



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**“PROCEDENCIA SEDIMENTARIA DEL GRUPO YURA
(MESOZOICO) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE MINERALES
PESADOS AL NORTE DE LA CUENCA AREQUIPA (13°30´ A
14°00´ LATITUD SUR), AYACUCHO”.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FREDY ALBERTO COAQUIRA PARI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis dedico con todo el cariño y respeto a Dios que a lo largo de mi vida académica e intelectual me mostro muchas maneras de seguir adelante y nunca rendirme en lo que empecé.

A mis padres Modesto Coaquira Pacori y Eusebia Pari Gutiérrez, por sus abnegados sacrificios, de haberme sabido guiar por el camino de la superación, formándome con principios y valores bien consistentes.

A todos mis hermanos por el apoyo emocional que me brindaron para terminar esta tesis.

A mi cuñada Zeneida por sus consejos y palabras de aliento en cada episodio de mi vida.

A mi esposa, amiga y compañera inseparable Leydi, cuyo inmenso amor y paciencia me han Sostenido emotivamente a lo largo de este tiempo.

Fredy Coaquira



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad para dedicarme al ejercicio de lo que más me gusta hacer en esta vida, que es la Geología, mi pasión y aventura. No hay lugar en la naturaleza que no aguarde secretos y arte, esta inspiración me permitió agregar un grano de conocimiento para contribuir en la investigación geocientífica.

A la Universidad Nacional de Altiplano - Puno (UNAP), en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica cuyos docentes me brindaron conocimientos y enseñanzas muy importantes para mi formación profesional.

A mi asesor Mg. Agustín Víctor Velez Vilca, maestro de la Universidad Nacional del Altiplano por la revisión, corrección y sugerencias de este estudio, cuyas apreciaciones permitieron la redacción final del manuscrito.

Agradezco a la Dirección de Geología Regional del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Al personal del Laboratorio de Petrología y Microscopía del INGGEMMET por su apoyo y por facilitarme sus equipos.

A los ingenieros de Geología Regional del INGGEMMET Fredy Jaimes, Luis Cerpa, Waldir Valdivia, Rildo Rodríguez, Pedro Navarro y Mirian Mamani, por las exigencias y enseñanzas impartidas.

Al PhD. Aldo Alvan De la Cruz, quien me motivo en el entendimiento de la proveniencia sedimentaria detrítica, cuyos consejos me han mostrado que en la búsqueda del conocimiento se termina encontrando más dudas que respuestas, pero que naturalmente son parte del aprendizaje constante.

Fredy Coaquira



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRONIMOS

RESUMEN18

ABSTRACT.....19

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA21

1.1.1. Formulación del problema.22

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....22

1.3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....23

1.4. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....26

1.4.1. Hipótesis general.26

1.4.2. Hipótesis específicas.....26

1.5. OBJETIVO.....26

1.5.1. Objetivo general.26

1.5.2. Objetivos específicos.26

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. PROCEDENCIA (PROVENIENCIA) SEDIMENTARIA28



2.1.1. Cambios en la composición mineral de sedimentos.....	30
2.2. Análisis de Minerales Pesados (HMA, Heavy Mineral Analysis)	31
2.2.1. Procesos que controlan los ensambles de minerales pesados.	35
2.2.2. Usos de los minerales pesados.	38
2.2.3. Estabilidad química de los minerales pesados.	40
2.2.4. Parámetros que controlan la sedimentación de los minerales pesados.....	42
2.2.5. Concentración de los minerales pesados en las diferentes rocas fuentes. ...	43
2.3. PETROGRAFÍA SEDIMENTARIA	44
2.3.1. Clasificación de areniscas.	44
2.3.2. Método de conteo de granos Gazzi- Dickinson.....	45
2.4. PROVENIENCIA SEDIMENTARIA ASOCIADO A UN RÉGIMEN TECTÓNICO.....	48
2.4.1. Bloques Continentales.	48
2.4.2. Arcos Magmáticos.....	49
2.4.3. Orógenos reciclados.....	49
2.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	50
2.5.1. Proveniencia sedimentaria.	50
2.5.2. Fuentes de aporte.....	51
2.5.3. Mineral pesado.	51
2.5.4. Monocristalino.....	51
2.5.5. Policristalino.....	51
2.5.6. Cuarzo, feldespato y litoclasto (QFL).	51
2.5.7. Orógeno.....	51
2.5.8. Cuenca Arequipa.	52



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	53
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	53
3.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES	54
3.3.1. Variable independiente.	54
3.3.2. Variable dependiente.	54
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	54
3.4.1. Población.....	54
3.4.2. Muestra.	54
3.5. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	54
3.5.1. Muestras para análisis de minerales pesados.	54
3.5.2. Muestras para análisis modal de areniscas.....	55
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA TOMA DE DATOS	55
3.6.1. Etapa preliminar de gabinete.....	55
3.6.2. Etapa de campo.	57
3.6.3. Post-campo.....	60

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. MARCO GEOGRÁFICO.....	84
4.1.1. Ubicación y extensión.....	84
4.1.2. Vías de accesos.....	84
4.2. MARCO GEOLÓGICO	84
4.2.1. Estratigrafía.....	84



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
5.1.1. Análisis de minerales pesados	107
5.1.2. Analisis Petrografico de Areniscas	127
5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	153
5.2.1. Propuesta de modelo geodinámico del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa (Ayacucho).	157
VI. CONCLUSIONES.....	161
VII. RECOMENDACIONES.....	163
VIII. REFERENCIAS.....	164
ANEXOS	170

Área : Geología Regional

Tema : Procedencia sedimentaria y análisis de minerales pesado

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 09 de noviembre de 2020.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de evolución sedimentaria	29
Figura 2. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Hualhuani parte inferior	32
Figura 3. Representación de ensambles de minerales pesados.	35
Figura 5. Unidad minera de Cerro Blanco en Chile “Goldcorp inc”.	39
Figura 6. Esquema de proveniencia de las Regiones geodinámicas	44
Figura 7. Clasificación de areniscas (arenitas y grauvacas) de acuerdo a su composición	45
Figura 8. Muestra de mano de arenisca y sección delgada.....	46
Figura 9. Clasificación de areniscas de acuerdo a su composición	48
Figura 10. Diagrama ternario de ambientes tectónicos	50
Figura 11. Diagrama de flujo del cronograma de trabajo.....	53
Figura 12. Colecta de muestras de areniscas	60
Figura 13. Maquinas que se usaron para el trituramiento de las muestras	62
Figura 14. Instrumentos y materiales que se utilizaron para la trituración	63
Figura 15. Equipos e instrumentos para proceso de tamizado.....	64
Figura 16. Tamizado de sedimentos usando chorros de agua	65
Figura 17. Limpiadores ultrasónicos.....	66
Figura 18. Flujograma de procesamiento de las muestras para el trituramiento	66
Figura 19. Proceso de baño en ácido acético	68
Figura 20. Preparación de instrumentos y materiales para uso de líquido pesado	69
Figura 21. Uso de politungstato de sodio	70
Figura 22. Proceso de decantación de los minerales pesados.....	71
Figura 23. Proceso de retiro de los minerales pesados.....	72



Figura 24. Proceso de reciclamiento del líquido pesado	73
Figura 25. Variedad de minerales pesados después de separar con el líquido pesado.....	74
Figura 26. Cuadro de densidades de minerales (g/cm ³) y liquido pesado comúnmente usados	75
Figura 27. Minerales pesados vistos al microscopio petrográfico.....	76
Figura 29. Proceso de preparación de slides.....	78
Figura 30. Materiales para mantener en buen estado los slides.....	78
Figura 31. Flujograma para el tratamiento de las muestras a estudiar	79
Figura 32. Mesa de trabajo en la separación de minerales pesados	79
Figura 33. Procesamiento de láminas delgadas de areniscas.....	81
Figura 34. Vista de los minerales pesados en el microscopio petrográfico.....	82
Figura 35. Estudio petrográfico de láminas delgadas en el microscopio petrográfico ..	83
Figura 36. Vista en microscopio electrónico de arenisca	83
Figura 37. Afloramiento de esquistos del Grupo Excélsior.....	86
Figura 38. Afloramiento de areniscas del Grupo Mitu sedimentario.....	87
Figura 39. Afloramiento de tobas de cristales del Grupo Mitu volcánico.....	88
Figura 40. Afloramiento de calizas wackestone del Grupo Pucará	89
Figura 41. Afloramiento de calizas wackestone de la Formación Socosáni	90
Figura 42. Afloramientos de la Formación Puente	92
Figura 43. Afloramientos de la Formación Cachíos	93
Figura 44. Columna Litoestratigráfica de la Formación Cachíos	94
Figura 45. Afloramientos de la Formaciones Labra y Gramadal.....	96
Figura 46. Columna litoestratigráfica de la Formación Labra.....	97
Figura 47. Afloramientos de la Formación Hualhuani.....	98



Figura 48. Contacto entre las Formaciones Hualhuani, Murco y Arcurquina.....	100
Figura 49. Afloramientos de las Formaciones Andamarca y Formación Labra.....	102
Figura 50. Afloramiento de rocas graníticas de la Unidad San Miguel de Ongoy	105
Figura 51. Minerales pesados extraídos de esquisto del Grupo Excélsior	110
Figura 52. Minerales pesados extraídos del granito de la Unidad San Miguel Ongoy	110
Figura 53. Minerales pesados extraídos de arenisca del Grupo Mitu sedimentario	111
Figura 54. Minerales pesados extraídos de andesita del Grupo Mitu volcánico	112
Figura 55. Minerales pesados extraídos de arenisca de la Formación Puente.....	112
Figura 56. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Cachíos parte inferior	113
Figura 57. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Cachíos parte superior	114
Figura 58. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Labra parte inferior	115
Figura 59. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Labra parte superior	115
Figura 60. Minerales pesados de areniscas de la Formación Hualhuani parte inferior	116
Figura 61. Minerales pesados de areniscas de la Formación Hualhuani parte superior	117
Figura 62. Diagrama de espectros de las potenciales rocas fuente	118
Figura 63. Representación de los ensambles de minerales pesados de rocas detríticas de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.....	121
Figura 64. Espectros de la asociación de los minerales ZTR y ATI.. ..	122
Figura 65. Distribución vertical de los minerales pesados del Grupo Yura.....	124



Figura 66. Distribución vertical de los minerales pesados del Grupo Yura en el departamento de Ayacucho	124
Figura 67. Primer modelo de proveniencia sedimentaria detrítica del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho.....	127
Figura 68. Muestra GR40a-15-094a, (NXs, 10x)	131
Figura 69. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Puente parte superior	132
Figura 70. Muestra GR40a-15-035a, (NXs, 10x)	133
Figura 71. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Cachíos parte inferior	134
Figura 72. Muestra GR40a-15-030a, (NXs, 10x)	135
Figura 73. Muestra GR40a-15-013a, (NXs, 10x)	136
Figura 74. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Cachíos parte superior	137
Figura 75. Muestra GR40a-15-029a, (NXs, 10x)	138
Figura 76. Muestra GR40a-15-001a, (NXs, 10x)	139
Figura 77. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Labra parte inferior.....	140
Figura 78. Muestra GR40a-15-012a, (NXs, 10x). arenisca de grano fino a medio que corresponde a la Formación Labra parte superior.....	141
Figura 79. Muestra GR40a-15-007a, (NXs, 10x)	142
Figura 80. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Labra parte superior.....	143
Figura 81. Muestra GR40a-15-027a, (NXs, 10x)	144
Figura 82. Muestra GR40a-15-032a, (NXs, 10x)	145



Figura 83. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Hualhuani parte inferior.....	146
Figura 84. Muestra GR40a-15-033a, (NXs, 10x)	147
Figura 85. Muestra GR40a-15-004a, (NXs, 10x)	148
Figura 86. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Hualhuani parte superior.....	149
Figura 87. Representación general de análisis composicional y discriminación de ambientes tectónicos	150
Figura 88. Segundo modelo de proveniencia sedimentaria en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho	152
Figura 89. Modelo geodinámico de las formaciones Puente y Cachíos.....	158
Figura 90. Modelo geodinámico de la Formación Labra	159
Figura 92. Modelo geodinámico de la Formación Hualhuani	160



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ratios de sensibilidad-proveniencia de minerales pesados	31
Tabla 2. Características generales de minerales pesados predominantes	33
Tabla 3. Comparación de orden de persistencia de minerales pesados	38
Tabla 4. Características generales de principales minerales pesados.....	41
Tabla 5. Determinación de proveniencia y ambiente tectónico a partir de composición QFL	50
Tabla 6. Resumen de las muestras colectadas en la salida de campo. se detalla la ubicación y el tipo de análisis que se realizara a cada muestra	59
Tabla 7. Vías de acceso terrestre al área de estudio	84
Tabla 8. Tabla de comparación en base a la abundancia porcentual de las muestras de minerales pesados	108
Tabla 9. Abundancia a partir de conteo de minerales ligeros (datos composicionales) de 12 muestras de areniscas en laminas delgadas	130



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ATi:	Índice apatito–turmalina
Ap:	Apatito
Amp:	Anfibol
ApPxn:	Apatito y piroxeno
AP:	Apatito y piroxeno
cm:	Centímetro
CZi:	Índice cromo espinela-zircón
C°:	Centígrado
ρ:	Densidad
D-e:	Devónico Excélsior
DRX:	Difracción de Rayos X
e.g:	Exempli gratia "por ejemplo"
etc.:	Etcétera
Ep:	Epidota
F:	Feldespato
Fp:	Feldespato plagioclasa
Fk:	Feldespato potásico
FT:	Trazas de fisión
Fm:	Formación
g/cm³:	Gramos por centímetro cúbico
GZi:	Índice granate-zircón
Grt:	Granate
HMA:	Heavy Mineral Analysis
He:	Helio



i.e:	Id est “Es decir”
ICP:	Plasma de acoplamiento inductivo
Jm-So:	Jurásico medio, Socosáni
Jm-p:	jurásico medio, Puente
Jm-ca:	Jurásico medio, Cachíos
Js-l:	Jurásico superior, Labra
Js-g:	Jurásico superior, Gramadal
Ki-a:	Cretáceo inferior, Arcurquina
km:	Kilometro
Ki-hu:	Cretáceo inferior, Hualhuani
Ki-mu:	Cretáceo inferior, Murco
L:	Litoclasto
Ls:	Lítico sedimentario
Lm:	Lítico metamórficos
Lv:	Lítico volcánicos
Lt:	Lítico total
Ma:	Millones de años
m:	Metro
MP:	Minerales pesados
mm:	Milímetro
mg:	Miligramos
MZi:	Índice monacita–zircón
Nm-cau:	Neógeno miocena, Caudalosa
Nm-an:	Neógeno miocena, Andamarca
Np-sa:	Neógeno pliocena, Sachabamba



- Np-aj/tbcri:** Neógeno pliocena, Ancaray Jahuana, toba de cristales
- Np-aj/tbla:** Neógeno pliocena, Ancaray Jahuana, toba lapilli
- Np-aj/anda:** Neógeno pliocena, Ancaray Jahuana, andesita afírica
- Np-aj/andp:** Neógeno pliocena, Ancaray Jahuana, andesita porfirítica
- Np-jj/tbla:** Neógeno pliocena, Jello Jasa, toba lapilli
- Np-jj/andp:** Neógeno pliocena, andesita porfirítica
- Np-ya/andp:** Neógeno pliocena, Yanamachay, andesita porfirítica
- Np-ya/tbcri:** Neógeno pliocena, Yanamachay, toba de cristales
- Np-pm/andp:** Neógeno pliocena, pucamachay, andesita porfirítica
- Np-an/andp:** Neógeno pliocena, antasello, andesita porfirítica
- Np-to/andp:** Neógeno pliocena, Tutayoc Orco, andesita porfirítica
- NXs:** Nicoles cruzados
- NO-SE:** Noroeste a Sureste
- pH:** Potencial de hidrogeno
- PET-so:** Permo-Triásico, San Miguel Ongoy
- PET- m/sed:** Permo-Triásico, Mitu sedimentario
- PET- m/v:** Permo-Triásico, Mitu volcánico
- Ppe-t:** Paleógeno, paleocena eocena, Ticllas
- PN-cas:** Paleógeno Neógeno, Castrovirreyna
- Pxn:** Piroxeno
- Qh-gl:** Cuaternario Holoceno, glacial
- Qh-flgl:** Cuaternario Holoceno, fluvioglacial
- Qh-fl:** Cuaternario Holoceno, fluvial
- Qh-co:** Cuaternario Holoceno, coluvial
- Q:** Cuarzo



QFL:	Cuarzo-feldespatolito
Qmr:	Cuarzo monocristalino de extinción recta
Qmo:	Cuarzo monocristalino de extinción ondulante
Qmc:	Cuarzo microcristalino
Qp:	Cuarzo policristalino
RZi:	Índice grupo TiO ₂ -zircón
RuZi:	Índice rutilo-zircón
Rt:	Rutilo
SO:	Suroeste
TsJi:	Triásico superior Jurásico inferior, Puente
TsJi-p:	Triásico superior Jurásico inferior, Pucará
Tur:	turmalina
Ttn:	Titanita
TtnAmpEp:	Titanita, Anfíbol, Epidota
U-Pb:	Uranio-plomo
µm:	Micras
VMS:	Sulfuros masivos volcanogénicos
XRF:	Fluorescencia de Rayos X
ZTR:	Zircón, turmalina y rutilo
Zrn:	Zircón



RESUMEN

Este estudio se desarrolló entre las localidades de Cangallo y Huancasancos del departamento de Ayacucho Centro Sur de Perú. El objetivo de la tesis busca determinar que el análisis de minerales pesados es una herramienta útil para determinar la procedencia sedimentaria de las formaciones Puente, Cachíos, Labra y Hualhuani que corresponden al Grupo Yura, Norte de la Cuenca Arequipa (Ayacucho). El análisis de minerales pesados se ha realizado en concentrados extraídos de areniscas. Cada uno de estas unidades litoestratigráficas tiene un espectro mineralógico que los hacen distinguibles excepto la roca de la Formación Gramadal no se considera en este estudio por consistir en roca carbonatada. Los métodos aplicados en esta tesis para determinar el aporte de sedimentos consisten en el análisis de minerales pesados, tanto en rocas del Grupo Yura como rocas Pre Jurásicas, como Grupo Excelsior, Unidad San Miguel Ongoy y Grupo Mitu y se refuerza con el estudio de petrografía sedimentaria de areniscas. El espectro mineral de la Formación Puente muestra predominancia de piroxenos al igual que la Formación Cachíos donde mayormente predominan los minerales pesados de piroxenos, mientras que la Formación Labra se caracteriza por la abundancia de zircón, turmalina y rutilo, y finalmente la Formación Hualhuani, presenta una mayor concentración de zircón y turmalinas, sin embargo, es notorio el incremento de granates en su espectro. Los espectros de minerales pesados del Grupo Yura se compararon con los observados de la roca fuente y se puede afirmar que los sedimentos de la Formación Puente y Formación Cachíos derivan principalmente del Grupo Mitu volcánico. Los sedimentos de la Formación Labra derivan del Grupo Mitu sedimentario y finalmente los sedimentos de la Formación Hualhuani derivan del Grupo Excelsior y Unidad San Miguel Ongoy. El Cambio de contenido mineral en cada unidad es muy notorio, y sirve como referente estratigráfico para correlaciones regionales. Con los concentrados de minerales pesados se reporta dos eventos en el Grupo Yura que ocasionaron el cambio de sedimentación, estos cambios representan etapas de levantamiento, exhumación y generación de sedimentos en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho.

Palabras claves: Procedencia sedimentaria, Cuenca, Minerales pesados, Grupo Yura, y Arenisca.



ABSTRACT

This study was carried out between the towns of Cangallo and Huancasancos in the department of Ayacucho Centro Sur in Peru. The objective of the thesis seeks to determine that the analysis of heavy minerals is a useful tool to determine the sedimentary origin of the Puente, Cachíos, Labra and Hualhuani formations that correspond to the Yura Group, North of the Arequipa basin (Ayacucho). The analysis of heavy minerals has been carried out on concentrates extracted from sandstones. Each of these lithostratigraphic units has a mineralogical spectrum that makes them distinguishable except the rock of the Gramadal Formation, which is not considered in this study because it consists of carbonate rock. The methods applied in this thesis to determine the contribution of sediments consist of the analysis of heavy minerals, both in rocks of the Yura Group and Pre Jurassic rocks, such as the Excelsior Group, the San Miguel Ongoy Unit and the Mitu Group and it is reinforced by the petrography study sandstone sedimentary. The mineral spectrum of the Puente Formation shows a predominance of pyroxenes as well as the Cachíos Formation where heavy pyroxene minerals predominate, while the Labra Formation is characterized by the abundance of zircon, tourmaline and rutile, and finally the Hualhuani Formation, presents a higher concentration of zircon and tourmaline, however, the increase in garnets in its spectrum is notable. The heavy mineral spectra of the Yura Group were compared with those observed from the source rock and it can be stated that the sediments of the Puente Formation and Cachíos Formation derive mainly from the volcanic Mitu Group. The sediments of the Labra Formation derive from the sedimentary Mitu Group and finally the sediments of the Hualhuani Formation derive from the Excelsior Group and the San Miguel Ongoy Unit. The change in mineral content in each unit is very noticeable, and serves as a stratigraphic reference for regional correlations. With the heavy mineral concentrates, two events are reported in the Yura Group that caused the sedimentation change, these changes represent stages of lifting, exhumation and generation of sediments towards the Northern part of the Arequipa basin in the department of Ayacucho.

Keywords: Sedimentary provenance, Basin, Heavy Minerals, Yura Group, and Sandstone.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La presente tesis busca determinar la procedencia del relleno sedimentario de la parte Norte de la Cuenca sedimentaria Arequipa (departamento de Ayacucho). Al definir de donde provienen los sedimentos del Grupo Yura, se puede deducir los rasgos geodinámicos, precisamente mediante el análisis de los minerales pesados que están incluidos en las rocas sedimentarias (minerales accesorios). Haciendo uso de esta técnica relativamente nueva, se determinó las rocas fuentes que aportaron a la cuenca sedimentaria (i.e. Cuenca Arequipa). Se pretende proveer de argumentos sólidos y verificables para inferir edades de sedimentación, su defecto, patrones consistentes de correlación en ausencia de fósiles guías (tales como ammonites).

Al revisar los antecedentes sobre la cronoestratigrafía del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa se observa que son constantes las discusiones sobre este tema. Esta tesis plantea ampliar los conocimientos con respecto a la historia de sedimentación de la Cuenca Arequipa sobre todo en la parte Norte motivo de este estudio y vincular estas variaciones con etapas geodinámicas.

Inicia con la exploración de la problemática existente para determinar, como primer paso, la historia de sedimentación mediante estudios de proveniencia sedimentaria en las areniscas del Grupo Yura. El análisis de minerales pesados inicia con la separación de estos minerales de las areniscas, aplicando técnicas especializadas de separación con liquido pesado (politungstato de sodio), para ser posteriormente identificados y cuantificados mediante espectros de minerales pesados con el microscopio petrográfico.

Con este estudio se plantea además indicar y establecer directamente la relación del control tectónico sobre las zonas de aporte al Norte de la Cuenca Arequipa en términos de levantamiento y exhumación de rocas. Por tal motivo, se complementó firmemente



con el análisis petrográfico de minerales ligeros QFL (cuarzo, feldespato y litoclasto), definiendo con precisión los variados tipos de cuarzos, estos estudios se realizaron en el río Caracha Cuadrángulo de Huancapi 28ñ en Ayacucho. La definición de la proveniencia de los sedimentos del Grupo Yura ayudo a marcar los cambios en el contenido mineral dentro del Grupo Yura y refleja cambios evolutivos en la geodinámica (lo cual está relacionado a la denudación de altos paleogeográficos). De este modo la paleogeografía puede ser descifrada y los procesos de levantamiento y exhumación de altos dentro de la Cuenca Arequipa e.g. elevaciones pre-Andinas.

Para llevar a cabo la presente investigación, se recolectaron 16 muestras en total de los cuales 4 de ellas se sacaron para estudiarlos como probables rocas fuentes y 12 de ellas se sacaron de las unidades detríticas del Grupo Yura (muestras representativas de la parte inferior y superior).

El presente proyecto de tesis se desarrolló en el marco de la investigación geológica del Proyecto GR40A “Geología de la Cuenca sedimentaria Occidental del Centro del Perú, proyecto el cual integre dentro de la Dirección de Geología Regional del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Grupo Yura forma la mayor parte del relleno sedimentario de la Cuenca Arequipa, constituido por las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani (Vicente, 1981). Las rocas detríticas provienen muy probablemente de diferentes fuentes de aportes, las cuales aún no están definidas. En ese sentido la presente tesis consiste en determinar dichas fuentes, para ello se realizó el análisis de los minerales pesados y se reforzó con el estudio petrográfico analizando la composición de las areniscas mediante



el conteo de granos (QFL), con cuyos resultados podremos responder a las interrogantes que se tienen.

1.1.1. Formulación del problema.

1.1.1.1. Pregunta general.

¿Cuál será la procedencia sedimentaria del Grupo Yura (Mesozoico) mediante el análisis de minerales pesados al Norte de la Cuenca Arequipa ($13^{\circ} 30'$ a $14^{\circ} 00'$) Latitud Sur, Ayacucho?

1.1.1.2. Preguntas específicas.

- a) ¿El análisis de minerales pesados puede definir la procedencia de sedimentos detríticos Mesozoicos al Norte de la Cuenca Arequipa?
- b) ¿El estudio de minerales pesados podrá servir como herramienta para el estudio de procedencias sedimentarias en secuencias sedimentarias detríticas del Grupo Yura (Mesozoico) en la parte Norte de la Cuenca Arequipa?
- c) ¿Se puede realizar comparaciones según la predominancia de espectros de los minerales pesados de las rocas fuentes con las rocas detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa?
- d) ¿Se puede determinar la procedencia de los ambientes tectónicos de las unidades detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa al efectuar la petrografía?

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Estudios multidisciplinarios sobre la evolución de los Andes Centrales han sido innumerables hasta la actualidad, donde muchos de ellos han tratado de explicar la geodinámica en una cuenca dada para cada época usando los métodos convencionales y tradicionales (e.g. mapeo estructural, litológico, columnas estratigráficas, etc.). Sin embargo, la mayoría incide en la escases de pruebas y evidencias que provea argumentos consistentes para elaborar un buen modelo geodinámico. Por tal motivo, se considera en esta tesis, dada la carencia de datos petrográficos en términos de cuantificación QFL.



Existen buenos estudios sobre estratigrafía en la zona de estudios (e.g. LAGESA, 1996); sin embargo, no existen estudios sedimentológicos dirigidos a los análisis de cuencas sedimentarias en la parte Norte de la Cuenca Arequipa y/o algún estudio petrográfico que provea de argumentos consistentes para explicar la evolución tectónica y sedimentaria en la parte Norte de la Cuenca Arequipa. La técnica de la procedencia sedimentaria es relativamente nueva, y provee argumentos para re direccionar la definición de episodios geodinámicos i. e. exhumación de cuerpos de rocas. La presente tesis permitió definir la procedencia de las rocas sedimentarias en la parte Norte de la Cuenca Arequipa (departamento de Ayacucho) y permitió identificar las fuentes principales de aporte de sedimentos.

1.3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En esta tesis, los estudios de proveniencia sedimentaria se basan en el análisis de minerales pesados del Grupo Yura. El estudio de minerales pesados es una técnica relativamente nueva, diversos autores han definido cronológicamente sucesivas etapas de exhumación de rocas y los han asociado a diferentes procesos de levantamientos que ocurrieron en las Cordilleras más importantes de los Andes Centrales (i.e. Cordillera de la Costa, Cordillera Occidental, con el método de la procedencia sedimentaria; (e.g. Wotzlaw et al., 2011; Bande et al., 2011; Decou et al., 2013; Alván et al., 2015). Por otro lado, en el departamento de Tacna Trinidad (2017) estudió la Evolución Geodinámica del Grupo Yura.

Alvan et al. (2017) presento un estudio sobre la evolución geológica de las Cuencas de Antearco del Sur del Perú (Moquegua y Camaná – Mollendo), mediante el estudio de Procedencia Sedimentaria y análisis de facies en rocas Cenozoicas.

Estos diversos autores han demostrado que el análisis de minerales pesados en sucesiones siliciclasticas es una herramienta muy útil para determinar la roca fuente de



dichos detritos, así como también definir consistentemente consecutivas etapas de exhumación de rocas (bordes de cuenca) y diferentes procesos de levantamiento que ocurrieron.

Por ejemplo, los estudios de los minerales pesados en las rocas sedimentarias detríticas del Cretáceo en los Alpes del Norte sugieren la evolución geodinámica Alpina temprana de la microplaca Austroalpina, donde los sedimentos derivan de dos áreas fuente, la primera área fuente está situada en el margen Sureste de la Austroalpina y la segunda área fuente está situada en el Noroeste (véase Von Eynatten & Gaupp, 1999). Decou et al. (2011) presento modelos de procedencia sedimentaria y realizaron cambios en los sistemas erosión - sedimentación en la Cuenca de antearco Andina y su vinculación a la Evolución del Orógeno Andino, estudiando los sedimentos siliciclasticos continentales de la Era Cenozoica (Formación Moquegua) en el Sur de Perú (15-18°S). Estos autores utilizaron la petrografía de detritos de minerales pesados, geoquímica de granos separados y termocronología. También Wotzlaw et al. (2011) realizaron estudios basados en el estudio de minerales pesados y geocronología al Norte de Chile y al Oeste del Altiplano de Bolivia en los sedimentos del Oligoceno en la depresión Central (Antearco interno) dando a conocer la evolución tectónica – magmática del área interpretando etapas de fuerte levantamiento de bordes de cuenca en el Oligoceno y Mioceno superior. Alvan et al. (2015) realizaron estudios en la Formación Camaná y el Grupo Moquegua (Valle de majes Camaná) realizando correlaciones estratigráficas basados en los espectros de minerales pesados e identificando etapas de levantamiento y exhumación de la Cordillera Occidental y de la Cordillera de la Costa. Recientemente Ramírez (2018) realiza estudios de Evolución sedimentaria de los depósitos Cenozoicos en el Sur de Perú, gracias a la interpretación de espectros de los minerales pesados y a los diagramas ternarios de ambiente tectónico definiendo el ambiente tectónico de los



sedimentos de la Secuencia A (Formación Camaná) provienen de un Basamento levantado, para la zona de investigación está representado por la Cordillera de la Costa, por la mayor proporción de componentes de cuarzo ondulante y feldespatos. Las Formaciones Moquegua Superior y Millo, su mayor aporte está en un Arco Magmático, lo que indica la mayor contribución de líticos volcánicos y plagioclasas, la presencia de cuarzo monocristalino, están ligados a rocas plutónicas, todo esto corresponde a la Cordillera Occidental.

En el departamento de Arequipa se considera que se encuentra el estratotipo del Grupo Yura, y fue descrito inicialmente como Formación Yura por Jenks (1948). Este Grupo tiene un espesor aproximado de 3500 m en su localidad tipo (Yura, Arequipa). Posteriormente Wilson & García (1962) la elevaron al rango de Grupo, distinguiendo a las formaciones inferior Ataspaca y superior Chachacumane. A su vez, en Yura, Benavides (1962) dividió a esta unidad en cinco miembros (Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani). LAGESA (1996) nombro a las formaciones del Grupo Yura como formaciones Huacaña, Paire y Soraya. Sin embargo, podrían tratarse de las mismas unidades litoestratigráficas y retomar la nomenclatura anterior (i.e. del estratotipo de Yura), así como lo definieron Quispesivana & Navarro (2002).

Teniendo en cuenta la definición del Grupo Yura en su estratotipo (Arequipa) y precisamente en Ayacucho, se entiende que estas “cuencas sedimentarias” se halló en el (Mesozoico) bajo un mismo régimen tectónico, sin embargo, lejos de algún control cronológico y petrológico y geodinámico que explique la evolución de esta parte de la Cuenca.



1.4. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

1.4.1. Hipótesis general.

La procedencia sedimentaria del Grupo Yura (Mesozoico) se determina mediante el análisis de minerales pesados al Norte de la Cuenca Arequipa ($13^{\circ} 30'$ a $14^{\circ} 00'$ Latitud Sur), Ayacucho.

1.4.2. Hipótesis específicas.

- a) El análisis de minerales pesados ayuda a definir la procedencia de sedimentos Mesozoicos al Norte de la Cuenca Arequipa.
- b) El estudio de minerales pesados es considerado como herramienta para el estudio de procedencias sedimentarias en secuencias sedimentarias detríticas del Grupo Yura (Mesozoico) en la parte Norte de la Cuenca Arequipa.
- c) Es posible establecer comparaciones según la predominancia de espectros de los minerales pesados de las rocas fuentes con las rocas detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa.
- d) Es posible determinar la procedencia de los ambientes tectónicos de las unidades detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa al efectuar la petrografía.

1.5. OBJETIVO

1.5.1. Objetivo general.

Determinar la procedencia sedimentaria de las unidades detríticas del Grupo Yura mediante el análisis de minerales pesados al Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.

1.5.2. Objetivos específicos.

- a) Determinar que el análisis de minerales pesados ayuda a definir la procedencia de sedimentos Mesozoicos al Norte de la Cuenca Arequipa.
- b) Presentar el estudio de minerales pesados como herramienta para el estudio de procedencias sedimentarias en secuencias sedimentarias detríticas del Grupo Yura (Mesozoico) en la parte Norte de la Cuenca Arequipa.



- c) Comparar los espectros según la predominancia de los minerales pesados de las rocas fuentes con las rocas detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa.
- d) Determinar la procedencia de los ambientes tectónicos de las unidades detríticas del Grupo Yura al Norte de la Cuenca Arequipa al efectuar la petrografía.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. PROCEDENCIA (PROVENIENCIA) SEDIMENTARIA

El término procedencia (o también conocido en el habla hispana como “proveniencia”) se deriva del verbo latín provenire, que significa viene de fuera (Weltje & von Eynatten, 2004). En un ámbito de aplicación más amplio, el análisis de procedencia incluye toda investigación que ayude en la reconstrucción de la historia litosférica de la Tierra (Basu, 2003). En petrología sedimentaria, el término “procedencia” se utiliza para abarcar todos los temas relacionados con la producción de sedimentos, composición de la roca fuente, e incluso fisiografía y el clima de la zona fuente de la que derivan (paleogeografía) (Figura 1), en términos de exhumación-levantamiento. El objetivo principal de la proveniencia es deducir las características de las zonas de aporte a través de las propiedades ópticas, composicionales y texturales de los minerales, complementados con información de otras líneas de evidencia, por ejemplo, petrografía QFL, geoquímica de minerales individuales, whole-rock, litogeoquímica XRF, DRX, microsondas electrónicas, etc. (Pettijohn et al., 1987; Morton, 1991).

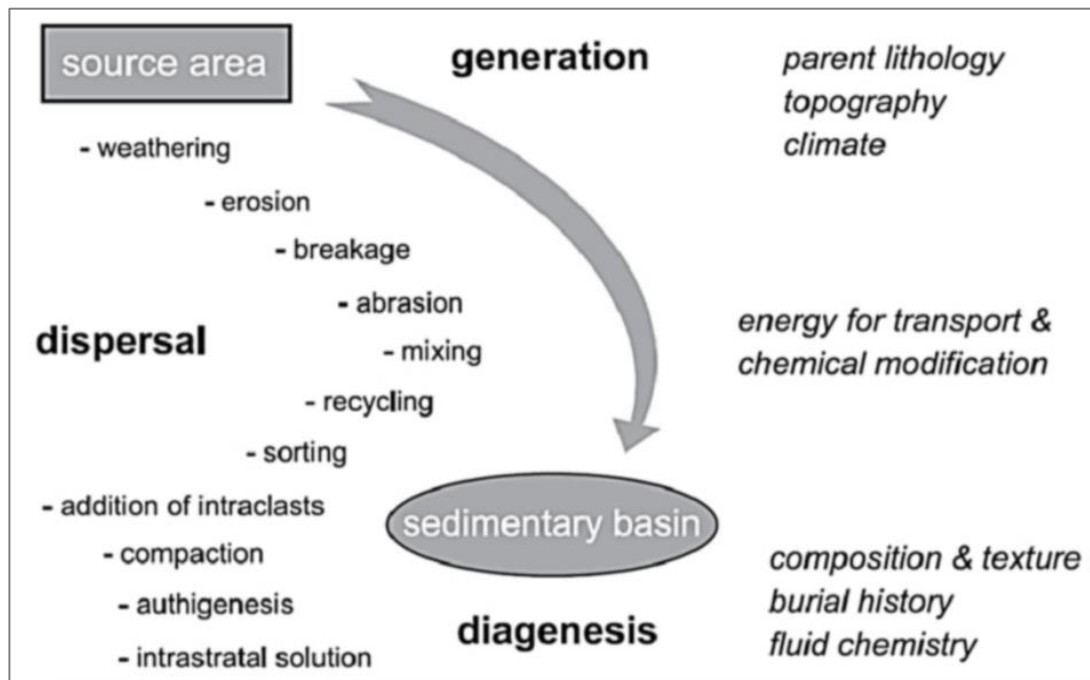


Figura 1. Procesos de evolución sedimentaria.
Fuente: Weltje & von Eynatten, 2004.

La adquisición de datos procedentes de la petrología sedimentaria y análisis de proveniencia sedimentaria sigue tres enfoques principales según Weltje & Prins (2003):

- (1) El análisis de la composición química de los granos de las areniscas (tanto para clasificaciones petrográficas, mineralógicas y químicas).
- (2) El análisis selectivo de un grupo específico de minerales i.e. espectros de minerales accesorios en las rocas (minerales pesados, $\rho > 2.87 \text{ g/cm}^3$), donde cada estrato o unidad tiene un espectro de minerales característico.
- (3) Los análisis morfológicos, químicos y radiométricos de granos individuales de fases minerales adecuadas, i.e. geoquímica de minerales individuales.

De los listados arriba, la presente tesis se centra en el ítem 2, del cual se ha preparado numerosos espectros de minerales pesados de las Formaciones siliciclásticas del Grupo Yura.



2.1.1. Cambios en la composición mineral de sedimentos.

La compleja interacción de tectonismo, eustatismo y el clima rige la capacidad de denudación de las rocas fuente (rocas generadoras de sedimentos i.e. bordes de cuenca). Tales procesos llevan a la acumulación de sedimentos a través de la erosión y transporte fluvial, reflejándose en la resultante arquitectura estratigráfica, el cual es revelado al analizar el interior de sus facies, composición mineral y/o paleontológica. Las variaciones en intensidad y estilo de las interacciones desencadenan una serie de fenómenos que influyen en los patrones de apilamientos y en la misma arquitectura (e.g. progradaciones, laminaciones, etc.), incluyendo cambios composicionales cualitativos y cuantitativos en los minerales que conforman las areniscas (Amorosi, & Zuffa, 2011). Entender los procesos autigénicos que influyen en la composición de petrofácies ayuda a reconstruir la evolución sedimentaria en una determinada área. Estos factores actúan a escala local solamente, produciendo cambios en la composición de las areniscas que no tienen potencial de correlación significativa de un lado a otro en la Cuenca, pero que pueden reflejar eventos de gran magnitud (Schumm, 1981). Los principales procesos autigénicos que se incluyen en esta tesis son avulsión canal-fluvial y captura de río, compactación sedimentaria y subsidencia diferencial, mezcla de proveniencia, dilución sedimentaria y clasificación hidráulica (Amorosi & Zuffa, 2011). Los primeros factores se muestran en las columnas estratigráficas en la presente tesis y los dos últimos influyen directamente en la producción de Minerales Pesados.

Para una correcta interpretación y elaboración del modelo de proveniencia, es fundamental que los parámetros utilizados sean heredados de la zona de origen y no se modifiquen mucho por los procesos operativos durante el ciclo de sedimentación, sin embargo, dado el natural sorteamiento de sedimentos, es deducible la mezcla de productos de diversas denudaciones. Para desenmarañar esta complejidad hay dos formas alternativas de generar estos datos, uno que utiliza todo el conjunto de mineral pesado

(HMA convencional, por sus siglas en inglés Heavy Mineral Analysis), (Tabla 1), otro que se concentra en los atributos de las especies minerales individuales (HMA variedad). Para maximizar la información sobre la procedencia, es recomendado hacer un enfoque combinado. Sin embargo, en esta tesis se pone énfasis en los espectros producidos a partir del HMA convencional, debido a que considero que para alcanzar mayor fidelidad en la definición de la roca fuente es necesario tomar mayor cantidad de elementos.

Tabla 1. Ratios de sensibilidad-proveniencia de minerales pesados

	Índice	Definición
ATi	Índice apatito-turmalina	$100 \times \text{conteo apatito} / (\text{total de apatito más turmalina})$
GZi	Índice granate-zircón	$100 \times \text{conteo granate} / (\text{total de granate más zircón})$
RZi	Índice grupo TiO ₂ -zircón	$100 \times \text{conteo grupo TiO}_2 / (\text{total grupo TiO más zircón})$
RuZi	Índice rutilo-zircón	$100 \times \text{conteo rutilo} / (\text{total de rutilo más zircón})$
MZi	Índice monazita-zircón	$100 \times \text{conteo monazita} / (\text{total monazita más zircón})$
CZi	Índice cromo espinela-zircón	$100 \times \text{conteo cromo espinela} / (\text{total cromo espinela + zircón})$

Fuente: Morton, 1994.

2.2. Análisis de Minerales Pesados (HMA, Heavy Mineral Analysis)

Los minerales pesados son aquellos que se encuentran como minerales accesorios de las rocas (zircón, apatito, turmalina, etc.) y raras veces como minerales formadores de roca (i.e. anfíboles y piroxenos). Estas pueden estar en rocas volcánicas y cristalinas (roca fuente) o en las rocas que conforman el relleno sedimentario de alguna Cuenca sedimentaria. Los minerales pesados son los más resistentes al proceso de sedimentación y tienen una densidad mayor a 2.87 g/cm³. El estudio de los minerales pesados (Figura 2). Consiste en un trabajo de reconocimiento, identificación y cuantificación bajo el microscopio petrográfico de los diferentes grupos minerales, en base a sus propiedades

ópticas (color, extensión, índice de refracción, morfología, etc) tomando como guía el manual de “Heavy Minerals in Colour” (Mange & Maurier, 1992).

El análisis de minerales pesados es una pieza clave para los estudios de proveniencia sedimentaria e historia de sedimentación (Mange & Wright, 2007).



Figura 2. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Hualhuani parte inferior. Muestra (GR40A-15-27b). Abreviaciones: Zircón (Zrn), Granate (Grt) y Turmalina (Tur).
Fuente: Propia.

Tabla 2. Características generales de minerales pesados predominantes

Mineral pesado	Gravedad específica	Rocas asociadas más comunes	Rocas ígneas intrusivas	Rocas ígneas volcánicas	Rocas metamórficas	Rocas sedimentarias	Yacimientos
Zircón (Zr)	4.60 - 4.70	Granito, gneis, esquistos.	Rocas ácidas a intermedias, generalmente de granito (euhedral)	Migmaitas (Euhedral), ortogneis (curvo), kimberlita (redondeado)	Granos redondeados	El yacimiento de zircones, se utiliza para las joyerías. De acuerdo a la coloración, se le asocia a las concentraciones de U, Th y REE.	El yacimiento de zircones, se utiliza para las joyerías. De acuerdo a la coloración, se le asocia a las concentraciones de U, Th y REE.
Turmalina (Tur)	3.00 - 3.25	Granito, gneis, esquistos.	Rocas ígneas ácidas, raramente en rocas básicas.	Presentes en algunos esquistos, gneis y filitas	Granos redondeados	El yacimiento de turmalinas se utiliza para las joyerías	El yacimiento de turmalinas se utiliza para las joyerías
Rutilo (Rut)	4.18 - 4.25	Granito y gneis.	Intrusivos ricos en hornblenda y en rocas pegmatíticas.	Presentes como mineral accesorio en esquistos, gneis y anfibolitas.		Yacimientos de titanio, rutilo mena primaria (>2.3% composición química)	Yacimientos de titanio, rutilo mena primaria (>2.3% composición química)
Apatitos (Ap)	3.15 - 3.20	Pegmatitas, venillas de alta temperatura y aureolas de metamorfismo de contacto.				Su abundancia de apatito es principal fuente de fósforo y fosfato.	Su abundancia de apatito es principal fuente de fósforo y fosfato.
Piroxenos (Pxn) Ortopiroxenos	2.95 - 3.96	Granitos, sienitas, skarn, gneis.	Rocas ultramáficas, rocas intermedias a alcalinas básicas. Raros en granito y sienitas.	Rocas volcánicas alcalinas (andesitas, basaltos y dacitas), rocas ultramáficas a intermedias (andesitas, basalto).	Rocas metamórficas, Hornfels, anfibolitas y gneis.		
Granate (Grt)	4.25	Esquistos micáceos.	Puede encontrarse en granitos y pegmatitas	Metamorfismo de alto grado y origen de meta básicas, también se encuentran en skarn y meta limolitas.		Los depósitos de granate son utilizados como gema, indicios de yacimientos de skarn	Los depósitos de granate son utilizados como gema, indicios de yacimientos de skarn
Anfibol	2.85 - 3.57	Diorita, granodiorita, tonalita, sienita, andesitas y basaltos.	Rocas intrusivas y como mineral accesorio en granitos.	Rocas volcánicas de composición ácida a intermedia.	Rocas de metamorfismo regional y de contacto (esquistos verdes)		
Epidota (Ep)	3.35 - 3.45	Ortogneis y anfíboles.		Presentes en skarn, esquistos, gneis, anfibolitas, metamorfismo de rocas calcosilicatadas		Los depósitos de epidota son utilizados como gema, indicios de yacimientos de skarn	Los depósitos de epidota son utilizados como gema, indicios de yacimientos de skarn
Esfena (Titanita) (Ttn)	3.40 - 3.55	Granito y gneis.	Como mineral accesorio de rocas intrusivas intermedias y ácidas.			Yacimientos de titanio, titanita indicados de mena de titanita (2.3% composición química)	Yacimientos de titanio, titanita indicados de mena de titanita (2.3% composición química)

Fuente: Modificado de Mange & Maurer, 1992.



Los minerales pesados constan de diversas especies minerales (Figura 3), cada grano transmite su propia historia y mediante la petrología sedimentaria se da diversas aplicaciones, como:

Determinar proveniencia para reconstruir la naturaleza y características de la roca fuente (roca generadora de sedimentos i.e. borde de cuenca sedimentaria o alto estructural).

Trazar rutas de transporte de sedimento, complementa el análisis de paleo-corriente. Mapeo de Patrones de dispersión de sedimentos (refuerza los mapas de facies, y apoya las predicciones de facies sedimentarias).

Esquemmatización, y en casos apropiados correlación de varios cuerpos de arena (correlaciones estratigráficas), en superficie o en pozos de perforación.

Localizar depósitos con potencial económico (exploración por hidrocarburos, recursos hídricos, placeres, depósitos VMS, estratoligados, etc) y aclarar procesos diagenéticos.

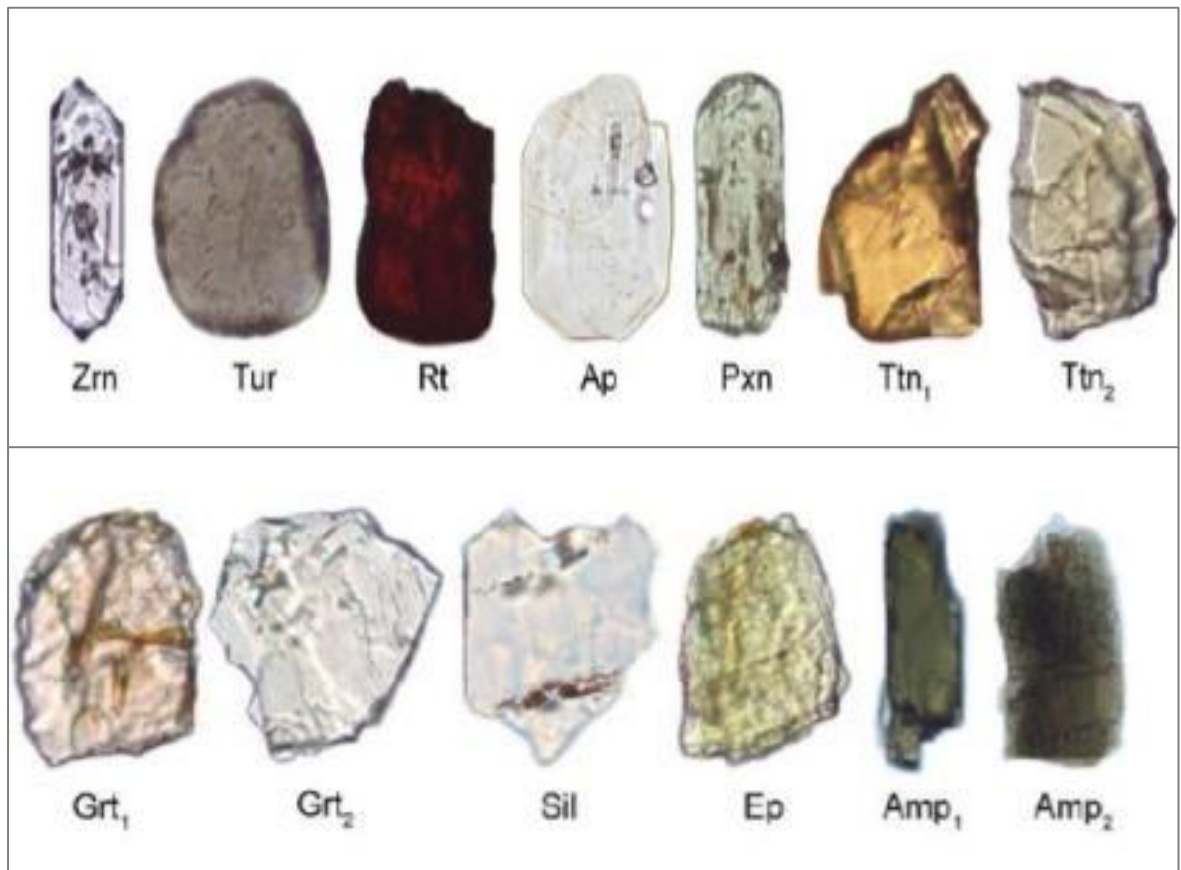


Figura 3. Representación de ensambles de minerales pesados.
Fuente: Alvan, 2015.

2.2.1. Procesos que controlan los ensambles de minerales pesados.

El análisis de minerales pesados (HMA) es una de las técnicas más consistentes y confiables en la determinación de la proveniencia de sedimentos (especialmente arenisca), ya que la procedencia original es modificada por muchos procesos que operan durante el ciclo de sedimentación (Figura 4) y hacen que la data de minerales pesados en los sedimentos refleje no solamente la composición de la roca fuente. Los ensambles de minerales pesados son afectados por tres procesos:

- Selección física (physical sorting).
- Abrasión mecánica.
- Disolución.

La selección física producida por condiciones hidrodinámicas ocurridas durante el transporte y la depositación controla la abundancia relativa de minerales pesados.



Abrasión mecánica producida durante el transporte causa la disminución de tamaño de grano por fracturamiento y redondeo. La disolución causa la pérdida parcial o completa de minerales pesados en diferentes condiciones químicas, sea durante la sedimentación, meteorización en la roca fuente, exposición subaérea en depósitos continentales, durante el enterramiento y/o finalmente durante la meteorización de los afloramientos (Morton, 1999). La meteorización en ambientes depositacionales continentales (según Morton, 1999):

Ambientes húmedos con buena vegetación. Tropicales o de climas templados tienden a generar aguas con acidez por degradación bacterial o materia orgánica (Burley et al., 1985), estas aguas causan cuantiosa disolución de MP inestables, Morton (1986) muestra que el apatito es abundante en areniscas marinas, pobre en areniscas marino-marginales y ausente en areniscas de ambientes fluviales y top-delta.

Ambientes formando capas rojas. Las capas rojas, en que el hierro se encuentra en un estado férrico, pueden formarse en condiciones áridas, condiciones desérticas o en climas estacionales, numerosos estudios muestran que la gran disolución de minerales ferromagnesianos (e.g. Ortopiroxenos, clinopiroxeno y anfíboles cálcicos) lleva lugar en estas condiciones.

Depósito aluvial. Los ensambles de minerales pesados pueden ser afectados durante su almacenamiento temporal aluvial, por ejemplo, en una llanura de inundación del río o en dunas costeras, Morton & Jhonsson (1993) sugieren que la ratio de apatito-turmalina

es significativamente reducido y la abundancia del granate y clinopiroxeno tiende a declinar con el incremento de la depositación aluvial.

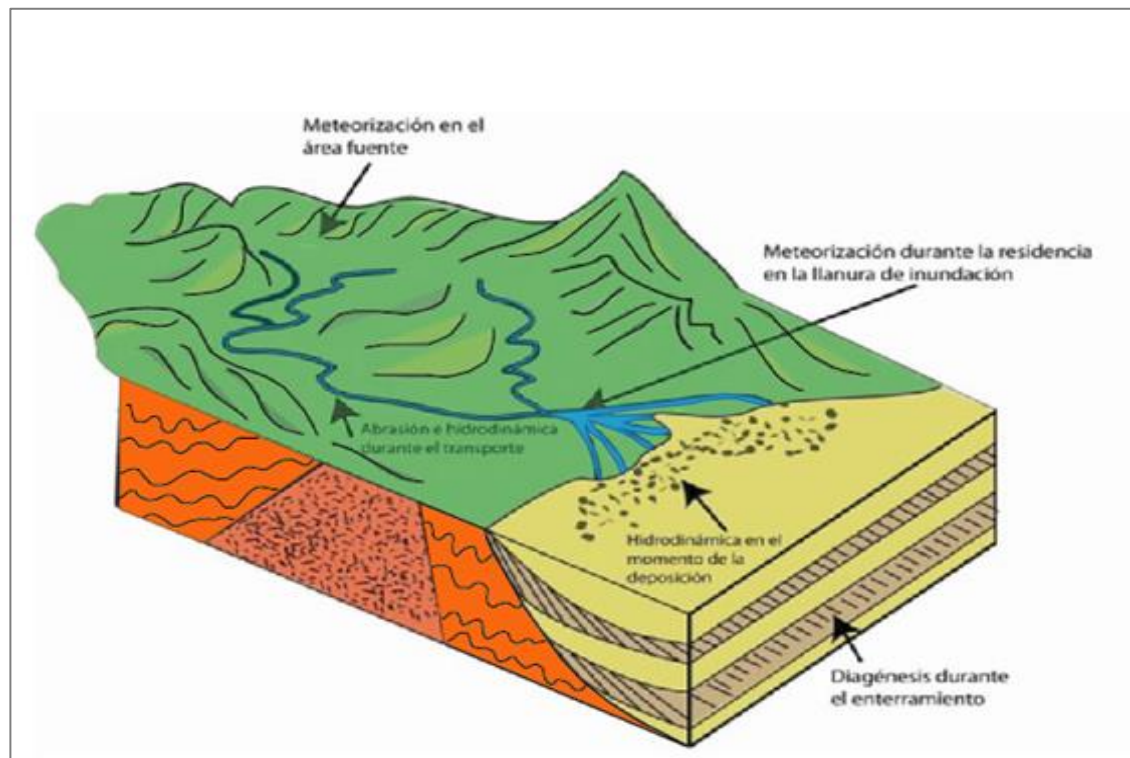


Figura 4. Esquema mostrando procesos que controlan ensamblajes de minerales pesados en areniscas. Fuente: Modificado de Morton & Hallsworth, 1994.

Procesos hidráulicos, ya que los minerales pesados son más densos que los granos de cuarzo y feldespatos, su comportamiento es diferente durante el transporte y depositación, que depende de la cantidad de granos que haya en el flujo, la naturaleza del medio de transporte (agua, aire) y el modo de dispersión dentro del medio de transporte (Morton & Hallsworth, 1999), es por este factor que se considera la granulometría entre 75 y 150 μm para el conteo de minerales pesados, eliminando variaciones proporcionales, en la presente tesis.

Diagénesis, los minerales pesados reaccionan a la diagénesis por disolución de las fases inestables (conocido como solución intrastratal) y el crecimiento de minerales secundarios, que no tienen relación con la procedencia, pero indican el régimen diagenéticos.



Tabla 3. *Comparación de orden de persistencia de minerales pesados*

Patrón de estabilidad al desgaste por ácidos	Patrones de estabilidad al sepultamiento	Orden de persistencia
minerales TiO ₂	Apatito	Minerales
Zircón	Monazita	TiO ₂
Turmalina	Espinela	Zircón
Silimanita	Turmalina, Zircón	Turmalina
Andalusita	Cloritoides	Monazita
Kyanita	Granate	Granate
Estaurolita	Estaurolita	Apatito
Topacio	Kyanita	Estaurolita
Titanita	Titanita	Kyanita
Monazita	Epídota	Epídota
Granate	Anfíbol cálcico	Anfíbol
Epídota	Andalusita, Silimanita	cálcico
Anfíbol cálcico	Piroxeno	Andalusita
Ortopiroxeno	Olivino	Topacio
Clinopiroxeno		Titanita
Olivino		Clinopiroxeno
Apatito		Silimanita
		Ortopiroxeno
		Olivino

Fuente: Morton & Hallsworth, 1999.

2.2.2. Usos de los minerales pesados.

Los minerales pesados pueden ser utilizados para variados estudios que ayudan a aumentar la consistencia de los trabajos de geología regional en general, correlaciones estratigráficas en cuencas sedimentarias para fines diversos (cartografía geológica regional y/o local). Además, se puede caracterizar las unidades de rocas mediante el agrupamiento de minerales pesados, con el fin de asignar la edad geológica a cada unidad de roca, es decir los minerales pesados servirá como una herramienta para asignar una posición estratigráfica mediante la caracterización de los minerales pesados de cada unidad geológica. Los estudios de los minerales pesados nos ofrecen una amplia variedad de análisis tales como dataciones U-Pb, Trazas de fisión (FT) y (U-Th) /He en zircones o apatitos y análisis químicos de granos individuales (por ejemplo, microsondas electrónicas, XRF, ICP, etc.). Los espectros (o concentraciones) de minerales pesados resultan ser indicadores de proveniencia sedimentaria, exhumación, levantamiento de

bordes de cuenca sedimentaria, y así proveen información clave para la reconstrucción de las condiciones geográficas existentes en la superficie terrestre a lo largo del tiempo geológico sobre la paleografía, en esta tesis profundizaremos este tema.

2.2.2.1. Rutilo (*Dióxido de titanio*).

De uso importante en la industria, ya que es la base del titanio metálico. Igualmente se emplea en soldadura para la elaboración de electrodos con material de aportación generalmente de acero al carbono, como recubrimiento y protección de dicho material base. Los principales proyectos de explotación de titanio son SCM White Mountain Titanium – Valle de Huasco, Cerro Blanco (Figura 5), ambos se encuentran en Chile.



Figura 5. Unidad Minera de Cerro Blanco en Chile “GOLDCORP INC”. El cual busca explotar y procesar rutilos (dióxido de titanio).
Fuente: GOLDCORP INC.

2.2.2.2. Zircón.

Este mineral es utilizado con bastante frecuencia en la industria como materia prima en la fabricación de aceros especiales, abrasivos y reactores de aviones. Otro de sus grandes usos es en la joyería donde es utilizado como imitación del diamante.

Yacimientos de zircón en el mundo. La fuente de mayor importancia de zircones es Camboya cerca de la frontera con Vietnam, estos son utilizados principalmente en la



joyería. Otros productores de zircón son Sri Lanka, Tailandia, Myanmar, Australia, Estados Unidos, Sudáfrica y Francia.

2.2.3. Estabilidad química de los minerales pesados.

La estabilidad de especies particulares de minerales pesados puede ser determinada por el pH del ambiente geoquímico, composición iónica y el comportamiento de los minerales pesados es diferente en ambientes ácidos y alcalinos (Mange & Maurer, 1992), en la Tabla 4, se muestra los principales minerales pesados estables presentes en el área de investigación.

Tabla 4. Características generales de principales minerales pesados

Mineral	Composición	ρ (g/cm ³)	Estabilidad	Rocas asociadas más comunes
Zircón	ZrSiO ₄	4.6 - 4.7	Ultraestable	Rocas de origen de la corteza, rocas granitoides, orto-paragneis, esquistos
Apatito	Ca ₂ (F, Cl, OH) (PO ₄) ₃	3.1-3.35	Estable	Granitos, carbonatitas, venas hidrotermales, pegmatitas.
Rutilo	TiO ₂	4.23-5.5	Eltraestable	Esquistos, gneis, anfibolitas, plutónicas ricas en hornblenda, pegmatitas.
Turmalina	Na(Mg, Fe, Mn, Al) ₃ Al ₆ (Si ₆ O ₁₈)(BO ₃) ₃ (OH,F) ₄	3.03-3.25	Ultraestable	Granito, pegmatitas granito, esquistos, gneises, filitas.
Granate (Almandina)	FeAl ₂ (SiO ₄) ₃	4.1- 4.3	Moderadamente estable	Rocas metamórficas, plutónicas, pegmatitas, variedades ultramáficas, volcánicos ácidos.
Anfíbol	(Na, K, B)0-1 (Na, Li, Ca, Mn, Fe+2, Mg) ₂ (Mg, Fe+2,+3, Mn, Al, Ti) ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₂ (OH, F, Cl) ₂	2.85-3.57	Inestable	Anfibolitas, gneises, granulitas, rocas ultrabásicas con metamorfismo.
Piroxeno (Enstatita)	Mg ₂ (Si ₂ O ₆)	3.21-3.96	Inestable	Rocas ultramáficas (peridotita, piroxenita, harzburgita, lherzolita, serpentinita, etc.), granulitas.
Sillimanita	Al ₂ SiO ₅	3.23- 3.27	Moderadamente estable	Rocas metamórficas de alto grado, gneises.
Titamita (esfena)	CaTi ₂ [SiO ₄](O, OH, F)	3.45- 3.55	Moderadamente estable	Pegmatitas, esquistos, gneis-granito, anfibolitas, rocas calco-silicatadas.
Epidota	Ca ₂ Fe ₃₊ ·Al ₂ O·OH(Si ₂ O ₇) (SiO ₄)	3.38- 3.49	Moderadamente estable	Esquistos verdes, hornfels, granito.

Fuente: Modificado de Mange & Maurer, 1992.



Los granos concentrados en areniscas que han pasado por prolongada abrasión y selección son predominantemente cuarzo, zircón, turmalina y rutilo. El índice ZTR es la combinación porcentual de zircón, turmalina y rutilo entre los minerales pesados transparentes omitiendo micas y especies autógenas e indica el grado de madurez de la roca y de los ensambles de minerales pesados en areniscas, usualmente excede a 90% en ortocuarzitas y en arcosas y grawacas es aproximadamente 2-39% (Hubert, 1962).

2.2.4. Parámetros que controlan la sedimentación de los minerales pesados.

Los parámetros más importantes que controlan la presencia y concentración de minerales pesados son:

2.2.4.1. La fisiografía y clima del área fuente.

Estos parámetros controlan la pre selección de los granos de minerales pesados durante la meteorización.

2.2.4.2. Abrasión y destrucción mecánica.

Ocurre durante el transporte, las cuales se relaciona con la resistencia de los granos al ser transportados.

2.2.4.3. Factor hidráulico.

Se desarrolla durante el transporte hidráulico, los efectos que causan son: el tamaño, forma y densidad de los granos de minerales pesados.

2.2.4.4. Post depositación y diagénesis.

Se puede discriminar mediante la estabilidad de los minerales pesados teniendo en cuenta lo siguiente:

- ✓ Concentración y acontecimiento de los minerales pesados en las diferentes rocas fuente.
- ✓ Desgaste de las rocas fuente
- ✓ Abrasión mecánica durante el sistema de transporte
- ✓ Procesos hidráulicos.



✓ Estabilidad de minerales pesados durante el enterramiento de diagénesis.

2.2.5. Concentración de los minerales pesados en las diferentes rocas fuentes.

Las rocas fuente pueden provenir de diferentes ambientes los cuales son:

2.2.5.1. Corteza Oceánica.

Comúnmente incluye a mantos de peridotitas en la base con gabros, anfibolitas, granitos potásicos y una delgada capa de rocas sedimentarias. En el manto oceánico presenta altos contenidos de minerales olivino seguido de ortopiroxenos, clinopiroxenos, espinela, piroxenos, anfíboles y epidotas.

2.2.5.2. Arcos Volcánicos.

Constituida por batolitos de composición gabro a graníticos de composición calcoalcalino, lavas basálticas a riolíticas y depósitos piroclásticos en la superficie (Gill, 1981), presentando mayor contenido de hornblenda, epidota y piroxeno.

2.2.5.3. Corteza continental.

Se caracteriza por la complejidad de estructuras y litológica, la composición de las areniscas es muy compleja por estar conformado de múltiples detritos de variados orígenes.

Los diferentes ensambles de minerales pesados de las rocas estudiadas son producidos por la geodinámica (Garzanti & Ando, 2007). De acuerdo a las regiones geodinámicas los principales sedimentos derivan de los bloques continentales, arcos

magmáticos o de un régimen orogénico. Limonta (2015) elaboro un esquema de proveniencia de las regiones geodinámicas (Figura 6).

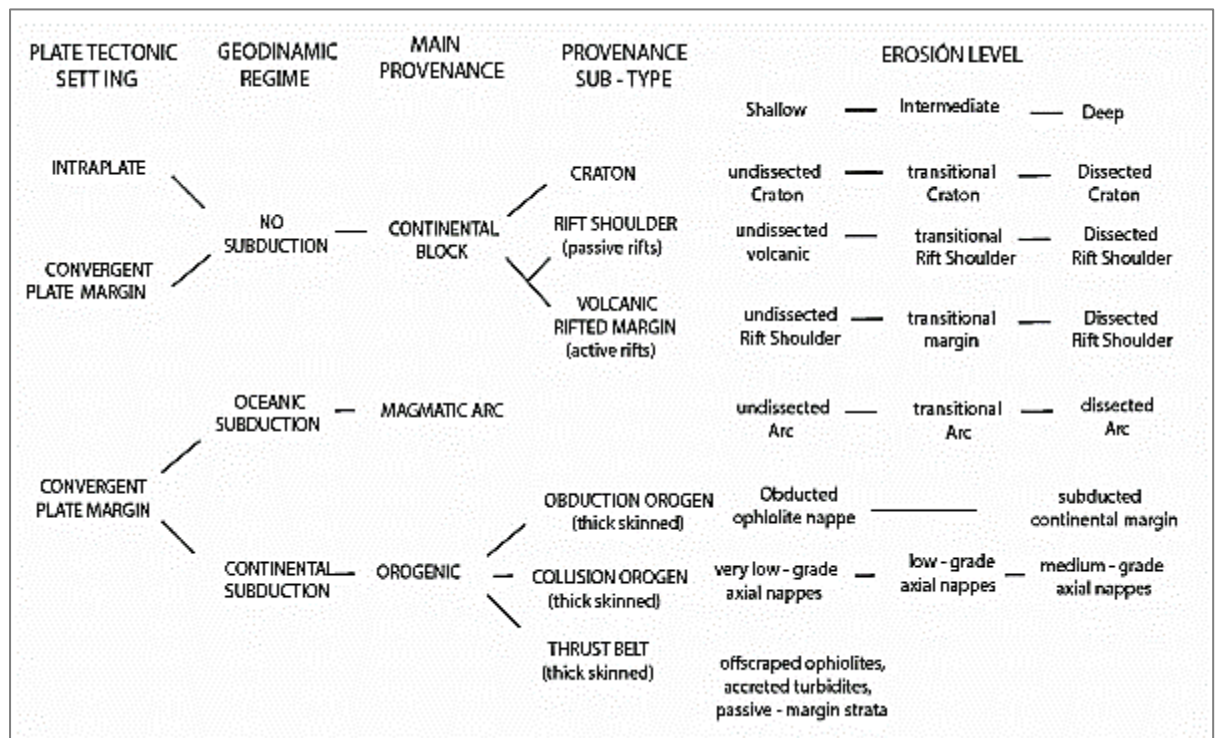


Figura 6. Esquema de proveniencia de las Regiones Geodinámicas.
Fuente: Limonta, 2015.

2.3. PETROGRAFÍA SEDIMENTARIA

2.3.1. Clasificación de areniscas.

En los estudios de proveniencia sedimentaria, las areniscas resultan ser muy útiles para reconstrucciones paleotectónicas y paleogeográficas, debido a la gran cantidad de información que contienen en referencia a los análisis microscópicos de sus granos (Zuffa, 1985).

Para clasificar las areniscas de acuerdo a su base composicional existen diversos criterios; sin embargo, un diagrama ternario propuesto por McBride (1962) resultó ser el más sofisticado debido a que considera los componentes esenciales exceptuando minerales accesorios e intraclastos. La base de esta clasificación considera los tres tipos principales de componentes arenosos (Q, cuarzo; F, feldespatos y L, fragmentos de

líticos) y en algunos el contenido en matriz (fracción inferior a 30 μm). Para usar este diagrama (Figura 7), es necesario contar en la sección delgada al microscopio entre 200 y 500 granos de minerales, 15 por cada una de las muestras. Este número es representativo y es estadísticamente confiable (Dickinson, 1970). El total de la suma de los componentes QFL debe dar 100%.

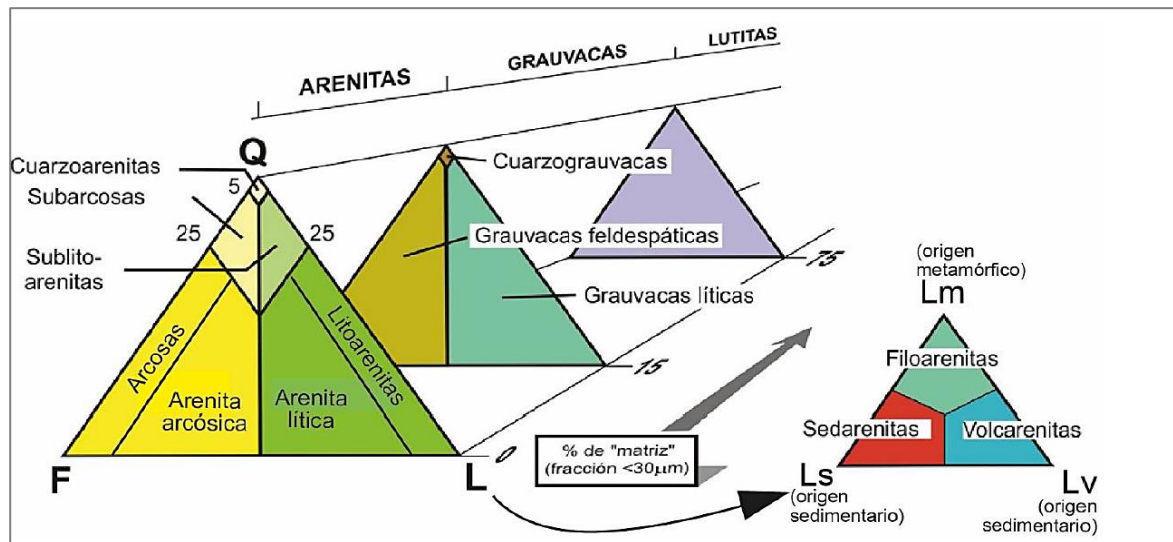


Figura 7. Clasificación de areniscas (arenitas y grauvacas) de acuerdo a su composición. Adaptada de Dott (1964), Dickinson (1970) y Pettijohn et al. (1987). Izquierda: Q = cuarzo, F = feldespatos y L = fragmentos líticos. Derecha: Lm= fragmentos líticos derivados de rocas metamórficas, Ls= fragmentos líticos derivados de rocas sedimentarias, y Lv= fragmentos líticos derivados de rocas volcánicas pesados en areniscas.

Fuente: Modificado de Morton & Hallsworth, 1994.

2.3.2. Método de conteo de granos Gazzi- Dickinson.

El análisis petrográfico sedimentario es utilizado como una herramienta para conocer la composición mineralógica y estructural a escala microscópica de rocas detríticas (areniscas). Las areniscas maduras a medianamente maduras (poco porcentaje de matriz, poco reemplazamiento o alteración post depósito) de tamaño de grano fino a medio son ideales para estudios de proveniencia. La composición va a depender principalmente de la naturaleza de la fuente del ambiente tectónico de su origen y del depósito (Sánchez & Centeno, 1994). Cabe mencionar que han propuesto técnicas petrográficas para las fracciones de grano más fino como limolitas y lutitas (Bangs & Basu, 1994).

Estos estudios se realizan en las areniscas (Figura 8) mediante el método estadístico de Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al.,1984), que consiste en el análisis cualitativo y cuantitativo para la caracterización petrográfica sedimentaria (Figura 8). El análisis cualitativo consiste en una observación cuidadosa y detallada para identificar y describir la composición, matriz, cemento, textura, etc. El análisis cuantitativo consiste en el conteo modal de los granos de cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos líticos (L) (Dickinson,1970); y con apoyo de los manuales de Mackenzie (2003). Con el objetivo de clasificar las rocas siliciclasticas según el tamaño de granos e identificar los componentes mineralógicos. Se deben considerar teóricamente en contar 300 o 600 granos por muestra y partículas mayores a 0.0625 mm de diámetro con respecto al porcentaje de matriz y/o cementante.

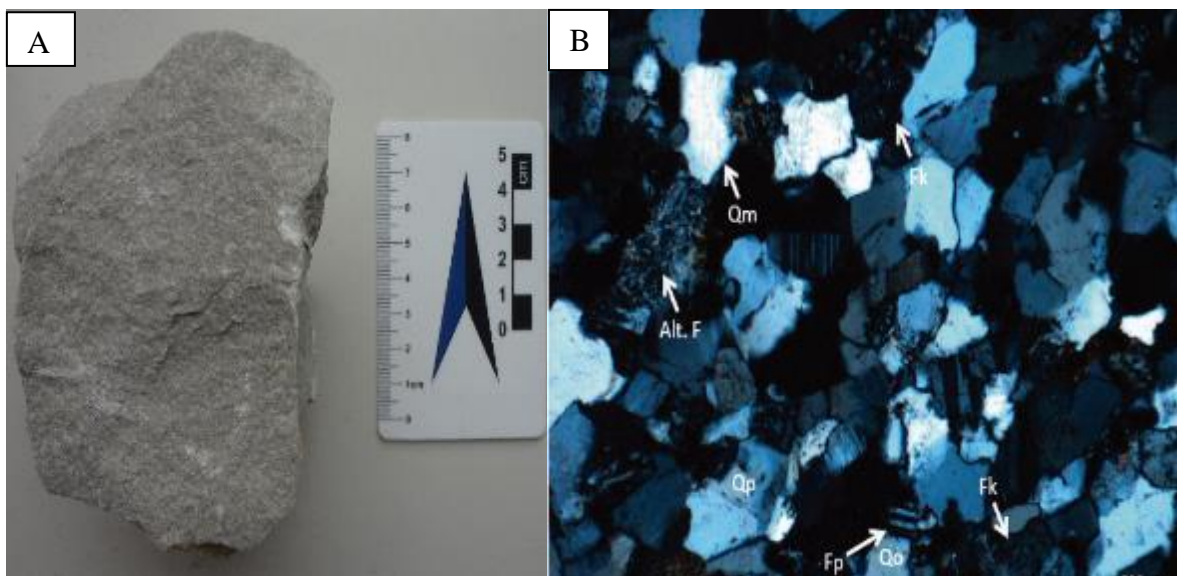


Figura 8. Muestra de mano de arenisca y sección delgada. A) Arenisca cuarzosa de grano medio extraída del río Manchire. B) Arenisca cuarzosa, vista en el microscopio en nicoles cruzados.
Fuente: Propia.

Se utiliza la plantilla sugerida en el Manual N°4: Clasificación de rocas sedimentarias (INGEMMET, 2015) (Ver Anexo A), las cuales fueron empleados en esta tesis para ordenar los datos producidos. Esta plantilla es utilizada para el relleno de datos y las características petrográficas que se observan en las láminas delgadas.



Parámetros empleados en los diagramas ternarios:

Qmr = Cuarzo monocristalino de extinción recta.

Qmo = Cuarzo monocristalino de extinción ondulante

Qp = Cuarzo policristalino.

Fp =Plagioclasa.

Fk = Feldespato potásico.

Ls = Lítico sedimentario.

Lm = Lítico metamórficos.

Lv = Lítico volcánicos.

MP = Minerales pesados.

Una vez hecho el análisis modal los datos se representan en el diagrama QFL. En la Figura 9, se muestra el diagrama de clasificación de areniscas propuestos por Dickinson (1970) y Pettijohn (1987). Las areniscas pueden estar clasificadas como:

- a) Cuarzoarenita (arenita cuarzosa o arenisca cuarzosa)
- b) Sublitoarenita
- c) Arcosa
- d) Arcosa lítica
- e) Litoarenita feldespática

f) Litoarenita

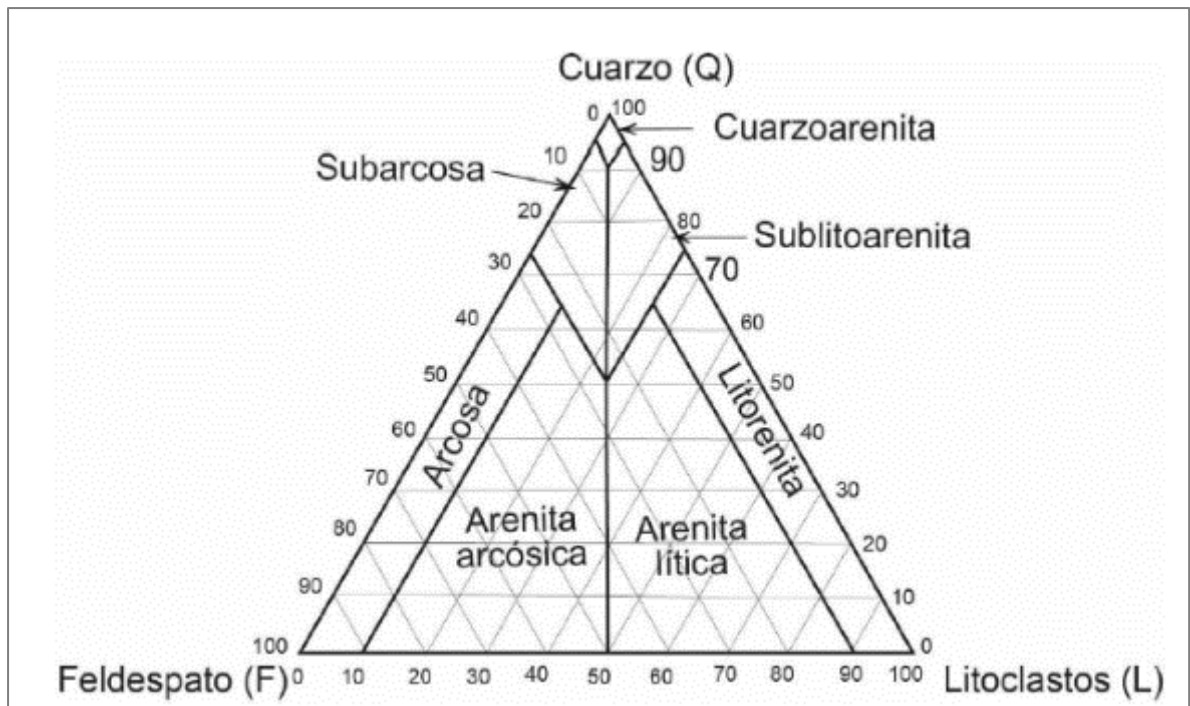


Figura 9. Clasificación de areniscas de acuerdo a su composición. Izquierda: Q = Cuarzo, F = Feldespatos y L = Fragmentos líticos.
Fuente: Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970).

Con estos resultados se puede determinar la proveniencia de depósitos clásticos en muy variados ambientes de sedimentación. Además, se puede determinar relieve y entorno tectónico en relación con la tectónica de placas.

2.4. PROVENIENCIA SEDIMENTARIA ASOCIADO A UN RÉGIMEN TECTÓNICO

Los datos obtenidos a partir del análisis modal detrítico de las areniscas deben ser ploteados en los diagramas de proveniencia de Dickinson et al. (1985), (Figura 10). En este diagrama propone 3 ambientes tectónicos.

2.4.1. Bloques Continentales.

Podemos encontrar dos ambientes dentro de los bloques continentales (Figura 10).



Bloques continentales de Cratón interior, son las partes más antiguas que los continentes o fragmentos de Pangea. Se trata de zonas llanas o de relieve bajo, con un margen pasivo en la zona costera.

Basamentos ascendentes, son áreas de extensión litológica localizada y caracterizada por una depresión central, flancos levantados y adelgazamiento cortical. Se trata de las zonas de rift continentales.

2.4.2. Arcos Magmáticos.

Alineamiento de volcanes que ocurre en los límites de las placas tectónicas (Figura 10). Se produce una gran cantidad de aporte de material volcánico tanto epiclásico (transporte por agua), como piroclasto (transporte por el aire). Estos materiales se acumulan en una serie de cuencas que son: las cuencas de antearco, trasarco, intra-arco y la zona de la fosa.

2.4.3. Orógenos reciclados.

Comprenden diversos entornos tectónicos, en los cuales las rocas sedimentarias y/o metamórficas han sido fuertemente plegadas, falladas y levantadas, constituyéndose área fuente (Figura 10). Tenemos básicamente tres tipos de tectonismo donde se producen estos fenómenos.

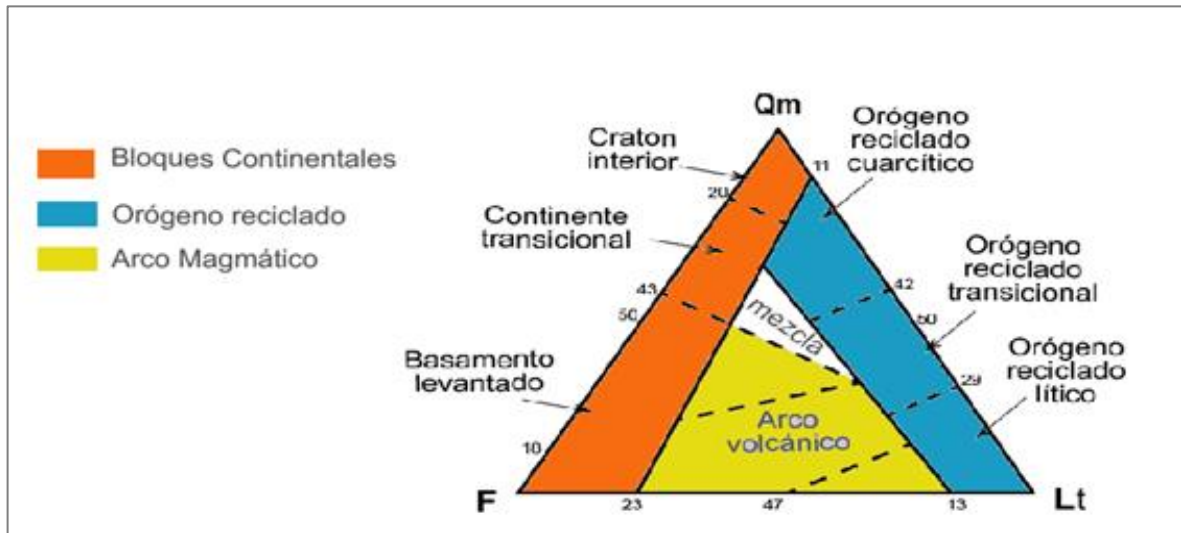


Figura 10. Diagrama ternario de ambientes tectónicos. Qm= cuarzo monocristalino (Qmr +Qmo) (Qmr =cuarzo monocristalino de extensión recta, Qmo = cuarzo monocristalino de extensión ondulante), F= feldespato total (K+ P) (K= feldespato potásico, P = plagioclasa), Lt = fragmentos líticos totales (Lv+Ls+Lm+Qp) (Qp = cuarzo Policristalino, Lv = fragmentos líticos volcánicos, Ls= fragmentos líticos sedimentarios y Lm= fragmentos líticos metamórficos.

Fuente: Dickinson, 1985.

Tabla 5. Determinación de proveniencia y ambiente tectónico a partir de composición QFL. Consiste en un resumen de la proveniencia y ambientes a partir de la composición de cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos líticos (L)

Tipo de procedencia	Ambiente tectónico	Composición de areniscas
Cratón estable	Plataforma estable o en el interior del continente	Areniscas cuarzosas (ricas en Qt) con altas relaciones Qm/Qp y K/P.
Basamento levantado (Basament uplift)	Borde de rift o ruptura transforme	Areniscas cuarzofeldespáticas (ricas en Qm y F) con bajas concentraciones de Lt y relaciones similares de Qm/F y K/P similares a las de fuente de aporte
Arco magmático	Arco de isla o Arco continental	Areniscas volcanoclásticas y feldespatolíticas (ricas en F) con altas relaciones de P/K y Lv/Ls. Si están expuestas rocas plutónicas, entonces las areniscas son cuarzofeldespáticas (ricas en Qm y F).
Orógeno reciclado	Complejos de subducción o cinturones de pliegues y cabalgaduras	Arenisca cuarzolíticas (ricas en Qt y Lt) con bajas concentraciones de F y Lv y relaciones variables de Qm/Qp y Qp/Ls.

Fuente: Dickinson, 1985.

2.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

2.5.1. Proveniencia sedimentaria.

Se refiere al estudio que se encarga de determinar de dónde derivan los sedimentos.



2.5.2. Fuentes de aporte.

Los cuerpos de roca (Ígneo, sedimentario y/o metamórfico) o las formaciones que sufrieron erosión y que han provisto de sedimentos que aportan al relleno de una cuenca sedimentaria.

2.5.3. Mineral pesado.

Minerales accesorios de alta densidad constituyentes de sedimentos silici-clásticos en porcentajes rara vez mayor al uno por ciento y presentes en variedad de tipos de roca como componentes esenciales o accesorios tales como anfíboles, piroxenos, micas, entre otros. Estos minerales son más resistentes a la erosión, se encuentran diseminados y tienen densidades mayores a 2.87 g/cm³ (Mange & Maurer, 1992).

2.5.4. Monocristalino.

Se utiliza este término únicamente para los granos de cuarzo constituidos por un único cristal, o con presencia de otra fase mineral en porcentaje inferior al 10 % del total del grano (Basu, 1975).

2.5.5. Policristalino.

Usado para los granos de cuarzo constituidos por dos o más unidades cristalinas por grano con distinta orientación óptica (Basu, 1975).

2.5.6. Cuarzo, feldespato y litoclasto (QFL).

Es la abreviación del diagrama ternario Cuarzo-Feldespatos-Fragmentos líticos usado para plotear cantidades porcentuales de estos granos y clasificar de manera práctica las areniscas, grawacas y arcosas. (Dickinson, 1970).

2.5.7. Orógeno.

Un orógeno (oroclinal) es en el sentido amplio, una curva en una cadena de montañas. El término oroclinal describe “un sistema orogénico que ha sido flexionado horizontalmente hasta tener la forma de una herradura o de un codo” Carey (1955).



2.5.8. Cuenca Arequipa.

Es un espacio de acomodamiento elongado (NO-SE) que comenzó a recibir aportes sedimentarios en el Jurásico inferior, con la depositación de secuencias volcánicas y detríticas, carbonatadas luego fue llenada por sedimentos turbidíticos y siliciclasticas. Probablemente está limitada al Noreste por el (aun interpretado) alto estructural Cusco-Puno, que lo separa de la cuenca sedimentaria Putina y posiblemente al Norte por el (aun interpretado) alto estructural Totos-Paras, que lo separa de la cuenca Pucará (e.g. Carlotto et al., 2009; entre otros).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es exploratorio-experimental debido a que es la primera vez que se está realizando este tipo de investigación en esta parte de la Cuenca Arequipa. Con esto se plantea definir la proveniencia de los sedimentos de la Cuenca Arequipa Ayacucho, mediante el empleo de muestras representativas de la zona de estudio.

Para este trabajo se realizó la metodología cuantitativa debido que se han recogido datos cuantitativos. Se incluye el resultado del análisis estadístico, los cuales servirá para el análisis de las muestras recogidas.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño para este tipo de investigación es exploratorio - experimental, como se muestra en el flujograma a continuación (Figura 11).

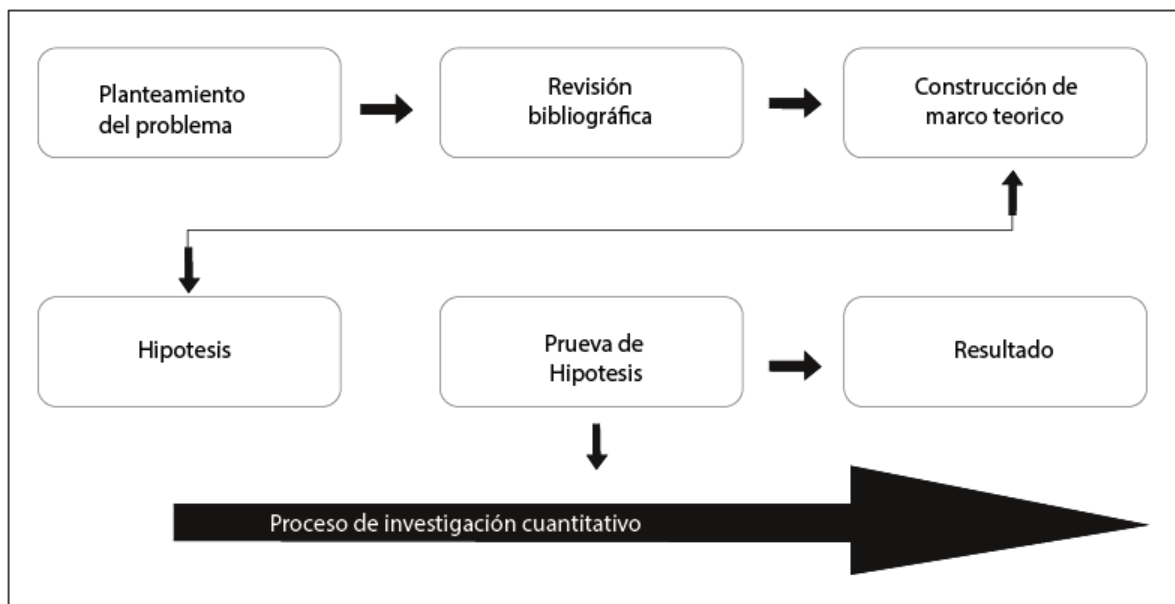


Figura 11. Diagrama de flujo del cronograma de trabajo.
Fuente: Propia.



3.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES

3.3.1. Variable independiente.

Análisis de minerales pesados de rocas detríticas al Norte de la Cuenca Arequipa.

3.3.2. Variable dependiente.

Proveniencia de sedimentos.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población.

Cuadrángulo de Huancapi 28 ñ.

3.4.2. Muestra.

Rocas Mesozoicas.

3.5. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

Se aplicó el método inductivo, debido a que a partir de los datos se llega a la conclusión. Para esta tesis se empleó las siguientes técnicas:

a) Análisis de minerales pesados.

Se utilizó como guía el protocolo de separación de minerales pesados para estudio de procedencia sedimentaria INGEMMET (2015).

b) Análisis modal de areniscas.

3.5.1. Muestras para análisis de minerales pesados.

Consistió en tomar adecuadamente muestras principalmente de areniscas y otras rocas ígneas y metamórficas de los cuales se les extraerá sus minerales accesorios, entre ellos sus minerales pesados, es decir tanto de las potenciales rocas fuentes (Pre-Mesozoico) como las rocas detríticas de la Cuenca Arequipa. Esto se realizará mediante el uso de un “liquido pesado” (Politungstato de sodio). Una vez separados los minerales pesados, se procederá al estudio petrográfico de estos mediante el uso del microscopio petrográfico. El estudio petrográfico sugiere identificar grano por grano, verificando sus propiedades ópticas (Propuestas por Mange & Maurer, 1992) y cuantificarlos (Hasta $n =$



250). Cada población de minerales pesados de cada muestra será considerada como “espectro” y se mostrarán en el capítulo V de esta tesis a partir de tablas de Excel y diagramas de espectros.

3.5.2. Muestras para análisis modal de areniscas.

El muestreo se basó en las areniscas (Sean grauvacas o litoarenitas) y consistió en definir su composición mineralógica y estructural a escala microscópica especialmente de minerales ligeros mediante el conteo e identificación de los granos en láminas delgadas. Una cantidad recomendable de granos es de 300 a 600 (Según Dickinson, 1970) el cual consiste en identificar los granos de cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos líticos (L). Estos datos son registrados y contabilizados en plantillas sugeridas en el Manual N°4 (Clasificación de rocas sedimentarias, INGEMMET, 2015).

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA TOMA DE DATOS

Las técnicas e instrumentos de la toma de datos para este trabajo se basaron en tres etapas que consiste en:

- ✓ Etapa preliminar a la salida de campo (gabinete).
- ✓ Etapa de campo.
- ✓ Etapa post-campo (gabinete).

3.6.1. Etapa preliminar de gabinete.

En el gabinete (etapa pre-campo) se realizó la búsqueda, revisión y análisis exhaustivo de la información existente sobre los trabajos realizados en el área, así también de estudios que comprenden el mismo fundamento en otras partes del mundo, tomando en consideración artículos, boletines de congresos, simposios y foros del INGEMMET, journals geocientíficos, Sociedad geológica del Perú, boletines informativos de los servicios más prestigiosos, entre otros. Por otra parte, también se ha tomado en



consideración bases de datos sobre sobre dataciones radiométricas necesarias para la interpretación final.

Después de revisar toda la información accesible, se ubicó los afloramientos de las unidades litoestratigráficas de las posibles rocas fuentes (Grupo Excelsior y Grupo Mito Volcánico).

Los criterios de coleccionar muestras para estudios de procedencia sedimentaria parte de los criterios que tenemos para reconocer una unidad litoestratigráfica. Por ejemplo, sabemos que una unidad litoestratigráfica es un cuerpo de roca de forma tabular que es reconocible en el campo por sus atributos litológicos, y puede ser delimitada por estas propiedades.

Se tomó en cuenta los límites y adecuadamente se toma muestras desde el inicio (e.g. Parte inferior de la Formación Labra) y otra muestra en la parte superior.

En una cuenca sedimentaria (e.g. Cuenca Arequipa), la composición mineralógica y hasta posiblemente las facies sedimentarias van a variar a lo largo de la cuenca sedimentaria, dependiendo de cuales sean las potenciales rocas fuentes que han generado los sedimentos (Morton & Hallsworth, 1999). Eso se debe a que las potenciales rocas fuentes son distintas a lo largo de la cuenca sedimentaria, o posiblemente a que se trate de arreglos tectónicos distintos dentro de la misma cuenca sedimentaria.

Comúnmente en la unidad litoestratigráfica de la Formación Labra se tienen variados cambios de facies. Es allí donde se pone énfasis en tomar muestras de aquellos cambios.

Como procedimiento complementario a las observaciones macroscópicas anteriormente descritas, se considera pertinente la toma de muestras para un análisis de laboratorio a detalle. Al igual que el proceso de fotointerpretación geológica, el levantamiento de columnas estratigráficas, ya que son base fundamental sobre la cual se



toman las decisiones para saber dónde se recolectarán las muestras de roca con énfasis a una característica geológica peculiar, o un nivel estratigráfico que no haya sido reportado o que carezca de información petrográfica.

3.6.2. Etapa de campo.

En primer lugar, se ubicó las zonas donde se encuentran aflorando las rocas fuente (determinadas en gabinete). Luego se realizó la toma de muestras.

3.6.2.1. Colecta de muestras.

Para la elaboración de esta tesis se colecto muestras para cumplir dos puntos importantes:

- ✓ El análisis de minerales pesados.
- ✓ Estudios petrográficos de conteo modal.

Para el análisis de minerales pesados, se colecto en campo al menos 4 kg de muestra de rocas debidamente codificado en sus respectivas bolsas. A la vez se ubicó las muestras en la columna litoestratigráfica generalizada y en el mapa geológico (Figura 12). Es necesario subdividir este grupo de muestras en:

- ✓ Muestras de las potenciales rocas fuente (pre-Mesozoico), considerando al Grupo Excélsior y Grupo Mitu volcánico.
- ✓ Muestras detríticas de la cuenca Arequipa, considerando al Grupo Yura, Formaciones Puente, Cachíos, Labra y Hualhuani.

Se tomó en cuenta criterios geológicos para coleccionar muestras para el estudio de procedencia sedimentaria y el procesamiento de minerales pesados, en el cual se tomaron muestras en la parte inferior y la otra muestra en la parte superior de la unidad litoestratigráfica, tomando muestras de areniscas grises algunas blanquecinas de preferencia se tomó de grano medio, sin embargo, lo ideal era que sean de grano grueso, pero no se pudo encontrar para su muestreo (Figura 12).



Para los estudios petrográficos de conteo modal, se consideró tomar una muestra en la misma ubicación donde se colectó las muestras para el análisis de minerales pesados de rocas detríticas de la Cuenca Arequipa, con el objetivo de fortalecer nuestras observaciones y el número de datos.

La codificación se realizó de la siguiente manera, primero el código del proyecto (GR40A), luego el año de colecta (15), el número de muestra (1,2, etc.) y la codificación dependiendo del estudio (“a” estudio petrográfico y “b” análisis de minerales pesados).

El resumen de las muestras, el lugar donde se tomaron las muestras y el tipo de análisis realizados a cada muestra se detalla en la Tabla 6 y Anexo B.

Tabla 6. Resumen de las muestras colectadas en la salida de campo. Se detalla la ubicación y el tipo de análisis que se realizara a cada muestra

Unidad	Muestra	Este (WGS84, 18S)	North (WGS84, 18S)	Cota	Litología	Localidad	Minerales pesados	Petrografía
Hualhuani (parte superior)	GR40A-15-004b	584034	8471346	4371	Arenisca	Tayapampa (Cerro Chamlantioe)	x	x
Hualhuani (parte superior)	GR40A-15-033b	571934	8476421	3008	Arenisca	Río Caracha	x	x
Hualhuani (parte inferior)	GR40A-15-032b	572591	8476399	2895	Arenisca	Río Caracha	x	x
Hualhuani (parte inferior)	GR40A-15-027b	574527	8485702	2787	Arenisca	Río Caracha	x	x
Labra (parte superior)	GR40A-15-007b	575828	8470144	3519	Arenisca	Carapo (Río Nunumhuayoc)	x	x
Labra (parte superior)	GR40A-15-012b	573295	8477671	2910	Arenisca	Río Caracha	x	x
Labra (parte inferior)	GR40A-15-001b	587393	8478368	4025	Arenisca	Orcco Huasi	x	x
Labra (parte inferior)	GR40A-15-029b	574158	8484681	2783	Arenisca	Río Caracha	x	x
Cachitos (parte superior)	GR40A-15-013b	573255	8479201	2896	Arenisca	Manchire (Quebrada Ceuellumayo)	x	x
Cachitos (parte superior)	GR40A-15-030b	572734	8479675	2895	Arenisca	Río Caracha	x	x
Cachitos (parte inferior)	GR40A-15-035b	571474	8469590	3109	Arenisca	Las Mercedes (Quebrada Poccohuayoc)	x	x
Puente (parte superior)	GR40A-15-094b	571644	8469999	3090	Arenisca	Amazona Pampa (Río Caracha)	x	x
Grupo Mitu Volcánico	GR40B-16-074b	605811	8486477	2539	Andesita	Río pampas	x	x
Grupo Mitu Sedimentario	GR40B-16-103b	578212	8493039		Arenisca	Río pampas	x	x
Unidad San Miguel Ongoy	GR40B-16-009b	600883	8495088	3731	Granito	Lindero Pata (Cerro Cooriscamco)	x	x
Grupo Excésior	GR40B-16-102b	554876	8496095	3176	Esquistos	Cocas	x	x

Fuente: Propia.

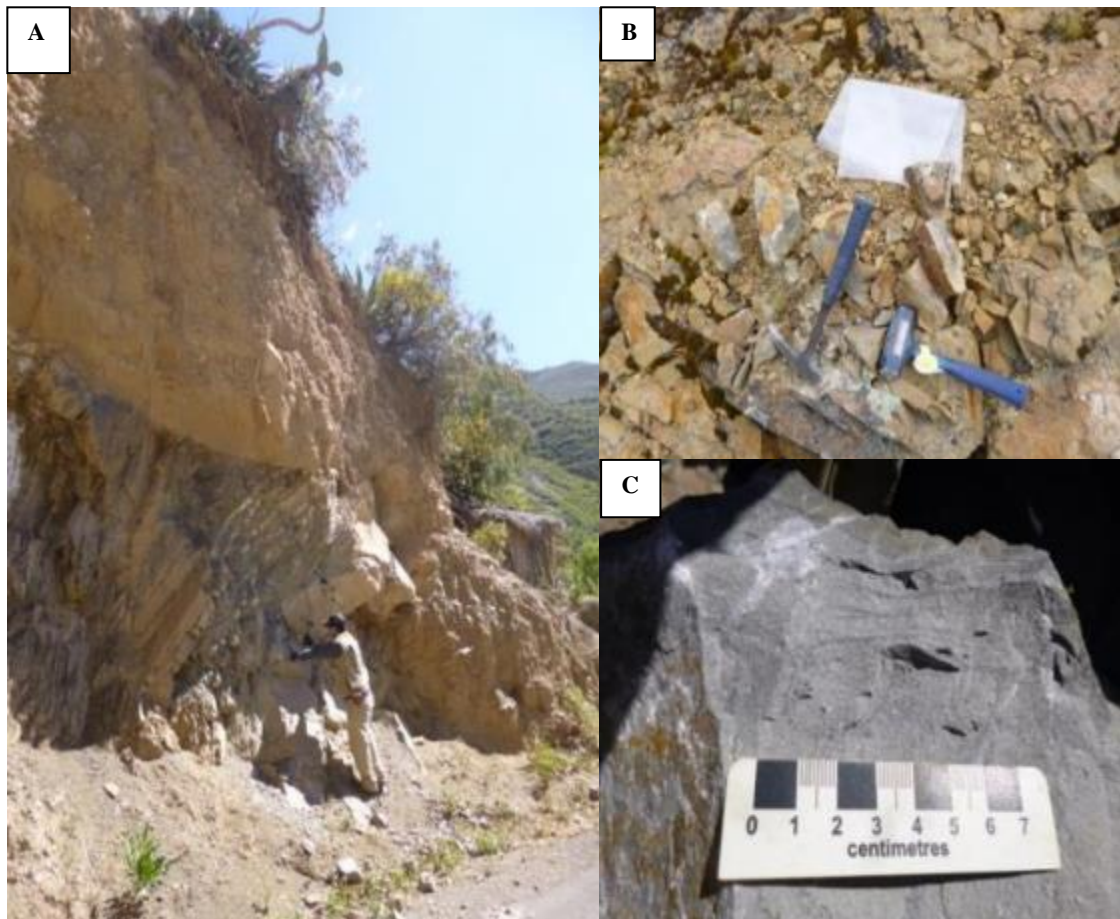


Figura 12. Colecta de muestras de areniscas. A) Afloramiento de la parte inferior de la Formación Labra, cerca al poblado de Manchire. B) Fragmentos de muestras de areniscas cuarzosas que corresponden a la Formación labra, para el estudio de minerales pesados. C) Muestra de mano de arenisca cuarzosa para estudio petrográfico que corresponde a la Formación Labra.
Fuente: Propia.

3.6.3. Post-campo.

Esta etapa consiste en procesar las muestras tomadas de campo, siendo esta etapa dividida en tres sub-etapas importantes, la primera de chancado y la segunda de separación de minerales pesados y la tercera de producción de slides con minerales pesados, listos para ser observados al microscopio petrográfico. En paralelo, se ha realizado cortes de secciones delgadas para análisis petrográfico (QFL). Aunque el análisis de minerales es el primer objetivo de esta tesis, la aplicación de estas técnicas paralelas sirve para confirmar nuestras observaciones obtenidas en base a los espectros de minerales pesados.



3.6.3.1. Técnicas de procesamiento de datos.

3.6.3.1.1. Procesamiento de minerales pesados.

Una vez que se tiene las muestras colectadas, se procedió a su tratamiento para triturar las muestras y obtener fracciones muy finas y controladas (hasta $\sim 63 \mu\text{m}$ de tamaño de grano). El objetivo es obtener la mayor cantidad de minerales pesados de las muestras. Los procedimientos deben seguirse estrictamente para evitar la contaminación y asegurar el éxito de la obtención de la fracción de minerales requeridos. Los procedimientos para obtener los minerales pesados se pueden clasificar en 5 partes principales:

- a) Trituramiento de las muestras
- b) Tamizado de las muestras
- c) Baño en ácido acético
- d) Uso de líquido pesado (politungstato de sodio, ps)
- e) Preparación de slides con minerales pesados

Durante la etapa del Trituramiento de muestras, es donde existe el mayor riesgo de contaminación. Por lo tanto, se sugiere elaborar los trabajos con mucha cautela.

a) Trituramiento de las muestras.

Se utilizó la máquina trituradora con mandíbulas (tambores) o Chancadora secundaria (Figura 13) para pulverizar la muestra hasta la fracción de ~ 250 a ~ 75 micras.



Figura 13. Maquinas que se usaron para el Trituramiento de las muestras. A) Chancadora secundaria Jaw crusher” o trituradora con mandíbulas en el laboratorio de preparación de muestras del INGEMMET. B) Vista detallada de la chancadora secundaria (Fuente: Propia).

Las maquinas deben ser detalladamente limpiadas antes y después de su uso. En el caso de la trituradora con mandíbulas, se desarma la parte superior usando las herramientas y limpiando la mandíbula móvil con un cepillo de metal y alcohol. También se limpió la canasta de recepción de sedimentos. Posteriormente se aplicó aire comprimido para eliminar las partículas de muestra que queden atrapadas en las trituradoras.

La Dirección de laboratorios del INGEMMET cuenta con dos tipos de trituradoras, consideradas como “primaria” y “secundaria” en este caso se utilizó la trituradora secundaria (Figura 14) y la trituradora primaria no se usó porque los fragmentos de roca eran $< 5\text{cm}$ de diámetro.



Figura 14. Instrumentos y materiales que se utilizaron para la trituración. 1) Cuchara metálica. 2) Rodillo metálico. 3) Alcohol. 4) Papel toalla.
Fuente: Propia.

b) Tamizado de las muestras.

Usualmente las trituradoras no ofrecen el mismo tamaño de grano en la muestra como resultado. Siempre hay sedimentos que alcanzan dimensiones de hasta más de $\sim 250 \mu\text{m}$. Una vez obtenida la fracción triturada, se requiere organizar la muestra en función a su granulometría. Por lo tanto, la muestra debe separada con tamices (Figura 15). Es decir, mediante mallas metálicas con tamaños estándares se logra la separación. Se recomienda trabajar con los tamices de $250 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, y finalmente $75 \mu\text{m}$ (mallas 10, 60, 100 y 200).



Figura 15. Equipos e instrumentos para proceso de tamizado. A) Maquina vibradora, donde se apilan los tamices y se acelera el proceso de tamizado. B) Tamices de diferentes medidas estándares.
Fuente: propia.

Después de obtener la muestra triturada, se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Debido a que el triturado usualmente no es perfecto y suelen quedar partículas más grandes que la preferida, se inicia el tamizado con la malla de tamaño 500 μm . Una vez pasada la muestra por la malla 500 μm , se debe separar la fracción $>500 \mu\text{m}$ para secarla (~24 horas en horno con temperatura $\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ como máximo) y guardarla en una bolsa con código indicando la fracción. Esta fracción de sedimentos podría usarse en el caso que las fracciones de menor granulometría contengan pobre contenido de minerales pesados.
2. Los sedimentos $<500 \mu\text{m}$ son nuevamente tamizados en la malla 250 μm (malla 60). De este modo, se obtendrán los sedimentos de tamaño mayores a 250 μm y menores de 500 μm (500-250 μm). Esta fracción de igual modo se separa, se seca, se etiqueta y se guarda hasta un posible tratamiento en el caso que la muestra de minerales pesados sea pobre.

3. Los sedimentos de granulometría menor a $250\ \mu\text{m}$ (menor a la malla 60) son pasados por el tamiz de $150\ \mu\text{m}$ (malla 100), de este modo quedan atrapados los sedimentos del rango $250\text{-}150\ \mu\text{m}$. Esta fracción es secada, guardada y codificada. De igual modo se les considera para una posterior búsqueda de minerales pesados, si es necesario.
4. Los sedimentos $<150\ \mu\text{m}$ son pasados por la malla de tamaño $75\ \mu\text{m}$ (malla 200), de modo que se obtiene la fracción $150\text{-}75\ \mu\text{m}$. Las arcillas no son necesarias en los estudios de minerales pesados, procedencia sedimentaria, y geoquímica y/o geocronología de minerales individuales; por lo tanto, fueron desechadas.

Posteriormente después de la separación con los diferentes tamices, pasamos al tamizado en húmedo con la malla 200 lavando los sedimentos con agua (Figura 16), de tal manera que solo quede granos de arena.

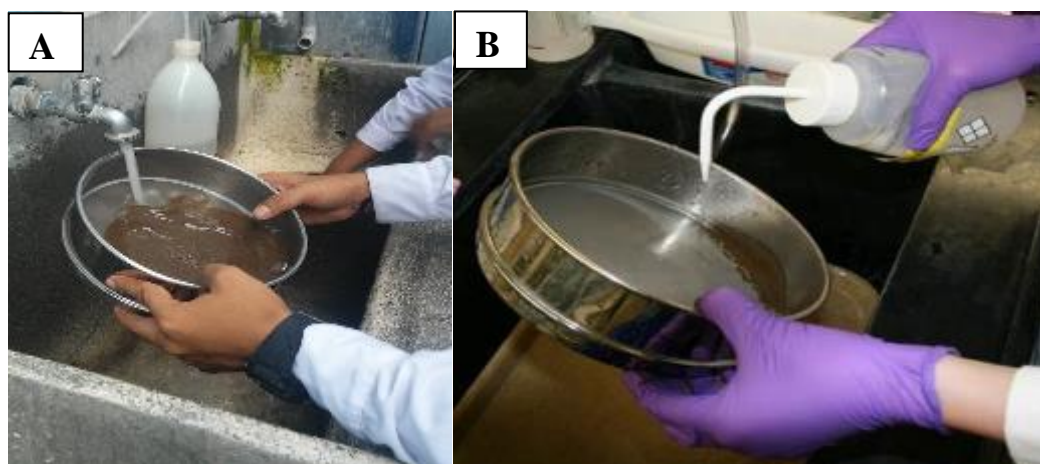


Figura 16. Tamizado de sedimentos usando chorros de agua.
Fuente: Propia.

Al terminar la labor de tamizado, los tamices necesitan ser limpiados para volver a ser usados, de tal modo que la malla no se maltrate y no se altere las dimensiones de sus agujeros. Por lo tanto, se utilizó el limpiador ultrasonido (Figura 17). Allí, los tamices se sumergen en agua y el ultrasonido hace su trabajo ($\sim 15\text{-}30$ minutos por tamiz). Los tamices quedan limpios sin algún grano atrapado en las mallas y estarán listos para el próximo uso. La importancia del uso del limpiador ultrasonido es porque las mallas deben estar limpias para evitar la contaminación de las muestras. No se recomienda usar

cepillos para las mallas de tamaño 150 μm y 75 μm , ya que podrían alterar las dimensiones de las mallas.

Figura 17. Limpiadores ultrasónicos. Provee un limpiado efectivo y rápido, esencialmente para las mallas de medidas 150 μm (malla 100) y 75 μm (malla 200).



Fuente: Propia.

Todo el proceso de triturado y tamizado puede ser resumido en el flujograma de la Figura 18.

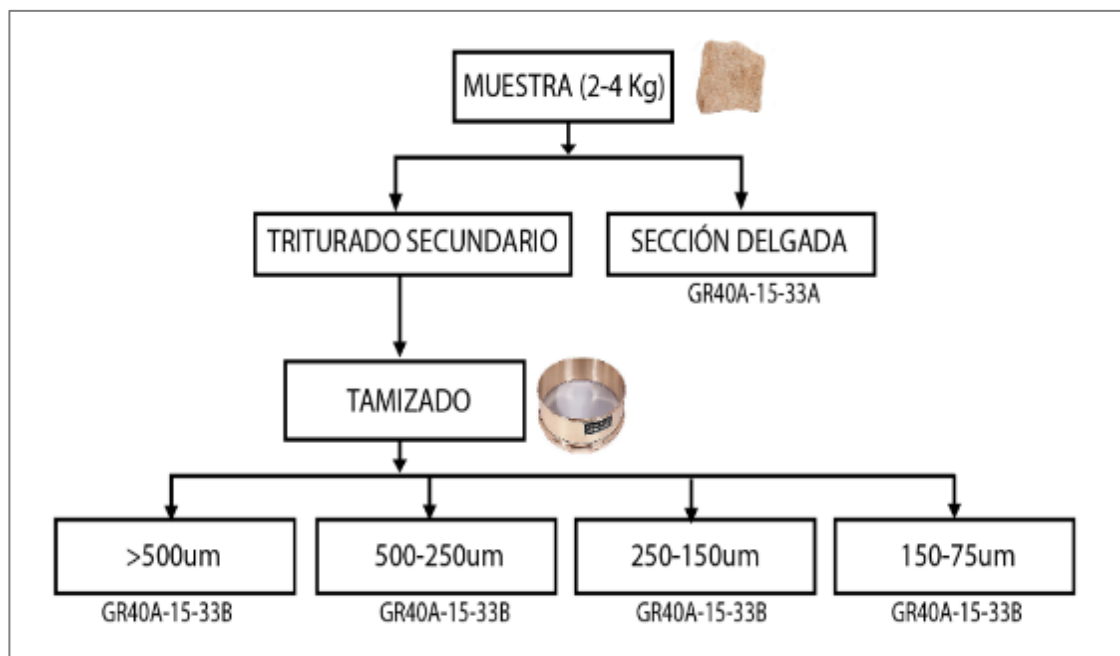


Figura 18. Flujograma de procesamiento de las muestras para el trituramiento. El código de la muestra es un ejemplo. Nótese que las fracciones $>500 \mu\text{m}$, $500-250 \mu\text{m}$ y $250-150 \mu\text{m}$ al ser guardadas, deben estar codificadas indicando su granulometría. Cada paso en el uso del baño en ácido acético debe estar indicado al final del código con su respectiva abreviatura. La sección



delgada no solo nos muestra una vista previa de la proporción de minerales pesados en la muestra, también nos ofrece las primeras pistas de procedencia sedimentaria QFL (Dickinson, 1970) en el caso que no se halle minerales pesados en la muestra.

Fuente: Propia.

La Figura 19 resume los pasos recomendados para el trituramiento de las muestras. Debido a que la concentración de minerales pesados se halla mayormente en la fracción 150-75 μm (de las mallas 100-200), se recomienda que apenas esta fracción sea separada por el tamiz, se le bañe con ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) concentrado al 5 %. Se recomienda cambiar el ácido las veces que sean necesarias, hasta no observar más efervescencia en la muestra. Si la muestra es muy carbonatada, el cambio de ácido podría durar incluso hasta 4 días. Se recomienda lavar la muestra con agua desionizada o destilada.

c) Baño en ácido acético.

La fracción de muestra fue sumergida en ácido acético, concentrado al 5 %. De este modo la cementación en las areniscas o posibles venillas de carbonatos que puedan haber formado parte de la roca fueron corroídas sin alterar a los minerales más susceptibles, ya que podrían haber sido: (e.g. apatitos, piroxenos, anfíboles y otros).



Figura 19. Proceso de baño en ácido acético. A) La fracción de muestra es corroída por el ácido acético en el laboratorio de química del INGEMMET. B) Muestra de la fracción de sedimento que va a trabajarse con el ácido acético. C) Concentrado al 5 % de ácido acético. Fuente: Propia.

d) Uso de líquido pesado (politungstato de sodio, ps).

El siguiente paso es obtener los minerales pesados, se trabajará con la fracción 150-75 μm . Esta fracción pre-concentrada de minerales pesados será sumergida en el embudo de decantación con el politungstato de sodio (líquido pesado) para que los minerales con densidades menores a 2.87 g/cm^3 sean separados de los mayores a 2.87 g/cm^3 . La densidad del politungstato de sodio debe estar medido precisamente en 2.87 g/cm^3 con un densímetro.

Se utilizaron algunos materiales de laboratorio para la separación de minerales pesados como: Probeta graduada, vasos precipitados, embudos de vidrio, papel filtro 110 mm de diámetro para los minerales ligeros que quedaran retenidos, pisseta, filtro para café para minerales pesados que quedaran retenidos, densímetro y soporte universal (Figura 20).



Figura 20. Preparación de instrumentos y materiales para uso de líquido pesado. Se muestra los materiales de laboratorio que se utilizaron para la separación de minerales pesados como: 1) Probeta graduada, 2) Vasos precipitados, 3) Embudos de vidrio, 4) Papel filtro 110 mm de diámetro, 5) Piseta, 6) Filtro para café, 7) Densímetro 8) Silicona y 9) politungstato de sodio (Líquido pesado).

Fuente: Propia.

El paso para realizar la obtención de los minerales pesados se organiza del siguiente modo:

- ✓ En el laboratorio de química del INGEMMET se alistó un embudo de separación el cual está soportado en un “soporte universal” (Figura 21). El montado del embudo de decantación se realizó con la ayuda de un aro. El aro estará sujeto a un “soporte universal”. Se instaló además debajo del embudo de decantación, dos embudos de vástagos apoyados por dos aros (ajustado al soporte universal).
- ✓ Cada embudo de vástago se le coloca un filtro para que recepcione a los minerales pesados y minerales ligeros, respectivamente. Uno de los embudos de vástago tendrá un papel-filtro de $\sim 8 \mu\text{m}$ de porosidad (Filtro para café), y el otro tendrá un papel-filtro de $\sim 20 \mu\text{m}$ de porosidad. El embudo de vástago con el papel de filtro $\sim 8 \mu\text{m}$ (Filtro para café) es instalado para que atrape los minerales pesados, es decir, los que yacen al fondo del embudo de decantación. El líquido pesado fluirá a través del filtro hasta el recipiente que está debajo de este embudo, en este caso un vaso precipitado. A la derecha, el embudo de vástago con el papel de filtro $\sim 20 \mu\text{m}$ se posicionará para que recepcione el líquido pesado con los minerales más ligeros, y el líquido pesado fluirá a través del filtro hasta un recipiente debajo del embudo con vástago.
- ✓ Se añadió $\sim 150 \text{ ml}$ de politungstato de sodio a 2.87 g/cm^3 dentro del embudo de decantación con el desagüe del embudo cerrado. Después, dentro del embudo de separación se añadió entre 40 g a 80 g de muestra (después de haberle aplicado el ácido acético y el secado) (Figura 21).

- ✓ El embudo de separación conteniendo el politungstato de sodio y el sedimento debe ser agitado gentilmente, de modo que se provoque la decantación forzada de los minerales más pesados (Figura 22).
- ✓ Después de ~20 minutos, la llave del embudo de separación debe ser abierto rápidamente para que permita la fuga de los minerales pesados. Estos evacuarán hacia el embudo con vástago, y el filtro de ~8 μm (Filtro para café) capturará los minerales pesados. El politungstato de sodio se filtrará y se ira a un recipiente abajo del embudo (Figura 23).
- ✓ Cuando no haya más minerales pesados que evacuar, el embudo de decantación será girado levemente a la derecha y se evacuará la fracción ligera al otro embudo con vástago (~20 μm). Los minerales ligeros estarán atrapados en el filtro, y el politungstato de sodio será filtrado a un recipiente debajo del embudo de decantación.
- ✓ Seguido se separan los sedimentos pesados con los sedimentos ligeros en los filtros respectivamente, luego se enjuaga con chorros de agua caliente para poder acelerar el filtrado del líquido pesado para su posterior recuperación.

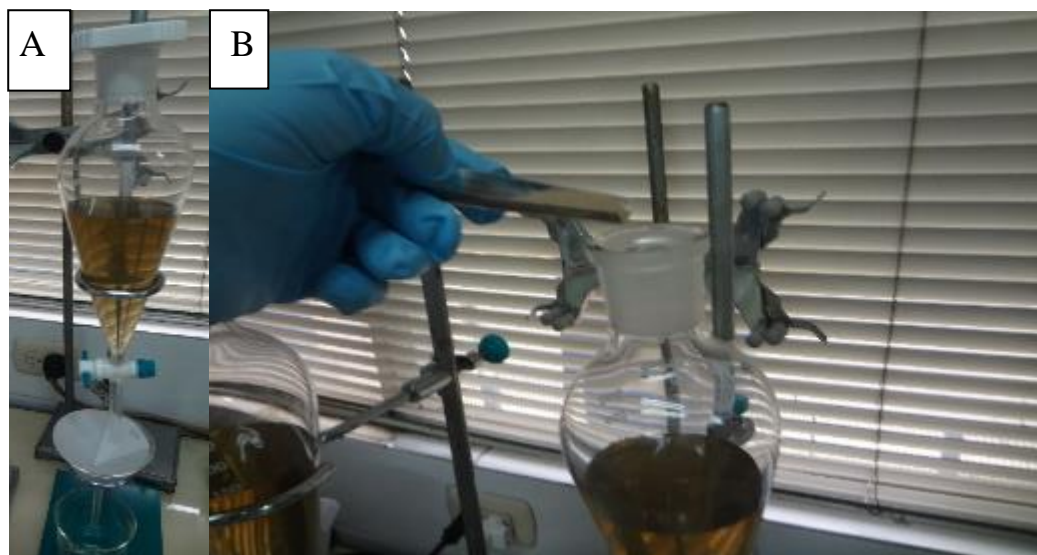


Figura 21. Uso de politungstato de sodio. A) Embudo de decantación con el líquido pesado dentro de un embudo de decantación. B) Se añade con una cuchara metálica el sedimento en pequeñas cantidades de 20 g, hasta llegar a 80 g de sedimento aproximadamente.
Fuente: Propia.

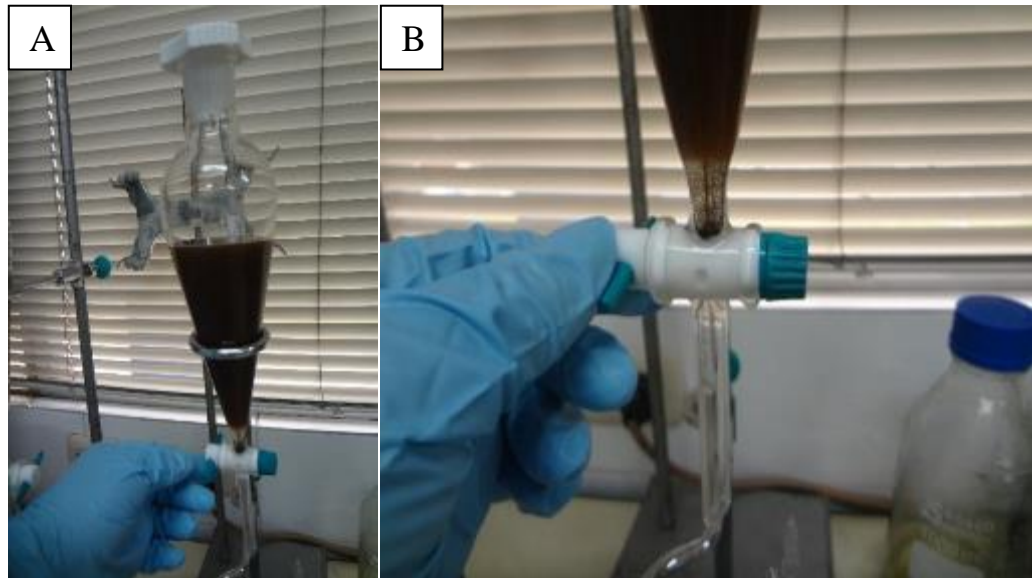


Figura 22. Proceso de decantación de los minerales pesados. A) El sedimento de arena dentro del embudo de decantación. B) La flecha de color rojo indica que los minerales pesados caen al fondo, mientras que la flecha de color azul indica a los minerales ligeros que quedan suspendidos por la baja densidad que poseen.
Fuente: Propia.

Hasta aquí, el proceso de separación de minerales pesados se ha completado. Después de eso, viene la etapa de recuperación del líquido pesado. Consiste en términos generales, en recuperar en lo máximo posible el líquido pesado, ya que se trata de un líquido muy caro que puede ser reutilizable. Para llevar a cabo con éxito este paso, se sugiere los siguientes pasos:

- ✓ Por otro lado, el papel-filtro de $\sim 8 \mu\text{m}$ conteniendo los minerales pesados, serán bañados con agua hirviendo, hasta limpiar los granos de minerales pesados que tengan adheridos el líquido pesado, y garantizar su limpieza, y recuperar los residuos del politungstato de sodio. Similar procedimiento se hace con la fracción de minerales ligeros. De este modo, el politungstato de sodio que estaba adherido a los papeles filtro y a los granos minerales ha sido disuelta con agua.
- ✓ El politungstato de sodio recuperado de la fracción pesada y de la fracción ligera será aunado al frasco que contiene el resto de ese líquido pesado (politungstato de sodio). La densidad del politungstato de sodio que se halla en aquel frasco debe ser medido

con el densímetro, y debe dar 2.87 g/cm^3 . De no ser el caso, agregar agua destilada hasta alcanzar la medida deseada, o de lo contrario, someter el frasco a la cocción a $\sim 50^\circ\text{C}$ por 1-2 horas aproximadamente, hasta alcanzar la medida indicada. El politungstato de sodio es un líquido muy volátil, y debe ser cerrado herméticamente en un frasco con tapa de goma.

- ✓ Es necesario reciclar el politungstato de sodio. Por lo tanto, se sugiere que se aliste las probetas graduadas y se inserte allí la mezcla de agua y los residuos del líquido pesado para provocar la decantación de posibles granos y/o arcilla que hayan sido filtrados (Figura 24). El líquido se vierte en un recipiente diferente y se posiciona en una cocción para provocar la evaporación a 50°C (Figura 24). hasta tener una concentración previa y recuperar el politungstato de sodio. Esta evaporación puede durar hasta 3 días.

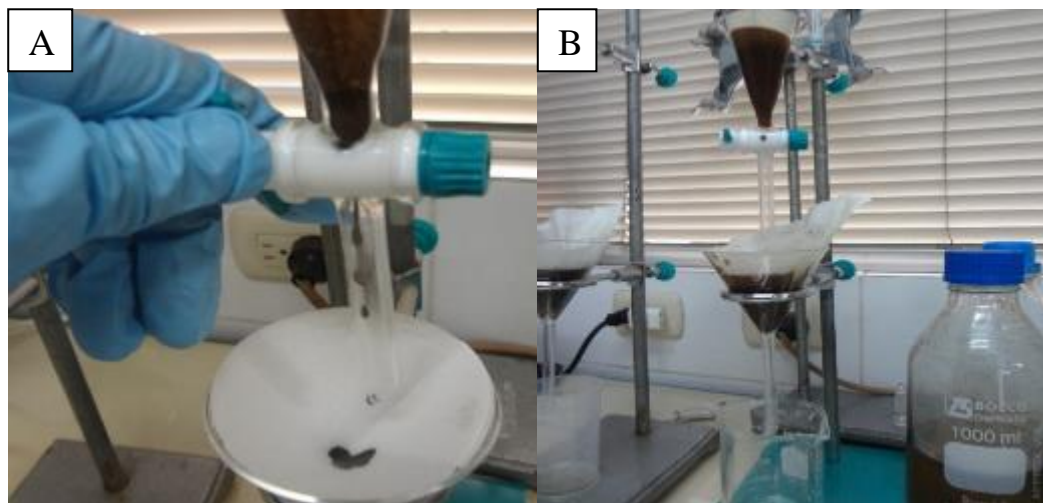


Figura 23. Proceso de retiro de los minerales pesados. A) Se suelta cuidadosamente el sujetador de salida del embudo de decantación, para dejar pasar a los sedimentos pesados. B) Sedimentos y minerales ligeros caen a un filtro para la recuperación del líquido pesado que queda impregnado en los sedimentos.
Fuente: Propia.

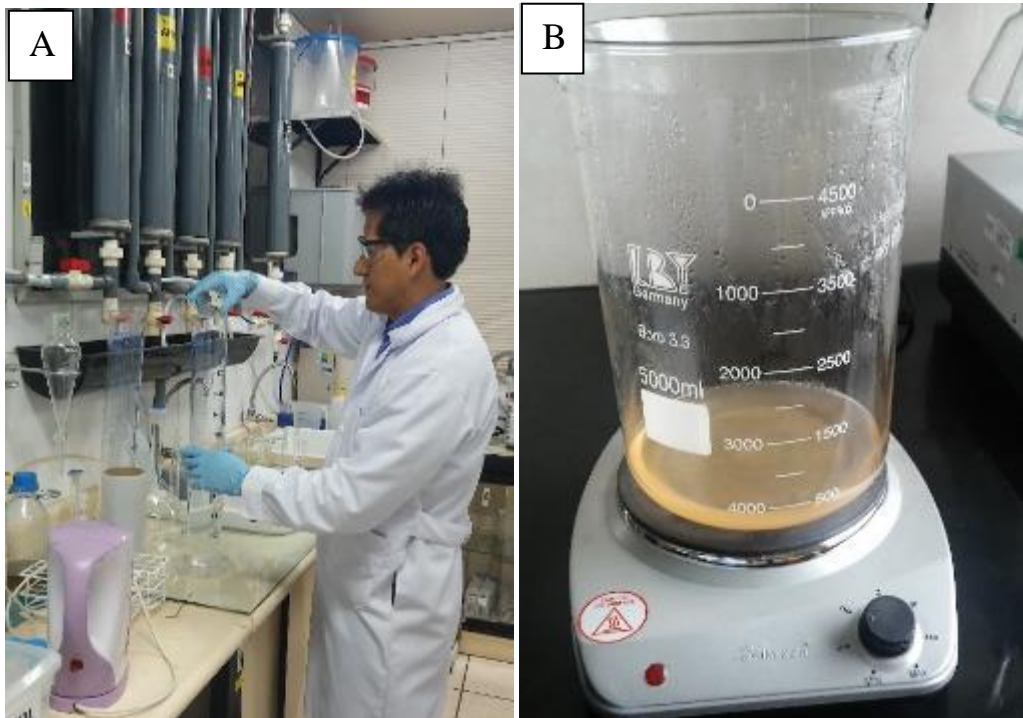


Figura 24. Proceso de reciclamiento del líquido pesado. A) Se prepara las probetas graduadas para reciclado. B) Se recomienda colocar recipientes con el agua resultante de la limpieza de los instrumentos y del propio mineral pesado sobre una cocinilla a $\sim 50^{\circ}\text{C}$ como máximo, y con la rotación encendida.
Fuente: Propia.

Podemos continuar con la preparación de la muestra de minerales pesados simultáneamente a la evaporación y recuperación del politungstato de sodio. En este paso, después del secado en el horno, ya tenemos lista la muestra de mineral pesado (Figura 25), y debe ser tratada para el siguiente paso. Se desea conocer el espectro de minerales pesados para cada muestra, por lo tanto, se requiere de un procedimiento específico que debe ser preciso, para garantizar un alto grado de confiabilidad en el conteo de los minerales.

- ✓ Después del baño con agua caliente, las fracciones de minerales pesados y de minerales ligeros serán secados en el horno, a $\sim 50^{\circ}\text{C}$ como máximo por ~ 12 horas aproximadamente.

- ✓ Después del secado, la fracción de minerales ligeros se guardará en un recipiente codificado y la fracción pesada estará lista para ser preparada.



Figura 25. Variedad de minerales pesados después de separar con el líquido pesado.
Fuente: Propia.

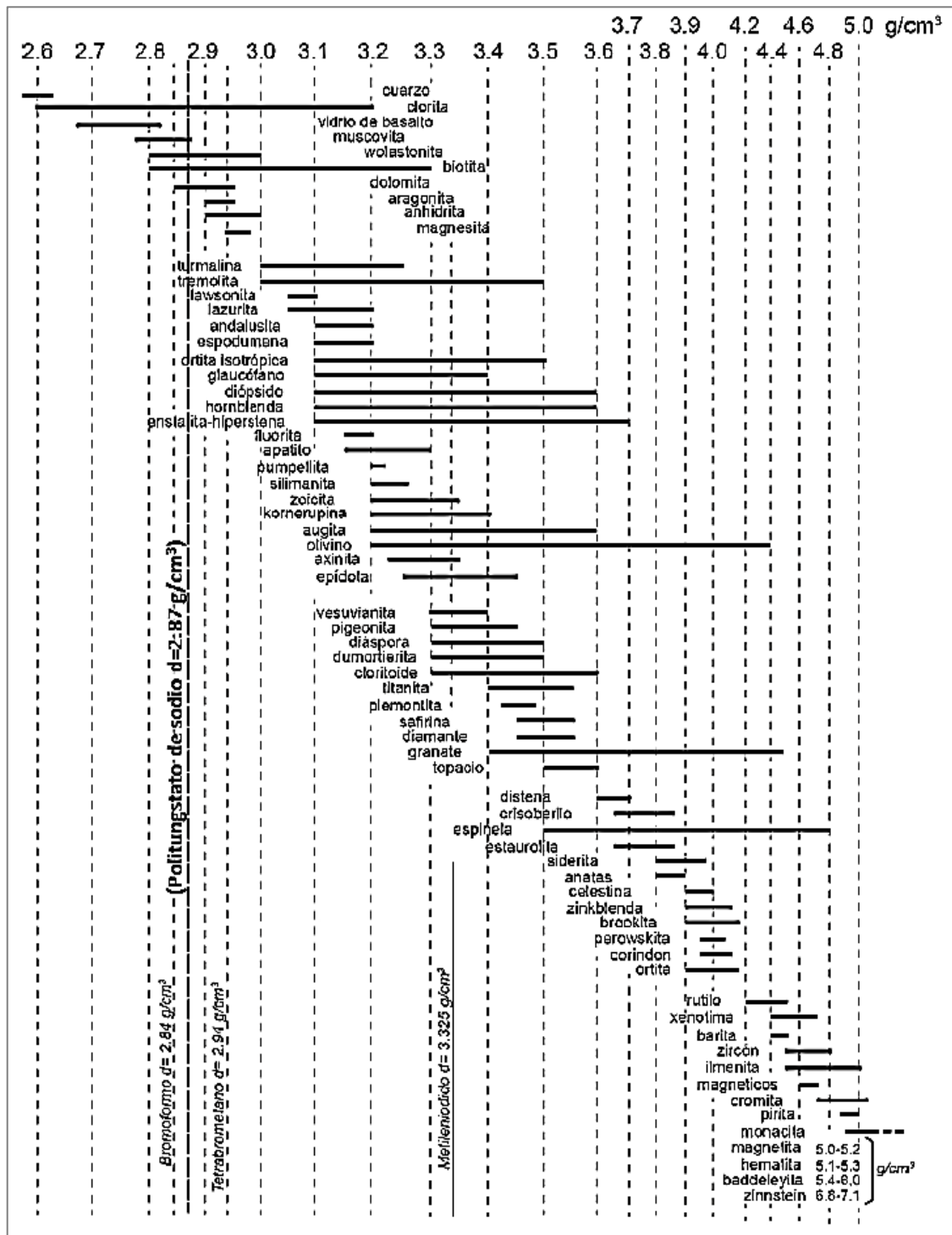


Figura 26. Cuadro de densidades de minerales (g/cm³) y líquido pesado comúnmente usados. Tradicionalmente se usaron para separar los minerales. Fuente: Boenigk, 1983.

e) *Preparación de slides con minerales pesados.*

El objetivo es montar los minerales pesados en un slide de vidrio, y que se vean como en la Figura 27, para que cada mineral pesado sea identificado y contado. Para llegar a esta meta, es necesario completar ciertos procedimientos sugeridos a continuación.

Una vez que la fracción pesada ha sido secada, ésta debe ser colocada sobre un papel bond blanco limpio. Se debe contar con un imán en forma de barra o algo que pueda ser manejable con la mano. Este imán debe ser envuelto en papel, de modo que éste se frota encima de aquella fracción de minerales pesados que está encima del papel bond. De este modo, se podrá separar los minerales más magnéticos/ferrosos del resto de la población de los minerales pesados (usualmente esos minerales magnéticos/ferrosos suelen ser los más oscuros). Este paso se hará en el caso que la muestra sea muy oscura y el contenido de minerales con hierro no alteren o dificulten el conteo de los minerales pesados en el slide. A este paso, la muestra obtenida por esta pre-separación magnética se le denominará e.g. GR40A-15-33 /150-75 μ m y se le etiquetará en un frasco con esta denominación (véase Figura 27).

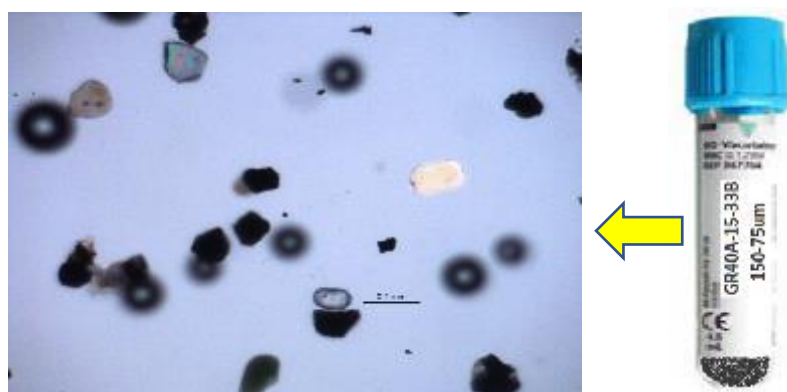


Figura 27. Minerales pesados vistos al microscopio petrográfico. Se observo con aumento de 10x y sumergidos en resina epoxy de 1.66 de índice de refracción. MP = minerales pesados.

Fuente: Propia.

De la muestra que no es magnética y aun yace en la hoja bond, se cogerá un puñado de muestra de minerales pesados directamente del frasco con una cucharita pequeña y se

colocará en una balanza hasta alcanzar ~20 mg. Estos sedimentos se colocarán dentro de un embudo de vástago (como en la Figura 28) y después sobre un papel graso, para luego ser dividido en 4 partes iguales con ayuda de una cuchilla, de tal modo que cada separación tendrá ~5 mg. Este procedimiento se realizará para evitar que haya pre-concentraciones de minerales aún más pesados en nuestro deseado espectro de minerales pesados.

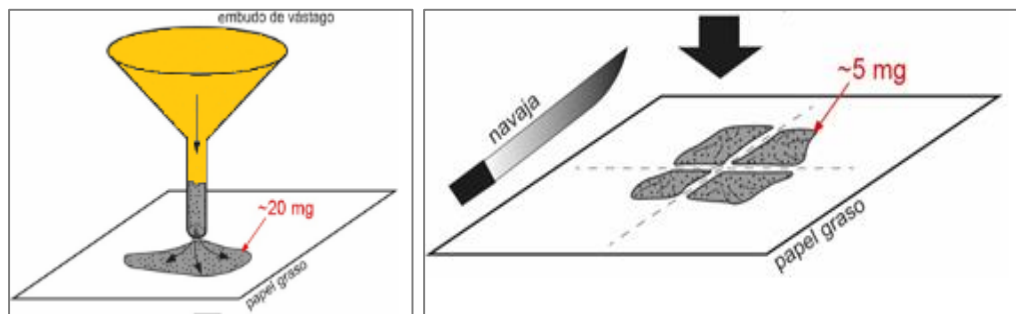


Figura 28. Proceso de preparación de minerales pesados para ser montados en el slide de vidrio. Nótese la posición del embudo de vástago. Con este procedimiento se asegura mayor homogeneidad de la distribución de minerales pesados en la muestra que será incluida en el slide.

Fuente: Propia.

Aquella porción de ~5 mg es insertada en el slide para estudiar los minerales pesados. Paralelamente, se recomienda forrar la coccinilla de laboratorio con papel aluminio y calentarla a ~70 °C (Figura 29). Sobre ésta se pone los slides de vidrio (Figura 29), y se calentará además el recipiente con la resina epoxy o bálsamo de Canadá. Una vez caliente la resina epoxy, con un objeto punzante o largo se debe sobreponer gotas de resina encima del slide de vidrio, el cual está a la vez encima de la coccinilla a ~70 °C. El objetivo de calentar todo este conjunto es para evitar las burbujas de aire, propio de las resinas.

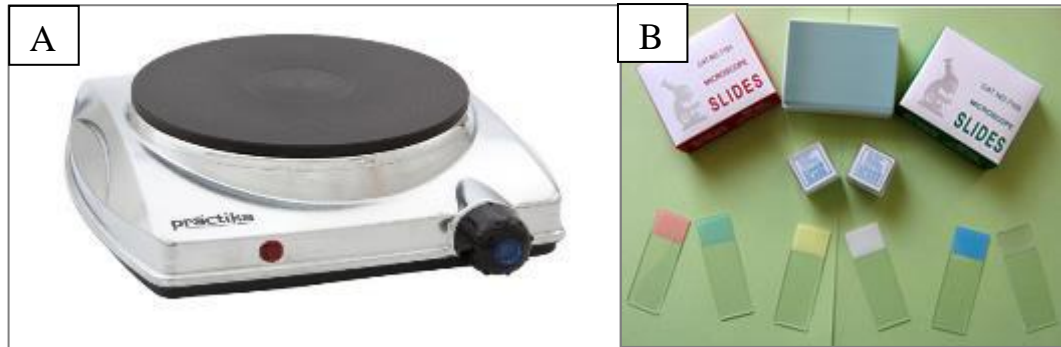


Figura 29. Proceso de preparación de slides. A) Cocinilla eléctrica de laboratorio. Antes de montar los slides de vidrio en la plataforma de la cocinilla, debe cubrirse con papel Aluminio. B) slides de vidrio.

Fuente: Propia.

Una vez que esté caliente la resina y las burbujas hayan sido eliminadas, se vaciará la porción de ~5 mg de minerales pesados, y se les dispersará con una aguja metálica por todo el slide. Aún caliente, los minerales y el epoxy serán cubiertos por un cubre-slide (Figura 30) y después se colocará su código de muestra con un plumón indeleble a un lado del slides de vidrio. Por lo tanto, la muestra está lista para empezar el conteo de minerales pesados con el microscopio petrográfico. Para su conservación y cuidado de estos slides de vidrio es necesario una caja que los contenga (Figura 30).

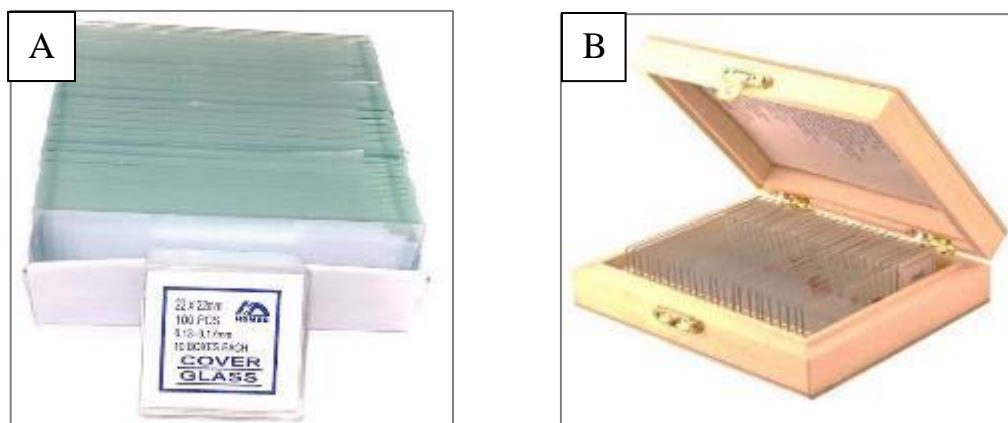


Figura 30. Materiales para mantener en buen estado los slides. A) Cubre-slides (glass cover). Se recomienda usar el tamaño 4 x 2 cm (estándar). B) Caja de madera porta slide.

Fuente: Propia.

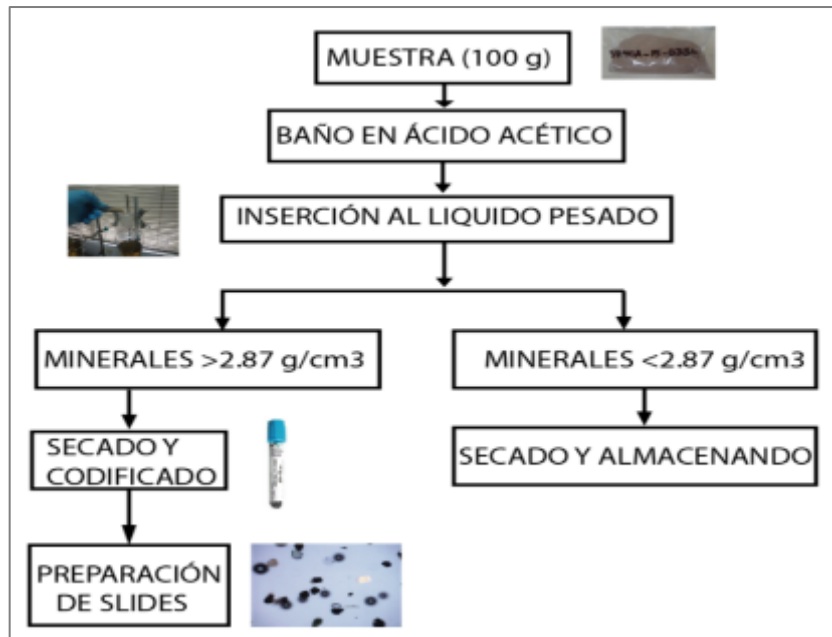


Figura 31. Flujograma para el tratamiento de las muestras a estudiar. Desde que la muestra recibe el baño de ácido acético, hasta la obtención de los slides de minerales pesados.

Fuente: Propia.

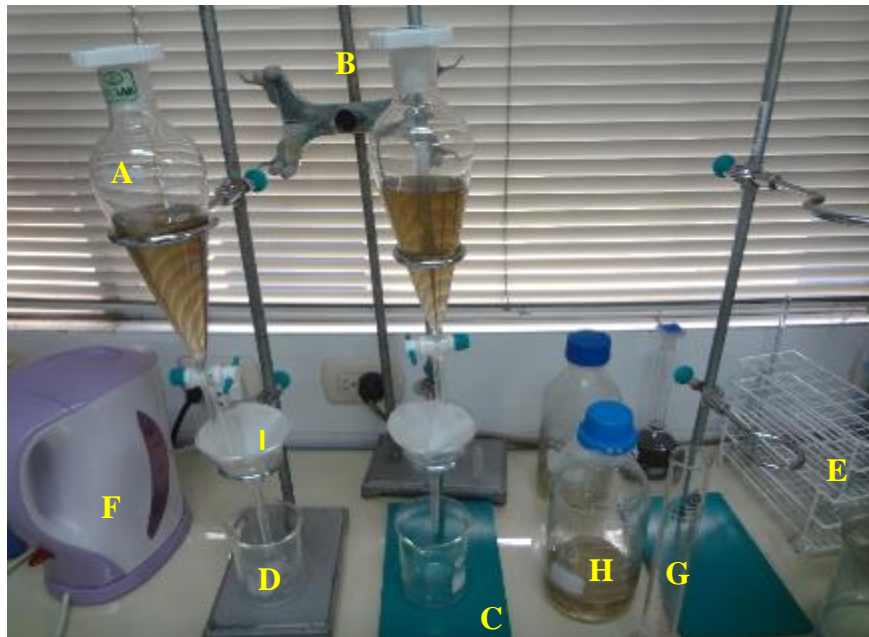


Figura 32. Mesa de trabajo en la separación de minerales pesados. A) Embudo de separación. B) Soporte universal. C) Pie del soporte universal. D) Vaso para recepcionar el líquido pesado durante la filtración de la porción de mineral pesado. E) Porta tubos de ensayo. F) Jarra de agua, útil para la limpieza de los filtros de papel. G) Probeta graduada para medir el líquido pesado. H) Frasco con el líquido pesado. I) Embudo con filtro dentro.

Fuente: Propia.



3.6.3.1.2. *Procesamiento de láminas delgadas de areniscas (petrografía sedimentaria).*

Las muestras para el análisis de conteo modal QFL (Figura 33) fueron tomadas en el mismo lugar de donde se tomó las muestras para el análisis de minerales pesados, en el laboratorio se procedió a la preparación de láminas delgadas la que consistió en:

- ✓ La muestra colectada fue representativa y además se direcciono el lado de la muestra donde se deseó cortar.
- ✓ Luego se procedió a verificar que todo el material que se vaya a utilizar este limpio.
- ✓ Con una cortadora de disco (Figura 33) se cortan las rocas hasta formar prismas (Figura 33).
- ✓ Se pule una de las superficies del prisma de la muestra.
- ✓ Se adhiere con resina epoxi a la cara pulida del prisma de la muestra a la porta objeto, ejerciendo presión para evitar la formación de burbujas y se deja secar.
- ✓ Una vez secado, se corta el prisma de la muestra dejando un grosor de unas 300 um.
- ✓ Se coloca el cubre objeto a la superficie de muestra que queda descubierta.
- ✓ Teniendo la lámina delgada lista para el análisis petrográfico (Figura 33).

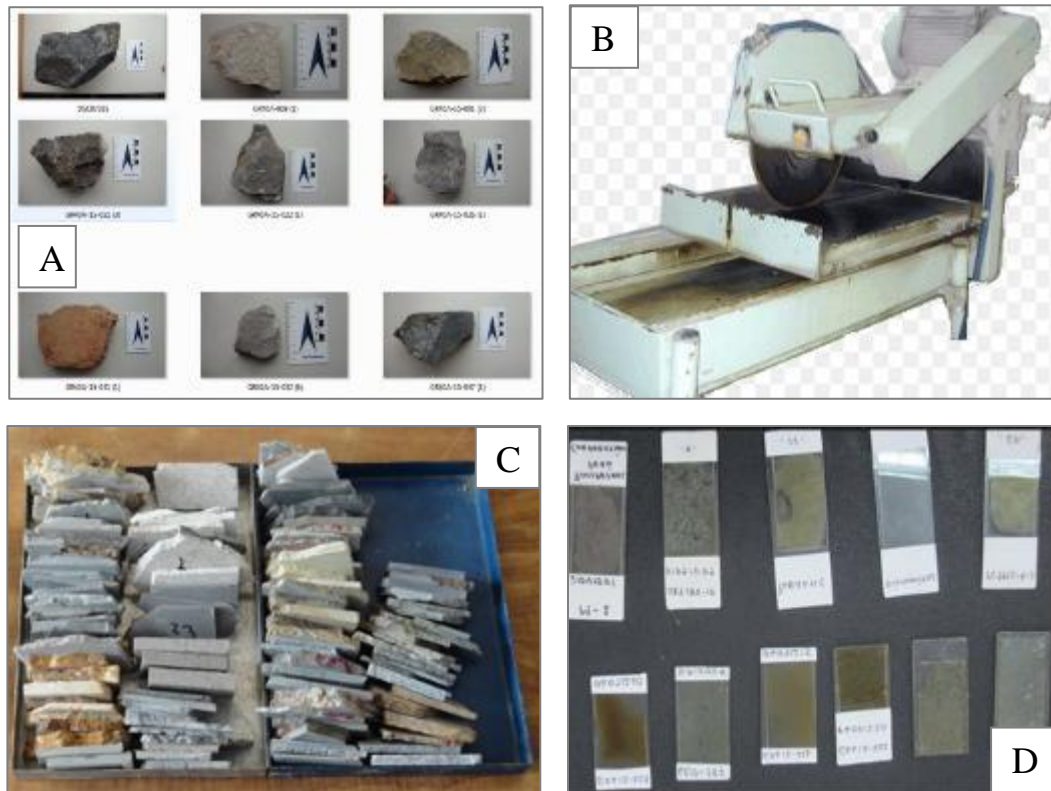


Figura 33. Procesamiento de láminas delgadas de areniscas. A) Muestras de mano representativas de areniscas para estudio petrográfico. B) Máquina cortadora con disco se corta las rocas hasta formar prismas. C) muestras cortadas en forma de prismas. D) laminas delgadas. Fuente: Propia.

3.6.3.2. Metodología del análisis de datos.

3.6.3.2.1. Análisis de minerales pesados.

El análisis de los minerales pesados se realizó en los slides, la cual consistió en el reconocimiento, identificación y conteo de los granos de minerales pesados de las potenciales rocas fuentes y de las rocas detríticas de la Cuenca Arequipa (Figura 34), observados bajo el microscopio petrográfico. Para el reconocimiento e identificación de los minerales pesados se utilizó los manuales de Mange & Maurer (1992). El conteo e identificación de los minerales pesados son registrados en la plantilla de minerales pesados, para posteriormente interpretarlos.

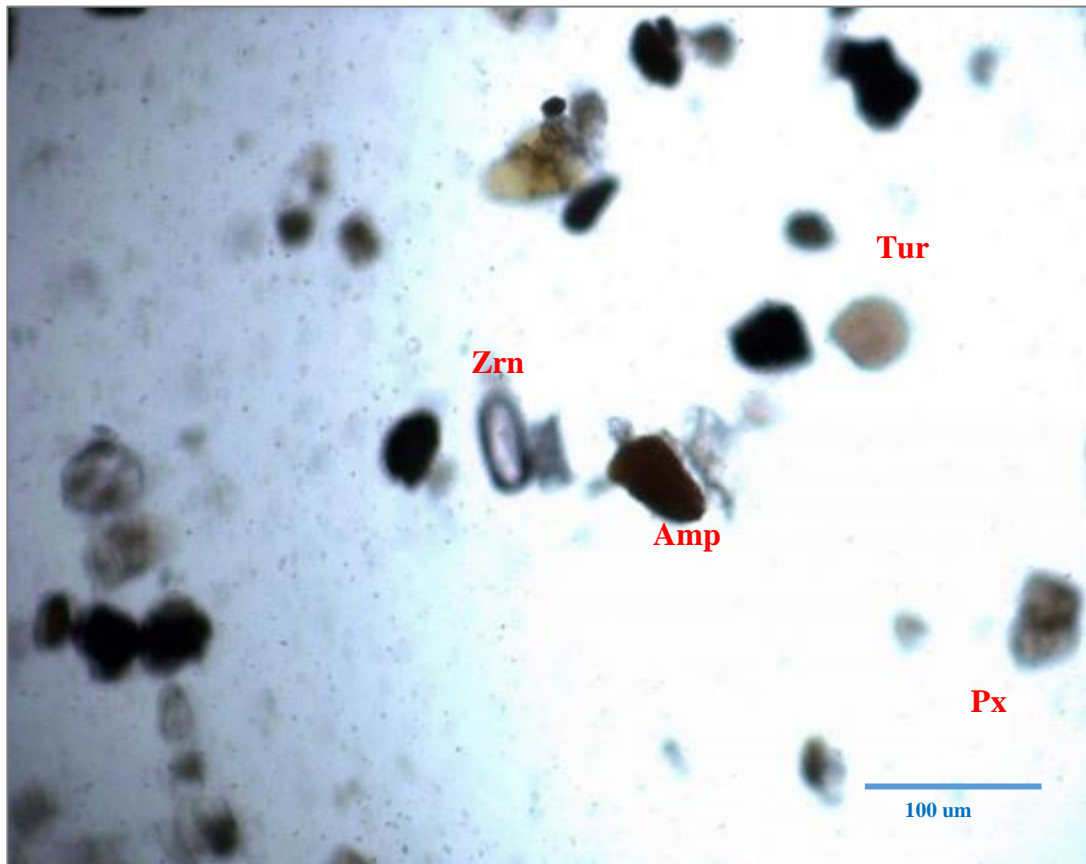


Figura 34. Vista de los minerales pesados en el microscopio petrográfico. Abreviaturas: zircón (Zrn), Anfíbol (Amp) y Turmalina (Tur).
Fuente: Propia.

3.6.3.2.2. Análisis de conteo modal QFL (Secciones delgadas).

Se realizó el reconocimiento y conteo modal de los granos (Q), feldespato (F) y fragmentos líticos (L) (Dickinson, 1970) de areniscas, a través del microscopio petrográfico (Figura 35). Se utilizó las referencias de Mackenzie (2003) para clasificar las areniscas según su composición, tamaño de los granos y reconocer los componentes mineralógicos en nicols paralelos (Figura 36) y nicols cruzados (Figura 36). Se empleó la plantilla sugerida en el Manual N°4: Clasificación de rocas sedimentarias (INGEMMET, 2015) para el registro de los análisis y conteo de los granos. De acuerdo al conteo de los granos se aplicó el método Gazzi-Dickinson con el uso del diagrama de clasificación de areniscas propuestos por Dickinson (1970) y Pettijohn (1987).



Figura 35. Estudio petrográfico de láminas delgadas en el microscopio petrográfico.

Fuente: <https://www.google.com/microscopio-en-laboratorio>.

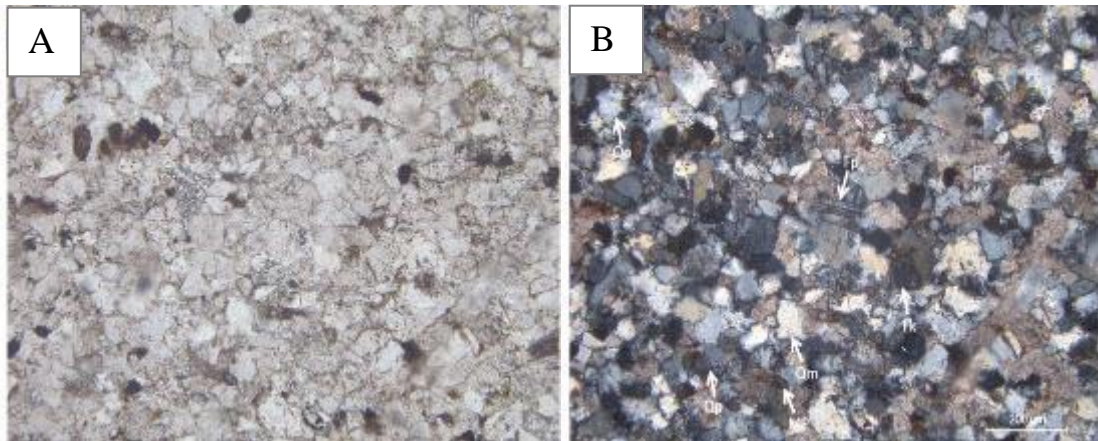


Figura 36. Vista en microscopio electrónico de arenisca. A) Sección delgada de areniscas de la muestra GR40A-15-094a, en nicols paralelos. B) Sección delgada de areniscas de la muestra GR40A-15-094a en nicols cruzados. Abreviaturas, Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulante (Qo), feldespato plagioclasa (Fp), feldespato potásico (Fk), y minerales pesados (MP). Fuente: Propia.

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. MARCO GEOGRÁFICO

4.1.1. Ubicación y extensión

El área de estudio se ubica en la parte alta de la Cordillera Occidental de Los Andes del Sur del Perú, entre las coordenadas geográficas 74°00' a 74°30' de Longitud Oeste y 13°30' a 14°00' Latitud Sur (UTM WGS84, Zona 18S, entre las coordenadas Norte: 8507389 a 8452051 y Este: 608172 a 554145) en el departamento de Ayacucho, incluyendo las provincias de Cangallo, Víctor Fajardo y Huanca Sancos, (Ver Anexo C).

4.1.2. Vías de accesos

El acceso a la zona de estudio es por vía aérea, Lima – Jauja (Junín) y por vía terrestre se puede llegar con vehículos camioneta 4x4, cúster, autos entre otros.

Tabla 7. *Vías de acceso terrestre al área de estudio*

Ruta	Distancia (km)	Tipo de vía
Lima – Pisco	234.0	Carretera Asfaltada
Pisco – Huaytará	118.0	Carretera Asfaltada
Huaytará – Totorilla	255.0	Carretera Asfaltada
Totorilla – Allpachaca	67.0	Carretera Asfaltada
Allpachaca – Cangallo	56.5	Carretera Asfaltada

Fuente: Propia.

4.2. MARCO GEOLÓGICO

4.2.1. Estratigrafía

El área de estudio está conformada por unidades litoestratigráficas que conforman rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas que tienen un rango de edad desde el Devónico hasta finales del Plioceno (Ver Anexo D y E); siendo los depósitos recientes atribuidos al Cuaternario.



4.2.1.1. Paleozoica.

4.2.1.1.1. Grupo Excélsior (D-e).

Inicialmente fue descrita como serie Excélsior, por Mc Laughlin, D.H. (1925) en la mina Excélsior de Cerro de Pasco, en el Perú Central, posteriormente Guisado, J. & Landa, C. (1965) elevaron la serie a la categoría de Grupo.

La edad de la Formación no ha sido debidamente establecida por Mc Laughlin ni Guisado. El primero la ubico en el Precambriano, haciendo referencia a una serie metamórfica compuesta por esquistos y gneis, que afloran al este de Cerro de Pasco, señalándola como “La Formación en los Andes Centrales”, sin embargo, no establece la relación estratigráfica entre dicha Formación basal y las lutitas de la serie Excélsior. Guizado, J. se basa en la descripción de las rocas cristalinas metamórficas de Huaytapallana, Harrison J. V. (1951); en sus propias observaciones, adopta para el Grupo Excélsior una edad Devoniana, pero que también podría corresponder al Precambriano. En el área ha sido denominada así por las secuencias deformadas e intensamente metamorfoseadas que presenta. Palacios O. (1994), describe en el cuadrángulo de Paras secuencias discordantes al Grupo Pucara. Por último, en la hoja de Huancapi-Paras Quispesivana & Navarro (2002) cartografiaron a esta unidad como Grupo Excélsior en base a los trabajos de McLaughlin (1925).

Por el río Pampas, al Noroeste de la localidad de Cocas, en el extremo Noroeste del cuadrángulo de Huancapi el Grupo Excelsior presenta un conjunto de afloramientos de dirección Noreste, cuya base no está expuesta y que se encuentra en discordancia angular a las areniscas cuarzosas intercalados con delgados niveles de limolitas que corresponden a la Formación Labra del Grupo Yura. Dichos afloramientos están compuestos por esquistos grises a verdosos con delgados niveles de cuarcitas grises, los estratos presentan plegamientos que tienen un espesor promedio de 20 cm, dentro de los

estratos se observan laminaciones horizontales finas afectadas por una intensa alteración y bajo grado de metamorfismo, también se observan vetillas de cuarzo de 1 cm de espesor promedio (Figura 37).



Figura 37. Afloramiento de esquistos del Grupo Excelsior. Las flechas amarillas indican claramente las foliaciones en la roca, estos afloran al Noroeste de la localidad de Cocas. Vista tomada hacia el Sur.
Fuente: Propia.

4.2.1.1.2. Grupo Mitu Sedimentario (PET-m/sed).

Quispesivana & Navarro (2002) en el cuadrángulo de Huancapi y Querobamba dividen al Grupo Mitu en dos secuencias uno sedimentario conformada por intercalaciones de areniscas rojizas, conglomerados y la otra volcánica constituidas por derrames andesíticos gris verdosos. En el área de estudio aflora al Oeste y Suroeste del poblado de Cangallo que consiste en areniscas arcósicas con niveles de conglomerados (Figura 38).

CERRO CENRRMULLE



Figura 38. Afloramiento de areniscas del Grupo Mitu sedimentario. Cerro Cenrrmulle, Suroeste de Cangallo. Vista tomada hacia el Suroeste.
Fuente: Propia.

4.2.1.1.3. Grupo Mitu Volcánico (PET-m/v).

En la provincia de Cusco (Gregory, 1916) dicha sucesión está descrita con el nombre de Pachatusan la cual está compuesta por una intercalación de conglomerados, volcánicos y areniscas de hasta 600 m de espesor. Asimismo, McLaughlin (1924) la describió como una intercalación sedimentaria aflorante en los alrededores de la localidad de Mitu en la provincia de Pasco, así como empleó el nombre de Volcánico Santa Catalina para una secuencia volcánica de 760 m de espesor que sobreyace a rocas sedimentarias rojizas en la localidad de Yauli; Newell et al. (1953) agrupa y asigna a esta sucesión de rocas volcánicas y sedimentarias una edad entre el Pérmico medio a superior. Posteriormente, en los alrededores de la localidad de Morococha y del “Domo Yauli- San Cristóbal”, Salazar (1993) reporta efectivamente que el miembro inferior del Grupo Mitu está conformado por areniscas conglomerádicas rojizas y brechas volcánicas. De esta manera, para el Centro del Perú esta unidad está dividida en una sedimentaria y otra volcánica (Quispesivana & Navarro, 2002). Mientras que para la región del Cusco se

divide en Pisac y Pachatusan (Candia & Carlotto, 1985; Carlotto et al., 1988; Mendívil & Dávila, 1994).

La edad del Grupo Mitu está establecida en base a su posición estratigráfica y a las lavas de esta unidad que afloran en la Cordillera Oriental las cuales tienen un rango de edad entre los 270 y 210 Ma (Kontak, 1985). De este modo, su edad se encuentra entre el Pérmico medio-superior a Triásico inferior. En el área de estudio ha sido descrito y reconocido por tobas rojizas, sobreyace en discordancia angular al granito que pertenece a la unidad San Miguel de Ongoy (Permotriásico) e infrayace al Grupo Pucará (Triásico superior- Jurásico inferior) (Figura 39).



Figura 39. Afloramiento de tobas de cristales del Grupo Mitu volcánico. Se ubican en el cerro Ccata, Noreste del poblado de Cangallo. Vista tomada hacia el Noreste
Fuente: Propia.

4.2.1.1.4. Grupo Pucará (TsJi-p).

El nombre de las calizas Pucará fue adoptado por Mc Laughlin (1924), quien describió una potente serie calcárea de edad Triásico superior al Liásico que aflora en diversos lugares de los Andes Centrales. Posteriormente, Jenks (1951) la elevó a categoría de Grupo Pucará. Posee una extensión regional muy amplia a lo largo de la faja andina y subandina desde la región de Apurímac hasta el Ecuador. Aunque su localidad tipo se encuentra en el distrito de Goyllarisquiza en la provincia de Daniel Alcides Carrión en Cerro de Pasco, también se le ha observado en Paria (Cerro de Pasco),

Condorsinga, Hatunhuasi y Potosí en Morococha. Se le atribuye un espesor promedio entre los 500 y 1000 m, aunque se han reportado espesores de hasta 2200 m.

Estratigráficamente en el área de estudio, sobreyace en discordancia angular al Grupo Mitu sedimentario por la parte Oriental de la localidad de Huancapi, e infrayace en discordancia angular a las calizas de la Formación Arcurquina por la parte Occidental, cerca al caserío Puca Cruz.

Sus afloramientos están compuestos por una secuencia carbonatada compuesta por una intercalación de calizas wackestone gris oscuras a claras y areniscas gris blanquecinas y amarillentas de grano medio con matriz de arcillas calcáreas con ocasionales niveles de limolitas gris oscuras, laminadas y de superficie endurecida de capas centimétricas hasta estratos de 1 m de espesor (Figura 40).



Figura 40. Afloramiento de calizas wackestone del Grupo Pucará. Afloran al Suroeste de Huancaraylla. Vista tomada hacia el Noroeste.
Fuente: Propia.

4.2.1.1.5. Formación Socosani (Jm-so).

Fue descrita originalmente como formación por Jenks (1948) en la localidad de Socosani en el departamento de Arequipa la cual también aflora al Sur de Tiabaya y Suroeste de Uchumayo, cerca de Poci. Sobreyace en discordancia angular sobre la Formación Chocolate (Liásico) y descansa debajo del Grupo Yura. Tiene un espesor aproximado de 430 m. En el área de estudio sus afloramientos están compuestos de calizas wackestone gris oscuras fosilíferas intercalado con delgados niveles de limolitas gris oscuras, en la margen izquierda del río Caracha al Norte del caserío Samuapampa



(Figura 41).

Figura 41. Afloramiento de calizas wackestone de la Formación Socosáni. Las líneas de color blanco indican a los pliegues tipo chevron en el río Caracha. Vista tomada hacia el Este.
Fuente: Propia.

4.2.1.2. Mesozoica.

4.2.1.2.1. Grupo Yura.

Reconocida y designada inicialmente como Formación Yura por Jenks (1946) la cual tiene un espesor aproximado de 3500 m. Posteriormente, Wilson (1962) la eleva al rango de grupo distinguiendo a las formaciones inferior Ataspaca y superior Chachacumane. A su vez, en el valle del río Yura Benavides (1962) divide a esta unidad en cinco miembros (Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani) los que en conjunto tienen aproximadamente 2100 m y 2900 m de espesor.



Formación Puente (Caloviano), Benavides (1962) denominó como Miembro Puente a una secuencia sedimentaria compuesta por areniscas cuarzosas gris parduzcas intercaladas con lutitas en los alrededores de la localidad de Socosani en el departamento de Arequipa; cuyo espesor está estimado en 600 m (Dávila, 1988). En el cartografiado realizado por LAGESA (1996) se le denominó como Miembro Minaschayoc perteneciente a la Formación Huacaña. Sin embargo, por su similitud con las facies siliciclásticas de la parte inferior del Grupo Yura, Quispesivana & Navarro (2002) la denominaron como formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani. En el área de estudio el Grupo Yura aflora por la quebrada Caracha al Sur de la laguna Tiyu Ccocha sus afloramientos sobreyace en leve discordancia angular a la Formación Socosani (Jurásico medio).

✓ *Formación Puente (Jm-p).*

La Formación Puente del Jurásico medio constituye areniscas cuarzosas gris verdosas de matriz arcillosa, tiene un arreglo estructural estrato decreciente de aproximadamente 60 m de espesor que sobreyace en leve discordancia a la Formación Socosani que constituyen calizas gris oscuras e infrayace concordantemente a la Formación Cachíos constituido por limolitas grises intercaladas con estratos delgados de areniscas cuarzosas gris claras (Figura 42).



Figura 42. Afloramientos de la Formación Puente. Afloran al Norte del caserío Las Mercedes, margen derecha del río Caracha. Vista tomada hacia el Oeste.
Fuente: Propia.

✓ *Formación Cachíos (Jm-ca).*

Reconocida por Benavides (1962) en la quebrada Cachíos ubicada en la margen derecha del río Yura en la localidad de Calera. La Formación Cachíos del Jurásico medio constituye una secuencia sedimentaria de aproximadamente 450 m de espesor que infrayace concordantemente a la Formación Labra y que está compuesta por niveles potentes de limolitas grises intercaladas con estratos delgados de arenisca cuarzosa gris claro de matriz arcillosa afectados por deformación sinsedimentaria (Figura 43).



Figura 43. Afloramientos de la Formación Cachíos. Afloran al extremo Noreste de la ladera del cerro Ancapatianan margen derecho del río Caracha. Vista tomada hacia el Oeste.
Fuente: Propia.

A continuación, se muestra una columna litoestratigráfica que se realizó en campo (Figura 44), el cual fue levantado por el río Caracha cerca al caserío La Merced, la columna tiene un espesor aproximado de 450 m, la parte inferior inicia con estratodecrecencia de areniscas así mismo presenta una granodecrecencia y en la parte superior presenta estratodecrecencia y granodecrecencia de areniscas, terminando con facies de limolitas gris oscuras.

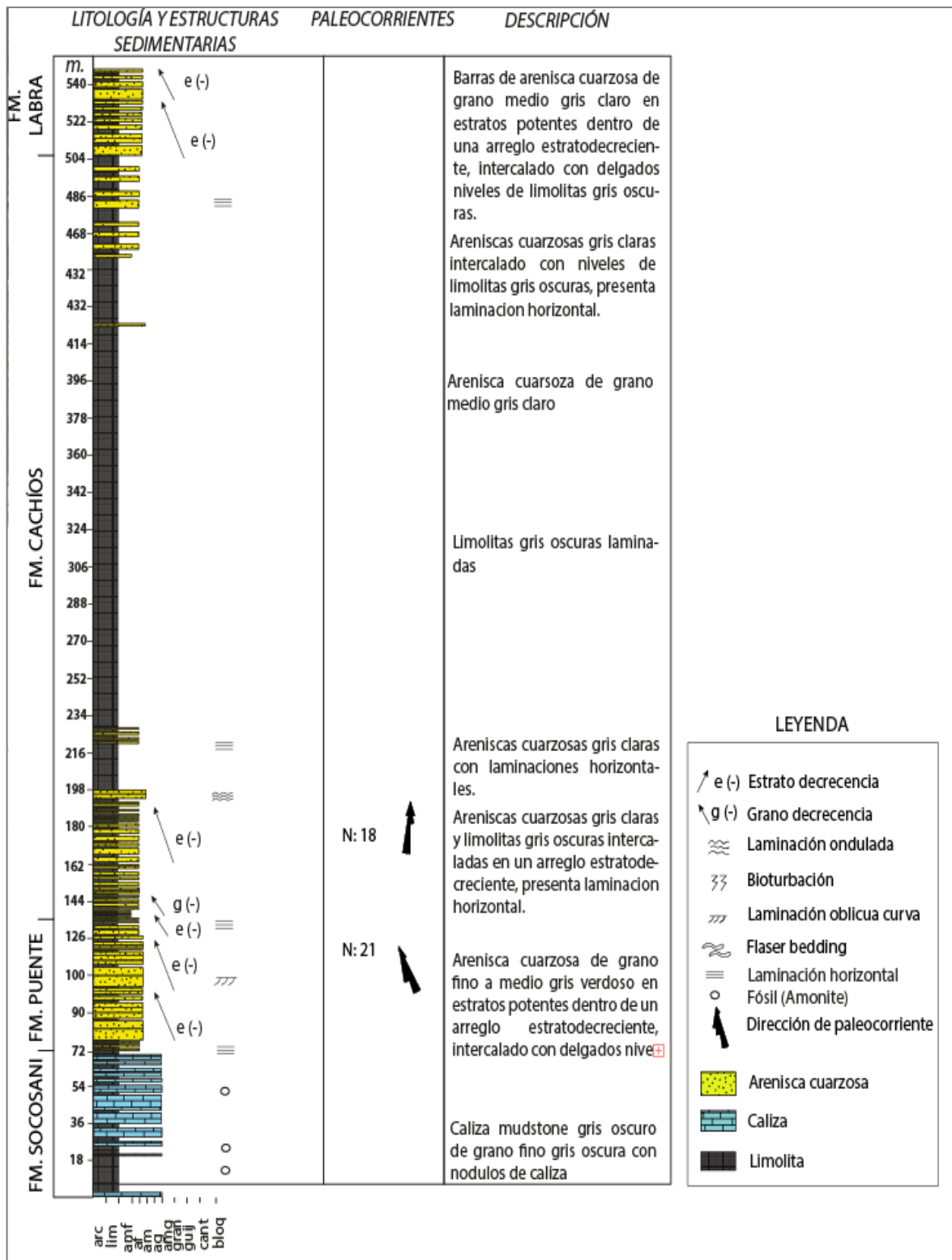


Figura 44. Columna litoestratigráfica de la Formación Cachíos. Levantado por el río Caracha cerca al caserío La Merced.

Fuente: Propia.



✓ *Formación Labra (Js-l).*

Reconocida por Benavides (1962) en el cerro Labra hacia el Sur de Hualhuani en el departamento de Arequipa. En el área de estudio, al Oeste del pueblo de Huamanquiya, la Formación Labra del Jurásico superior consta de una secuencia sedimentaria de 450 a 500 m de espesor que descansa sobre la Formación Cachíos e infrayace concordantemente a la Formación Gramadal constituida por calizas gris claras mudstone. Está constituida por areniscas cuarzosas gris claro potentes de grano fino a medio y lutitas parduscas a gris oscuras (Figura 45).

✓ *Formación Gramadal (Js-g).*

Inicialmente fue identificada y estudiado por Jenks (1948) el cual aflora en los alrededores de los cerros Hualhuani y Labra con un espesor aproximado de 80 m, y 100 m en los márgenes del río Huasamayo o Pichirigma en el departamento de Arequipa. En el cuadrángulo de Huancapi está conformado por anticlinales y sinclinales de gran longitud de dirección NO-SE. Para esta zona, esta unidad estaba cartografiada como Formación Paire (LAGESA, 1996). Aunque por su similitud litológica con las calizas del Jurásico de la Cuenca Arequipa, se le designó con el nombre de Formación Gramadal (Quispesivana & Navarro, 2002). Al Este de la localidad de Huamanquiya, la Formación Gramadal que corresponde al Jurásico superior consta de una secuencia de calizas Mudstone grises en estratos centimétricos a métricos que pueden variar de 0.20 a 1 m, esta secuencia carbonatada en conjunto alcanza los 120 m de espesor. (Figura 9).

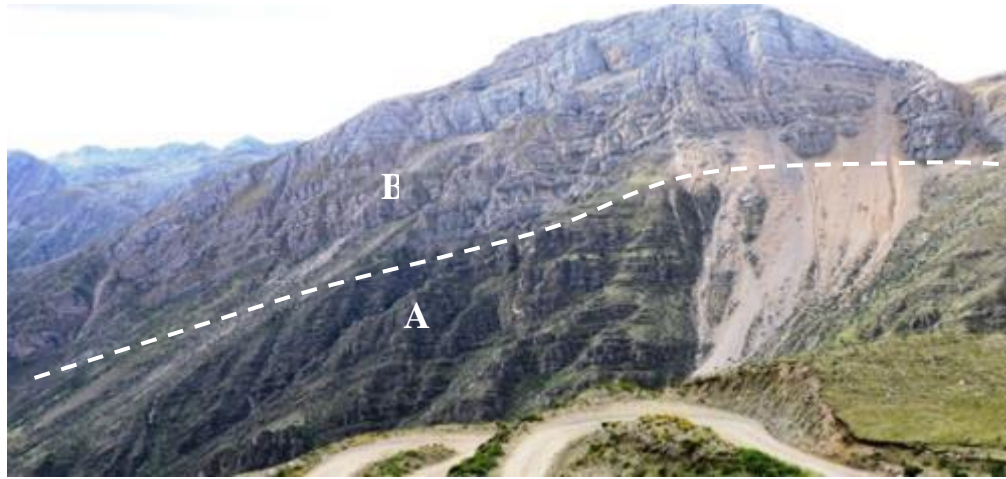


Figura 45. Afloramientos de la Formaciones Labra y Gramadal. A) Afloramientos de la Formación Labra. B) Formación Gramadal sobreyace en concordancia a la Formación Labra. Los afloramientos se ubican al Este del pueblo de Huamanquiya. Vista tomada hacia el Noreste. Fuente: Propia.

A continuación, se muestra una columna litoestratigráfica que corresponde a la Formación Labra que se realizó en campo (Figura 46), el cual fue levantado por el río Caracha cerca al caserío La Merced, la columna tiene un espesor aproximado de 450 m, la parte inferior inicia con granodecrecencia de areniscas y finaliza con estratodecrecencia.

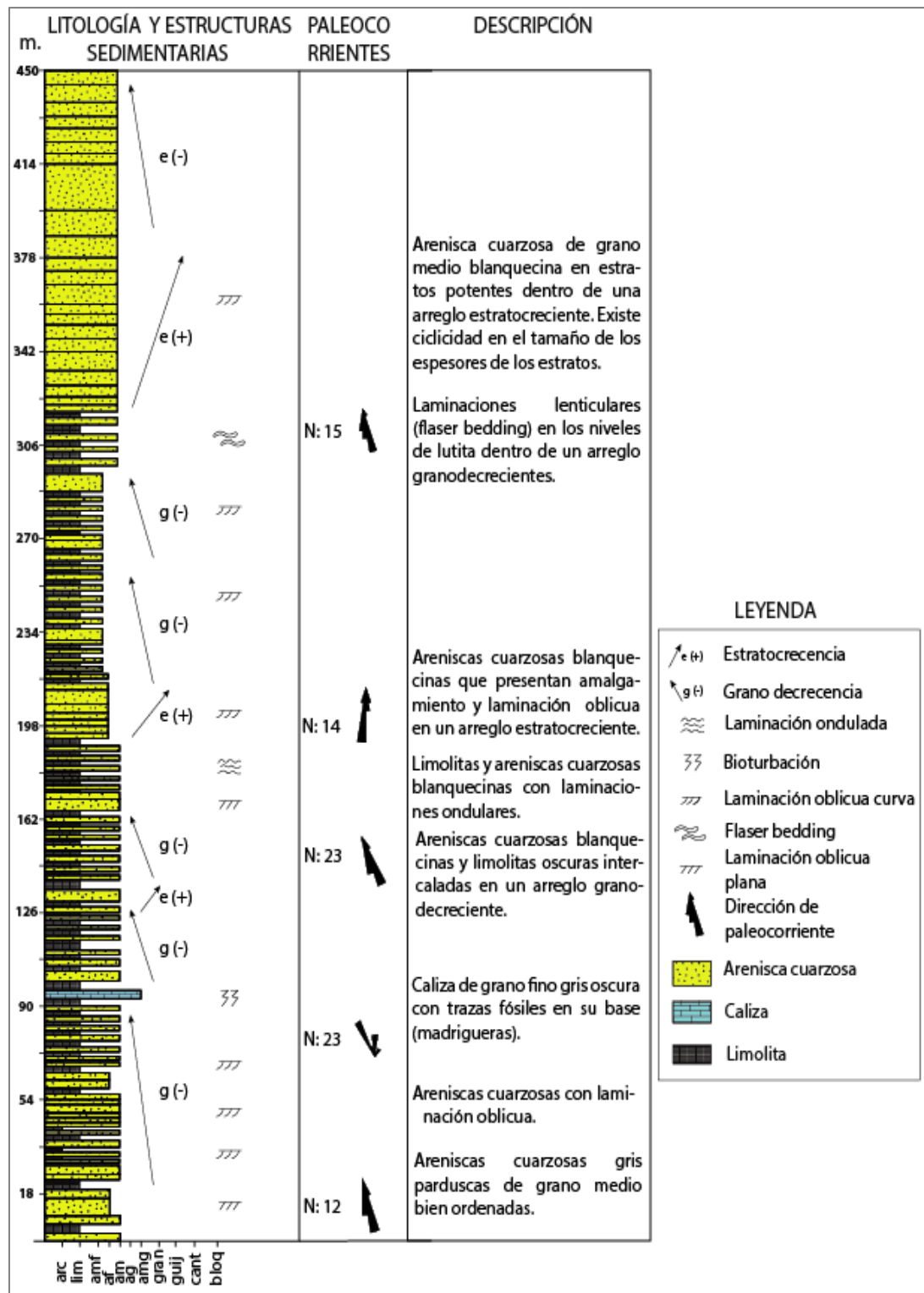


Figura 46. Columna litoestratigráfica de la Formación Labra. Levantado por el río Caracha, cerca al caserío La Merced.

Fuente: Propia.

✓ *Formación Hualhuani (Ki-hu).*

Descrita inicialmente por Jenks (1948), posteriormente Benavides (1962) la denominó como Miembro Hualhuani en la localidad tipo que se encuentra en el Cerro Hualhuani en el departamento de Arequipa cuyo espesor se estima entre 50 y 60 m de espesor.

En el área de estudio la Formación Hualhuani del Cretáceo inferior, aflora en la parte Sur del poblado de Sarhua, que corresponde a una secuencia sedimentaria de aproximadamente 450 m de espesor. Está compuesta por areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio a grueso en estratos centimétricos a métricos con laminación oblicua curva intercaladas con delgados niveles centimétricos de limolitas



rojizas y grises (Figura 47).

Figura 47. Afloramientos de la Formación Hualhuani. Afloran cerca de la localidad de Sarhua. Vista tomada hacia el Sur.
Fuente: Propia.

4.2.1.2.2. *Formación Murco (Ki-mu).*

Jenks (1948) y Benavides (1962) reconocieron y describieron a esta unidad como una secuencia sedimentaria cuya sección tipo se encuentra en el paraje de Pacchay Santa Rosa en el Valle Sigwas. Tiene un espesor aproximado de hasta 350 m. En el cuadrángulo de Huancapi con poco espesor a lo largo de una dirección NO-SE. Inicialmente fue



cartografiada como Formación Mara (LAGESA, 1996). Posteriormente Quispesivana & Navarro (2002) cambiaron este nombre por el de Formación Murco.

Jaillard (1995) interpreta a la parte inferior de la Formación Murco como una secuencia de frente deltaico distal o plataforma marina clásica, que progresa hacia la parte superior como una secuencia de medio costero de playa o de llanura deltaica distal sometida a la influencia de olas. Mientras que Jacay (2005) relaciona a esta unidad a una llanura aluvial costera con facies de lagoon tipo sabkhas. En base a su posición estratigráfica se le asigna edad Barremiano-Aptiano.

En el área de estudio la Formación Murco del Cretácico inferior aflora por la quebrada Huachanja, cerca al caserío Cruz Ccasa, que consiste en una secuencia sedimentaria de 150 a 200 m de espesor de areniscas cuarzosas de grano medio a fino rojizo intercalada con limolitas verdosas y rojizas (Figura 48). Destaca en la parte media una secuencia continua de areniscas cuarzosas de grano medio blanquecinas que alcanzan los 10 m de espesor.

4.2.1.2.3. Formación Arcurquina (Ki-a).

Establecida por Jenks (1948) y descrita a detalle por Benavides (1962) cuyo espesor promedio está medido en 670 m en los alrededores del cerro Arcurquina y que puede llegar hasta 900 m según su posición geográfica. Esta formación fue cartografiada inicialmente por LAGESA (1996) como Formación Ferrobamba. Posteriormente, se le designó el nombre de Formación Arcurquina (Quispesivana & Navarro, 2002).

La Formación Arcurquina es del Cretáceo inferior y consta de una secuencia sedimentaria de calizas Mudstone grises en niveles centimétricos en la base desde 0.20 m de espesor que varían hacia la parte superior con espesores de hasta 0.80 m (Figura 48).



Figura 48. Contacto entre las formaciones Hualhuani, Murco y Arcurquina. Se ubica en la quebrada Huachanja. Vista tomada hacia el Oeste.
Fuente: Propia.

4.2.1.3. Cenozoica.

4.2.1.3.1. Formación Ticllas (Ppe-t).

Morche (1995) denominó así a una intercalación de aproximadamente 500 m compuesta por flujos piroclásticos de colores claros ricos en cristales de cuarzo y plagioclasa; lavas porfirítica de color gris con tonalidades azuladas, rosadas; y brechas de composición andesítica hasta riolítica en los alrededores de Ticllas, en el departamento de Ayacucho. Para el cuadrángulo de Huancapi este nombre es asignado por Quispesivana & Navarro (2002) a una secuencia volcanosedimentaria de hasta 900 m de espesor.

4.2.1.3.2. Formación Castrovirreyña (PN-cas).

Salazar (1993) denominó bajo este nombre a una secuencia volcanosedimentaria de espesor aproximado de 1500 m reportada en los alrededores de los ríos tributarios Orientales del río Cañete, Huancavelica. Sus afloramientos están constituidos por areniscas tobáceas de grano fino a medio (LAGESA, 1996), calizas, tobas, brechas tobáceas y lavas. Cabe resaltar que las areniscas presentar estratificación cruzada, así



como abundantes niveles de conglomerados de gránulos y guijarros intercalados con lutitas gris claras las cuales presentan vetillas de yeso. Al interior de sus afloramientos, se ha reportado la existencia de gasterópodos mal conservados en los horizontes de areniscas calcáreas. Por lo que, Quispesivana & Navarro (2002) le asignan de edad Paleógeno - Neógeno, en base a su contenido fosilífero *Cyprideis sp.*, *Cytheridea sp.* y *Menetus sp.*, *Cyprideis sp.*

4.2.1.3.3. Formación Caudalosa (Nm-cau).

La localidad típica de esta formación se encuentra en los alrededores de la Mina Caudalosa en el departamento de Huancavelica (Salazar, 1993). Sus afloramientos se observan principalmente en el sector Central-Occidental del área de estudio, a lo largo de los poblados de Pucayacu, Pucara, Huasipata. Los que están constituidos por lavas andesíticas gris oscuros intercaladas con niveles de depósitos de tobas lapilli. En base a su posición estratigráfica se le asigna Mioceno (Salazar, 1993).

4.2.1.3.4. Formación Andamarca (Nm-an).

Sánchez & Lagos (2003) denominan como Formación Andamarca a una secuencia volcánica de gran extensión que aflora en la localidad de Andamarca en el departamento de Junín cuyo espesor se estima en 200 m. A lo largo de los cuadrángulos de Huancapi y Querobamba, los mejores afloramientos están registrados en las localidades de Pampachiri y Jajalla, así como en los cerros Chaccha, Jojnahua, Larigoto, Repisillo, Cruzpata ubicados en el extremo Suroeste del mismo cuadrángulo. Anteriormente, había sido cartografiada como parte de la Formación Sencca y Matapuquio (LAGESA, 1996); sin embargo, se ha mantenido la nomenclatura según la localidad tipo donde se le ha reportado. Estratigráficamente, sobreyace a la Formación Caudalosa.

Sus afloramientos están compuestos por una intercalación de tobas lapilli gris blanquecinos, conglomerados constituidos por clastos de cuarcitas; areniscas tobáceas y

lavas andesíticas. En base a su posición estratigráfica, se le asigna una edad del Neógeno - Mioceno (Figura 49).

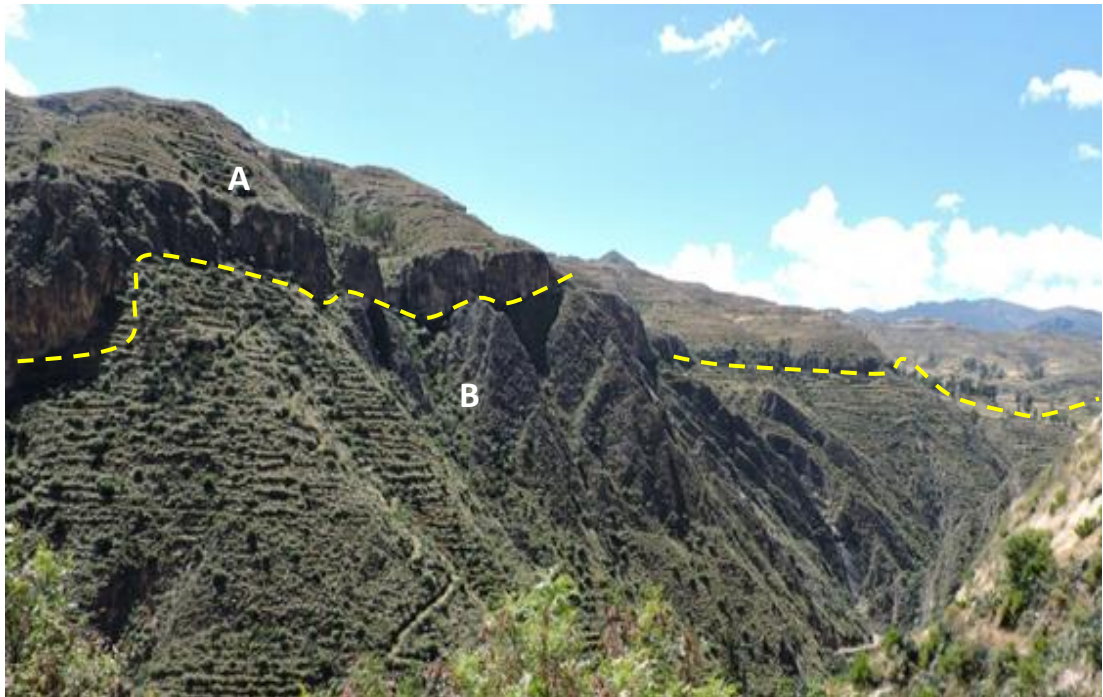


Figura 49. Afloramientos de las Formaciones Andamarca y Formación Labra. A) Depósitos de la Formación Andamarca. B) Formación Labra. Afloran cerca al caserío Chucupalla, vista tomada hacia el Suroeste.

Fuente: Propia.

4.2.1.3.5. Formación Sachabamba (*Np-sa*).

Esta Formación se define como una secuencia volcano sedimentaria, como resultado de la agrupación de las tobas de la morfoestructura volcánica Yanamachay definida por Morche et al. (1995). En el área de estudio se encuentra a manera de capas rojas derivadas del granito de San Miguel de Ongoy.

La base de la Formación Sachabamba no es continua, habiéndose encontrado al Oeste del poblado de Vischongo unas capas rojas que sobreyace al intrusivo de la Unidad San Miguel Ongoy. En general en el área de estudio la Formación Sachabamba es grano creciente y los niveles de toba son ceniza con fragmentos de líticos.



4.2.1.3.6. *Morfoestructuras Volcánicas.*

Los depósitos volcánicos inicialmente fueron atribuidos al Grupo Barroso, miembro inferior por (LAGESA, 1996), sin embargo, Quispesivana & Navarro (2002) optaron por diferenciarlos y asociarlos a Morfoestructuras volcánicas que corresponden al Neógeno-Plioceno.

✓ *Morfoestructura Volcánica Ancaray Jahuana.*

Consisten en la base a tobas de cristales (Np-aj/tbcri), le sobreyacen tobas lapilli (Np-aj/tbla), seguido de andesitas afírica (Np-aj/anda) y finalmente andesitas porfíricas Np-aj/andp.

✓ *Morfoestructura Volcánica Jellojasa.*

Consiste en tobas lapilli (Np-jj/tbla), seguido de andesitas porfíricas (Np-jj/andp).

✓ *Morfoestructura Volcánica Yanamachay.*

Consiste en andesitas porfíricas (Np-ya/andp), seguido de tobas de cristales (Np-ya/tbcri).

✓ *Morfoestructura Volcánica Pucamachay.*

Consiste en andesitas porfíricas (Np-pm/andp).

✓ *Morfoestructura Volcánica Antasello.*

Consiste en andesita porfírica (Np-an/andp).

✓ *Morfoestructura Volcánica Tutayoc Orco.*

Consiste en andesitas porfíricas (Np-to/andp).

4.2.1.3.7. *Depósitos Cuaternarios.*

✓ *Depósitos Glaciares (Qh-gl).*

Corresponden a acumulaciones de bloques subángulosos a angulosos englobados en una matriz arenosa y/o arcillosa cuyo espesor varía entre los 1 m a 10 m. Se extienden mayormente en las laderas bajas del cerro Condorcata y por la localidad de Pacopata.



✓ *Depósitos Fluvioglaciares (Qh-flgl).*

Están conformados por acumulaciones de cantos y bloques subredondeados englobados en matriz arcillosa que llegan a tener un espesor de 3 m. Se les aprecia principalmente en las Pampas de Tampincapampa Pampa Tirani, quebrada Tirani, quebrada Tampinca, también se le encuentran en las márgenes de cauces paleofluviales debido al retrabajo fluvial de los depósitos glaciales preexistentes.

✓ *Depósitos Fluviales (Qh-fl).*

Se encuentran principalmente en la intersección de los valles del río San José, Chilques y Acarí (depresión Puquio). Aunque en este lugar la exposición de estos depósitos es limitada, es posible observar terrazas de cantos y bloques de hasta 30 m de altura de pendiente moderada a abrupta.

✓ *Depósitos Coluviales (Qh-co).*

Los más representativos se ubican al Suroeste de la zona de estudio por el Caserío Manzanayoc, en la ladera del cerro Lance, están compuestos por bloques de roca que corresponden a conos de detritos y a desprendimientos de roca de amplitud local sobre una pendiente de inclinación abrupta. Se caracterizan por presentar poco espesor el cual no excede los 10 m.

4.2.1.3.8. *Rocas Intrusivas.*

a) *Unidad San Miguel Ongoy (PET-so).*

Batolito de Inicialmente en el área de estudio se tenía registrado como basamento del Querobamba con una edad de 1123 Ma. (Miskovic et al., 2009) sin embargo, dataciones en U-Pb precisan una edad de 260.7 Ma. (Reitsma et al., 2012). Las rocas plutónicas cubren aproximadamente el 15 % la superficie del área de estudio, la orientación general de los afloramientos es de Noroeste a Sureste coincidente con el alineamiento general de los Andes, consiste en granito de textura

fanerítica de grano medio, compuesta por cristales de feldespatos potásicos, plagioclasas, cuarzo, biotita y anfíboles (Figura 50).



Figura 50. Afloramiento de rocas graníticas de la unidad San Miguel de Ongoy. A) Vista panorámica. B) Muestra de mano del granito. Vista tomada al Este.
Fuente: Propia.

b) Unidad Ccasccabamba (Nm-ca).

b.1) Subvolcánico Andesítico.

El afloramiento de este cuerpo se encuentra al Noreste del área de estudio por la quebrada Picuayso. Tiene una textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa.

b.2) Cuarzo Monzodiorita.

En el área de estudio los afloramientos de cuarzo monzodiorita son pequeños, se exponen al Noreste del área de estudio por el río Pampas, cortando a las tobas del Grupo Mitu volcánico. Tiene una textura fanerítica de grano medio a fino, compuesto por cristales de feldespatos potásicos, plagioclasas, cuarzo y ferromagnesianos.

b.3) Cuarzodiorita.

Los afloramientos de cuarzodiorita se exponen en la parte Sureste del área de estudio, río Ccuenhuamayo, por alrededores de los caseríos Paccha y Mamanchicpampa, cortando a las calizas de la Formación Ayabaca. En sectores por



el caserío Cocha y caserío Liriopampa cortan a las calizas que corresponden al Grupo Pucara. Tiene una textura fanerítica de grano medio constituida por cristales de plagioclasas, cuarzo y ferromagnesianos.

b.4) Tonalita.

Presenta una textura fanerítica de grano medio, compuesta de cristales de plagioclasa, cuarzo y ferromagnesianos, aflora en el cerro Intihuatana y cerro Minasniyoc, parte Suroeste del área de estudio.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se requiere de un tratamiento estadístico para validar los resultados obtenidos en las evaluaciones cuantitativas aplicadas en los análisis de minerales pesados y análisis modal de areniscas (QFL), para realizar la interpretación de datos de cada análisis.

5.1.1. Análisis de minerales pesados

5.1.1.1. *Tratamiento estadístico de minerales pesados.*

El estudio de minerales pesados consiste en el reconocimiento, identificación y cuantificación de los diferentes grupos de minerales pesados. En base a los resultados del conteo se preparó una tabla porcentual de abundancia (Tabla 8), donde se muestra el conteo estadístico de los granos de minerales individuales de cada muestra y la ubicación colectada de cada muestra de los minerales pesados se encuentra en el Anexo F.

Tabla 8. Tabla de comparación en base a la abundancia porcentual de las muestras de minerales pesados. Incluye posibles rocas Fuentes y de las rocas detríticas del Grupo Yura

Unidad	Muestra	Localidad	Litología	Zircon (Zrn %)	Rutilo (Rt%)	Turmalina (Tur %)	Apatito (Ap %)	Piroxeno (Pxn %)	Titanita (Ttn %)	Granate (Grt %)	Anfibol (Amp %)	Epidota (Ep %)
Hualhuani (parte superior)	GR40A-15-004b	Tayapampa (Cerro Chanlanioc)	Arenisca	21.80	8.60	13.50	2.10	6.00	3.70	28.50	8.90	6.90
	GR40A-15-033b	Río Caracha	Arenisca	20.90	9.30	15.00	1.80	5.30	1.50	27.80	9.90	8.50
	GR40A-15-032b	Río Caracha	Arenisca	26.50	4.20	22.20	1.40	4.50	4.50	22.50	9.30	4.90
	GR40A-15-027b	Río Caracha	Arenisca	26.90	3.30	21.00	3.00	4.20	4.20	19.00	11.50	6.90
Labra (parte superior)	GR40A-15-007b	Carapo (Río Nununhueyoc)	Arenisca	28.10	9.90	25.90	7.60	5.40	4.70	1.40	8.30	8.70
	GR40A-15-012b	Río Caracha	Arenisca	31.00	8.60	25.60	1.00	8.00	7.60	2.70	7.90	7.60
Labra (parte inferior)	GR40A-15-001b	Orcco Huasi	Arenisca	27.60	19.50	19.20	5.40	5.20	9.60	4.20	4.90	4.40
	GR40A-15-029b	Río Caracha	Arenisca	34.40	10.80	18.90	5.00	7.20	6.50	2.60	3.60	11.00
Cachíos (parte superior)	GR40A-15-013b	Manchire (Quebrada Ccuellumayo)	Arenisca	4.00	2.50	3.00	1.00	66.70	1.20	1.10	2.30	18.20
	GR40A-15-030b	Río Caracha	Arenisca	6.00	3.30	7.40	2.70	59.80	1.90	2.70	1.10	15.10
Cachíos (parte inferior)	GR40A-15-035b	Las Mercedes (Quebrada Pocchueyco)	Arenisca	5.50	2.20	3.10	4.50	56.50	2.20	1.00	5.50	19.50
	GR40A-15-094b	Amazona Pampa (Río Caracha)	Arenisca	5.80	3.00	7.30	2.00	58.70	8.00	4.00	5.00	6.20
Grupo Mitu Volcánico	GR40B-16-074b	Río pampas	Andesita	0.44	0.00	1.00	0.00	94.25	0.00	0.00	2.06	2.25
	GR40B-16-103b	Río pampas	Arenisca	38.90	7.00	21.20	2.00	7.50	8.40	1.00	4.00	10.00
Unidad San Miguel Ongoy	GR40B-16-009b	Lindero Pata (Cerro Cooriscamco)	Granito	50.20	2.60	21.40	0.80	2.20	0.40	0.00	14.10	8.30
	GR40B-16-102b	Cocas	Esquistos	25.90	4.44	21.86	2.50	7.50	0.00	24.90	11.70	1.20

Fuente: Propia.



Descripción mineralógica y cuantitativa de las potenciales roca fuente y de las rocas detríticas del Grupo Yura.

Se describe cada unidad litoestratigráfica en base a la abundancia de los minerales pesados. Se clasifico en 3 ordenes (observación personal semi – cuantitativa), de acuerdo a la predominancia de los minerales pesados los cuales son:

- ✓ Abundante (> 20 %)
- ✓ Moderado (20 – 10 %)
- ✓ Escaso (<10 %)

5.1.1.1.1. Contenido de minerales pesados de las potenciales roca fuente de sedimentos.

A continuación, se describe una síntesis de las posibles unidades de aporte de los detritos que conforman las secuencias sedimentarias del Jurásico de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho.

a) Grupo Excélsior.

La muestra GR40B-16-102b corresponde al esquisto que aflora por la localidad de Cocas. De acuerdo a la identificación y conteo de los minerales pesados esta muestra presenta como mineral pesado en abundancia a los zircones (25.90 %), granates (24.90 %) y turmalinas (21.86 %) los minerales pesados moderados son los anfíboles (11.70 %) y los minerales pesados que son escasos (<10 %) son piroxenos, rutilos, apatitos y epidotas. En conclusión, los esquistos que corresponden al Grupo Excélsior se caracterizan por presentar abundante contenido de zircones, granates y turmalinas con proporciones moderadas de anfíboles (Figura 51).

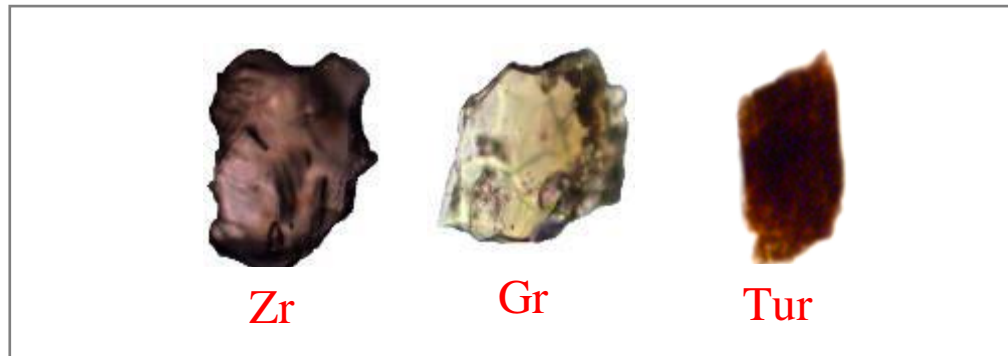


Figura 51. Minerales pesados extraídos de esquistos del Grupo Excelsior. Abreviaciones: Zircón (Zrn), Granate (Grt) y Turmalina (Tur).
Fuente: Propia.

b) *Unidad San Miguel Ongoy.*

La muestra GR40B-15-009b corresponde al granito que aflora cerca al pueblo de Lindero para precisamente en el cerro Cooriscamco. De acuerdo a la identificación y conteo de los minerales pesados esta muestra presenta como mineral pesado en abundancia a los zircones (50.20 %) y turmalinas (21.40 %), como minerales pesados moderados se tiene a los anfíboles (14.10 %) y los minerales pesados escasos (<10 %) son las epidotas, rutilos, piroxenos y apatitos. Por lo tanto, el granito que corresponde a la unidad San Miguel Ongoy se caracteriza por presentar abundante contenido de zircones y turmalinas (Figura 52).

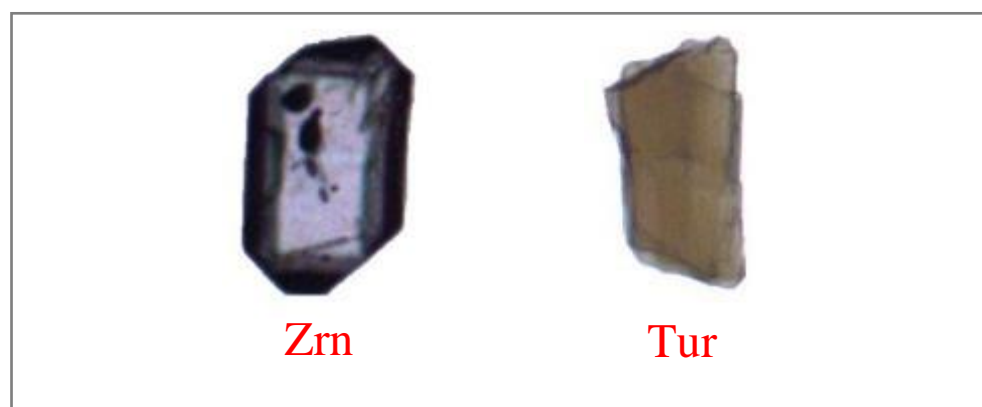


Figura 52. Minerales pesados extraídos del granito de la unidad San Miguel Ongoy. Abreviaciones: Zircón (Zrn) y Turmalina (Tur).
Fuente: Propia.

c) *Grupo Mitu sedimentario.*

La muestra GR40B-16-103b corresponde a la arenisca que aflora por el río Pampas. De acuerdo a la identificación y conteo de los minerales pesados esta muestra presenta como minerales pesados abundantes a los zircones (38.90 %) y turmalinas (Tur 21.20 %), no presenta minerales pesados moderados y los minerales pesados escasos (<10 %) son epidotas, titanitas, piroxenos, rutilos, anfíboles, apatitos y granates. Por lo tanto, las areniscas que corresponden al Grupo Mitu sedimentario, se caracterizan por presentar abundante contenido de zircones y turmalinas (Figura 53).

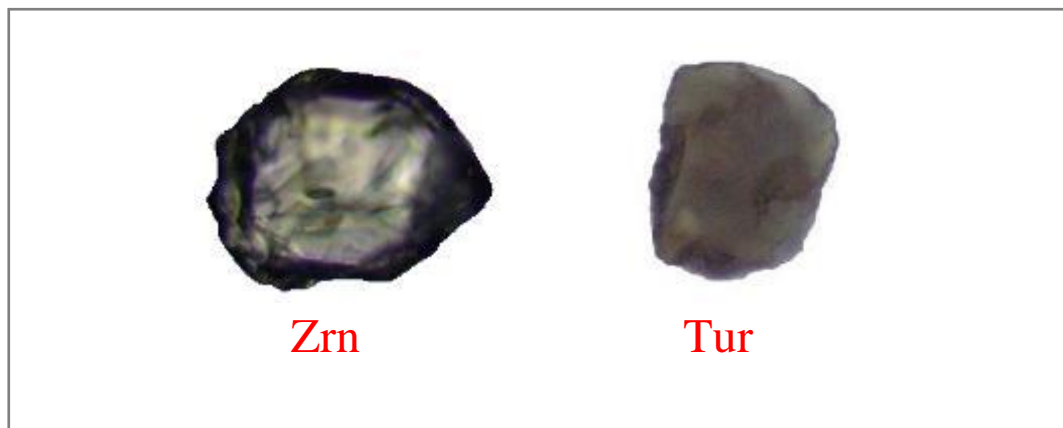


Figura 53. Minerales pesados extraídos de arenisca del Grupo Mitu sedimentario. Abreviaciones: Zircón (Zrn) y Turmalina (Tur). Fuente: Propia.

d) *Grupo Mitu volcánico.*

Está constituido por andesitas, se colectó la muestra GR40B-16-074b que aflora por el río Pampas. De acuerdo a la identificación y conteo de los minerales pesados esta muestra presenta como minerales pesados en abundancia a los piroxenos (94.25 %), no presenta minerales pesados moderados y los minerales pesados escasos (<10 %) son epidotas, anfíboles, turmalinas y zircones. Por lo tanto, las andesitas que corresponden al Grupo Mitu volcánico, se caracteriza por presentar abundantes piroxenos (Figura 54).

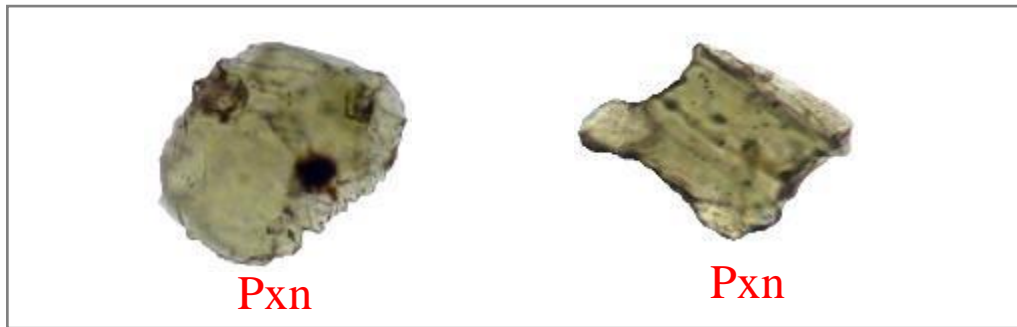


Figura 54. Minerales pesados extraídos de andesita del Grupo Mitu volcánico. Abreviaciones: Piroxeno (Pxn).
Fuente: Propia.

5.1.1.1.2. Contenido de minerales pesados de rocas detríticas del Grupo Yura.

a) Formación puente.

Está constituido por areniscas, afloran al Norte del caserío La Merced (Rio Caracha), Se colecto la muestra (GR40A-15-94b) de la parte superior.

a.1) Formación Puente parte superior.

De acuerdo a la identificación y conteo de los minerales pesados, esta muestra presenta como minerales pesados abundantes al piroxeno (58.7 %), no presenta minerales pesados moderados y los minerales escasos (<10 %) son titanitas, turmalinas, epidotas, zircones, anfíboles, granates y apatitos. Por lo tanto, la arenisca de la Formación Puente parte superior se distingue por presentar abundante contenido de piroxenos (Figura 55).

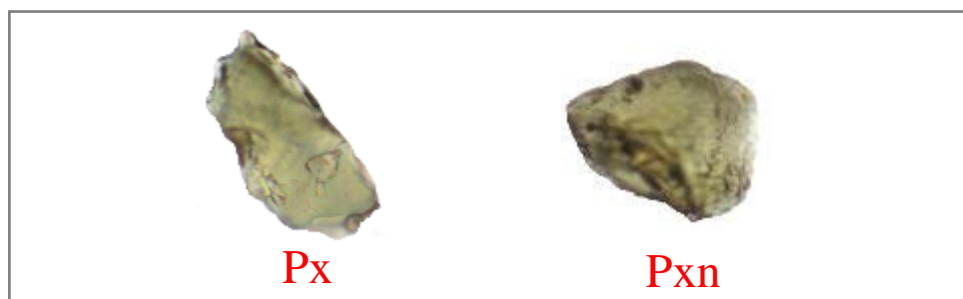


Figura 55. Minerales pesados extraídos de arenisca de la Formación Puente. Abreviaciones: Piroxeno (Pxn).
Fuente: Propia.

b) Formación Cachíos.

Está constituida por lutitas grises oscuras con niveles delgados de areniscas cuarzosas grises. Se colectó la muestra (GR40A-15-35b) de la parte inferior y las muestras (GR40A-15-30b y GR40A-15-13b) se colecto de la parte superior.

b.1) Formación Cachíos parte inferior.

En la parte inferior de la Formación Cachíos, se tiene a la muestra GR40A-15-35b, contiene minerales pesados en abundancia a los piroxenos (56.5 %), el mineral pesado moderado es la epidota (19.5 %) y los minerales pesados escasos (<10 %) son los anfíboles, zircones, apatitos, turmalinas, rutilos, titanitas y granates. Por lo tanto, las areniscas que corresponden a la Formación Cachíos parte inferior, se distinguen por presentar abundante contenido de piroxenos con proporciones moderadas de epidotas (Figura 56).

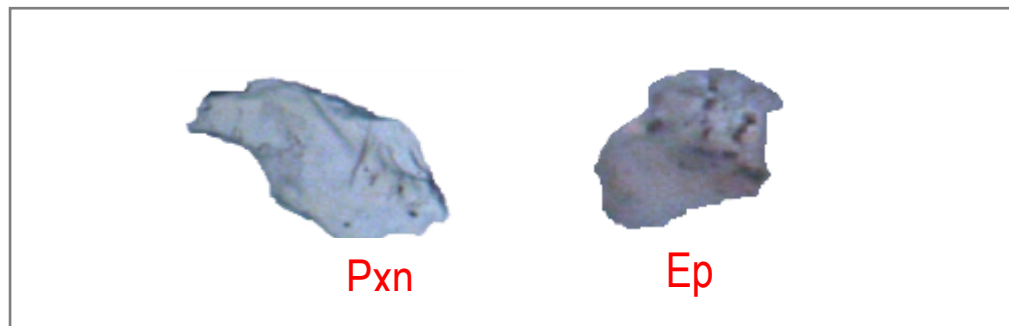


Figura 56. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Cachíos parte inferior. Abreviaciones: Piroxeno (Pxn) y Epidota (Ep).
Fuente: Propia.

b.2) Formación Cachíos parte superior.

En la parte superior de la Formación Cachíos, se tiene a la muestra GR40A-15-30b y GR40A-15-13b, donde los minerales pesados en abundancia son los piroxenos (66.7 a 59.8 %), los minerales pesados moderados son las epidotas (15.1 a 18.2 %) y los minerales pesados escasos (<10 %) son las turmalinas, zircones, rutilos, apatitos, granates, titanitas y anfíboles. Por lo tanto, las areniscas cuarzosas que corresponden

a la Formación Cachíos parte superior, se distinguen por presentar abundante contenido de piroxenos con proporciones moderadas de epidotas (Figura 57).

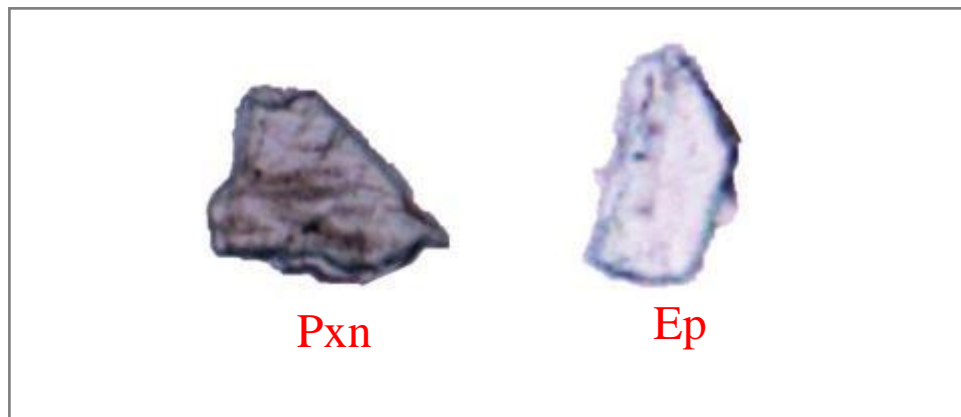


Figura 57. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Cachíos parte superior. Abreviaciones: Piroxeno (Pxn) y Epidota (Ep).
Fuente: Propia.

c) Formación Labra.

Está constituida por areniscas grises claras y niveles de limolitas grises, verdosas y rojizas. Se colectó de la parte inferior las muestras de areniscas GR40A-15-29b y GR40A-15-01b y de la parte superior se colecto las muestras (GR40A-15-12b y GR40A-15-07b).

c.1) Formación Labra parte inferior.

En la parte inferior de la Formación Labra, se tiene a la muestra GR40A-15-29b y GR40A-15-01b, contiene minerales pesados abundantes a los zircones (27.60 a 34.40 %), los minerales pesados moderados son turmalinas (18.90 a 19.20 %), Rutilos (10.80 a 19.50 %) y epidotas (11 %). Los minerales pesados escasos (<10%) son titanitas, apatitos, piroxenos, anfíboles y granates.

Por lo tanto, las areniscas cuarzosas que corresponden a la Formación Labra parte inferior, se distinguen por presentar abundantes zircones con proporciones moderadas de turmalinas, rutilos y epidotas (Figura 58).



Figura 58. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Labra parte inferior. Abreviaciones: Turmalina (Tur) y Zircón (Zrn). Fuente: Propia.

c.2) *Formación labra parte superior.*

En la parte superior de la Formación Labra, se tiene las muestras GR40A-15-12b y GR40A-15-07b, siendo los minerales pesados predominantes zircones (28.10 a 31 %) y turmalinas (25.60 a 25.90 %) respectivamente. No presenta minerales pesados subordinados. Como minerales pesados de menor proporción (<10 %) de las muestras mencionadas se tiene a rutilos, piroxenos, anfíboles, apatitos, epidotas y granates. Por lo tanto, las areniscas cuarzosas que corresponden a la Formación Labra parte superior, se distinguen por presentar zircones y turmalinas (Figura 59).



Figura 59. Minerales pesados extraídos de areniscas de la Formación Labra parte superior. Abreviaciones: Zircón (Zrn) y Turmalina (Tur). Fuente: Propia.

d) *Formación Hualhuani.*

Está constituida por areniscas blanquecinas y niveles delgados de limolitas grises. Se colectó de la parte inferior las muestras GR40A-15-27b y GR40A-15-32b y de la parte superior las muestras GR40A-15-33b y GR40A-15-04b.

d.1) *Formación Hualhuani parte inferior.*

En la parte inferior, las muestras GR40A-15-27b y GR40A-15-32b contiene como mineral pesado abundante a los zircones (26.5 a 26.9 %), granates (22.5 %) y turmalinas (21.0 a 22.20 %) y como minerales pesados moderados se tiene a los anfíboles (19.0 %). Los minerales pesados escasos (<10 %) de las muestras mencionadas son piroxenos, titanitas, apatitos, rutilos y epidotas. Por lo tanto, las areniscas que corresponden a la Formación Hualhuani parte inferior, se distinguen por presentar abundantes zircones, granates y turmalinas con proporciones moderadas de anfíboles (Figura 60).



Figura 60. Minerales pesados de areniscas de la Formación Hualhuani parte inferior.
Abreviaciones: Zircón (Zrn), Granate (Grt) y Turmalina (Tur).
Fuente: Propia.

d.2) *Formación Hualhuani parte superior.*

En la parte superior de la Formación Hualhuani, las muestras GR40A-15-33b y GR40A-15-04b tiene como minerales pesados abundantes a los granates (27.8 a 28.5 %) y zircones (20.9 a 21.8 %). Los minerales pesados moderados son turmalinas (13.5 a 15.0 %). Los minerales pesados escasos (<10 %) son anfíboles, rutilos, epidotas, piroxenos,

titanitas y apatito. Por lo tanto, las areniscas que corresponden a la Formación Hualhuani parte superior, se distinguen por presentar abundantes granates y zircones con proporciones moderadas de turmalinas (Figura 61).



Figura 61. Minerales pesados de areniscas de la Formación Hualhuani parte superior. Abreviaciones: Granate (Grt) y Zircón (Zrn). Fuente: Propia.

5.1.1.2. Comparación de espectros de rocas fuentes vs rocas detríticas del Grupo

Yura.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 8, se realiza una comparación gráfica de espectros de las muestras de las posibles rocas fuentes (Figura 62) y de las muestras de rocas detríticas del Grupo Yura (Figura 63), según la predominancia de los minerales pesados.

5.1.1.2.1. Espectros de minerales pesados de las rocas fuentes.

El Grupo Excélsior, La unidad San Miguel Ongoy, el Grupo Mitu sedimentario y el Grupo Mitu volcánico, son las principales rocas fuentes que se tiene aflorando en la zona de estudio.

a) Grupo Excélsior.

consiste en esquistos que aflora por la localidad de Cocas. Los minerales pesados identificados y contados en estas rocas se reportan en la Tabla 9. Estos resultados fueron representados en el diagrama de espectros (Figura 62), donde se puede apreciar la abundancia grafica de zircones, granates y turmalinas.

b) *Unidad San Miguel Ongoy.*

Consiste en granitos, que aflora cerca al pueblo de lindero pata precisamente en el cerro Cooriscamco. Los minerales pesados identificados y contados en estas rocas se reportan en la Tabla 9. estos resultados fueron representados en el diagrama de espectros (Figura 62), donde se puede apreciar la abundancia grafica de zircones y turmalinas.

c) *Grupo Mitu sedimentario.*

Consiste en areniscas que aflora por el río Pampas. Los minerales pesados identificados y contados en estas rocas se reportan en la Tabla 9. Estos resultados fueron representados en el diagrama de espectros (Figura 62), donde se puede apreciar la abundancia grafica de zircones y turmalinas.

d) *Grupo Mitu volcánico.*

Está constituido por andesitas, que afloran por el río Pampas. Los minerales pesados identificados y contados en estas rocas se reportan en la Tabla 9. Estos resultados fueron representados en el diagrama de espectros (Figura 62), donde se puede apreciar la abundancia grafica de piroxenos.

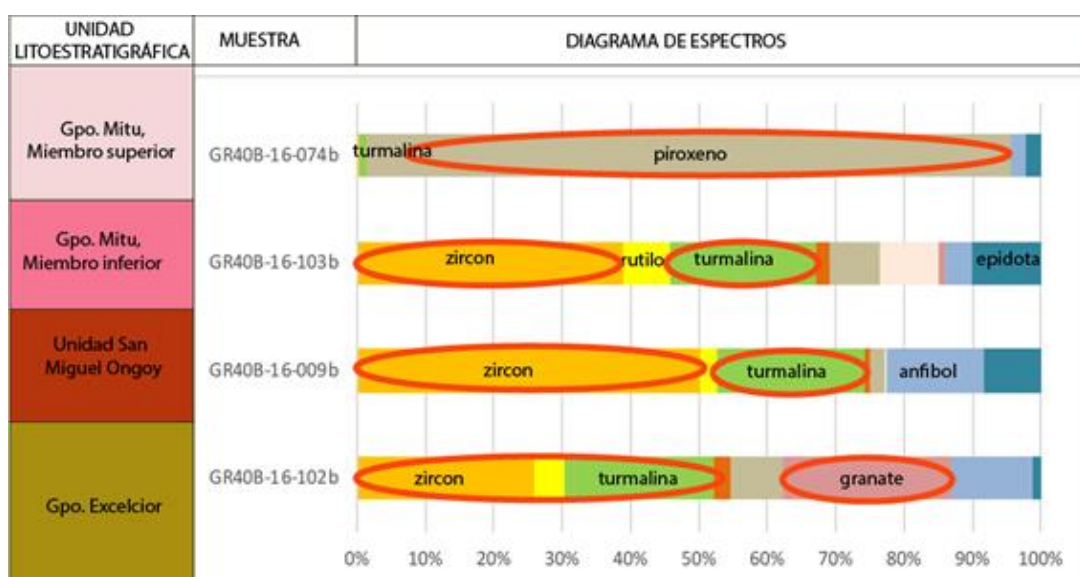


Figura 62. Diagrama de espectros de las potenciales rocas fuente. Se muestran los ensambles de minerales pesados. Los círculos rojos indican la abundancia de los minerales pesados.

Fuente: Propia.

5.1.1.2.2. *Espectros de minerales pesados de las rocas detríticas del Grupo Yura.*

Las rocas detríticas que forman la parte Norte de la Cuenca Arequipa corresponden al Grupo Yura, representada por las formaciones Puente, Cachíos, Labra y Hualhuani. De cada Formación se identificaron, caracterizaron y cuantificaron los minerales pesados contenidos en las muestras de rocas extraídos y se reporta en la Tabla 9. Los resultados de esta tabla son representados en el diagrama de espectros para cada formación (Figura 63).

a) Formación Puente.

Los espectros de los minerales pesados de esta formación (Figura 63), se caracteriza por presentar abundantes piroxenos.

b) Formación Cachíos.

Se dividió en dos partes inferior y superior:

Los espectros de minerales pesados de la parte inferior de la Formación Cachíos (Figura 63), se aprecia la abundancia de piroxenos con proporciones moderadas de epidotas.

Los espectros de minerales pesados de la parte superior de la Formación Cachíos (Figura 63), se aprecia la abundancia de piroxenos y proporciones moderadas de epidotas.

c) Formación Labra.

Se dividió en dos partes inferior y superior:

Los espectros de minerales pesados de la parte inferior de la Formación Labra (Figura 63), se aprecia la abundancia de zircones con proporciones moderadas de turmalinas, rutilos y epidotas. Los espectros de minerales pesados de la parte superior de la Formación Labra (Figura 63), se aprecia la abundancia de zircones y turmalinas.



d) Formación Hualhuani.

Se dividió en dos partes inferior y superior:

Los espectros de minerales pesados de la parte inferior de la Formación Hualhuani (Figura 63), se aprecia la abundancia de zircones, granates y turmalinas, con proporciones moderadas de anfíboles. Los espectros de minerales pesados de la parte superior de la Formación Hualhuani (Figura 63), se aprecia la abundancia de granates y zircones con proporciones moderadas de turmalinas.

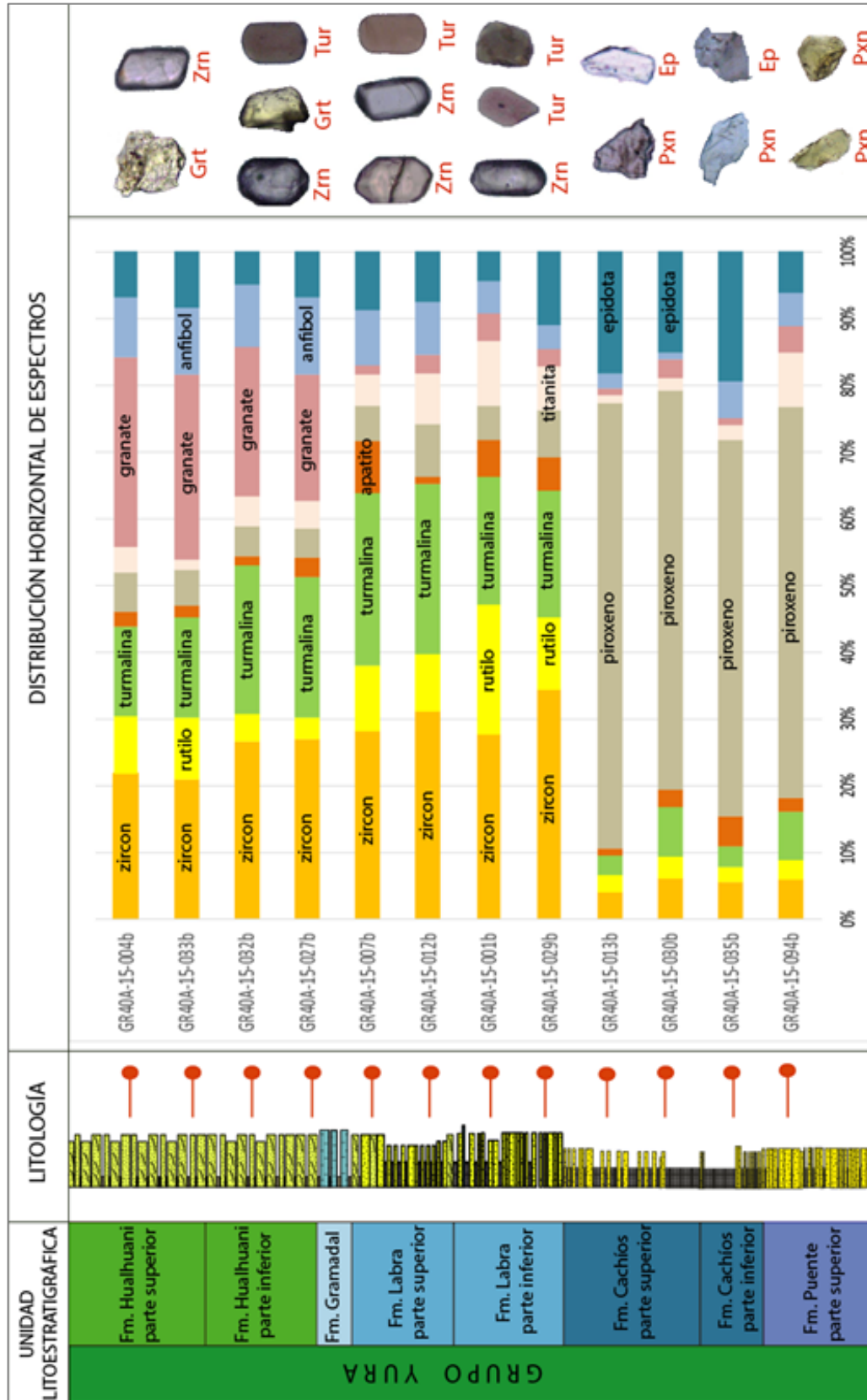


Figura 63. Representación de los ensambles de minerales pesados de rocas detríticas de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.
Fuente: Propia.

Numerosos autores tales como Hubert (1962), Morton & Hallsworth (1994) y Alvan (2015) sugieren el índice de proveniencia, mediante la aplicación de las ratios/proporciones de minerales pesados tales como $ZTR = \text{Zircón} + \text{Turmalina} + \text{Rutilo}$ y $ATi = \text{Índice Apatito} + \text{Turmalina}$. Utilizando estas proporciones de minerales pesados, se puede observar hasta 3 variaciones principales en los cambios de picos de los espectros en las rocas del Grupo yura de Ayacucho (Figura 64). La asociación de las ratios de ZTR y ATi, son minerales más frecuentes en areniscas recicladas.

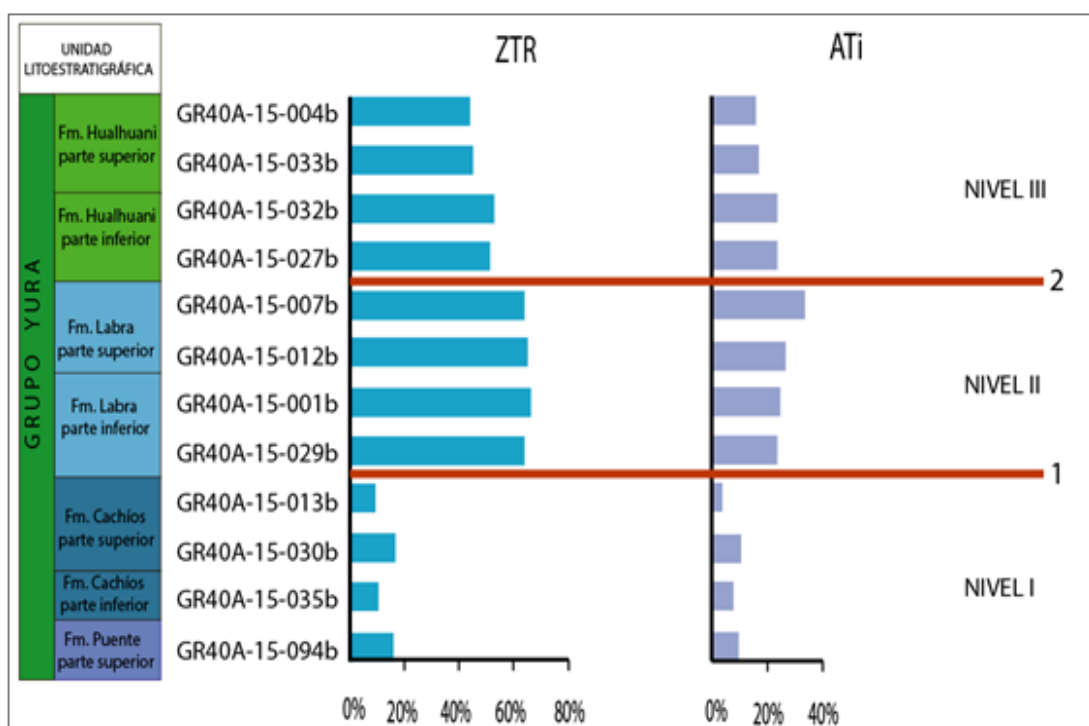


Figura 64. Espectros de la asociación de los minerales ZTR Y ATi. Abreviación: ZTR = Zircón + Turmalina + Rutilo; ATi = Índice Apatito Turmalina. La cual nos muestra 3 cambios muy considerables. Las líneas rojas indican los cambios más resaltantes en composición mineralógica de las unidades litoestratigráficas del Grupo yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.

Fuente: Propia.

En la Figura 64 se realizó la representación gráfica de ratios, la cual indica 3 niveles de acumulación de sedimentos y 2 eventos importantes para la acumulación de estos sedimentos. El nivel I representado por las muestras GR40A-15-094b, GR40A-15-035b, GR40A-15-030b y GR40A-15-013b nos indica un bajo contenido de ratios ZTR (zircón, turmalina y rutilo) y ATi (apatito y turmalina) en comparación con los niveles II y III.



EL nivel II representado por las muestras GR40A-15-029b, GR40A-15-001b, GR40A-15-012b y GR40A-15-007b, nos indica un aumento en ratios de ZTR y ATi, el nivel II y III se diferencian por los cambios de picos de espectros de ratios.

El nivel III representado por las muestras GR40A-15-027b, GR40A-15-032b, GR40A-15-033b y GR40A-15-004b, nos indica una ligera disminución en comparación a ratios con el nivel II.

En conclusión, la asociación ZTR (zircón, turmalina y rutilo) y ATi (índice apatito y turmalina), nos indican que en el nivel I tuvo un bajo aporte de una fuente reciclada. Para el nivel II y III tuvo un mayor aporte de una fuente reciclada.

Así también con los datos obtenidos en la Tabla 9 Se realizó la gráfica de la distribución vertical de los minerales pesados estudiados en las posibles unidades de aporte y las unidades detríticas del Grupo Yura (Cuenca Arequipa en el Departamento de Ayacucho) (Figura 65).

El énfasis de la colecta de muestras es que sean representativas de cada unidad litoestratigráfica, teniendo al menos 2 muestras por cada formación (Figura 65).

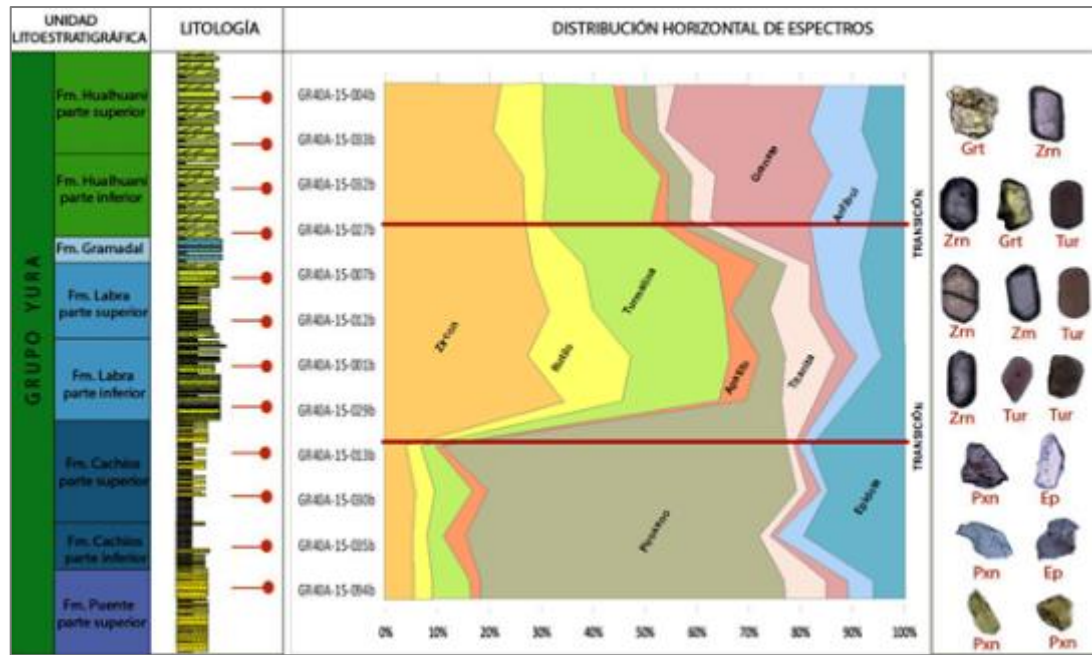


Figura 65. Distribución vertical de los minerales pesados del Grupo Yura. Las líneas rojas indican los cambios más resaltantes en composición mineralógica de las posibles unidades de aporte y las unidades litoestratigráficas Mesozoicas parte Norte de Cuenca Arequipa en Ayacucho. Fuente: Propia.

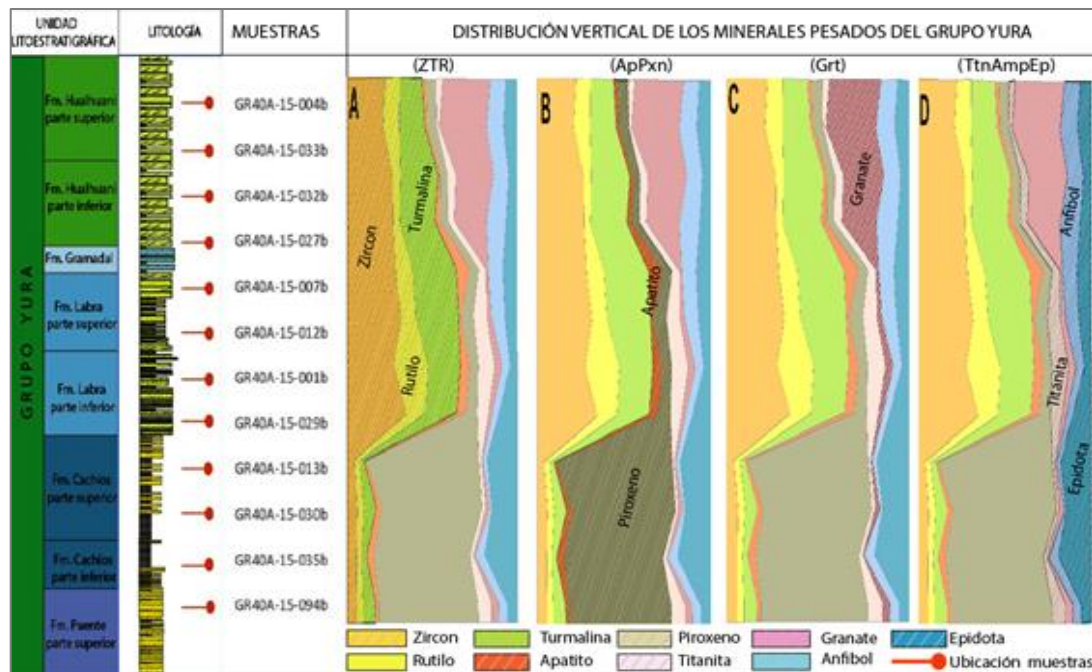


Figura 66. Distribución vertical de los minerales pesados del Grupo Yura en el departamento de Ayacucho. En A) Espectros de minerales pesados de zircón, rutilo y turmalina. B) Espectros de minerales pesados de apatito y piroxeno. C) Espectro de mineral pesado de Granate. D) Espectros de minerales pesados de titanita, anfíbol y epidota. Fuente: Propia.

La distribución vertical de los minerales pesados de los espectros de zircón, rutilo y turmalina (Figura 66), presenta un bajo contenido para la Formación puente, de igual modo

para la Formación Cachíos y aumenta progresivamente para la Formación Labra y Hualhuani.

La predominancia de zircones, rutilos y turmalinas son característicos del Grupo Mitu sedimentario, además el zircón es abundante en el Grupo Excélsior y Unidad San Miguel Ongoy (Figura 62).

La distribución vertical de minerales pesados de apatito y piroxeno (Figura 66) presenta un pico en la Formaciones Puente y Cachíos y disminuye progresivamente para la Formación Labra y Hualhuani. Los minerales pesados de apatito y piroxeno son característicos del Grupo Mitu volcánico (Figura 62).

La distribución vertical del granate (Figura 66) presenta un bajo contenido en las Formaciones Puente, Cachíos y Labra; tiende a aumentar para la Formación Hualhuani. El granate es característico del Grupo Excélsior (Figura 62).

La distribución vertical de los minerales pesados de titanita, anfíbol y epidota (Figura 66), se presenta en todas las Formaciones detríticas del Grupo Yura, además estos minerales pesados se reportan en todas las rocas fuente estudiadas, pero en cantidades menores. Por lo tanto, podrían derivar estos minerales de otras fuentes de aporte que posiblemente ya estén erosionadas.

Si recordamos los minerales pesados reportados en las potenciales rocas fuente tenemos que:

- a) El Grupo Excélsior y la Unidad intrusiva San Miguel Ongoy se caracteriza por presentar una asociación de zircones, granates y turmalinas (Figura 62).
- b) El Grupo Mitu sedimentario se caracteriza por presentar una asociación de zircon y turmalina (Figura 62).
- c) El Grupo Mitu volcánico se caracteriza por presentar una asociación muy particular de piroxenos (Figura 62).



Comparando los minerales pesados reportados en las potenciales rocas fuentes y los minerales reportados en las unidades detríticas estudiadas del Grupo Yura (Jurásico) (Figura 63) podríamos deducir que para las Formaciones puente y Cachíos se tiene un alto contenido de piroxenos, los que podría derivar del Grupo Mitu volcánico.

Para la Formación Labra aumenta el contenido de zircon, turmalina y rutilo son los minerales comunes en el Grupo Mitu sedimentario.

Para la Formación Hualhuani presenta un aumento de zircon, granate y turmalina estos minerales son característicos del Grupo Excelcior y de la Unidad San Miguel Ongoy (Figura 62) y probablemente también sea característico del basamento metamórfico de Querobamba que constituyen granitos.

5.1.1.2.3. Modelo de proveniencia sedimentaria para las rocas detríticas del Grupo Yura en base a minerales pesados.

El primer modelo de proveniencia sedimentaria se basa en los espectros de minerales pesados de las potenciales roca fuente (Figura 62) y de las rocas detríticas del Grupo Yura (Figura 63) y son combinados a modo de presentar un modelo integrado (Figura 66). Los cambios en la composición mineral de cada unidad litoestratigráfica son representados en la Figura 64, 65 y 66. Todos estos resultados se correlacionaron, dando lugar a un primer modelo de proveniencia sedimentaria de la parte Norte de la cuenca Arequipa en Ayacucho, donde se señalan los cambios en la mineralogía (líneas rojas en la Figura 67).

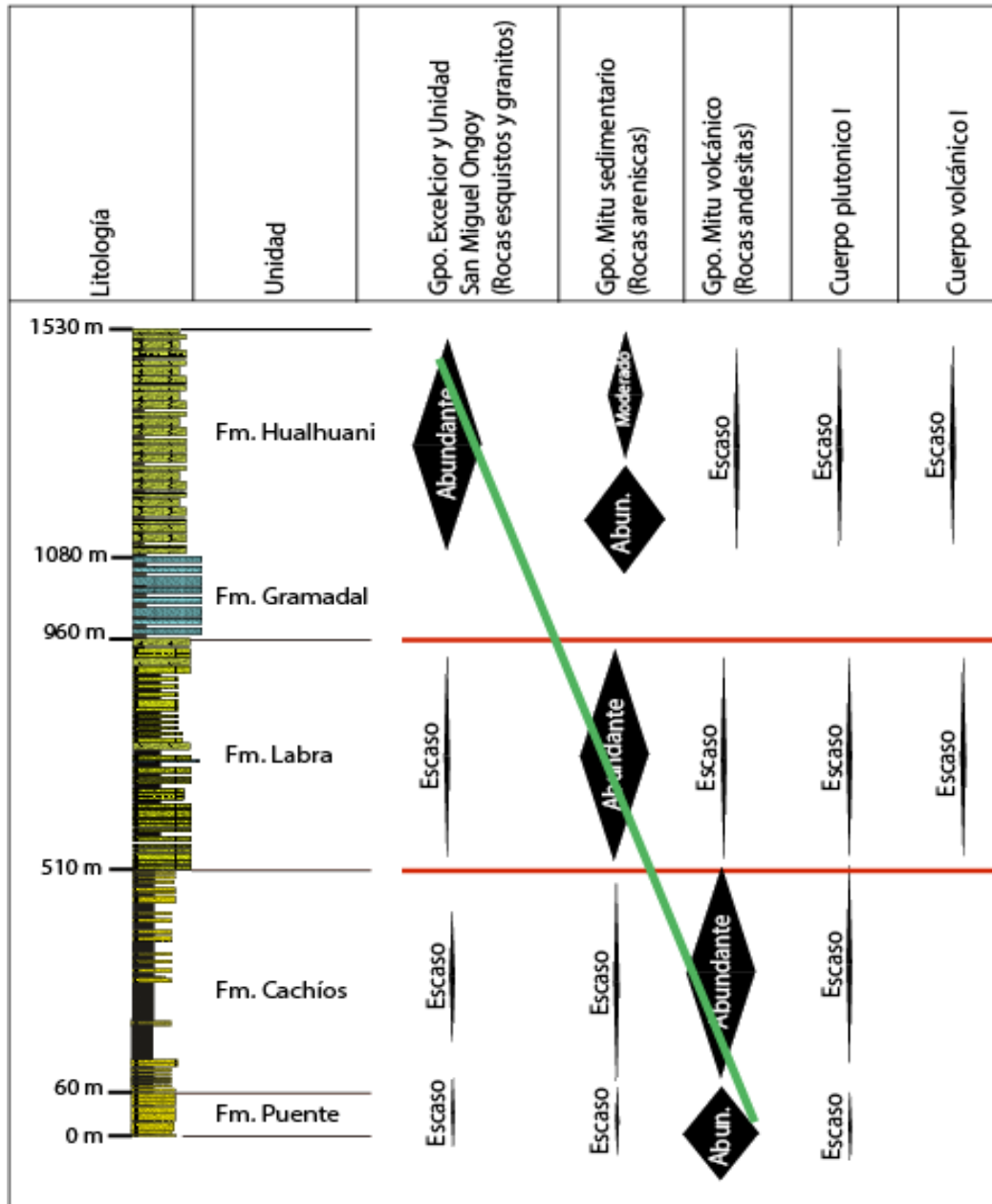


Figura 67. Primer modelo de proveniencia sedimentaria detrítica del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho. La línea roja indica los cambios en las proporciones dominantes de las rocas que aportaron sedimentos de cada unidad detrítica del Grupo Yura. La línea verde indica una clara evolución geodinámica progresiva y paleogeográfica en relación al aporte de sedimentos.
Fuente: Propia.

5.1.2. Analisis Petrografico de Areniscas

En esta tesis se ha realizado el análisis QFL de doce muestras de areniscas para reforzar los estudios de proveniencia sedimentaria planteados. Dado que los métodos para conocer la proveniencia sedimentaria en una cuenca sedimentaria son variados (e.g. análisis de



minerales pesados, análisis petrográfico de areniscas (QFL), litogeoquímica, etc.). Se aclara que todos ellos buscan definir la composición mineral y química de los sedimentos (Morton & Hallsworth, 1994). Tomando en consideración estas declaraciones, la presente tesis se basa en los análisis de minerales pesados y se refuerza con el análisis composicional de las arenisca mediante el método de conteo de granos (QFL).

Los análisis de proveniencia se basan únicamente en la composición de la fracción clástica de las areniscas (Dickinson, 1970). Sin embargo, hay que tener presente que el clima, el relieve la abrasión y el retrabajo de partículas son otros factores que controlan la composición de las areniscas (Dickinson & Suczek, 1979). Considerando que tipo de matriz y de cemento presentes en las areniscas están condicionados por la diagenesis. Para este trabajo se realizó el análisis cuantitativo y cualitativo de los granos que presentan las areniscas y la descripción de las diferentes características que presenta la muestra.

5.1.2.1. Tratamiento estadístico de los análisis petrográficos (Secciones delgadas).

Se da a conocer el estudio del análisis petrográfico de 12 secciones delgadas correspondientes a la Formación Puente parte superior (GR40A-15-094a), Formación Cachíos parte inferior (GR40A-15-035a), Formación Cachíos parte superior (GR40A-15-030a) y (GR40A-15-013a), Formación Labra parte inferior (GR40A-15-029a) y (GR40A-15-001a), Formación Labra parte superior (GR40A-15-012a) y (GR40A-15-007a), Formación Hualhuani parte inferior (GR40A-15-027a) y (GR40A-15-032a) y Formación Hualhuani parte superior (GR40A-15-033a) y (GR40A-15-004a). Las muestras se colectaron de la parte Norte de la Cuenca Arequipa, departamento de Ayacucho, en su mayoría del trayecto del río Caracha (Ver Anexo G). Para el análisis de las secciones delgadas de rocas sedimentarias se realizó el conteo modal de los granos de cuarzo (Q), feldespatos (F) y fragmentos líticos (L), según el diagrama QFL de Pettijohn et al. (1987) y



Dickinson (1970), además se contó con el apoyo de los manuales de Mackenzie (2003). Se utilizó la plantilla sugerida en el manual No. 4: Clasificación de rocas sedimentarias (INGEMMET, 2015).

Para el presente trabajo se realizó el conteo modal de granos (Q), feldespato (F) y litoclastos (L), donde se consideró la tipología de cada grano.

Los cuarzos (Q) que se consideraron son:

1. Cuarzo monocristalino de extinción recta (Qmr).
2. Cuarzo monocristalino de extinción ondulante (Qo).
3. Cuarzo policristalino (Qp).

Los feldespatos (F) que se consideraron son:

1. Feldespato potásico (Fk)
2. Feldespato plagioclasas (Fp).

Los fragmentos líticos (L) que se consideraron son:

1. Litoclasto metamórfico (Lm)
2. Litoclasto sedimentario (Ls)
3. Litoclasto volcánico (Lv)
4. Los granos micro cristalinos (Qmc) o “chert” han sido incluidos dentro de la categoría L (litoclastos), así como lo propone Dickinson (1970).

El resumen del conteo de las areniscas es representado y categorizado de acuerdo a su composición mineral (Tabla 9).

Tabla 9. Abundancia a partir de conteo de minerales ligeros (datos composicionales) de 12 muestras de areniscas en laminas delgadas. Los valores están expresados porcentualmente. Abreviaciones: N° = Numero de granos estudiados, Q = Cuarzo (Qmr + Qp + Qmo), F = Feldespatos (Fp + Fk), L = Litoclastos (Lv + Ls + Lm + Qmc), Fp = Feldespato plagioclásico, Fk = Feldespato potásico, Qm = Cuarzo monocristalino (Qmr + Qo), Qmo = Cuarzo ondulante, Qmr = Cuarzo monocristalino de extinción recta, Qp = Cuarzo policristalino, Qmc = Cuarzo microcristalino (chert), Lm = Litoclasto metamórfico, Ls = Litoclasto sedimentario, Lv = Litoclasto volcánico, Lt = Litoclasto total (L + Qp). Para el nombre de las rocas se considera la nomenclatura propuesta por Dickinson (1985), en el diagrama de clasificación de areniscas.

Unidad	Muestra	Localidad	Litología	N°	D (%)	F (%)	L (%)	Qm (%)	Qmr (%)	Qp (%)	Qo (%)	Qmc (%)	Fp (%)	Fk (%)	Lm (%)	Ls (%)	Lv (%)	Lt (%)
Hualhuani (parte superior)	GR40A-15-004a	Tayapampa (Cerro Chanlantoc)	Subarcosa	213.0	84.5	8.0	7.5	70.4	47.9	14.1	22.5	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	7.5	21.6
	GR40A-15-033a	Río Caracha	Subarcosa	253.0	81.0	11.1	7.9	73.1	67.6	7.9	5.5	0.0	0.0	11.1	0.0	1.6	6.3	15.8
	GR40A-15-032a	Río Caracha	Subarcosa	778.0	85.3	8.4	6.3	71.5	50.0	13.9	21.5	0.0	4.4	4.0	0.0	0.1	6.2	20.2
	GR40A-15-027a	Río Caracha	Subarcosa	561.0	88.2	7.5	4.3	77.5	56.1	10.7	21.4	0.0	2.5	5.0	0.0	0.0	4.3	15.0
Labra (parte superior)	GR40A-15-007a	Carapo (Río Nununhuayoc)	Sublitoarenita	521.0	72.6	13.2	14.2	64.1	52.0	8.4	12.1	0.0	5.8	7.5	0.0	4.0	10.2	22.6
	GR40A-15-012a	Río Caracha	Sublitoarenita	353.0	70.5	14.4	15.0	43.6	38.5	26.9	5.1	0.0	3.7	10.8	0.0	9.1	5.9	41.9
Labra (parte inferior)	GR40A-15-001a	Orcco Huasi	Sublitoarenita	498.0	74.5	9.4	16.1	65.3	55.2	9.2	10.0	0.0	4.4	5.0	0.0	3.2	12.9	25.3
	GR40A-15-029a	Río Caracha	Sublitoarenita	448.0	79.5	8.0	12.5	75.2	72.8	4.2	2.5	0.0	6.0	2.0	0.0	3.1	9.4	16.7
Cachíos (parte superior)	GR40A-15-013a	Manchire (Qda. Ccuellumayo)	Arenita arcósica	493.0	35.5	54.0	10.5	34.9	26.8	0.6	8.1	0.0	42.8	11.2	0.0	1.2	9.3	11.2
	GR40A-15-030a	Río Caracha	Arenita arcósica	509.0	35.6	53.0	11.4	35.0	27.1	0.6	7.9	0.0	42.2	10.8	0.0	1.2	10.2	12.0
Cachíos (parte inferior)	GR40A-15-035a	Las Mercedes (Qda. Poccohuaycco)	Arenita arcósica	606.0	39.6	45.0	15.3	39.1	30.2	0.5	8.9	0.0	35.1	9.9	0.0	1.8	13.5	15.8
	GR40A-15-094a	Amazona Pampa (Río Caracha)	Arenita arcósica	663.0	42.5	41.3	16.1	42.1	31.5	0.5	10.6	0.0	27.3	14.0	0.0	1.2	14.9	16.6

Fuente: Propia.

5.1.2.2. Descripción, Clasificación y Procedencia de areniscas.

a) Formación Puente.

a.1) Formación Puente parte superior.

La muestra GR40A-15-094a. Es una arenisca de grano muy fino a fino de textura clástica, compuesta por cuarzo, feldespatos y litoclastos, la matriz está compuesta principalmente por calcita, cuarzo y arcillas, con cemento arcilloso. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están moderadamente ordenados, los contactos intergranulares son largos, cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.06 mm, la porosidad intergranular es $< 2\%$ (Figura 68).

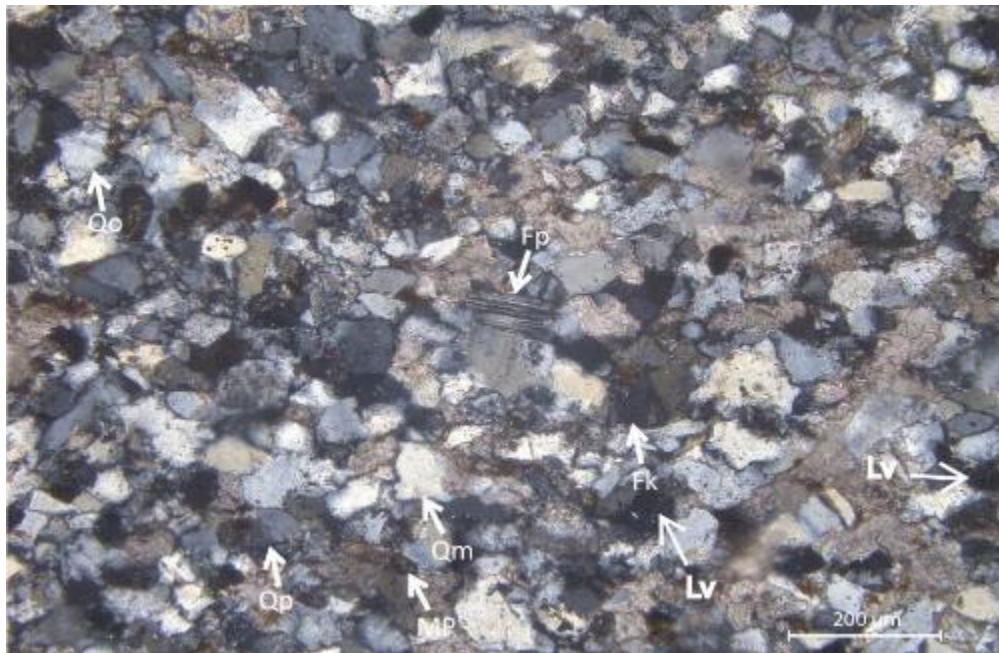


Figura 68. Muestra GR40A-15-094a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino a fino que corresponde a la Formación Puente parte superior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulado (Qo), feldespato plagioclasa (Fp), feldespato potásico (Fk), y minerales pesados (MP).

Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-094a. Está compuesta por granos heterogéneos, el contenido total de los granos es: Cuarzo total (Qt) 42.5 %, feldespatos 41.3 % y litoclastos (L) 16.1 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 69). Según estos datos la muestra GR40A-15-094a es una arenita arcósica de grano muy fino a fino.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-094a corresponde a la Formación Puente parte superior, está compuesta por granos de cuarzo, feldespatos y litoclastos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra arenita arcósica de grano muy fino a fino, se ubican en el área de aporte de Basamento levantado, esto nos indicaría que la roca aportante es de origen volcánico, teniendo relación con zonas de rift (Figura 69).

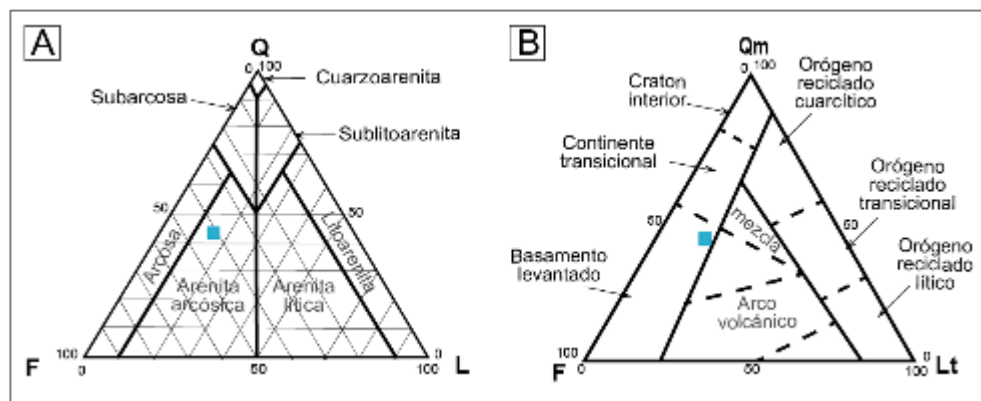


Figura 69. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Puente parte superior. A) El punto celeste indica la composición de la muestra GR40A-15-094a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) El punto celeste indica el área de aporte de la arenita arcósica. Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

b) Formación Cachíos.

b.1) Formación Cachíos parte inferior.

La muestra GR40A-15-035a. Es una arenisca de grano muy fino de textura clástica, compuesto por litoclastos, cuarzo y feldespatos, la matriz está compuesto principalmente por calcita, cuarzo y arcillas, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están moderadamente ordenados, los contactos intergranulares son suturado, cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.06 mm, la porosidad intergranular es $< 1 \%$ (Figura 70).



Figura 70. Muestra GR40A-15-035a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino que corresponde a la Formación Cachíos parte inferior: Cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico (Fk), feldespato plagioclasa (Fp) y litoclastos volcánicos (Lv). Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-035a corresponde a la Formación Cachíos parte inferior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: feldespatos (F) 45.0 %, Cuarzo total (Qt) 39.6 % y litoclastos (L) 15.3 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970) (Figura 71). Según estos datos la muestra GR40A-15-035a es una arenita arcósica de grano muy fino.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-035a corresponde a la Formación Cachíos parte inferior, está compuesta por granos de litoclastos, cuarzo y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra arenita arcósica se ubican en el área de aporte de basamento levantado, esto nos indicaría que la roca aportante es de origen volcánico, teniendo relación con zonas de rift (Figura 71).

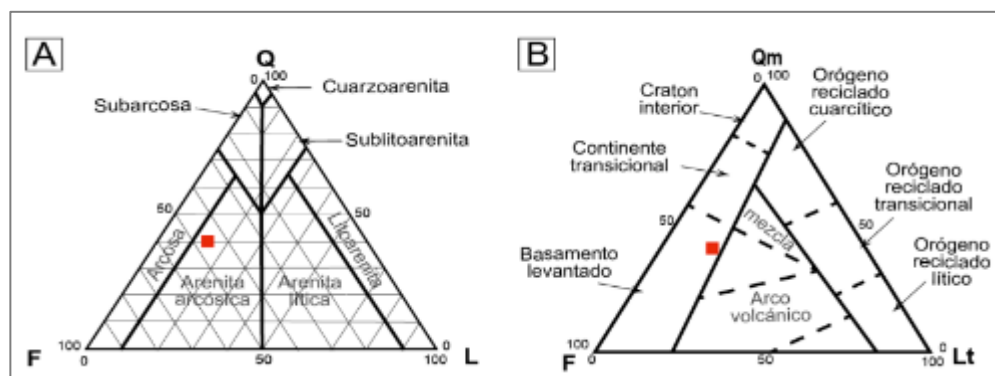


Figura 71. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Cachíos parte inferior. A) El punto rojo indica la composición de la muestra GR40A-15-035a, diagrama QFL (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) El punto rojo indica el área de aporte de la arenita arcósica en la zona de Basamento levantado.

Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

b.2) Formación Cachíos parte superior.

La muestra GR40A-15-030a es una arenisca de grano muy fino a fino de textura clástica, compuesto por cuarzo, litoclastos y feldespato, la matriz está compuesto principalmente por calcita, cuarzo y feldespatos alterados < 6 %, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subángulosos a subredondeados y están mal ordenados, los contactos intergranulares son cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.07 mm, la porosidad intergranular es < 2 % (Figura 72).

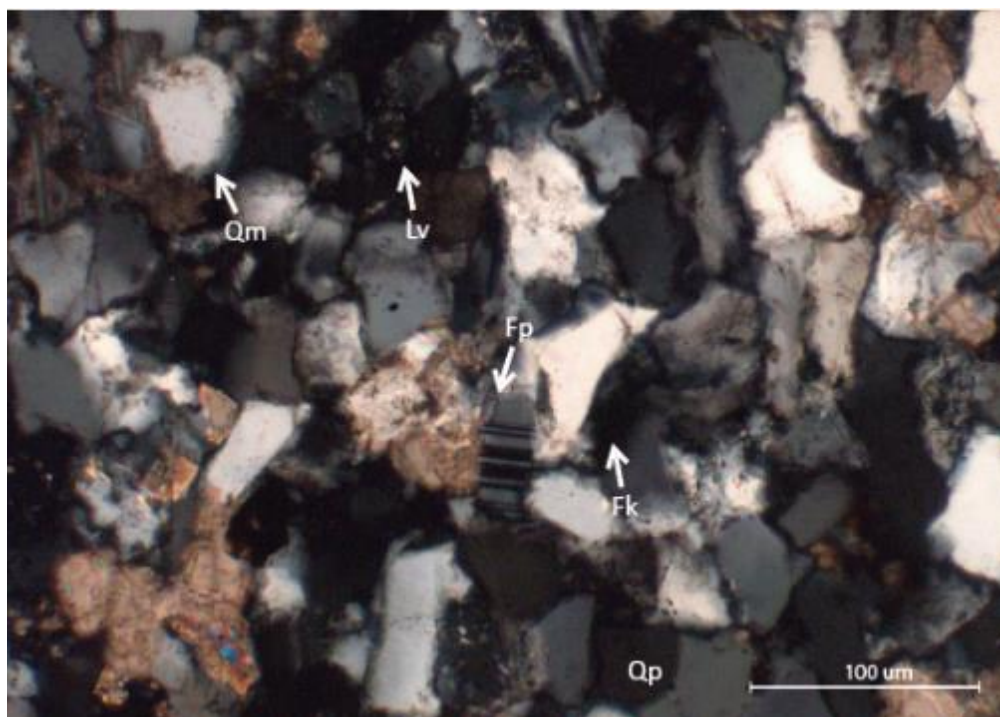


Figura 72. Muestra GR40A-15-030a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino a fino que corresponde a la Formación Cachíos parte superior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), feldespato potásico (Fk), feldespato plagioclasa (Fp) y litoclastos volcánicos (Lv).

Fuente: Propia.

La muestra GR40A-15-013a es una arenisca de grano muy fino de textura clástica, compuesto por cuarzo, litoclastos de naturaleza volcánica y sedimentaria y finalmente feldespato, el cemento es arcilloso. La forma de los granos son subángulosos a subredondeados y están moderadamente ordenados, los contactos intergranulares son

largos, cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.04 mm, la porosidad intergranular es $< 2\%$ (Figura 73).

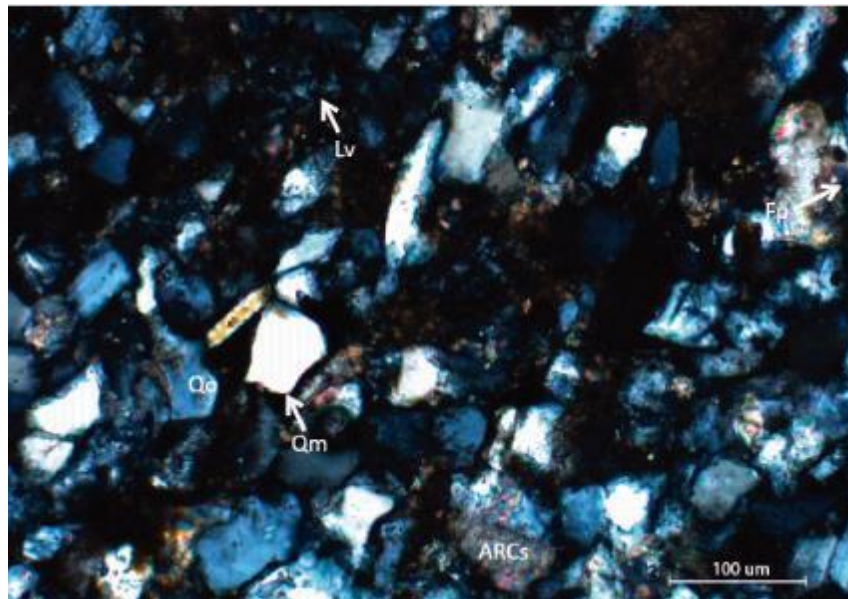


Figura 73. Muestra GR40A-15-013a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino que corresponde a la Formación Cachíos parte superior: Cuarzo monocrystalino (Qm), cuarzo ondulante (Qo), feldespato plagioclasa (Fp), litoclastos volcánicos (Lv) y arcillas (ARCS).
Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-030a corresponde a la Formación Cachíos parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: feldespatos 53.0 %, Cuarzo total (Qt) 35.6 %, litoclastos (L) 11.4 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 74). Según estos datos la muestra GR40A-15-030a es una arenita arcósica.

La muestra GR40A-15-013a corresponde a la Formación Cachíos parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: feldespatos (F) 54.0 %, Cuarzo total (Qt) 35.5 %, litoclastos (L) 10.5 % y. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el

diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970) (Figura 74). Según estos datos la muestra GR40A-15-013a es una arenita arcósica.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-030a corresponde a la Formación Cachíos parte superior, está compuesta por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra arenita arcósica se ubican en el área de aporte de Basamento levantado, esto nos indicaría que la roca aportante es de origen volcánico, teniendo relación con zonas de rift (Figura 74).

La muestra GR40A-15-013a corresponde a la Formación Cachíos parte superior, está compuesta por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra arenita arcósica se ubican en el área de aporte de Arco volcánico, esto nos indicaría que la roca aportante es de origen volcánico, teniendo relación con zonas de rift (Figura 74).

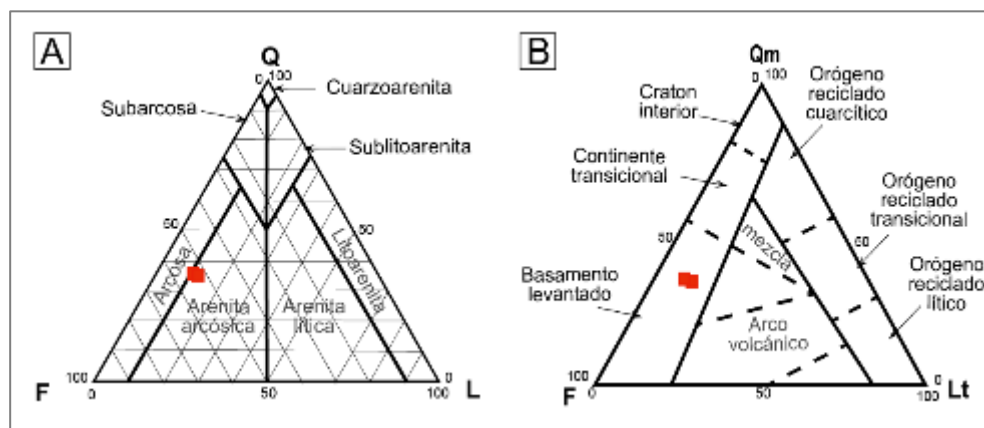


Figura 74. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Cachíos parte superior. A) Los puntos rojos indican la composición de la muestra GR40A-15-030a y GR40A-15-013a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Se aprecia los puntos rojos son muestras GR40A-15-030a y GR40A-15-013a se ubican en el área de aporte Basamento levantado. Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

c) Formación Labra.

c.1) Formación Labra parte inferior.

La muestra GR40A-15-029a es una arenisca de grano muy fino a fino de textura clástica, constituido por cuarzo, litoclastos y feldespato, la matriz está constituida por carbonatos y arcillas, el cemento es arcilloso. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están ordenados, los contactos intergranulares son suturados, cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.08 mm, la porosidad intergranular es < 1 % (Figura 75).

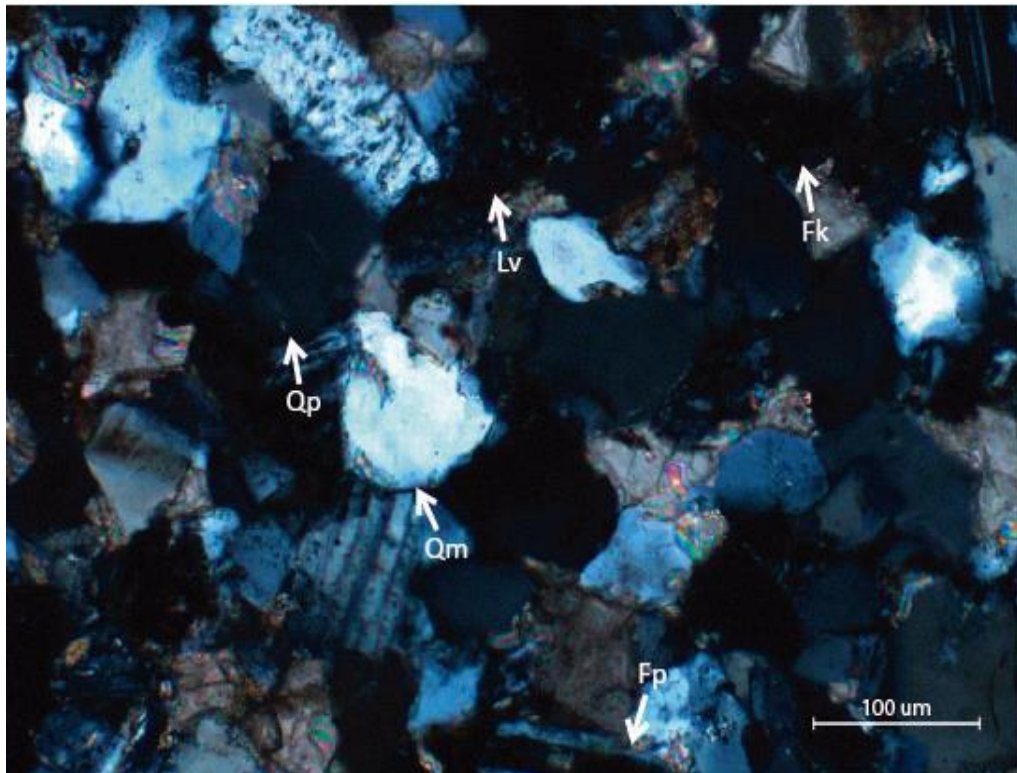
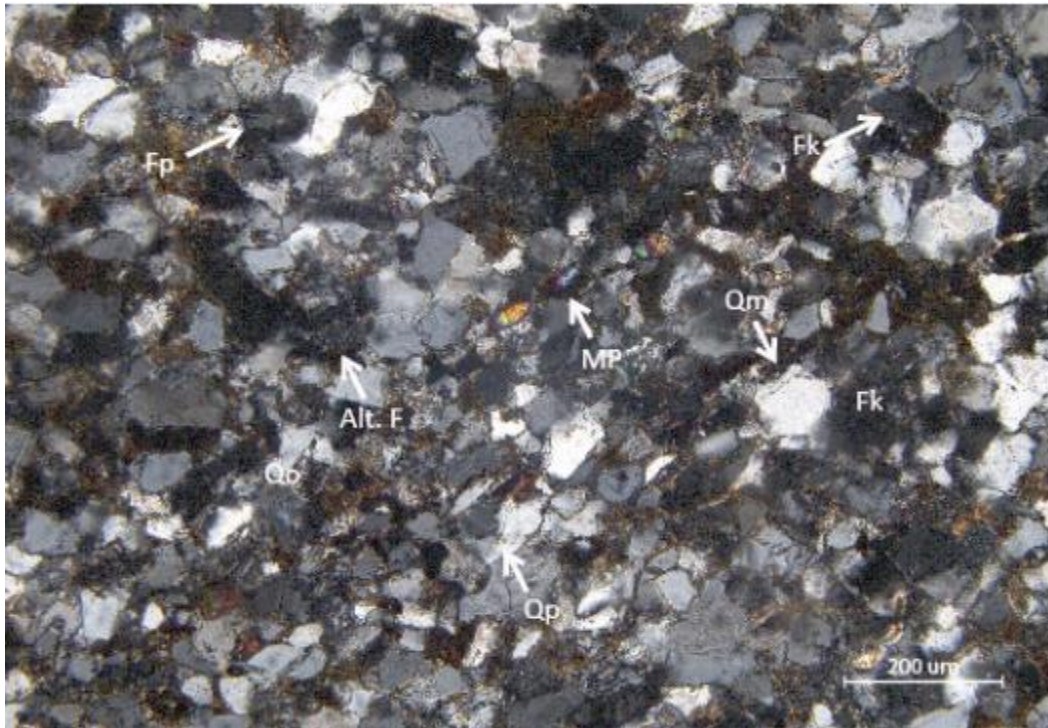


Figura 75. Muestra GR40A-15-029a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino a fino que corresponde a la Formación Labra parte inferior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), feldespato potásico (Fk), plagioclasa (Fp) y litoclastos volcánicos. Fuente: Propia.

La muestra GR40A-15-001a es una arenisca de grano muy fino a fino de textura clástica, constituido por cuarzo, litoclastos y feldespatos, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subángulosos a subredondeados y están moderadamente ordenados, los

contactos intergranulares son cóncavos, convexos y suturados. El tamaño de grano promedio es 0.05 mm, la porosidad intergranular es $< 1\%$ (Figura 76).

Figura 76. Muestra GR40A-15-001a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino a fino que



corresponde a la Formación Labra parte inferior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulado (Qo), feldespato potásico (Fk), plagioclasa (Fp), alteración de feldspatos (Alt. F) y minerales pesados (MP).

Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-029a corresponde a la Formación Labra parte inferior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 79.46 %, litoclastos (L) 12.50 % y feldspatos 8.04 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 77). Según estos datos la muestra GR40A-15-029a es una sublitoarenita.

La muestra GR40A-15-001a corresponde a la Formación Labra parte inferior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 74.50 %, litoclastos (L) 16.06% y feldspatos (F) 9.44 %. Los resultados obtenidos a partir del

conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970) (Figura 77). Según estos datos la muestra GR40A-15-001a es una sublitoarenita.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-029a corresponde a la Formación Labra parte inferior, está compuesta por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra sublitoarenita se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 77).

La muestra GR40A-15-001a corresponde a la Formación Labra parte inferior, está compuesta por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra sublitoarenita se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 77).

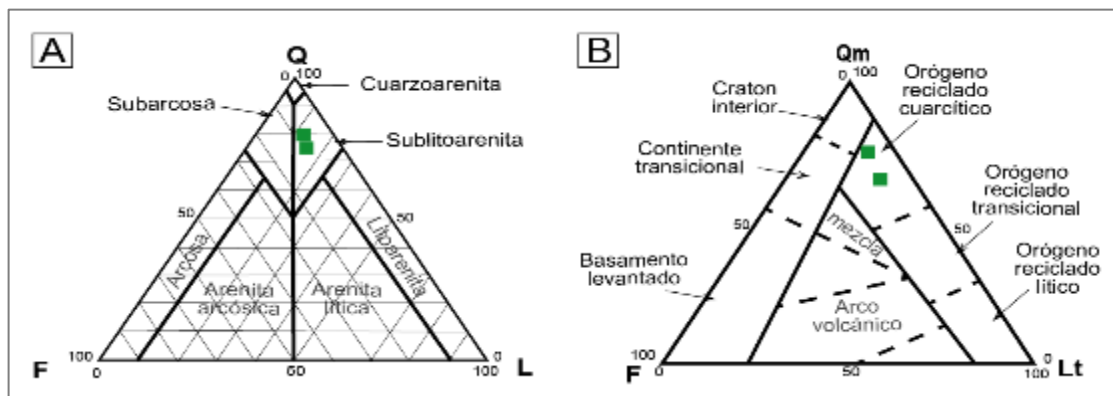


Figura 77. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Labra parte inferior. A) Los puntos verdes indican la composición de la muestra GR40A-15-029a y GR40A-15-001a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Se aprecia que las muestras GR40A-15-029a y GR40A-15-001a se ubican en el área de aporte Orógeno reciclado cuarcítico.

Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

c.2) Formación Labra parte superior.

La muestra GR40A-15-012a es una arenisca de grano fino a medio de textura clástica, constituido por cuarzo litoclastos y feldespatos, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subángulosos a subredondeados y están ordenados, los contactos intergranulares son suturados, cóncavos y convexos. El tamaño de grano promedio es 0.12 mm, la porosidad intergranular es $< 1\%$ (Figura 78).

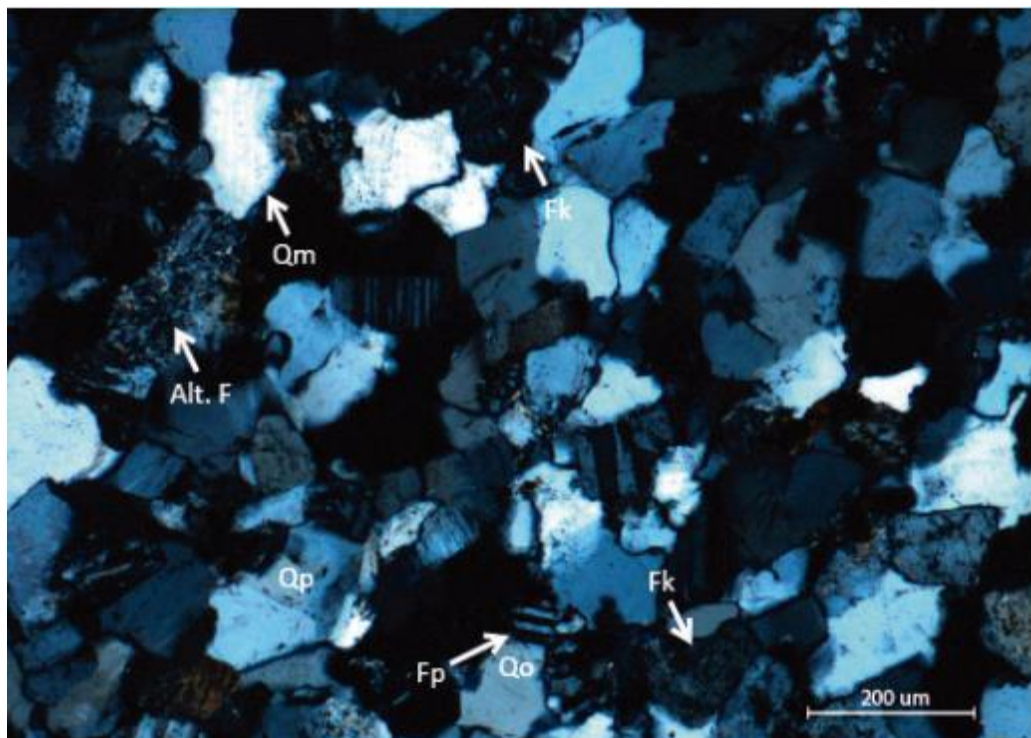


Figura 78. Muestra GR40A-15-012a, (NXs, 10x). Arenisca de grano fino a medio que corresponde a la Formación Labra parte superior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulado (Qo), feldespato potásico (Fk), plagioclasa (Fp) y alteración de feldespatos (Alt. F). Fuente: Propia.

La muestra GR40A-15-007a es una arenisca de grano fino a medio de textura clástica, constituido por cuarzo, litoclastos de naturaleza sedimentaria y volcánica y finalmente feldespatos, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subángulosos a subredondeados y están moderadamente ordenados, los contactos intergranulares son cóncavos, convexos y suturados. El tamaño de grano promedio es 0.16 mm, la porosidad intergranular es $< 1\%$ (Figura 79).

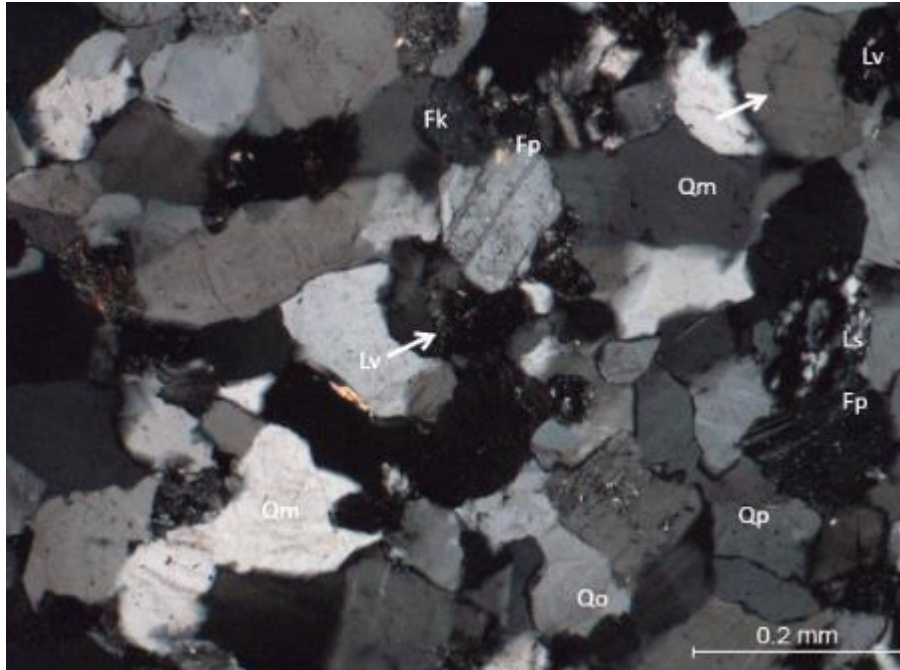


Figura 79. Muestra GR40A-15-007a, (NXs, 10x). Arenisca de grano fino a medio que corresponde a la Formación Labra parte superior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo ondulante (Qo), cuarzo policristalino (Qp), feldespato potásico (Fk), plagioclasa (Fp) y litoclastos volcánicos (Lv).
Fuente: Propia.

clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-012a corresponde a la Formación Labra parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 70.54 %, litoclastos (L) 15.01 % y feldespatos 14.45 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 80). Según estos datos la muestra GR40A-15-029a es una sublitoarenita.

La muestra GR40A-15-007a corresponde a la Formación Labra parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 72.55 %, litoclastos (L) 14.20 % y feldespatos (F) 13.24 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 80). Según estos datos la muestra GR40A-15-001a es una sublitoarenita.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-012a corresponde a la Formación Labra parte superior, está compuesto por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra sublitoarenita se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado transicional (Figura 80).

La muestra GR40A-15-007a corresponde a la Formación Labra parte superior, está compuesto por granos de cuarzo, litoclastos y feldespatos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra sublitoarenita se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 80).

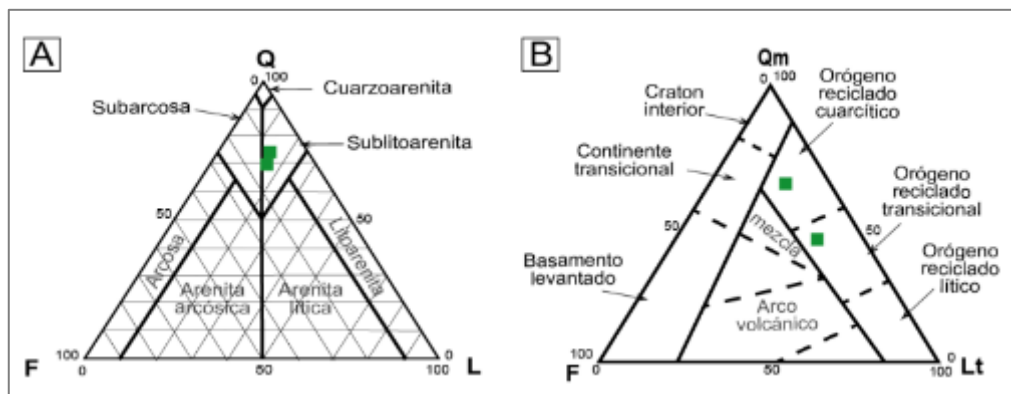


Figura 80. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Labra parte superior. A) Los puntos verdes indican la composición de la muestra GR40A-15-012a y GR40A-15-007a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Los puntos verdes indican que las muestras GR40A-15-012a y GR40A-15-007a se ubican en el área de aporte Orógeno reciclado transicional a Orógeno reciclado cuarcítico respectivamente.

Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

d) Formación Hualhuani.

d.1) Formación Hualhuani parte inferior.

La muestra GR40A-15-027a. Es una arenisca de grano muy fino a fino de textura clástica, constituido por cuarzo, feldespatos y litoclastos, la matriz está compuesto principalmente por arcillas, cuarzo líticos y óxidos de hierro < 5 %, el cemento es arcilloso y silíceo. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están ordenados.

Los contactos intergranulares son convexos, cóncavos y largos. El tamaño de grano promedio es 0.08 mm, la porosidad intergranular es $< 2\%$ (Figura 81).

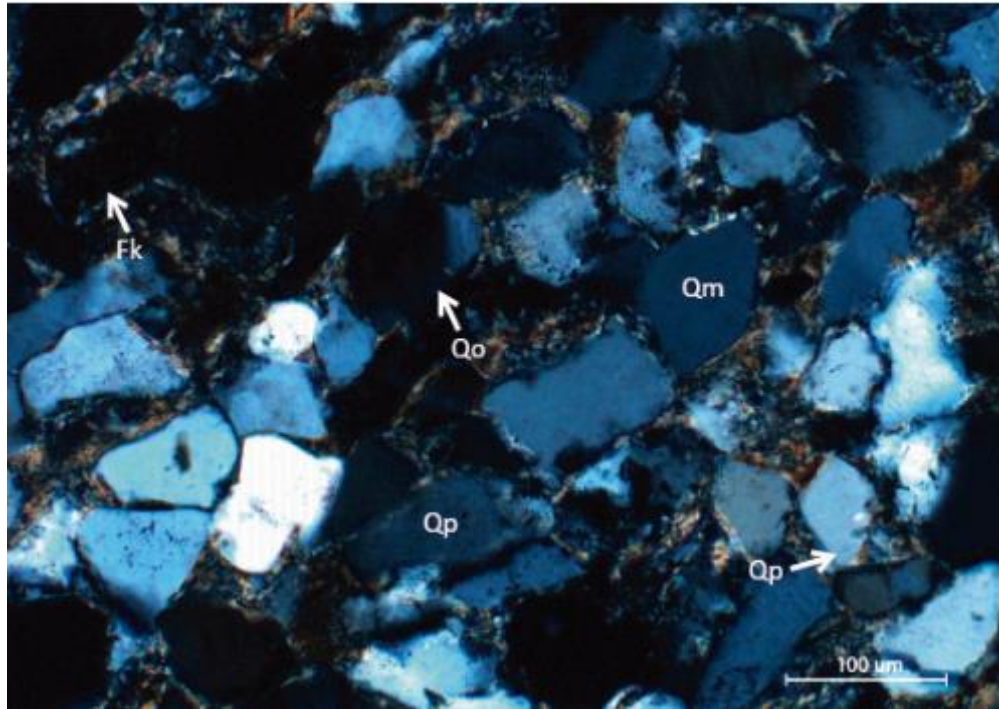


Figura 81. Muestra GR40A-15-027a, (NXs, 10x). Arenisca de grano muy fino a fino que corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulante (Qo) y feldespato potásico (Fk).
Fuente: Propia.

La muestra GR40A-15-032a. Es una arenisca de grano fino a medio de textura clástica, constituido por cuarzo, feldespatos y litoclastos, la matriz está compuesto principalmente por arcillas, cuarzo y líticos $< 3\%$, el cemento es arcilloso y silíceo. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están bien ordenados. Los contactos intergranulares son cóncavos, convexos y suturados. El tamaño de grano promedio es 0.197 mm, la porosidad intergranular es $< 2\%$ (Figura 82).

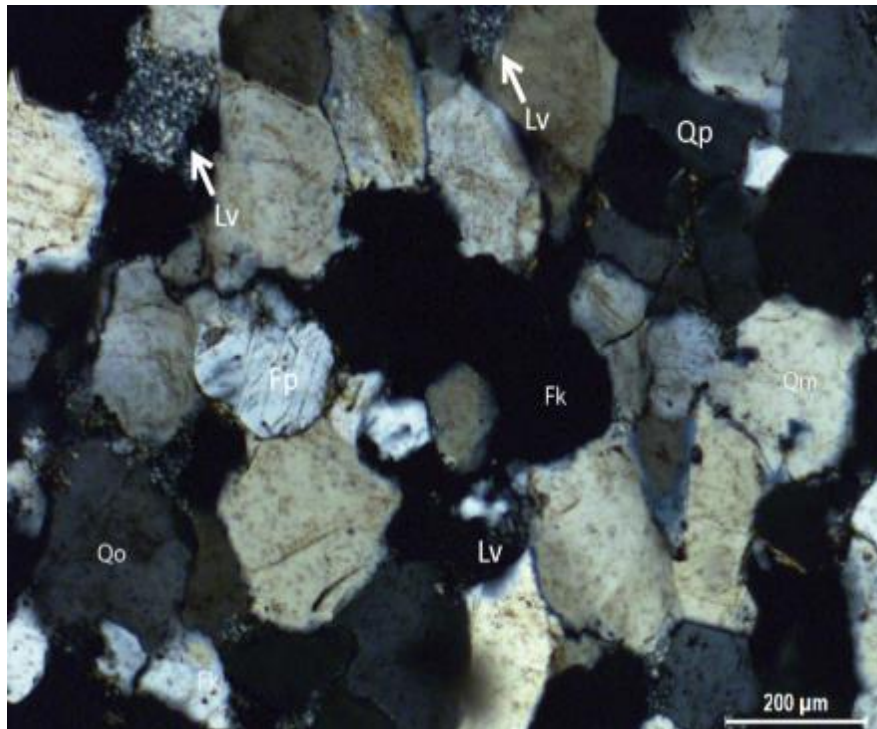


Figura 82. Muestra GR40A-15-032a, (NXs, 10x). Arenisca de grano fino a medio que corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulante (Qo), feldespato potásico (Fk), feldespato plagioclasa (Fp) y Liticos de composición andesítica (L). Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-027a corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 88.24 %, feldespatos (F) 7.44 % y litoclastos (L) 4.28 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970) (Figura 83). Según estos datos la muestra GR40A-15-027a es una subarcosa.

La muestra GR40A-15-032a corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 85.35 %, feldespatos (F) 8.35 % y litoclastos (L) 6.30 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 83). Según estos datos la muestra GR40A-15-032a es una subarcosa.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-027a corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior, está compuesto por granos de cuarzo, feldespatos y litoclastos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra subarcosa se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 83).

La muestra GR40A-15-032a corresponde a la Formación Hualhuani parte inferior, está compuesto por granos de cuarzo, feldespatos y litoclastos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra subarcosa se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 83).

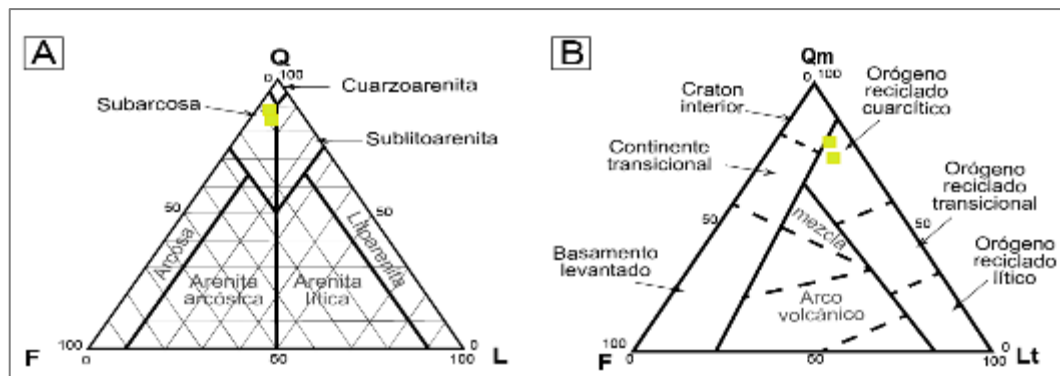


Figura 83. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Hualhuani parte inferior. A) Los puntos amarillos indican la composición de la muestra GR40A-15-027a y GR40A-15-032a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Los puntos amarillos indican que las muestras GR40A-15-027a y GR40A-15-032a se ubican en el área de aporte Orógeno reciclado cuarcítico. Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

d.2) Formación Hualhuani parte superior.

La muestra GR40A-15-033a. Es una arenisca de grano fino a medio de textura clástica, constituido por cuarzo, feldespatos y litoclastos, la matriz está compuesto principalmente por óxidos de hierro (como impregnaciones) < 5 %, el cemento es silíceo. La forma de los granos son subredondeados a subángulosos y están bien ordenados. Los contactos son cóncavos, convexo y suturado, el tamaño de grano promedio es 0.20 mm, la porosidad intergranular es < 1 % (Figura 84).

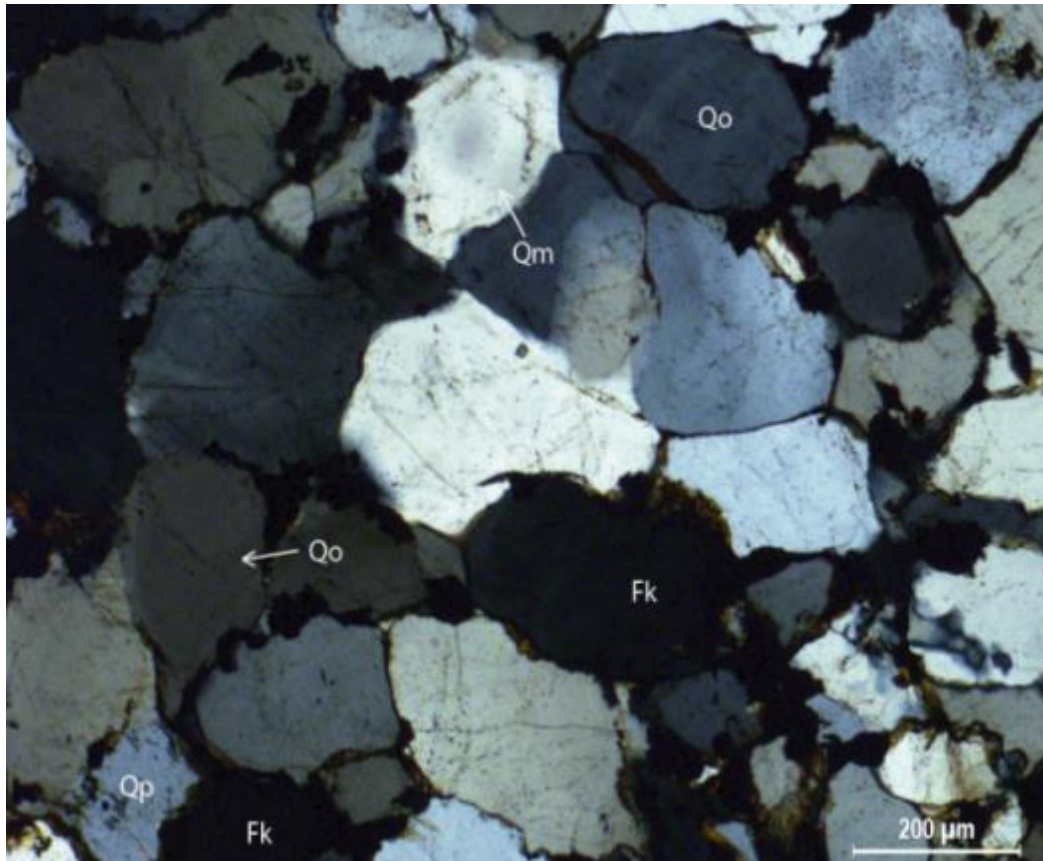


Figura 84. Muestra GR40A-15-033a, (NXs, 10x). Arenisca de grano fino a medio que corresponde a la Formación Hualhuani parte superior: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulante (Qo), feldespato potásico (Fk).
Fuente: Propia.

La muestra GR40A-15-004a. Es una arenisca de grano medio de textura clástica, constituido por cuarzo, feldespato potásico y litoclastos, la matriz está compuesto principalmente por arcillas, micas y óxidos de hierro (como impregnaciones) < 5 %, el cemento es silíceo. La forma de los granos es redondeada a subredondeados y están ordenados. Los contactos intergranulares son cóncavos y convexos, el tamaño de grano promedio es 0.31 mm, la porosidad intergranular es < 1 % (Figura 85).

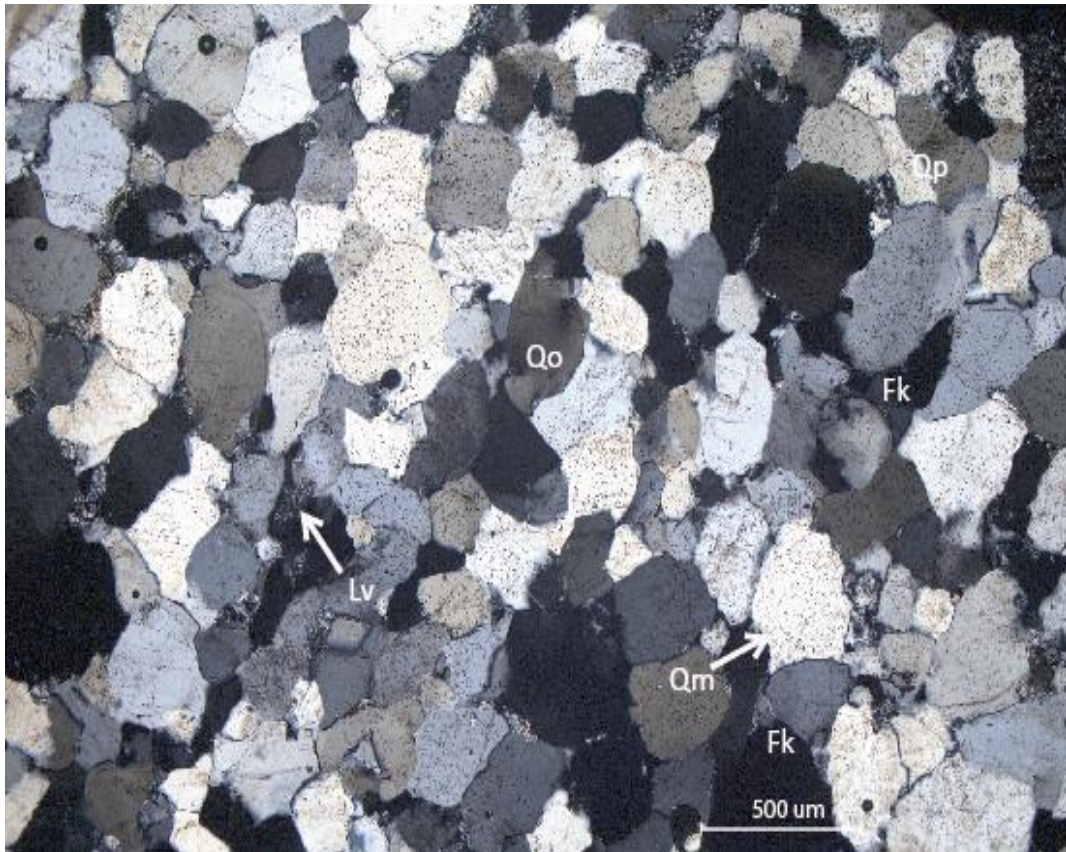


Figura 85. Muestra GR40A-15-004a, (NXs, 10x). Subarcosa de grano medio: Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), cuarzo ondulante (Qo), feldespato potásico (Fk) y litoclastos volcánicos (Lv). Fuente: Propia.

Clasificación según su composición.

La muestra GR40A-15-033a corresponde a la Formación Hualhuani parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 81.03 %, feldspatos (F) 11.07 % y litoclastos (L) 7.91 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 86). Según estos datos la muestra GR40A-15-033a es una subarcosa.

La muestra GR40A-15-004a corresponde a la Formación Hualhuani parte superior, está compuesta por granos heterogéneos, el contenido de los granos es: Cuarzo total (Qt) 84.51 %, feldspatos (F) 7.98 % y litoclastos (L) 7.51 %. Los resultados obtenidos a partir del conteo de las modas detríticas de las areniscas fueron representados en el diagrama

triangular clasificatorio QFL propuesto por Pettijohn et al. (1987) y Dickinson (1970), (Figura 86). Según estos datos la muestra GR40A-15-033a es una subarcosa.

Procedencia de ambiente tectónico.

La muestra GR40A-15-033a corresponde a la Formación Hualhuani parte superior, está compuesto por granos de cuarzo, feldespatos y litoclastos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra subarcosa se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 86).

La muestra GR40A-15-004a corresponde a la Formación Hualhuani parte superior, está compuesto por granos de cuarzo, feldespatos y litoclastos. A partir de los datos ploteados en el diagrama triangular QFL, nos indica que la muestra subarcosa se ubican en el área de aporte de orógeno reciclado cuarcítico (Figura 86).

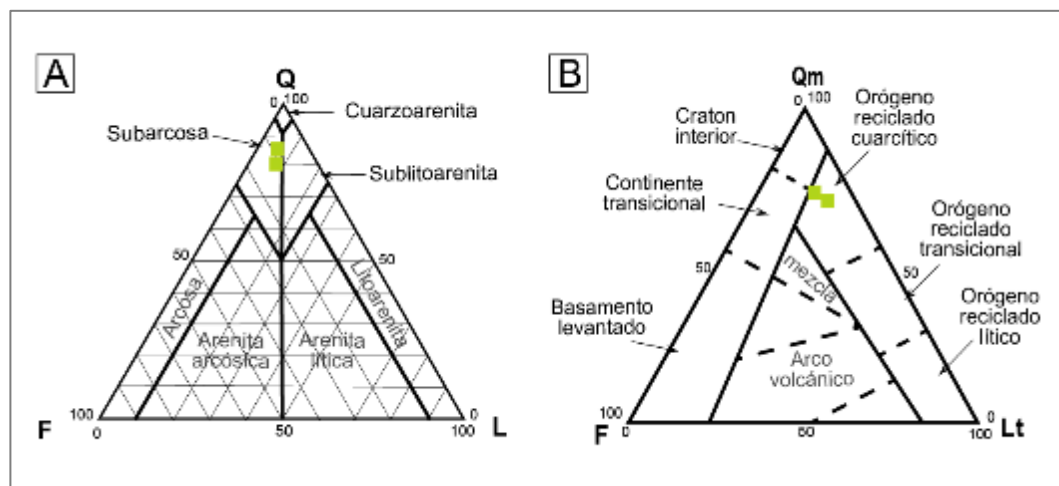


Figura 86. Representación composicional y discriminación de ambiente tectónico de la Formación Hualhuani parte superior. A) Los puntos amarillos indican la composición de la muestra GR40A-15-033a y GR40A-15-004a, diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Se aprecia que las muestras GR40A-15-033a y GR40A-15-004a se ubican en el área de aporte Orógeno reciclado cuarcítico. Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

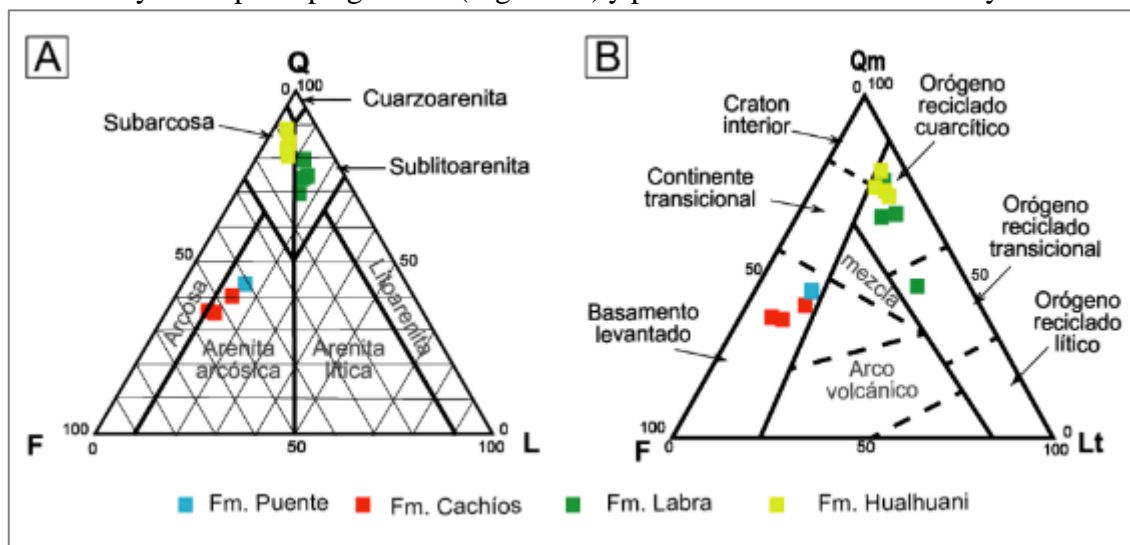
Se analizó los resultados del conteo de 12 muestras de areniscas del Grupo Yura (Tabla 9). Estos resultados fueron representados en el diagrama ternario QFL con el objetivo de realizar la clasificación de las areniscas (propuesta por Dickinson, 1970) por

lo tanto las muestras estudiadas son clasificadas como arenita arcósica, subarcosa, arenita lítica y sublitoarenita (Figura 87).

Se ha considerado además la representación espacial en el diagrama ternario de Qm (Cuarzo monocristalino), F (feldespato) y L (litoclastos), con el objetivo de determinar el ambiente tectónico (Figura 86), según los diagramas de Dickinson & Suczek (1979) y Dickinson (1985).

Por otro lado, obsérvese que la mayoría de las muestras analizadas del Grupo Yura se encuentra en los ambientes tectónicos de “Orógeno reciclado cuarcítico” y Arco volcánico (Figura 87).

Por lo tanto, se deduce para las Formaciones Puente y Cachíos, los sedimentos podrían derivar de un arco volcánico por el alto contenido de líticos de naturaleza volcánica y feldespatos plagioclasa (Figura 87) y para las Formaciones Labra y Hualhuani



los sedimentos podrían proceder de un Orógeno reciclado cuarcítico por el alto contenido de cuarzo (Figura 87).

Figura 87. Representación general de análisis composicional y discriminación de ambientes tectónicos. A) Clasificación de areniscas utilizando el diagrama QFL, (Fuente: Adaptado de Pettijohn, 1987 y Dickinson, 1970). B) Representación generalizada de ambientes tectónicos usando la proporción composicional QmFLt.

Fuente: Adaptado de Dickinson, 1985.

5.1.2.3. Modelo de proveniencia sedimentaria para las rocas detríticas del Grupo

Yura en base a minerales ligeros

En base a los resultados del conteo modal de granos QFL (cuarzo feldespato y fragmentos líticos) de las rocas detríticas del Grupo Yura (Tabla 9). Los cambios en la composición mineralógica de los minerales ligeros de cada unidad litoestratigráfica son representados en la Figura 88. Todos los resultados obtenidos de minerales ligeros se correlacionaron dando lugar a la interpretación de las posibles zonas de aporte.

Formaciones Puente y Cachíos.

Los sedimentos en ambas unidades estratigráficas podrían derivar de un basamento levantado, relacionado a zonas de rift, porque al plotear los datos del conteo en el diagrama ternario de ambientes tectónicos (Dickinson, 1985), se localiza en el Basamento levantado (Figura 87), además presenta abundante feldespato plagioclasa (Fp) y fragmentos líticos de naturaleza volcánica. Por lo tanto, el basamento levantado reportado cerca de la zona de estudio es la zona de rift que corresponde al Grupo Mitu volcánico (Figura 87).

Formaciones Labra y Hualhuani.

Los resultados del conteo modal QFL (cuarzo, feldespato y fragmentos líticos), fueron ploteados en el diagrama ternario, las cuales nos indica que los sedimentos podrían derivar del orógeno reciclado. Así también presenta la abundancia de cuarzo y una disminución de granos de feldespatos y de fragmentos líticos de naturaleza volcánica. Esto nos indica que hubo mayor transporte antes de su sedimentación (Grupo Mitu sedimentario) (Figura 88).

En la Tabla 9 presenta aumento de cuarzo monocristalino de extinción recta y ondulante los que nos indica que podría derivar de rocas metamórficas (Grupo Excelsior)

y los cuarzos policristalinos podrían derivar de rocas plutónicas (Unidad San Miguel Ongoy) para la Formación Hualhuani.

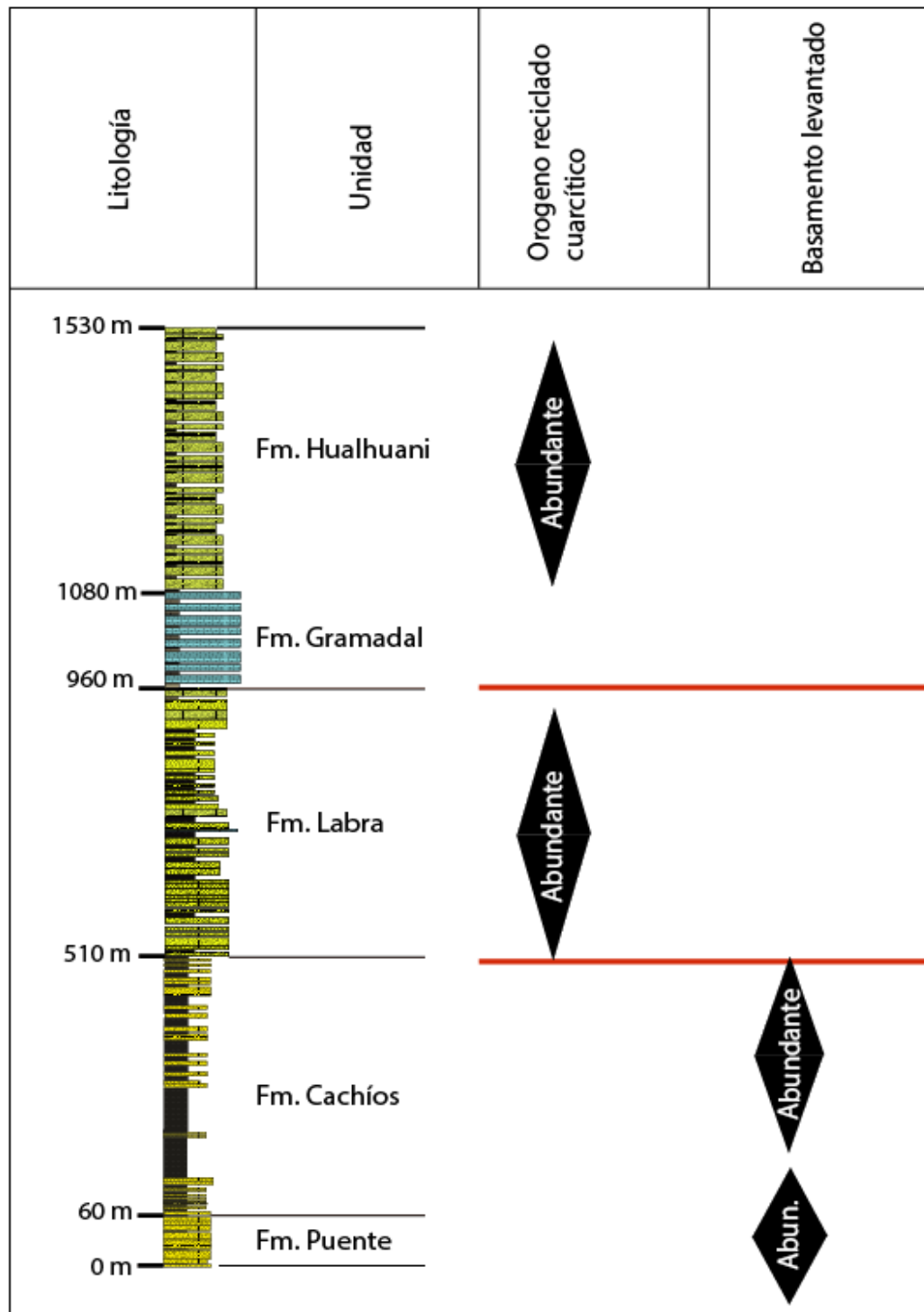


Figura 88. Segundo modelo de proveniencia sedimentaria en la parte Norte de la Cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho. La línea roja representa el cambio de los ambientes tectónicos.

Fuente: Propia.

5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizó una integración de análisis de minerales pesados y ligeros (Análisis QFL), estos resultados obtenidos se compararon y discutieron. Los resultados de esta integración se ilustran en la Figura 88.

Proveniencia de la Formación Puente

Los sedimentos de la Formación Puente tuvieron mayor aporte de las rocas que conforman el Grupo Mitu volcánico debido a la abundancia de piroxenos (Figuras 62, 63 y 66). Sin embargo, presentan aportes escasos de sedimentos derivados de las rocas del Grupo Excélsior y de la unidad San Miguel Ongoy (zircones, turmalinas y granates). Además, se ha identificado minerales pesados tales como zircones redondeados incoloros que no guardan relación con los descritos en las posibles rocas fuente, por lo que se dedujo que es posible que haya habido aportes bien escasos de sedimentos de un cuerpo plutónico I (aún sin determinar y datar, posible batolito de Querobamba) (Figura 67).

Los estudios petrográficos de las Formaciones Puente, se tiene como resultado que los sedimentos derivan de una fuente volcánica, esta guarda relación con los reportes en la zona de estudio (zona de rift), dado al plotear los datos del conteo en el diagrama ternario de ambientes tectónicos cae en el campo de Basamento levantado. Además, es observable granos de feldespato plagioclasa (Fp) y fragmentos líticos (Lv) de composición andesítica.

Proveniencia de la Formación Cachíos

A diferencia de la Formación Puente la Formación Cachíos tiene mayor aporte de las rocas que conforman el Grupo Mitu volcánico debido a la abundancia de piroxenos (Figuras 62, 63 y 66). Sin embargo, presentan aportes escasos de sedimentos derivados de las rocas del Grupo Excélsior y de la unidad San Miguel Ongoy (zircones, turmalinas y granates). Además, se ha identificado minerales pesados tales como zircones



redondeados incoloros que no guardan relación con los distritos en las posibles rocas fuente, por lo que se dedujo que es posible que haya habido aportes bien escasos de sedimentos de un cuerpo plutónico I (aún sin determinar y datar) (Figura 67).

También con este método se deduce que durante la transición de la Formación Cachíos hacia la Formación Labra ocurrió un evento que marco el cambio de aportes de sedimentos, debido que el contenido de piroxenos para la Formación labra disminuye e incrementa el contenido de zircón, rutilo y turmalina.

Los estudios petrográficos de la Formación Cachíos, se tiene como resultado que los sedimentos derivan de una fuente volcánica, esta guarda relación con los reportes en la zona de estudio (zona de rift), dado al plotear los datos del conteo en el diagrama ternario de ambientes tectónicos cae en el campo de Basamento levantado. Además, es observable granos de feldespatos plagioclasa (Fp) y fragmentos líticos (Lv) de composición andesítica.

La integración de los dos métodos citados sugiere que los sedimentos que aportaron a la Formación Cachíos son mayormente provenientes del Grupo Mitu volcánico, mientras en escasa proporción son del Grupo Excelsior y de la unidad San Miguel Ongoy (zircones, turmalinas y granates). Por lo tanto, los datos coinciden con lo reportado con los minerales pesados.

Proveniencia de la Formación Labra

Los sedimentos que conforman la parte inferior de la Formación Labra provienen posiblemente de la denudación del Grupo Mitu sedimentario debido a la similitud de sus minerales pesados (zircones y turmalinas) (Figura 62, 63 y 66) y en cantidades escasos derivaron del Grupo Mitu volcánico, por los minerales de piroxenos observables (Figura 66).



En la Formación Labra parte superior se observa la predominancia de sedimentos que fueron derivados del Grupo Mitu sedimentario (zircones y turmalinas) (Figuras 62, 63 y 66) y cantidades escasos del Grupo Excélsior (granates) y unidad San Miguel Ongoy (Zircones y turmalinas) (Figuras 62 y 63) y/o de algún Cuerpo plutónico I de tipo Orógeno reciclado, mientras que el Grupo Mitu volcánico aportó con escasos minerales pesados por los piroxenos que presenta (Figuras 62, 63 y 66). Por otro lado, se observa concentraciones de minerales pesados muy diferentes a los reportados en las potenciales rocas fuente descritas en esta tesis, tales como piroxenos y apatitos euhedrales que posiblemente derivaron de un cuerpo volcánico I (aun sin diferenciar), el cual estaría cercano y por correlaciones estratigráficas regionales podría tratarse de la Formación Chocolate (aun sin registro y datación). Así mismo se volvió a identificar minerales pesados de zircones redondeados que no guardan relación con los descritos en esta tesis como roca fuente, por lo que se deduce que posible haya habido aportes escasos de sedimentos de un cuerpo plutónico I (aún sin determinar y datar, posible batolito de Querobamba). En términos generales, estos resultados sugieren que, durante la sedimentación de la Formación Labra, el Grupo Mitu sedimentario, Grupo Excélsior y unidad San Miguel Ongoy se encontraban exhumados, se erosionaron y aportaron sus sedimentos para la acumulación, además de un cuerpo plutónico I (probablemente el Batolito de Querobamba), se hallan a muchos kilómetros de distancia.

También con este método se deduce que durante la transición de la Formación Labra hacia la Formación Hualhuani ocurrió un evento que marco el cambio de aportes de sedimentos, debido que el contenido de turmalinas disminuye y aumenta el contenido de granates. Al comparar los dos métodos citados sugiere que los sedimentos que aportaron a la Formación Labra son mayormente provenientes del Grupo Mitu



sedimentario, mientras en escasa proporción son del Grupo Mitu volcánico, Grupo Excelsior y Unidad San Miguel Ongoy.

Los estudios petrográficos de la Formación Labra nos indican que los sedimentos podrían derivar de un Orógeno reciclado cuarcítico, estos resultados son obtenidos al plotear los datos de la Tabla 9 al diagrama ternario de ambientes tectónicos. Rocas de Orógeno reciclado reportados en los mapas elaborados por INGEMMET es el Grupo Mitu sedimentario. Por lo tanto, los datos coinciden con lo reportado con los minerales pesados.

Proveniencia de la Formación Hualhuani

En la Formación Hualhuani parte inferior se observan minerales pesados muy similares al Grupo Excelsior y Unidad San Miguel Ongoy, los cuales están marcados por abundancia de granates (Figuras 62, 63 y 66). Además, se observa abundantes zircones y turmalinas, los cuales son característicos del Grupo Mitu sedimentario (Figuras 62, 63 y 66).

En la parte superior de la Formación Hualhuani se registró abundantes granates y zircones minerales pesados que son característicos del Grupo Excelsior y de la unidad San Miguel Ongoy (Figuras 62, 63 y 66). Así mismo se observó en moderada proporción a zircones, turmalinas y rutilos que son minerales pesados que son característicos del Grupo Mitu sedimentario de acuerdo a estos estudios. Por otro lado, los piroxenos son escasos en esta unidad y refleja escasa influencia de la denudación del Grupo Mitu volcánico. Por lo tanto, se puede afirmar que la erosión del Grupo Mitu fue muy escasa o sus afloramientos son muy restringidos influyendo muy escaso en el relleno en la parte norte de la cuenca Arequipa en el departamento de Ayacucho (Figura 67). Se reporta además de piroxenos y apatitos euhedrales que posiblemente deriven del cuerpo volcánico I (Figura 67) (¿Formación Chocolate?). Así mismo se tiene registrado escaso

aporte de minerales pesados de anfíboles, estos minerales podrían haber derivado de un cuerpo plutónico I (probablemente Batolito de Querobamba).

También se presume un aporte moderado del Grupo Mítu sedimentario por la presencia de zircones y turmalinas.

Los estudios petrográficos de la Formación Hualhuani nos indican que los sedimentos podrían derivar de un Orógeno reciclado cuarcítico, estos resultados son obtenidos al plotear los datos de la Tabla 9 al diagrama ternario de ambientes tectónicos. Rocas de Orógeno reciclado reportados en los mapas elaborados por INGEMMET es el Grupo Excélsior y la Unidad San Miguel Ongoy. Por lo tanto, los datos coinciden con lo reportado con el análisis de los minerales pesados.

5.2.1. Propuesta de modelo geodinámico del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa (Ayacucho).

La integración del análisis de minerales pesados y análisis petrográfico (Figura 67), permitió sugerir seis principales fuentes de aportes para los sedimentos que forman la parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.

1. Grupo Excélsior
2. Unidad San Miguel Ongoy
3. Grupo Mítu sedimentario
4. Grupo Mítu volcánico
5. Cuerpo plutónico I
6. Cuerpo volcánico I

Las muestras de las cuatro primeras unidades arriba listadas son consideradas como “roca fuente” (o roca generadora de sedimentos) y se caracterizaron según su contenido de minerales pesados. A este grupo se decidió adicionar al cuerpo plutónico I y Cuerpo volcánico I, basados en el hallazgo de minerales pesados y ligeros (secciones delgadas) que delatan su existencia, además de las listadas. También se consideró las características

(forma color, etc.) de ciertos minerales pesados, por ejemplo, zirrones redondeados y con tonalidades rosáceas. Se interpretó los modelos geodinámicos del Grupo yura para la parte Norte de la cuenca Arequipa (Figura 89, 90, 91 y 92).

Se interpreta que la denudación de las rocas que conformaron el Grupo Mito volcánico sirvió como principal aporte para la generación de areniscas de las formaciones Puente y Cachíos y se tuvo como fuente moderada de producción de los sedimentos del Grupo Excelsior y Unidad San Miguel Ongoy (Figura 89).

La Formación Labra tuvo como principal fuente a las rocas del Grupo Mito sedimentario (Figura 90), además presenta aportes en cantidades escasas del Grupo Excelsior (granates) y unidad San Miguel Ongoy (Zircones y turmalinas) (Figuras 62 y 63) y/o de algún Cuerpo Plutónico I de tipo Orógeno reciclado, mientras que el Grupo Mito volcánico aportó con escasos minerales pesados por los piroxenos que presenta.

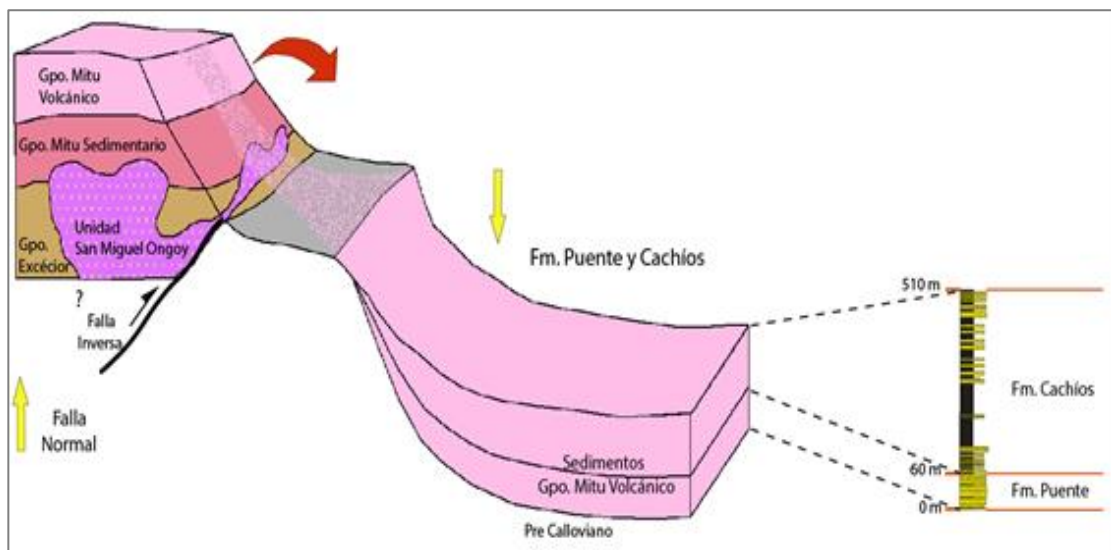


Figura 89. Modelo Geodinámico de las Formaciones Puente y Cachíos. Parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.
Fuente: Propia.

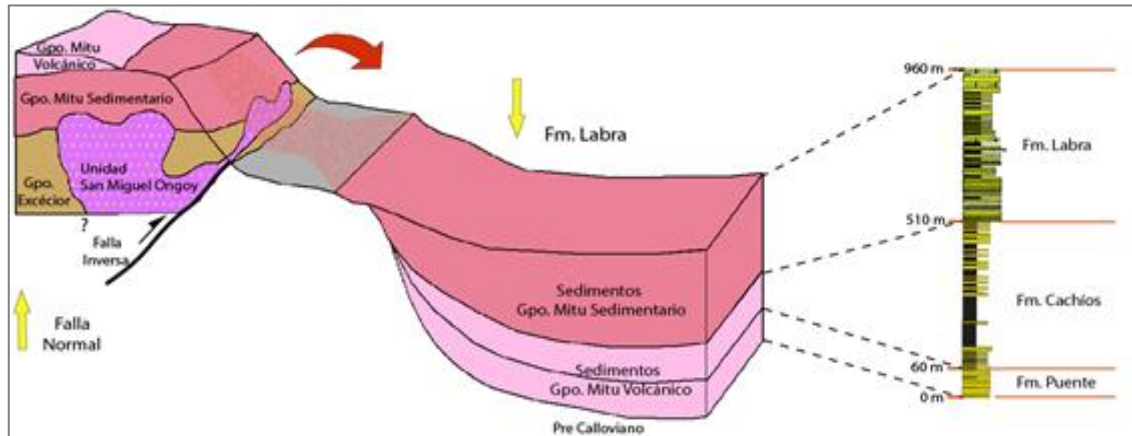


Figura 90. Modelo Geodinámico de la Formación Labra. Parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho. Fuente: Propia.

En lo que respecta a la Formación Gramadal son rocas carbonatadas que se formaron por el ingreso de mar (Figura 91), según (Alván et al., 2017) se le atribuye a esta depositación una etapa de quiescencia tectónica muy efímera.

Las areniscas de la Formación Hualhuani derivaron principalmente de rocas metamórficas (Grupo Excelsior y de rocas intrusivas granitos como la Unidad San Miguel Ongoy (Figura 92). Adicionales rocas fuente se podrán definir cuándo se tenga dataciones radiométricas (dataciones U-Pb, en cola de espera).

La caracterización mineralógica de cada formación del Grupo Yura es un aporte fundamental para establecer argumentos para correlaciones estratigráficas en el caso de unidades con ausencia de contenido fósil. Servirán de argumentos muy consistentes al momento de proponer correlaciones estratigráficas. Esta información puede ser fortalecida con los métodos analíticos adicionales, con el fin de ayudar en la definición de un cuadro cronoestratigráfico y en la Cartografía Geológica Nacional.

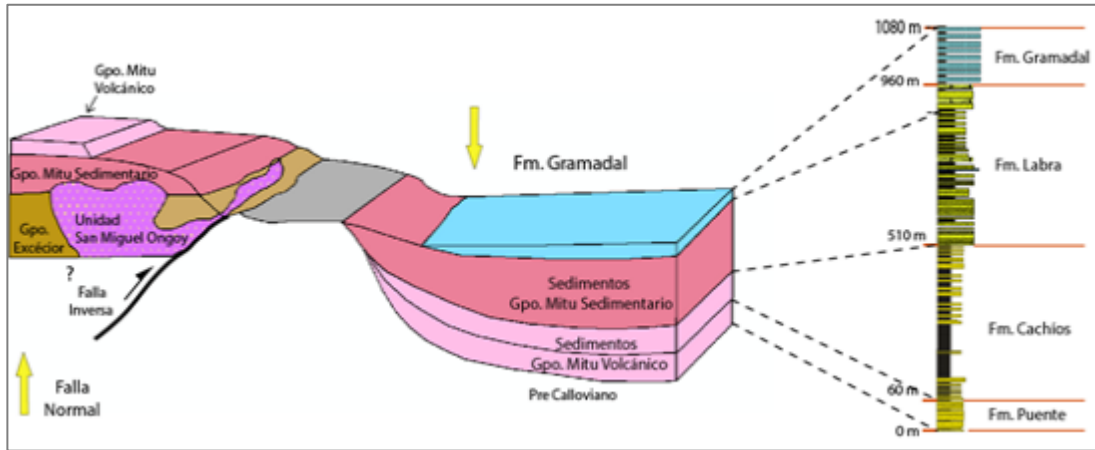


Figura 91. Modelo Geodinámico de la Formación Gramadal. Parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.
Fuente: Propia.

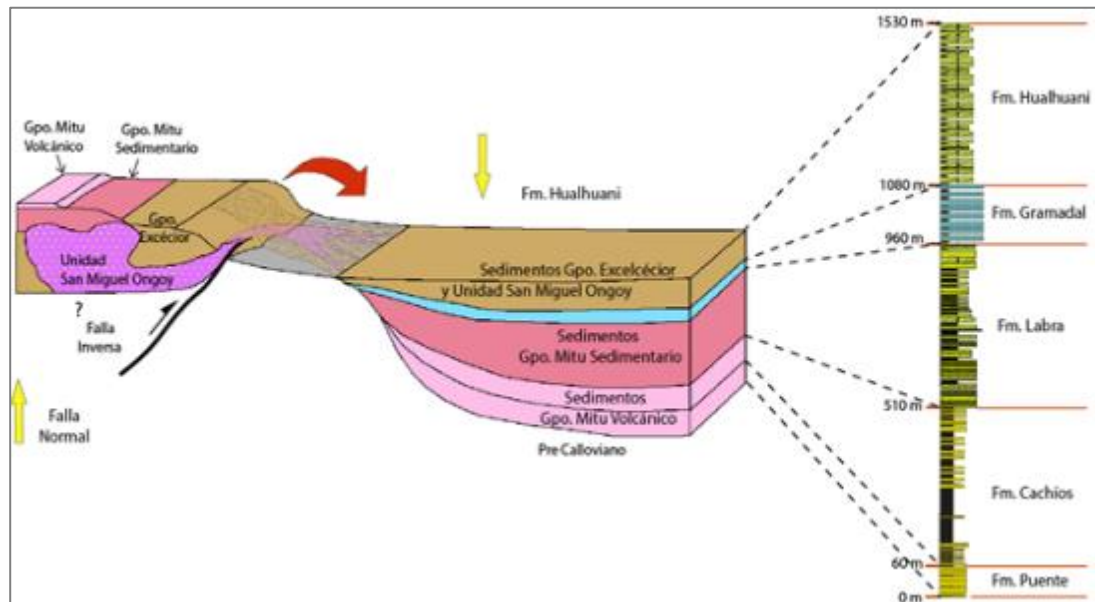


Figura 92. Modelo Geodinámico de la Formación Hualhuani. Parte Norte de la Cuenca Arequipa en Ayacucho.
Fuente: Propia.



VI. CONCLUSIONES

- a) Se ha logrado determinar la procedencia sedimentaria de rocas detríticas del Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa a través del análisis de minerales pesados.
- b) El estudio de minerales pesados es una herramienta que nos ha permitido definir que las secuencias evolutivas del Grupo Yura muestran el principio básico de proveniencia, en donde las rocas fuente más jóvenes (Grupo Mitu volcánico) provee sedimentos mediante su denudación para formar las rocas más antiguas del relleno sedimentario en la parte Norte de la Cuenca Arequipa (Formaciones Puente y Cachíos), mientras las rocas fuente más antiguas como el Grupo Excélsior y la Unidad San Miguel Ongoy han provisto de sedimentos para formar las rocas más recientes del Grupo Yura (Formación Hualhuani).
- c) Se determinó el ambiente tectónico de los sedimentos de las Formaciones Puente y Cachíos que derivan de un Basamento levantado lo que indica la mayor contribución de feldespato plagioclasa (Fp) y líticos volcánicos (Lv) y las Formaciones Labra y Hualhuani derivan de un Orógeno reciclado cuarcítico, la cual se caracteriza por presentar abundante cuarzo (Q) y en menor proporción de feldespatos y líticos volcánicos.
- d) Se compararon los espectros según la predominancia de minerales pesados de la roca fuente con los observados de las unidades detríticas del Grupo Yura y se puede afirmar que los sedimentos de la Formaciones Puente y Cachíos se caracteriza por la abundancia de minerales pesados de piroxenos y en menor proporción de zircones, turmalinas y granates los cuales derivan principalmente del Grupo Mitu volcánico y en menor proporción de las rocas que conforman al Grupo Excélsior y Unidad San Miguel Ongoy. Los sedimentos de la Formación Labra se caracteriza por su



abundancia de zircón, turmalina y rutilo el cual derivan principalmente del Grupo Mitu sedimentario y en menor proporción de las rocas que conforman al Grupo Excélsior y Grupo Mitu volcánico y finalmente los sedimentos de la Formación Hualhuani se caracteriza principalmente por la abundancia de granates, zircones y turmalinas que derivan principalmente del Grupo Excélsior, Unidad San Miguel Ongoy, en moderado proporción a las rocas del Grupo Mitu sedimentario.



VII. RECOMENDACIONES

- a) Realizar con mayor cantidad de muestras de areniscas los estudios de minerales pesados para reforzar los espectros minerales y tener mejor certeza en la determinación variación horizontal en toda la cuenca Arequipa. Crear la base de datos de espectros de minerales pesados de las rocas fanerozoicas del territorio peruano, con el objetivo de fabricar elementos de correlación a nivel de las cuencas sedimentarias del Perú.
- b) Queda abierto la posibilidad de complementar y reforzar los modelos de proveniencia presentados en esta tesis con dataciones radiométricas U-Pb en zircones detríticos, análisis geoquímicos y análisis de facies sedimentarias en el Grupo Yura en la parte Norte de la Cuenca Arequipa.
- c) Aprovechar los estudios de proveniencia de sedimentos en trabajos de cartografiado geológico, prospección de recursos hídricos y establecimiento de correlaciones estratigráficas en el territorio peruano, así como en la búsqueda de potenciales recursos minerales.
- d) Aplicar la técnica de análisis de minerales pesados en otras Formaciones Sedimentarias de rocas detríticas a lo largo del Perú, como por ejemplo la Formación Huancané en Puno y dar a conocer de sus procedencias sedimentarias.



VIII. REFERENCIAS

Alván, A. (2015). *Geodynamic significance of the arc to deposits Cenozoic in southern Peru (16 ° 25'S and 17 ° 15'S): Limited by analysis of sedimentary facies and provenance*. Dissertation, University of Gottingen, Geoscience Center, 120.

Alván, A., von Eynatten, H., Dunkl, I., & Gerdes, A. (2015). Zircón U- Pb geochronology and heavy mineral composition of the Camaná Formation, Southern Peru: Constraints on sediment provenance and uplift of the Coastal and Western Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 61, 14-32.

Alván, A., Ramirez, K., Eynatten V., Dunkl, I., Jacay, J., & Bertone, G. (2017). Evolución Geológica de las Cuencas de Antearco del Sur de Perú (Moquegua y Camaná Mollendo): Proveniencia Sedimentaria y Análisis de Facies en Rocas Cenozoicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 112.

Amorosi, A., & Zuffa, G. (2011). Sand composition changes across key boundaries of siliciclastic and hybrid depositional sequences. *Sedimentary Geology*, 236, 153-163.

Benavides, V. (1962). *Estratigrafía Pre-terciaria de la región de Arequipa*. *Congreso Nacional de Geologa*. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 38, 5-63.

Bande, B., Horton, J., Ramírez, A., Mauricio, P., & Daniel F. (2011). Clastic deposition, provenance, and sequence of Andean thrusting in the Frontal Eastern Cordillera and Llanos foreland basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 30, 412.

Bangs, C., & Basu, A. (1994). Provenance analysis of muddy sandstone: *Journal of Sedimentary Research*, 64, 2-7.

Basu, A., Young, SW., Suttner, L., James, WC., & Mack, G. (1975). Re-evaluation of the use of ondulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45(4), 873-882.

Boenigk, W. (1983). *Crystal Research & technology*. Stuttgart

Candia, F., & Carlotto, V. (1985). Estudio geológico de la zona Huambutio – Lamay. *Universidad San Antonio Abad, Cusco*, 86.



- Carlotto, V., Rodríguez, R., Acosta, H., Cárdenas, J., & Jailard, E. (2009). Alto estructural Totos-Paras (Ayacucho): Límite paleogeográfico en la evolución mesozoica de las cuencas Pucará (Triásico Superior-Liásico) y Arequipa (Jurásico-Cretácico). *Sociedad Geológica del Perú*, 7, 1-46.
- Dávila, D. (1988). *Geología del cuadrángulo de Cailloma*. INGEMMET, Boletín 40.
- Dickinson, W. (1970). *Interpreting detrital modes of graywacke and arkose*. Geology Department, Stanford University, California. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40, 695 - 707.
- Dickinson, W., & Suczek, C. (1979). Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *The American Association of Petroleum Geologists*, 12, 2164-2182.
- Decou, A., Von Eynatten, H., Dunkl, I., Frei, D., & Worner, G. (2013). Late Eocene to Early Miocene Andean uplift inferred from detrital zircon fission track and U-Pb dating of Cenozoic forearc sediments. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 6 - 23.
- Dott, R. (1964). *Wacke, graywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification*. *Journal of Sedimentary Research* September.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Lave, J., Attal, M., France, Cc., & DeCelles, P. (2007). Quantifying San Provenance and Erosion. *Earth and planetary Science Letters*, 25, 500 - 515.
- Gill, J. (1981). *Orogenic Andesites and Plate tectonics*. Springer-Verlag, Berlin, 390.
- Guisado, J., & Landa, C. (1965). *Geología del cuadrángulo de pampas*. Carta Geológica Nacional Boletín 12.
- Gregory, H. (1916). *A geological reconnaissance of the Cuzco valley Perú*. Reconnaissance of the Ayusbamba (Peru) fossil beds. *Journal Science*, 41, 100.
- Harrison, J. (1951). *Geología de los Andes Orientales del Perú Central*. Sociedad Geológica del Perú, 21.



Hubert, J. (1962). *A Zircon-Tourmaline-Rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 3, 440 - 450.

INGEMMET (2015). *Clasificación de rocas sedimentarias*. Plantilla sugerida en el Manual N° 4. DGR, 1,10.

INGEMMET (2015). *Protocolo de separación de minerales pesados para estudio de procedencia sedimentaria*. DGR, 1.

Ingersoll, RV., Bullard, T., Ford, R., Grimm, J., Pickle, J., & Sares, S. (1984). The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 103 - 116.

Jacay, J., & Sempere, T. (2005). Emplacement levels of the Coastal Batholith in Central Peru. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005). *Barcelona, Spain. Extended Abstracts*, 397-399.

Jenks, W. (1948). *Geología de la hoja de Arequipa al 100,000*. Carta Nacional del Perú. Boletín, 204 - 220.

Jenks, W. (1951). *Triassic to tertiary stratigraphy near Cerro de Pasco, Perú*. Geological Society of America Buletin, 203-220.

Kontak, D., Clark, A., Farra, R., & Strong, E. (1985). The Rift Asociated Permo-triassic Magmatism of the Eastern Cordillera. *The Peruvian Andes – Clasgon, London & New York (Blackie Wiley)*.

LAGESA (1996). *Geología de los cuadrángulos de Huancapi, Chincheros, Querobamba y Chaviña*. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 70, 185.

Limonta, M. (2015). *Heavy minerals a key tounravel orogenic processes*. Universita Degli Studi Di Milano- Bicocca Dottorato di Ricerta XXVI ciclo in Scienze della Terra.

Morton, A., & Hallsworth, C. (1999). Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. Department of Geology and Petroleum Geology. *University of Aberdeen, Kings Buildings, Aberdeen AB9 2UE, UK*.



- Miskovic, A. (2009). *Magmatic evolution of the Peruvian Eastern Cordilleran intrusive belt: insights into the growth of continental crust and tectonism along the Proto-Andean western Gondwana*, 267.
- Morche, W., & De la Cruz, J. (1995). Geología del cuadrángulo de Ayacucho. *INGEMMET. Boletín 61*.
- Mange, M., & Maurer, H. (1992). Heavy minerals in the study of sediments: principles and practice. *Department of Earth Sciences University of Oxford*.
- Mackenzie, F. (2003). *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks*. Oxford, England, Elsevier.
- Mange, A. & Wright, D. (2007). Heavy minerals in use. *Developments in sedimentology series*, 58, 1328.
- Mendivil, S., & Dávila, D. (1994). Geología de los cuadrángulos de Cuzco y Livitaca Hojas 28 S y 29 S. *Boletín 52, Serie A: Carta Geológica Nacional INGEMMET*.
- McBride, E. (1963). *A Classification of Common Sandstones*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 3, 664 - 669.
- MC Laughlin, D. (1924). *Geology and physiography of the Peruvian Cordillera*. Departments of Junín and Lima. *Sociedad Geológica del Perú*, 3, 591 - 632.
- Morton, A. (1986). *Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones: implications for the generation of secondary porosity*. *Clay Miner*, 21, 711 - 733.
- Morton, A. (1991). *Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research*. *Geological Society London Special Publications*, 57, 31.
- Morton, A., & Johnsson, M. (1993). Factors influencing the composition of detrital heavy mineral suites in Holocene sands of the Apure River drainage basin, Venezuela. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. *Geol. Soc. Am.*, 284, 171 - 85.
- Morton, A., & Hallsworth, C. (1994). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90, 241 - 256.



- Morton, A., & Hallsworth, C. (1999). Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 3 - 29.
- Newell, N., Chronic, B., & Roberts, T. (1953). Upper Paleozoic of Peru. *Geol.soc. of. Am*, 58.
- Palacios, O. (1994). *Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chocorvos y Paras*. INGEMMET. Bol. 34.
- Pettijohn, F. (1941). *Persistence of heavy minerals and geologic age*. Geol. 49, 610 - 625.
- Pettijohn, F., Potter, P., & Siever, R. (1987). Sand and sandstone. *Springer-Verlag New York*.
- Quispesivana, L., & Navarro, P. (2002). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Guadalupe (28-1), Huancapi (28-ñ), Chincheros (28-o), Castrovirreyna (27-m), San Miguel (27-o), Tupe (26-1), Conaica (26-m), Huarochirí (25-k), Yauyos (25-l) y Huancayo (25-m). *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Perú. Boletín N°61, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 21.
- Reitsma, M. (2012). *Reconstructing the Late Paleozoic – Early Mesozoic plutonic and sedimentary record of south-east Peru: Orphaned back-arcs along the western margin of Gondwana*. Universite de Geneve Departement of Mineralogie. 37.
- Ramírez, K. (2018). *Análisis de minerales pesados y evolución sedimentaria de los depósitos cenozoicos del cuadrángulo de punta de bombón (35s), sur del Perú*. Tesis de pregrado.
- Salazar, H. (1993). *Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chíncha, Tantara y Castrovirreyna*. INGEMMET. Bol. 44.
- Sánchez, j., & Centeno, E. (1994). Técnicas y aplicaciones del estudio de los sedimentos terrígenos de grano fino: Procedencia y tectónica. Instituto de geología. *Universidad Autónoma de México*.
- Schumm, S. (1981). *Evolution and response of the fluvial system: sedimentological implications*. Sepm Special Publication, 31, 19 - 29.



Trinidad, I. (2017). *Evolución geodinámica del mesozoico al Sur de la cuenca Arequipa (17° - 18° latitud Sur) basado en el análisis de minerales pesados*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Tesis de pregrado.

Vicente, J. (1981). *Elementos de la estratigrafía Mesozoica Sur Peruana. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*, 1, 319 – 351.

von Eynatten, H., & Gaupp, R. (1999). Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sedimentary Geology*, 124, 81 - 111.

Weltje, G., & Prins, M. (2003). Muddled or mixed Inferring paleoclimate from size distributions of deep-sea clastics. *Sedimentary Geology*, 162, 33 - 62.

Weltje, G., Von., & Eynatten, H. (2004). Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171, 1 - 11.

Wilson, J., & Garcia, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca. *Carta Geol. Nac., Boletín*, 4, 81.

Wotzlaw, F., Decou, A., Von Eynatten, H., Worner G., & Frei D. (2011). Jurassic to Palaeogene tectono-magmatic evolution of northern Chile and adjacent Bolivia from detrital zircon U-Pb geochronology and heavy mineral provenance. *Earth-Sci. Rev.*

Zuffa, G. (1985). *Optical Analyses of Arenites: Influence of Methodology on Compositional Results. Provenance of Arenites*. Reidel Publishing Company, 165 - 189.



ANEXOS

Anexo A: Plantilla para llenar datos de conteo de granos QFL del microscopio petrográfico (sección delgada).

Anexo B: Resumen de datos de muestras obtenidos de campo.

Anexo C: Mapa de ubicación del área de estudio.

Anexo D: Mapa geológico del área de estudio.

Anexo E: Columna litoestratigráfica generalizada del área de estudio.

Anexo F: Mapa de ubicación de muestras para estudio de minerales pesados.

Anexo G: Mapa de ubicación de muestras de areniscas para estudio petrográfico.