic Belt. *Mineral. Deposita* 57 (4), 631–641. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01074-z>.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Resultados de análisis DRX de las muestras del Plutón Lluta.

ID/Phase Name <i>Wt% Rietveld</i>	Quartz	Bytownite	Andesina	Oligoclase	Albite	Microcline	Orthoclase	Hornblende	Actinolite	Biotite	Augite	Chalcopyrite	Pyrite	Pyrrhotite	Magnetite	Schorl	Chlorite	Muscovite	Illite	Kaolinite
D4_01_GQ_APL_6	32.1	3.6	7.5	11.7	0.8	8.7	22.0	0.2	0.1	0.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.2	2.8	3.6	1.5	2.1	0.4
D4_02_GQ_MZG_13	21.9	21.9	0.7	19.3	1.8	5.6	12.5	3.7	7.2	0.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.6	2.0	1.2	0.4
D4_03_GQ_GRD_15	22.8	9.4	2.1	23.0	0.5	8.4	8.6	2.8	4.9	4.3	2.3	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	2.2	3.1	3.5	1.3
D4_04_GQ_MZG_5	23.4	2.5	21.4	5.9	0.6	27.5	1.5	1.8	5.8	1.2	2.2	0.0	0.1	0.5	2.1	0.0	1.2	0.4	1.2	0.6
D4_05_GQ_MZG_3	20.0	14.0	3.5	15.5	2.5	1.4	22.2	5.2	5.3	0.1	0.6	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	3.0	3.2	1.4	1.7
D4_06_GQ_MZG_14	25.5	16.2	6.4	3.0	10.2	9.6	10.4	8.0	0.3	2.8	1.8	0.0	0.2	0.1	0.4	0.0	1.3	0.5	2.1	1.2
D4_07_GQ_GRD_16	7.6	15.9	8.2	21.8	0.9	14.1	3.7	9.5	1.2	4.4	3.0	0.0	0.9	1.0	0.9	0.0	2.4	1.9	2.5	0.2
D4_08_GQ_GRD_17	15.8	31.7	8.6	5.1	0.5	11.3	7.8	3.4	1.7	1.1	2.2	0.0	0.5	0.4	2.5	0.0	5.2	1.9	0.0	0.4
D4_09_GQ_GRD_12	0.1	1.5	4.6	39.2	1.2	6.0	11.7	4.1	9.6	2.1	0.4	0.0	5.1	0.5	1.4	0.0	5.2	2.4	2.4	2.4
D4_10_GQ_MZG_270	14.7	7.2	5.1	23.4	1.0	10.4	11.4	7.1	7.4	0.4	1.5	0.0	0.6	0.5	0.8	0.0	1.9	2.7	2.2	1.7
D4_11_GQ_DR_266	8.6	24.8	4.1	14.5	6.0	8.3	4.8	9.2	8.3	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	2.4	1.3	2.1	2.8
D4_12_GQ_APL_269	31.0	21.8	4.5	3.2	1.7	5.8	20.8	0.0	0.3	3.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.1	0.5	1.9	2.0
D4_13_GQ_APL_267	36.5	1.4	1.2	19.1	3.5	6.9	21.1	0.8	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	1.2	0.9	3.4	1.7
D4_14_GQ_DR_84	6.2	38.6	2.1	4.3	0.6	0.8	14.3	13.8	6.1	0.0	1.7	0.0	0.5	0.0	2.1	0.0	3.5	1.4	3.5	0.7
D4_15_GQ_GRDT_220	20.2	27.0	5.6	7.3	1.0	16.0	3.1	3.4	5.5	0.9	1.1	0.0	0.0	0.4	1.0	0.0	4.1	1.8	1.0	0.6
D4_16_GQ_APL_219	27.3	2.6	2.0	32.3	0.6	17.7	4.2	0.0	0.1	0.9	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	3.5	0.6	4.8	0.5
D4_17_GQ_GRDT_199	20.0	21.2	5.8	8.8	0.2	4.7	15.4	2.6	7.9	0.1	2.2	0.0	0.2	0.2	0.5	0.0	3.4	1.8	4.4	0.6
D4_18_GQ_GRDT_217	21.5	14.6	19.6	5.9	1.5	3.1	14.3	3.0	3.1	3.3	2.6	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	1.4	1.2	2.4	0.3
D4_19_GQ_DR_150	8.7	34.7	5.3	4.4	4.0	10.9	3.0	8.0	7.1	2.9	0.9	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	2.7	2.8	0.6	0.9
D4_20_GQ_GRDT_111	14.3	9.2	24.0	9.0	1.1	15.5	1.5	8.5	4.6	0.1	0.8	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	4.0	1.7	1.6	1.1

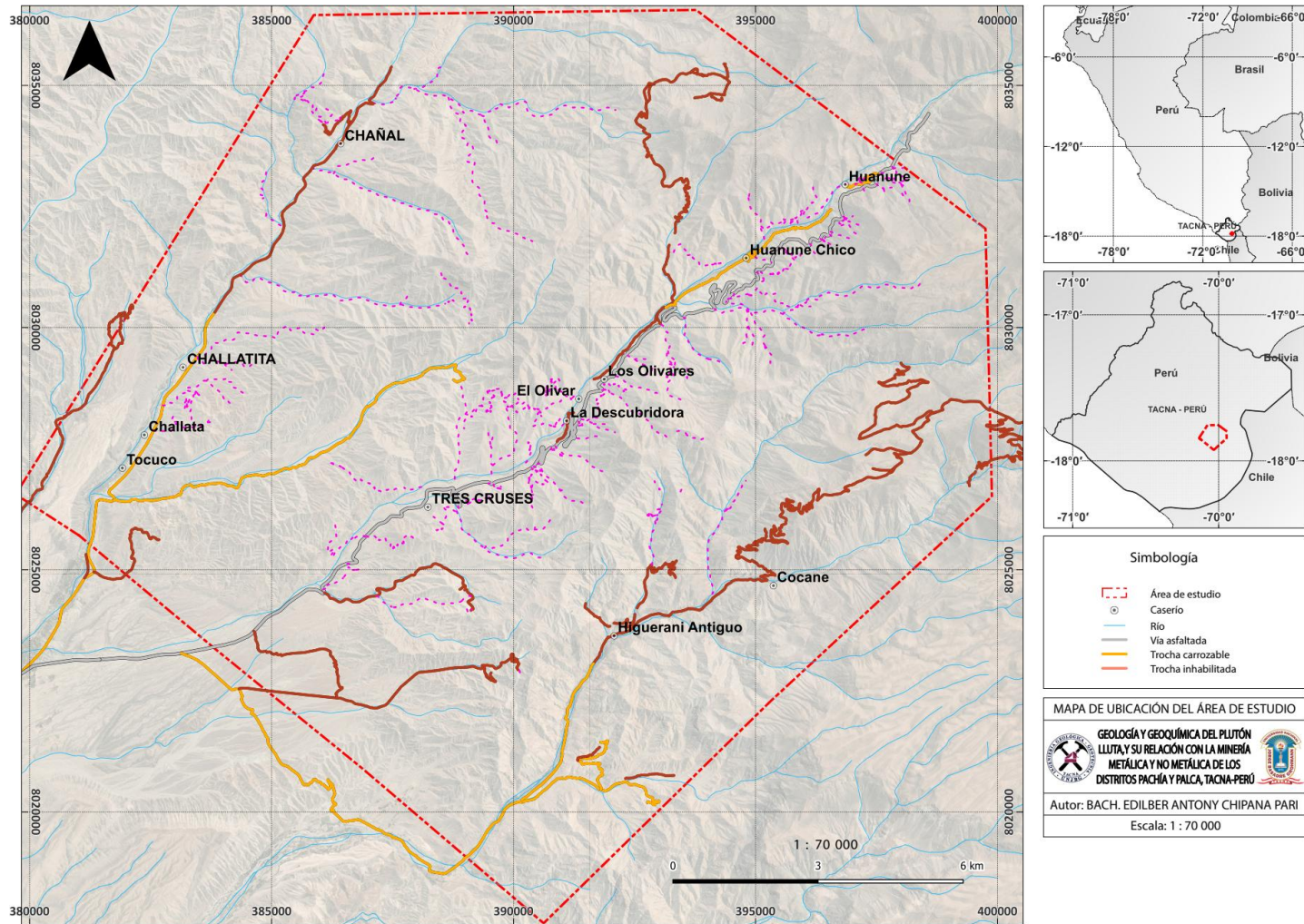
## ANEXO 2: Resultados de análisis químico, incluyendo los datos de Acosta et al., 2011.

SAMPLE ID	1_GQ_API_6	2_GQ_MG_13	3_GQ_GRD_15	4_GQ_MG_5	5_GQ_MG_3	6_GQ_MG_14	7_GQ_GRD_16	8_GQ_GRD_17	9_GQ_GRD_12	10_GQ_MG_270	11_GQ_DR_266	12_GQ_API_269	13_GQ_API_267	14_GQ_DR_84	15_GQ_GRD_220	16_GQ_API_219	17_GQ_GRD_199	18_GQ_GRD_217	19_GQ_DR_150	20_GQ_GRD_111	PA980800	PA990800	Pa-IV-04-05	Pa-III-15-03	Pa-III-16-03
	LITHOLOGY	Monogranite	Monogranite	Granodiorite	Monogranite	Granodiorite	Monogranite	Quartz Monodiorite	Granodiorite	Monodiorite	Granodiorite	Quartz Diorite	Syeno Granite	Syeno Granite	Quartz Diorite	Granodiorite	Monogranite	Granodiorite	Granodiorite	Quartz Diorite					
Recvd WL	2.9	2.43	2.64	2.45	2.27	2.84	2.47	2.48	2.94	2.4	2.15	2.5	2.94	2.25	2.58	2.38	2.16	2.05	-	-	-	-	-	-	
wR%																									
Al2O3	13.01	15.42	15.42	14.34	15.32	14.2	16.8	16.3	16.93	15.16	16.34	12.94	12.31	17.06	15.22	15.07	15.35	15.56	17.44	16.22	15.49	15.2	15	15.518815	15.492402
BaO	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.11	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.11	0.06	0.08	0.06	0.06	0.1	0.11					
CaO	1.8	4.63	3.83	3.52	4.15	2.3	6.5	5.51	5.57	4.13	6.21	0.97	0.76	7.59	4.08	2.39	4.29	4.46	6.92	5.01	4.71	3.9	4.01	2.140176	2.397669
CO2(S)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01					
Fe2O3	2.11	2.87	4.96	4.35	6.38	2.77	7.9	6.86	9.3	5.93	8.1	1.84	1.9	9.76	5.95	3.09	6.34	6.53	8.86	7.27	6.26	4.58	4.18	3.874532	7.17387
K2O	4.55	3.21	3.44	4.83	4.49	4.36	2.51	2.94	2.44	3.63	2.28	5.15	5.25	2.39	3.69	3.59	3.28	3.51	2.34	3.4	3.31	3.92	3.32	3.803631	3.2761
MgO	0.94	1.79	1.86	1.92	2.53	0.84	3.18	2.84	3.47	2.33	3.33	0.32	0.34	3.47	2.12	0.89	2.49	2.36	4.05	2.54	2.5	1.69	1.5	3.782494	3.956977
MnO	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07	0.04	0.1	0.12	0.14	0.06	0.09	0.07	0.02	0.17	0.11	0.05	0.09	0.1	0.16	0.14	0.09	0.08	0.06	0.192177	0.108545
Na2O	3.27	3.74	3.46	3.05	3.2	3.23	3.96	3.48	4.76	3.82	3.92	3.1	3.11	3.07	2.39	4.6	3.4	3.4	3.14	3.19	3.52	3.23	3.42	3.347195	3.266232
P2O5	0.09	0.11	0.13	0.12	0.16	0.06	0.21	0.19	0.26	0.18	0.23	0.04	0.03	0.43	0.15	0.11	0.17	0.17	0.23	0.31	0.2	0.11	0.09	0	0
SiO2	70.35	66.96	65.14	65.77	62.33	70.16	55.35	58.94	52.07	62.37	58.08	74.67	74.18	53.42	64.47	68.46	62.39	63.35	54.93	59.18	61.13	65.05	65	66.438758	63.448773
SiO	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.1	0.06	0.05	0.03	0.05	0.02	0.01	0.06	0.03	0.02	0.03	0.03	0.08	0.08	0.05				
TiO2	0.39	0.54	0.57	0.7	0.79	0.34	0.84	0.75	1.13	0.86	0.98	0.2	0.22	1.12	0.77	0.35	0.8	0.82	0.9	0.86	0.83	0.55	0.39	0.802728	0.878232
H2O																									
LOI%	1.61	0.54	0.64	0.89	1.31	1.1	2.32	0.9	4	0.97	1.1	0.4	0.94	1.3	0.7	1.67	1.28	0.52	1.05	1.09	0	0	0	0	0
Total	98.32	100.05	99.69	99.78	99.93	99.54	99.07	105.95	99.07	99.54	101.25	99.85	99.18	100.65	100.75	100.55	100.1	101	100.65	99.88					
ppm																									
C	0.2	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.1	0.07	0.05	0.19	0.02	0.04	0.04	0.05					
S	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	2.46	0.05	4.09	0.01	0.07	0.01	0.01	0.11	0.03	0.05	<0.01	0.01	0.12	0.14					
Ba	556	629	627	734	682	579	934	933	574	682	586	549	511	1015	609	756	599	573	905	1050	579	689	0	677.2	485.6
Ce	53.6	56.9	56.8	71.3	52.3	48.4	42.6	49.3	45.9	60.6	51.2	58.8	78.2	78.8	59.2	46.5	54.6	57.2	54	78.8	65.5	46.5	0	45.8	51.2
Cr	32	23	26	38	21	21	19	11	28	32	30	24	24	34	16	29	27	24	18	0	0	0	0	29	32
Co	2.22	2.66	6.57	5.53	3.93	7.04	2.77	3.49	1.24	3.42	3.8	10.05	4.68	2.52	4.98	2.5	3.83	8.59	5.58	2.67	4	7.5	0	3.5	3.3
Dy	3.71	3.5	3.75	5.09	3.14	5.14	3.13	5.19	5.25	5.25	4.25	4.15	4.15	4.97	2.83	4.57	2.83	4.56	3.7	4.11	3.57	4.03	0	3.5	4.03
Ey	2.76	2.24	2.65	3.07	2.68	1.46	1.84	2.76	2.87	2.89	3.04	2.82	3.3	2.74	1.84	2.65	2.84	2.19	2.51	2.1	2.09	2.37			
Eu	0.53	0.91	0.94	0.86	1.1	0.69	1.28	1.08	1.53	1.06	1.16	0.42	0.46	1.73	0.94	0.72	1.14	0.99	1.32	1.44	1.1	0.9	0	0.9	0.96
Ga	13.6	17	17	16.2	18.4	15	20.1	21.4	21.4	19.3	19.6	13.4	20	17	16	16	16.6	17.8	18.4	18	16	0	0	14	14
Ge	3.86	3.93	3.74	5.96	4.57	2.55	3.66	4.04	5.11	5.13	5.38	3.96	4.1	6.65	3.28	3.02	4.99	5.03	4.32	5.93	6.6	4.5	0	3.92	4.33
Ge	1.8	1.7	1.6	0.5	0.8	<0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0	0	0	0	1	1
Hf	5.94	6.66	6.43	8.41	7.1	4.61	3.27	4.19	3.71	7.18	5.46	4.42	5.54	7.31	8.28	5.33	6.52	7.99	4.36	6.79	7	5	0	3	4
Ho	0.9	0.85	0.8	0.95	0.92	0.49	0.64	0.64	0.92	1.1	1.02	0.92	0.91	1.15	0.96	0.5	0.9	0.91	0.93	0.8	0.8	0	0	0.71	0.8
La	26.2	28.1	27.6	35.5	26.9	26.7	22.9	25.6	21.3	30.1	25.1	31.7	40.1	42.7	29	24.2	27.5	27.9	30.2	43	23.5	22.5	0	21.6	24.2
Lu	0.47	0.34	0.41	0.53	0.46	0.25	0.29	0.36	0.43	0.48	0.41	0.54	0.48	0.45	0.45	0.26	0.39	0.3	0.29	0.34	0.3	0.4	0	0.29	0.33
Nb	14.7	7.97	1.89	20.65	8.38	5.68	4.51	5.86	8.35	9.8	7.76	13.8	9.52	13.55	8.96	5.8	7.98	8.51	8.36	14.2	9	9	0	6	6
Nd	23.5	24.2	26.2	35.7	26.4	19.4	23.5	25.8	27	31.6	27.5	25.2	32.6	40.2	30.6	20.4	27.2	28.7	27.1	37	24.5	21	0	22	24.4
Pr	6.37	6.69	6.76	9.27	6.76	5.49	5.77	6.66	6.04	7.88	7.06	7.04	9.02	9.88	7.55	5.67	7.09	7.21	6.69	9.38	6.1	5.1	0	5.61	6.32
Rb	281.5	102.5	161	198	160	191	80.6	98.6	88.3	161	86.2	274	254	73	174.5	142	147	168.5	61	106.5	149	149	0	127.4	131.4
Sm	4.51	4.23	4.46	7.7	5.19	3.28	4.21	4.82	5.55	5.99	5.86	4.28	5.74	7.26	5.69	4.07	5.23	5.48	5.34	6.61	4.7	4.2	0	4.5	5.1
Sr	1.7	7	1.9	3.5	3.3	5.5	0.9	1.4	1.9	2.2	2.2	1.2	2.8	3.9	2.2	2.5	1	2.3	1.8	1.9	2	2	0	11	8
Sr	141.5	291	308	199	273	189	797	607	438	267	412	129	77.6	553	251	215	279	262	688	457	391	262	0	368.2	252.4
Tb	1.6	0.8	0.9	0.9	0.7	0.9	0.5	0.6	0.5	0.9	0.7	2.3	1.5	1	0.9	0.7	0.8	0.7	1	4	5.5	0	0	0.5	0.6
Tb	0.61	0.62	0.62	0.94	0.82	0.36	0.57	0.6	0.79	0.83	0.83	0.74	0.69	0.95	0.86	0.47	0.78	0.73	0.65	0.91	0.7	0.6	0	0.65	0.74
Th	24.4	18.5	19.05	23.1	18	26.1	5.42	8.49	4.24	17.05	9.1	31.8	41.5	17.15	22.1	17.8	20.2	17.95	10.05	19.25	13	14	0	14.9	14.8
Tm	0.44	0.36	0.44	0.53	0.41	0.28	0.29	0.3	0.42	0.46	0.41	0.53	0.35	0.48	0.43	0.26	0.43	0.4	0.32	0.4	0.4	0.3	0	0.28	0.32
U	5.51	4.23	3.97	5.56	4.26	5.5	1.73	2.33	1.02	3.51	2.15	9.16	4.83	3.57	3.84	4.07	4.76	3.85	2.05	3.91	3.5	3	0	3.4	4.01
V	45	95	106	86	128	47	213	177	255	118	179	14	21	214	116	38	127	125	206	120	130	95	0	115	106
W	2	1.5	1.9	2.8	1.9	3	1.9	1.7	1.8	2.1	1.8	4.6	2.5	1.9	2.6	2.1	2.8	2.1	1.9	88	126	0	1	2	2
Y	27	22.7	26	31.6	27.8	15.3	18	19.6	28.1	31.1	28.8	29	26.1	32.9	30.2	17.6	26.8	27	22.1	28.4	22.5	22.5	0	18.9	21.4
Yb	2.88	2.18	2.74	2.84	2.55	1.48	1.73	1.85	2.86	2.62	2.82	3.36	2.83	3.02	2.75	1.68	2.32	2.69	2.34	2.4	2.3	2.1	0	1.9	2.2
Zr	209	217	211	309	268	141	107	152	138	256	205	125	153	301	318	192	231	299	168	276	228	177	0	198	148.6
As	6.1	2.3	1.4	2.9	2.9</																				

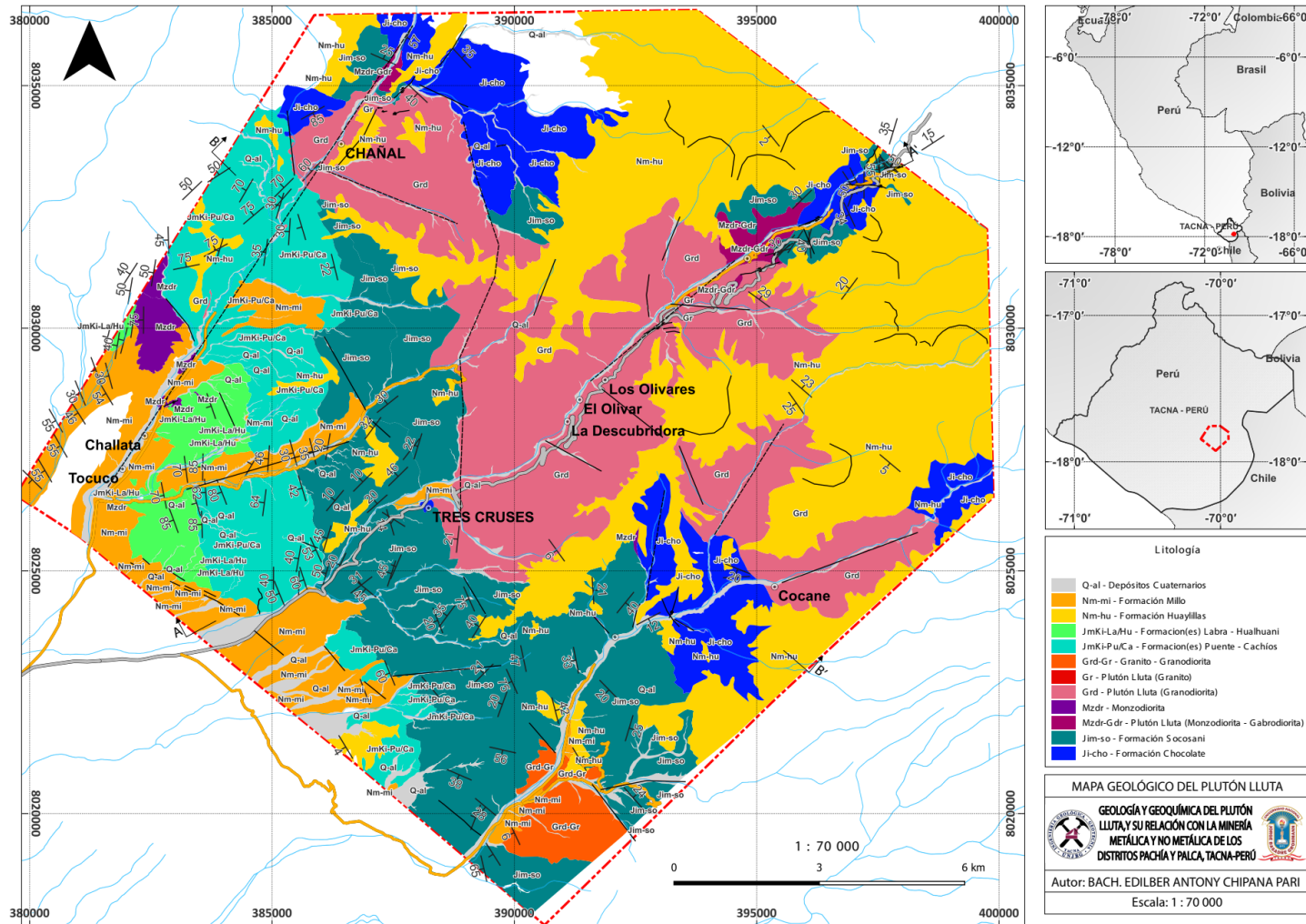
**ANEXO 3:** Coordenadas de las muestras geoquímicas/petrográficas.

<b>SAMPLE ID</b>	<b>LOCALITY</b>	<b>X UTM19S</b>	<b>Y UTM19S</b>	<b>UNIT</b>	<b>LITHOLOGY</b>
1_GQ_APL_6	Pachía-Palca	386374	8033102	Superunidad Yarabamba	Monzogranite
2_GQ_MZG_13	Pachía-Palca	390327	8020239	Superunidad Yarabamba	Monzogranite
3_GQ_GRD_15	Pachía-Palca	391120	8020721	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
4_GQ_MZG_5	Pachía-Palca	386888	8032853	Superunidad Yarabamba	Monzogranite
5_GQ_MZG_3	Pachía-Palca	385894	8033361	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
6_GQ_MZG_14	Pachía-Palca	391108	8020713	Superunidad Yarabamba	Monzogranite
7_GQ_GRD_16	Pachía-Palca	383522	8028607	Superunidad Yarabamba	Quartz Monzodiorite
8_GQ_GRD_17	Pachía-Palca	383051	8028536	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
9_GQ_GRD_12	Pachía-Palca	391737	8023998	Superunidad Yarabamba	Monzodiorite
10_GQ_MZG_270	Pachía-Palca	385770	8033208	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
11_GQ_DR_266	Pachía-Palca	387339	8035108	Superunidad Yarabamba	Quartz Diorite
12_GQ_APL_269	Pachía-Palca	385882	8033335	Superunidad Yarabamba	Syeno Granite
13_GQ_APL_267	Pachía-Palca	387239	8034579	Superunidad Yarabamba	Syeno Granite
14_GQ_DR_84	Pachía-Palca	395348	8031454	Superunidad Yarabamba	Quartz Diorite
15_GQ_GRDT_220	Pachía-Palca	392264	8028449	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
16_GQ_APL_219	Pachía-Palca	392454	8029371	Superunidad Yarabamba	Monzogranite
17_GQ_GRDT_199	Pachía-Palca	392973	8030043	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
18_GQ_GRDT_217	Pachía-Palca	392214	8028955	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
19_GQ_DR_150	Pachía-Palca	395129	8031756	Superunidad Yarabamba	Quartz Diorite
20_GQ_GRDT_111	Pachía-Palca	395427	8031978	Superunidad Yarabamba	Granodiorite
PA860800	Palca	389802.1393	8026656.414	Superunidad Yarabamba	-
PA950800	Palca	390998.9001	8021019.754	Superunidad Yarabamba	-
Pa-IV-04-05	Palca	390319.0319	8020244.959	Superunidad Yarabamba	-
Pa-III-15-03	Palca	389147.0185	8026769.94	Superunidad Yarabamba	-
Pa-III-16-03	Palca	392472.9865	8029580.013	Superunidad Yarabamba	-

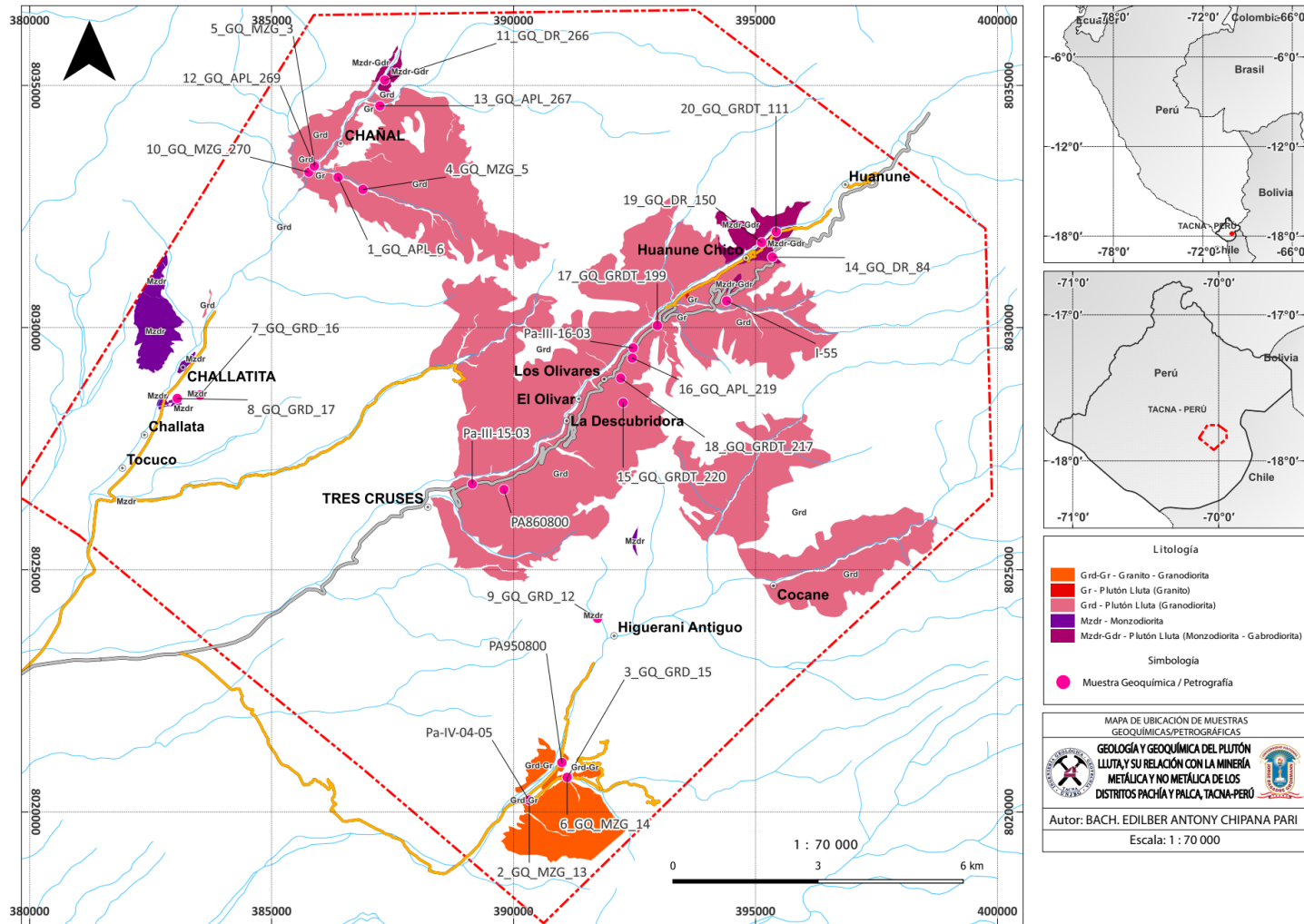
ANEXO 04: Mapa de ubicación del área de estudio.



ANEXO 05: Mapa geológico del Plutón Lluta.



ANEXO 06: Mapa de ubicación de muestras geoquímicas/petrográficas.



ANEXO 07: Mapa de concesiones mineras metálicas y no metálicas en el Plutón Lluta.

