

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**PROCEDENCIA SEDIMENTARIA DE DEPÓSITOS CENOZOICOS
EN BASE A ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN PACHIA (36v)
Y TACNA (37v), TACNA**

Tesis para optar el título de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Fausta Yacory Bustamante Gonzáles

Asesor:

M.Cs. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani

Colaborador:

PhD. Aldo Alván De la Cruz

Cajamarca, Perú

2017

DEDICATORIA

Con toda la humildad de mi ser, dedico primeramente este trabajo a Dios Yahveh.

A mis padres: Royser y Fanny, por su amor incondicional, su esfuerzo y sacrificio.

A mis hermanos Rocky, Daniel, Brenda y Danna por ser mi motivación y mi alegría.

AGRADECIMIENTO

Expreso los más sinceros agradecimientos a mi Dios, mis padres y hermanos por darme la vida y apoyarme en mi profesión, a la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica y sus docentes por contribuir en mi formación profesional, especialmente a mi asesor M.Cs. Ing. Zenón Quispe Mamani, al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), al Director de Geología Regional Ing. Pedro Navarro y al grupo de investigación del Proyecto GR41A, al Jefe de proyecto (Investigador Principal) PhD. Aldo Alván De la Cruz, Ing. Elvis Sánchez, y amigos tesisistas Edid, Iván y Ángel, por darme la oportunidad de realizar mi tesis profesional. Al personal del Laboratorio de Petrología y Microscopía del INGGEMMET por su apoyo y por facilitarme sus equipos. También al Proyecto Especial Tacna (PET), por facilitarme muestras de testigos de perforación de Tacna. Esta tesis fue desarrollada en el marco del Convenio N° 216-2015 (Registro de variaciones climáticas en los sedimentos durante el Mesozoico y Cenozoico en el suroeste de Perú [Sur de 17°S], y sus implicancias en el levantamiento de los Andes Centrales) entre el INGGEMMET y FONDECYT (Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica, Perú) y del Proyecto GR41A. Se agradece y reconoce a estas instituciones por incentivar la investigación científica en el Perú y por aplicarlo a la industria.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.	
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO II.	
MARCO TEÓRICO.....	5
ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	5
BASES TEÓRICAS.....	7
2.2.1 PROCEDENCIA (PROVENIENCIA) SEDIMENTARIA.....	7
2.2.2 MINERALES PESADOS Y ANÁLISIS (HMA, Heavy Mineral Analysis).....	10
2.2.3 PETROGRAFÍA SEDIMENTARIA.....	14
2.2.4 FACIES Y AMBIENTES SEDIMENTARIOS.....	19
DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	23
CAPÍTULO III.	
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
3.1.1 UBICACIÓN POLÍTICA.....	24
3.1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	24
3.1.3 ACCESIBILIDAD.....	26
3.1.4 CLIMA.....	26
3.1.5 GEOMORFOLOGÍA.....	28
3.1.6 HIDROLOGÍA.....	31
3.1.7 GEOLOGÍA.....	31
3.1.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	43
3.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	44
3.1.1 TIPO, DISEÑO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	44
3.1.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	45
3.1.3 MUESTRA.....	45

	Pág.
3.1.4 UNIDAD DE ANÁLISIS	45
3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	46
3.2.1 ETAPA PRELIMINAR DE GABINETE.....	46
3.2.2 ETAPA DE CAMPO.....	46
3.2.3 ETAPA DE LABORATORIO Y TRATAMIENTO DE DATOS	47
3.4 PROCESAMIENTO DE MUESTRAS	48
3.4.1 EQUIPOS Y MATERIALES	48
3.4.2 PROCESAMIENTO DE MUESTRAS Y PROCESO DE OBTENCIÓN DE MINERALES PESADOS.....	48
3.5 TRATAMIENTO DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	62

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	64
4.1.1 ANÁLISIS DE FACIES Y MINERALES PESADOS	70
4.1.1.1 COLUMNA N°1. LADERA NOR-ESTE DE CERRO CHUSCHUCO.....	70
4.1.1.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°1	73
4.1.2.1 COLUMNA N°2. LADERA ESTE DE CERRO CHUSCHUCO	77
4.1.2.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°2	79
4.1.3.1 COLUMNA N°3. LADERA SUR DE CERRO CHURCOS	80
4.1.3.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°3	83
4.1.4.1 COLUMNA N°4. LADERA OESTE DE CERRO CUBETA-LOS CÓNDORES. ...	86
4.1.4.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°4	90
4.1.5.1 COLUMNA N°5. LADERA OESTE DE CERRO ACIRUME.....	91
4.1.5.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°5	95
4.1.6.1 COLUMNA N°6. CERRO MAGOLLO	96
4.1.6.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°6	99
4.1.7.1 COLUMNA N°7. YARAHUAY.....	101
4.1.7.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°7	105
POZOS DE PERFORACIÓN	106
4.1.8.1 COLUMNA N°8. LOGUEO POZO TDY_01	106
4.1.8.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDY-01.....	108
4.1.9.1 COLUMNA N°9. POZO TDY_02.....	111
4.1.9.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDY-02.....	113
4.1.10.1 COLUMNA N°10. POZO TDRY_02	116

	Pág.
4.1.10.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDRY-02	118
4.1.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN UNIDADES PRE-CENOZOICAS	120
4.1.3 CONTEO DE GRANOS QFL.....	126
4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	129
4.2.1 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR	136
4.2.2 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN HUAYLILLAS.....	138
4.2.3 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN MILLO	138
4.2.1 MODELO DE PROVENIENCIA SEDIMENTARIA DEL CENOZOICO EN TACNA	139
4.2.4 PROVENIENCIA EN RELACIÓN AL AMBIENTE TECTÓNICO	144
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	146
CAPÍTULO V.	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
5.1 CONCLUSIONES	147
5.2 RECOMENDACIONES	149
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1. Ratios de sensibilidad-proveniencia de minerales pesados (Morton, 1994).	10
Tabla 2. 2. Comparación de orden de persistencia de minerales pesados, se observa los patrones de estabilidad en meteorización ácida y condiciones de enterramiento. (Morton & Hallsworth, 1999; adaptado de Pettijohn, 1941).	13
Tabla 2. 3. Características generales de principales minerales pesados (modificado de Mange & Maurer, 1992).	13
Tabla 2. 4. Parámetros de granos (Ingersoll et al., 1984; antes Dickinson, 1970; Graham et al., 1976; Ingersoll & Suczek, 1979)	16
Tabla 2. 5. Principales tipos de procedencia y características composicionales de las arenas asociadas. (Dickinson et al., 1985).	17
Tabla 2. 6. Clasificación de facies fluviales mediante códigos (propuesto por Miall, 1996).	20
Tabla 2. 7. Clasificación de elementos arquitecturales para depósitos fluviales. Modificado de Miall (1985, 1996).	21

	Pág.
Tabla 2. 8. Abreviaciones de las litofacies no-genéticas (Branney y Kokelaar, 2003). Por ej. mLT (i) – mLT (nl,ip) es una lapilli-toba masiva con gradación inversa en la parte de arriba y una lapilli-toba masiva con una gradación normal de clastos líticos e inversa gradación con clastos pumicíticos (traducido por Puy,2006).	22
Tabla 3. 1. Datos de ubicación geográfica de la zona de estudios.....	24
Tabla 3. 2. Listado de equipos y materiales utilizados para el desarrollo de investigación.	48
Tabla 4. 1. Muestras se rocas sedimentarias para análisis de minerales pesados (n=41). ...	66
Tabla 4. 2. Datos de las muestras obtenidas de la unidad Moquegua en Chuschuco.	74
Tabla 4. 3. Muestras obtenidas de la Formación Huaylillas, Cerro Chuschuco	75
Tabla 4. 4. Muestras recolectadas de la unidad Moquegua, Cerro Chuschuco	79
Tabla 4. 5. Datos de muestras tratadas para análisis de minerales pesados.....	83
Tabla 4. 6. Detalles de la muestra de la Formación Huaylillas.	84
Tabla 4. 7. Muestras analizadas en columna estratigráfica del Cerro Cubeta.	90
Tabla 4. 8. Detalle de las muestras de areniscas tomadas en campo, Cerro Acirume.	95
Tabla 4. 9. Muestras para análisis de minerales pesados, Cerro Magollo.	99
Tabla 4. 10. Detalles de las muestras obtenidas para el análisis de minerales.	105
Tabla 4. 11. Descripción de las muestras obtenidas del pozo TDY_01.	108
Tabla 4. 12. Detalle de las muestras obtenidas del pozo TDY_02.	113
Tabla 4. 13. Detalles de las muestras obtenidas en el pozo TDRY-02.....	118
Tabla 4. 14. Datos de las muestras y resultado del conteo de granos de secciones delgadas en las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo; Qm= Cuarzo monocristalino, Qp= Cuarzo policristalino, F= Feldespatos y L= Líticos. Qm+Qp=Qt.	126
Tabla 4. 15. Resumen de espectros de minerales pesados de potenciales rocas fuente y Moquegua C y D, los símbolos xxx =abundante, xx= común, x= presente, o=ausente; (*) indica muestras analizadas por Decou et al. (2011) y Alván et al. (2015).	135
Tabla 4. 16. Rocas fuente y la estimación de contribución a las formaciones Moquegua Superior, Huaylillas y Millo.	142

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2. 1. Principales pasos de la evolución sedimentaria (negrita) y procesos principales que modifican la composición de los sedimentos clásticos desde el área fuente a la cuenca sedimentaria. Factores que controlan (<i>itálica</i>) son mostrados a la derecha (Weltje & von Eynatten, 2004).	8
Figura 2. 2. Espectros de minerales pesados. (Modificado de Ando et al., 2010).	11

Figura 2. 3. Diagrama esquemático mostrando procesos que controlan ensambles de minerales pesados en areniscas (modificado de Morton & Hallsworth, 1994).	12
Figura 2. 4. Clasificación de areniscas y grauvacas de acuerdo a su composición. Adaptada de Dott (1964), Dickinson (1970) y Pettijohn et al. (1987).	15
Figura 2. 5. Diagramas QFL y QmFLt para plasmar la cantidad modal de los granos estructurales de areniscas terrígenas, muestran subdivisiones provisionales según el tipo de procedencia inferido. Dickinson et al. (1983), antes Dickinson & Suczek (1979).	18
Figura 2. 6. Diagrama de ambientes sedimentarios, muestra ambientes continentales, de transición y marinos. (Fuente: Earth System History, Third Edition). Los ambientes sedimentarios del Grupo Moquegua en Tacna corresponderían a abanicos aluviales, trenzados, y posiblemente lacustres (Marocco et al., 1985).	19
Figura 3. 1. Plano de ubicación del área de investigación (indicada en el cuadrángulo color rojo), sistema WGS-84.	25
Figura 3. 2. Mapa de las principales vías de acceso en el departamento de Tacna.	27
Figura 3. 3. Vista de la Llanura costanera de Tacna desde el Cerro Chuschuco (Pachía, 36v). Foto horizontalizada.	28
Figura 3. 4. En A) Cadena de montañas correspondientes a la Cordillera Occidental, vista al este de Cerro Talane (Pachía, 36v), y en B) Valles y terrazas en Tacna, vista al noroeste del Cerro Solitario (Tacna, 37v).	29
Figura 3. 5. Vista de la superficie Huaylillas al sureste de Tacna, Quebrada Viñani (Tacna, 37v). ..	29
Figura 3. 6. Plano geomorfológico-altitudinal, atributos altitudinales tomados de Wilson & García (1962).	30
Figura 3. 7. Vista del río Uchusuma al este del Cerro Chuschuco (Pachía, 36v).	31
Figura 3. 8. Columna estratigráfica generalizada de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v).	37
Figura 3. 9. Afloramientos de rocas atribuidas a la unidad Moquegua, en A) Vista al SO en Cerro Chuschuco, en B) Estratos de areniscas en los Cerros Perdido y Cubeta.	39
Figura 3. 10. Fm. Huaylillas con sus tres miembros, vista desde Cerro Blanco, Tacna.	40
Figura 3. 11. Vista de la Formación Millo en el Cerro Magollo (E: 361843, N: 8005108), situado al oeste de la ciudad de Tacna.	41
Figura 3. 12. Modelo digital de terreno que muestra principales sistemas de fallas en el antearco del sur de Perú. Tomado de Flores et al. (2005).	44
Figura 3. 13. Organigrama del desarrollo de la presente investigación.	45

	Pág.
Figura 3. 14. Ubicación referencial de los lugares donde se levantó columnas estratigráficas, Tacna. Los cuadros rojos indican tanto columnas estratigráficas como testigos de pozo de perforación del PET (Tacna).	47
Figura 3. 15. Colecta de muestras de areniscas en la unidad Moquegua, en A) roca observada a la lupa 20X y en B) flechas indican zonas de colecta, lentes de arenisca o matriz areniscosa de los conglomerados.	49
Figura 3. 16. Chancadora secundaria de mandíbulas marca Rhino (en A y B), Área de Preparación Mecánica de muestras del Laboratorio de INGEMMET.	50
Figura 3. 17. A y B) Limpieza de mandíbula de la chancadora secundaria con alcohol y cepillo metálico.	50
Figura 3. 18. Roca pulverizada por la chancadora secundaria.	51
Figura 3. 19. A) Tamices utilizados para seleccionar la muestra por su granulometría (mallas N°10, N°60, N°100, N°200 y base), en B) muestra triturada lista para ser tamizada y C) tamizador ROTAP.	52
Figura 3. 20. Sedimentos obtenidos del tamizador y guardados en bolsas codificadas.	52
Figura 3. 21. A y B) Limpiador ultrasónico usado para la limpieza de los tamices.	53
Figura 3. 22. A) Sedimentos de muestra antes del lavado, por ejemplo, se tiene codificada la muestra “GR41A-16-59b/200”; B). Lavado de sedimentos en malla N° 200.	53
Figura 3. 23. A) Ácido acético concentrado al 5%, B) Incorporación de ácido acético 5% a los sedimentos y C) Muestras en proceso de bañado con ácido acético al 5%.	54
Figura 3. 24. A) Secado de la muestra en estufa eléctrica a Temperatura $\leq 50^{\circ}\text{C}$: B) Muestra extraída de la estufa, codificada y pesada con balanza de miligramos.	54
Figura 3. 25. A) Representación del Politungstato de sodio en fase sólida, B) PS preparado y C) medida de la densidad de Politungstato de sodio (PS).	55
Figura 3. 26. Densidades de los minerales (g/cm^3) y líquidos pesados comúnmente usados (vertical) que tradicionalmente se usaron para separar los minerales (tomado de Boenigk, 1983).	55
Figura 3. 27. Embudo de decantación y embudo de vástago con papel filtro (A y B), soporte universal (C).	56
Figura 3. 28. A) Papel filtro ($\sim 20\ \mu\text{m}$ y $\sim 40\ \mu\text{m}$) ubicado en los embudos para el filtrado de líquido pesado; B) Líquido pesado en el embudo de decantación y C) llave cerrada.	57
Figura 3. 29. Proceso de separación de minerales pesados usando politungstato de sodio. Laboratorio de Preparación mecánica de muestras, INGEMMET.	57
Figura 3. 30. A) Muestra en proceso de decantación de minerales densos dentro de embudo de separación y B) Filtrado de líquido pesado y retención de minerales pesados y ligeros.	58
Figura 3. 31. Proceso de recuperación de líquido pesado (A) y medida de densidad (B).	59
Figura 3. 32. Frascos codificados conteniendo los minerales pesados y minerales ligeros.	59

	Pág.
Figura 3. 33. Minerales pesados divididos en magnéticos y no magnéticos (vistos en microscopio estereoscópico), tamaño de los minerales de 75 a 150 μ m.	60
Figura 3. 34. A y B) Cuarteo de la muestra de minerales pesados, realizado para asegurar homogeneidad de granos.	61
Figura 3. 35. A) Resina calentada a $\sim 70^{\circ}\text{C}$ y portaobjetos, para ser usada en la preparación de slides con granos de minerales pesados y B) Slides conteniendo minerales pesados para contarlos en el microscopio petrográfico.	61
Figura 3. 36. A y B) Identificación de minerales pesados en microscopio petrográfico.	62
Figura 3. 37. Gráficos representativos del contenido porcentual de minerales pesados por muestra analizada, exhibidos detalladamente en Capítulo IV.	63
Figura 4. 1. Columnas estratigráficas ubicadas en un plano referencial de las rocas cenozoicas en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v). Tomado de Monge & Cervantes (2000) y Sánchez et al. (2000).	65
Figura 4. 2. Plano que muestra la ubicación referencial de muestras (n=41) para análisis de minerales pesados.	67
Figura 4. 3. Ubicación espacial de las columnas estratigráficas elaboradas en Pachía (36v) y Tacna (37v). Los registros de los pozos TDY-01, TDRY-02 y TDY-02 son sub-superficiales, mientras el resto de columnas corresponden a afloramientos.	69
Figura 4. 4. Vista de Cerro Chuschuco, lugar de desarrollo de columna N°1.	70
Figura 4. 5. Facies sedimentarias en las secuencias A y B en Chuschuco Norte.	71
Figura 4. 6. En página anterior: Columna estratigráfica resumida de Cerro Chuschuco Norte.	72
Figura 4. 7. En a y b se muestran facies sedimentarias de las secuencias b y c de la Fm. Huaylillas.	73
Figura 4. 8. Conteo de minerales pesados en muestras de unidad Moquegua – Chuschuco.	74
Figura 4. 9. Minerales pesados identificados en A y D) zircones, B) clinopiroxeno, E) titanita, F) apatito y C) varios minerales observados al microscopio obtenidos de la Formación Moquegua Superior.	75
Figura 4. 10. Minerales pesados en muestras de la Formación Huaylillas en Cerro Chuschuco.	76
Figura 4. 11. Minerales pesados identificados al microscopio en nicols paralelos; en A) Clinopiroxenos, B) Ortopiroxenos y C) ortopiroxeno y zircón obtenidos de la Fm. Huaylillas.	76
Figura 4. 12. Panorámica con vista al oeste del Cerro Chuschuco.	77
Figura 4. 13. Facies Formación Moquegua y B) Facies Formación Huaylillas, este de Cerro Chuschuco.	77
Figura 4. 14. Columna estratigráfica resumida, parte este de Cerro Chuschuco.	78
Figura 4. 15. Resultado del conteo de granos de minerales pesados en la unidad Moquegua.	79

	Pág.
Figura 4. 16. Minerales pesados observados al microscopio, en A) piroxenos, B) zircón, C) anfíbol, D) titanita y D) apatito.	80
Figura 4. 17. Vista al W-E del Cerro Churcos, al este de la ciudad de Tacna.....	80
Figura 4. 18. Secuencias observadas en el Cerro Churcos.....	81
Figura 4. 19. Columna estratigráfica resumida, Cerro Churcos.....	82
Figura 4. 20. Resultado del conteo de minerales pesados en la unidad Moquegua.....	83
Figura 4. 21. Minerales pesados identificados al microscopio, en A) piroxenos y titanita de GR41A-16-09, B) zircón y C) titanita de la muestra GR41A-16-10 (ver proporciones en la Figura 4.20).....	84
Figura 4. 22. Resultado del conteo de minerales pesados en GR41A-16-13.....	85
Figura 4. 23. Minerales pesados identificados en microscopio, en A) anfíboles verdosos y oxidados, apatito y epidotas, B) Apatito y C) Titanita, pertenecientes a la unidad Huaylillas.....	85
Figura 4. 24. Vista al S-E del Cerro Los Cóndores, se distingue la unidad Moquegua Superior.....	86
Figura 4. 25. Laminaciones oblicuas en estratos de la Formación Moquegua dirigidas al sur-oeste.	86
Figura 4. 26. Secuencia B, en a) Estratos de areniscas y en b) areniscas intercaladas con lutitas.....	87
Figura 4. 27. En a) Sets de conglomerados matriz soportados y b) areniscas con laminación oblicua dirigidas al SO.....	87
Figura 4. 28. Columna resumida de la Formación Moquegua en el Cerro Cubeta y Los Cóndores.....	88
Figura 4. 29. Conglomerados de la secuencia “D” y “E” sobre las tobas lapilli.....	89
Figura 4. 30. Resultado del conteo de minerales pesados, Cerros Cubeta – Los Cóndores.....	90
Figura 4. 31. Minerales pesados en A) anfíbol, zircón, granate y titanita de la muestra GR41A-16-261, en B) Apatito, C) epidota y ortopiroxeno, D) zircones de la muestra GR41A-16-263.....	91
Figura 4. 32. Vista al norte, ladera del Cerro Acirume.....	91
Figura 4. 33. Nivel basal mostrando el contacto entre los conglomerados y la depositación piroclástica sobreyacente. Cerro Acirume.....	92
Figura 4. 34. a) Conglomerados y facies de areniscas interbarras, b) Conglomerados de la secuencia A- Acirume.....	93
Figura 4. 35. a) Clastos esporádicos de hasta 1m de diámetro y b) sets de conglomerados granodecrecientes de ± 30 cm.....	93
Figura 4. 36. Columna estratigráfica resumida de la unidad Moquegua en el Cerro Acirume.....	94
Figura 4. 37. Resultado del conteo de granos de minerales pesados en las muestras de Acirume.....	95
Figura 4. 38. En A) clinopiroxenos de la muestras GR41A-16-294, en B y C) granates, D) zircón y E) titanita pertenecientes a la unidad GR41A-16-292.....	96
Figura 4. 39. Vista al este en el Cerro Magollo.....	96
Figura 4. 40. Contacto entre conglomerados de la unidad Magollo (Secuencia A) y Fm. Huaylillas.....	97

Figura 4. 41. En a) Areniscas intercaladas con niveles de tobas y en b) pómez flotadas en niveles de areniscas.	97
Figura 4. 42. Secuencia C en superficie erosiva a la secuencia B.....	98
Figura 4. 43. Columna resumida de la unidad Millo, Cerro Magollo.	98
Figura 4. 44. Resultados del conteo de granos de minerales pesados, unidad Millo.	100
Figura 4. 45. Minerales pesados en A) zircón, en B) ortopiroxeno y anfíboles y en C) variados minerales pesados de piroxenos, anfíboles y zircón en muestras de la unidad Millo.....	100
Figura 4. 46. Vista al nor-este, lugar de levantamiento de columna estratigráfica.....	101
Figura 4. 47. En a) toba de cristales con esporádicos pómez y b) areniscas tobáceas laminadas horizontalmente.....	101
Figura 4. 48. Conglomerados matriz soportados y componente volcánico.....	102
Figura 4. 49. Columna estratigráfica resumida desarrollada en la localidad Yarahuay.....	103
Figura 4. 50. Resultado del conteo de granos en muestras de Yarahuay.	105
Figura 4. 51. Minerales identificados en A) clinopiroxenos y anfíboles de GR41A-16-57, en B) ortopiroxeno y anfíbol y C) zircón de la muestra GR41A-16-59.....	106
Figura 4. 52. Columna estratigráfica resumida del pozo TDY_01.....	107
Figura 4. 53. Conteo porcentual de MP en unidades Millo y Huaylillas.	109
Figura 4. 54. Minerales pesados identificados en GR41A-16-67, en A) titanita, B) granate y C) zircón y ortopiroxeno pertenecientes a la unidad Millo.....	109
Figura 4. 55. Múltiples minerales pesados identificados en GR41A-16-68, en A) piroxenos y anfíboles, en B) piroxenos, zircón y epídotas.....	110
Figura 4. 56. Resultado de conteo de granos de muestras en unidad Moquegua.	110
Figura 4. 57. Minerales identificados en la unidad determinada como Moquegua en el pozo TDY-01, en A) clinopiroxenos y anfíbol, en B) epídota (arriba) y zircón (abajo), en C) anfíbol oxidado y epidota (verde claro).	111
Figura 4. 58. Columna estratigráfica resumida del pozo TDY_02.	112
Figura 4. 59. Resultado del conteo de granos en las Formaciones Millo y Huaylillas, pozo TDY_02.	114
Figura 4. 60. Minerales pesados identificados en la muestra GR41A-16-74, en A) anfíbol, B) zircón y C) ortopiroxeno.....	114
Figura 4. 61. Minerales pesados en A) y B) piroxenos y en C) anfíbol, de la unidad Huaylillas.	115
Figura 4. 62. Resultado del conteo de MP en muestras de la unidad Moquegua, pozo TDY_02...	115
Figura 4. 63. Minerales pesados identificados en microscopio, en A) piroxeno, granate, anfíbol, en B) zircón, C) titanita y D) apatito.....	116
Figura 4. 64. Columna estratigráfica resumida del pozo TDRY-02.....	117
Figura 4. 65. Resultado del conteo de MP, muestra atribuida a la unidad Millo, pozo TDRY_02.	118

	Pág.
Figura 4. 66. Minerales pesados identificados en GR41A-16-63, en A) anfíbol, B) ortopiroxeno, C) granate y en D) titanita.	119
Figura 4. 67. Resultado del conteo de MP en muestras de la unidad Moquegua, pozo TDRY_02.	119
Figura 4. 68. Minerales pesados identificados en A) zircón, B) titanita, C y D) granates dela unidad Moquegua en TDRY_02.	120
Figura 4. 69. Resultado de conteo de minerales pesados en rocas del Basamento metamórfico y Grupo Ambo.	120
Figura 4. 70. Resultado del conteo de minerales pesados de la Formación Chocolate.	121
Figura 4. 71. Granos de minerales pesados en las Formaciones Pelado y Socosani.	122
Figura 4. 72. Resultado del conteo de minerales pesados en rocas del Grupo Yura.	122
Figura 4. 73. Resultado del conteo de granos de MP en el Grupo Toquepala.	123
Figura 4. 74. Minerales pesados identificados en el Grupo Toquepala, en A) ortopiroxeno y epidota, en B) zircón, en C) granate y en D) apatito.	123
Figura 4. 75. Conteo de granos de minerales pesados, Grupo Tacaza (Alván, 2015).	124
Figura 4. 76. Minerales pesados identificados en rocas intrusivas de la unidad Yarabamba. A y B) anfíboles, C) zircón, D) apatito y E) titanita.	124
Figura 4. 77. Minerales identificados de la unidad Milonita, en A) zircón, B) ortopiroxeno y C) epidota.	125
Figura 4. 78. Resultado del conteo de MP en Unidad Yarabamba y Dique Milonita.	125
Figura 4. 79. Minerales en la muestra GR41A-16-09 vista en nicoles paralelos (a) y cruzados (b), obsérvese cuarzo policristalino en el centro de la imagen.	127
Figura 4. 80. Minerales de GR41A-16-177 vista en nicoles paralelos (a) y cruzados (b).	127
Figura 4. 81. Minerales ligeros en la muestra GR41A-16-06 vista en nicoles paralelos (a) y cruzados (b).	127
Figura 4. 82. Minerales en GR41A-16-38 vista en nicoles paralelos (a) y cruzados (b).	128
Figura 4. 83. Minerales ligeros en la muestra GR41A-16-59, vista en nicoles paralelos a) y cruzados (b).	128
Figura 4. 84. Correlación de columnas estratigráficas simplificadas, en base a sus facies sedimentarias, para las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo (ver anterior página número 135), su integración con análisis composicional de conglomerados.	131
Figura 4. 85. Ratios de Minerales Pesados relacionados a la proveniencia sedimentaria. (ZTR: Zircón+Turmalina+Rutilo, GZi: índice Granate-Zircón, ATi: índice Apatito-Turmalina; Hubert (1962), Morton & Jhonsson (1993)).	132
Figura 4. 86. Correlación entre columnas estratigráficas elaboradas para esta tesis y pozos de perforación en La Yarada (PET), integración con análisis de minerales pesados (anterior página número 138).	134

	Pág.
Figura 4. 87. Resumen del valor porcentual de minerales pesados en unidades Pre-Cenozoicas aflorando en los cuadrángulos de Pachía y Palca aumentado de los datos provistos en Trinidad (2017) y Alván et al. (2015).	134
Figura 4. 88. Resumen del valor porcentual de espectros de minerales pesados en la Formación Moquegua Superior, Secuencia C1 (\approx Unidad Moquegua C según Sempere et al., 2004 y Decou et al., 2011).	137
Figura 4. 89. Resumen del valor porcentual de espectros de minerales pesados en la Formación Moquegua Superior, Secuencia C2.	138
Figura 4. 90. Resumen del valor porcentual (espectros) de minerales pesados en secuencias clásticas de la Formación Huaylillas.	138
Figura 4. 91. Resumen del valor porcentual de minerales pesados (espectros) en Formación Millo.	139
Figura 4. 92. Modelo depositacional del ambiente fluvio-aluvial en el departamento de Tacna. (Adaptado de Miall, 2006).	143
Figura 4. 93. Datos de areniscas de las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo en un diagrama “QtFL” de Dickinson (1983).	144
Figura 4. 94. Datos de areniscas de las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo en diagrama “QmFLt” de Dickinson (1983).	145

RESUMEN

En el sur de Perú rocas aflorantes del Cenozoico en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v), Tacna, registran evidencias importantes de procesos tectónicos y sedimentarios sucedidos durante la evolución geológica de la Cuenca sedimentaria Moquegua, en relación a la orogenia de los Andes, mediante el análisis de minerales pesados y petrografía sedimentaria se permitirá conocer la geodinámica de los bordes de cuenca. Los resultados revelan que la Formación Moquegua Superior contiene anfíboles y piroxenos (50-80%) como minerales pesados predominantes e indican la contribución principal de las formaciones Tacaza (30-24 Ma), Huaylillas (24-10 Ma) y del Batolito de la Costa (190-60 Ma), y minerales de menor proporción como zircón, apatito, titanita y granate (<15%), sugieren menores aportes de las formaciones Pelado, Socosani, Grupo Ambo, Formación Chocolate, Grupo Yura y Formación Toquepala. La Formación Millo contiene predominantes piroxenos y anfíboles (80-90%), siendo sus principales aportantes de sedimentos las formaciones Huaylillas (24-10 Ma) y Barroso (10-4 Ma). Dado el cambio en composición mineral y vertical de facies, se afirma que el proceso de exhumación de unidades se ajusta a un pulso rápido en el levantamiento de los Andes Centrales asociado al efecto cinemático del sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio. Mediante la elaboración de siete columnas estratigráficas y tres testigos de perforación, se ha definido dos secuencias principales dentro de la Formación Moquegua Superior e interpretado como un ambiente fluvio-aluvial y lacustre al sur-oeste de la cuenca, las correlaciones de facies marcan fallas normales ocultas en el suelo de Tacna, y podrían vincularse a reservorios de recursos hídricos.

Palabras claves

Proveniencia sedimentaria, Cenozoico, minerales pesados, facies sedimentarias, cuenca antearco.

ABSTRACT

In Southern Peru, Cenozoic outcrops in the quadrangles of Pachia (36v) and Tacna (37v), Tacna, record important evidence of tectonic and sedimentary processes that occurred during the geological evolution of the Moquegua sedimentary basin, in relation to the orogeny of The Andes, by means of the analysis of heavy minerals and sedimentary petrography, it will be possible to know the geodynamics of the basin edges. The results reveal that the Upper Moquegua Formation contains amphiboles and pyroxenes (50-80%) as predominant heavy minerals and indicate the main contribution of the Tacaza (30-24 Ma), Huaylillas (24-10 Ma) and Batolito de la Costa (190-60 Ma), and smaller minerals such as zircon, apatite, titanite and garnet (<15%), suggest smaller contributions from the Pelado, Socosani, Ambo Group, Yura Group, Chocolate and Toquepala Formations. The Millo Formation contains predominant pyroxenes and amphiboles (80-90%), with the main sediment sources being the Huaylillas (24-10 Ma) and Barroso (10-4 Ma) formations. Given the change in mineral and vertical composition of facies, it is stated that the exhumation process of units is adjusted to a rapid pulse in the Central Andes survey associated with the kinematic effect of the Cincha-Lluta-Incapuquio fault system. By means of the elaboration of seven stratigraphic columns and three drilling cores, two main sequences have been defined within the Upper Moquegua Formation and was interpreted as a fluvial-alluvial and lacustrine environment to the south-west of the basin, the correlation of facies indicates normal faults Hidden in the soil of Tacna, and could be linked to reservoirs of water resources.

Key Words

Sedimentary provenance, Cenozoic, Heavy minerals, Sedimentary facies, forearc basin.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

La proveniencia sedimentaria estudia el origen de los sedimentos, desde el borde de la cuenca hasta la misma, con el objetivo de desenmarañar los procesos que influyeron en su depositación (Johnsson, 1993; von Eynatten & Dunkl 2012). Un componente esencial para los estudios de proveniencia es el análisis de minerales pesados, el cual ha probado ser una excelente herramienta para una definición consistente en las correlaciones estratigráficas, predicción de extensiones de facies sedimentarias, y definición de etapas geodinámicas que afectaron la cuenca (Mange et al., 2003; von Eynatten & Dunkl, 2012). Los beneficios de esta técnica pueden ser amplios si se les integra con técnicas de exploración geológica tales como análisis de facies sedimentarias o cartografiado geológico (cf. Alván et al., 2015), el cual es el primer objetivo de este trabajo de tesis.

En el sur de Perú, precisamente en el departamento de Tacna (18° S), afloran rocas sedimentarias de edad Cenozoico, las cuales evidencian un complejo sistema fluvial que se instaló entre la Cordillera Occidental y la Depresión Central (o Antearco) desde el Oligoceno (Acosta et al., 2004; Flores et al., 2004). Este antiguo sistema fluvial se le conoce como Grupo Moquegua (Marocco et al., 1985) e involucra un recorrido inferido de 80 km o más, si tomamos a la Cordillera Occidental y la línea de costa actual como sus límites. Estos depósitos sedimentarios reflejan distintas etapas de actividad volcánica coetánea con sedimentación activa (Marocco & Noblet, 1990) junto con episodios de levantamiento, deformación y exhumación de distintos tipos de rocas (Wotzlav et al., 2011; Decou et al., 2013). Toman en consideración que las variaciones en las facies sedimentarias son respuestas de procesos tectónicos (cf. Miall, 1985), y que su definición es crucial para la exploración por recursos hídricos, es necesario tomar en consideración una reevaluación en los códigos de Miall (1985) en las rocas del Grupo Moquegua de Tacna, y evaluar el significado de la composición mineral de sus estratos.

Se conoce que las rocas que afloran (y no afloran) en el departamento de Tacna han sido consecuencias de múltiples procesos geológicos, tales como efectos de las variaciones en

el ángulo de subducción (Oncken et al., 2006), y el efecto de la transición oeste-este del Arco volcánico Toquepala (~91-45 Ma) hasta el Arco volcánico Andahuaylas-Anta (~45-30 Ma) (Mamani et al., 2010), de los cuales se piensa que influyeron en la creación y relleno sedimentario del Antearco, resultando en el Grupo Moquegua y la Formación Millo. Dado que la evolución geodinámica del Antearco fue considerablemente activa y variable (Alván, 2015), es indispensable integrar análisis de facies sedimentarias (incluyendo asociaciones de facies) y los análisis de minerales pesados con énfasis en la definición de la proveniencia sedimentaria del Grupo Moquegua en Tacna.

La definición de la proveniencia de las rocas del Grupo Moquegua, la secuencia sedimentaria de la Formación Huaylillas y la Formación Millo en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (37v) permitirá conocer las principales rocas pre-Cenozoico que sirvieron para generar sedimentos a la Cuenca Moquegua en Tacna, además ayudarán a definir su evolución tectono-sedimentaria y los posibles pulsos que experimentó la Cordillera Occidental, además ayudarán a entender la orogenia de los Andes Centrales en la zona de Tacna. Para la presente investigación primero se elaboró columnas estratigráficas en los mejores afloramientos de rocas sedimentarias y se ha obtenido muestras de roca para el análisis de minerales pesados. Una vez estudiados los espectros de minerales pesados de la Formación Moquegua Superior, Formación Huaylillas y Formación Millo, se tienen como siguientes objetivos determinar su proveniencia sedimentaria, para posteriormente ser integrados/comparados con resultados de los análisis Cuarzo-Feldespatos-Líticos (QFL) en areniscas (sección delgada) y con un esquema sedimentario consistentemente definido en base a análisis de facies sedimentarias.

Este trabajo de tesis se ha realizado en el Proyecto de investigación geológica GR41A de la Dirección de Geología Regional del INGEMMET, y bajo el Convenio N° 216-2015 entre el FONDECYT (Perú) e INGEMMET (“Registro de variaciones climáticas en los sedimentos durante el Mesozoico y Cenozoico en el suroeste de Perú (Sur de 17°S), y sus implicancias en el levantamiento de los Andes Centrales”).

La estructura de la presente tesis contiene cinco capítulos:

Capítulo II, contiene el marco teórico, que presenta a manera del estado del arte (antecedentes) y bases teóricas (marco referencial) en los que se fundamenta la presente investigación.

Capítulo III contiene los materiales y métodos, que señala la ubicación geográfica del área de investigación, geomorfología, hidrología, marco geológico, así como el procedimiento a

seguir en el tratamiento de minerales pesados y se describe el manejo de los datos generados.

Capítulo IV contiene el Análisis y discusión de resultados, en este capítulo se presenta (i) el análisis de facies sedimentarias a partir de las columnas estratigráficas levantadas en campo, y presentación de las geometrías depositacionales más representativas, también se muestra (ii) el resultado del conteo de minerales pesados y del conteo de minerales ligeros (QFL) según Dickinson (1970), y finalmente, (iii) se presenta una integración de los dos puntos anteriormente mostrados, y se provee una discusión, analizando las posibles soluciones al problema, contrastándolo con la hipótesis.

Capítulo V contiene las Conclusiones y recomendaciones., que a partir de los resultados que se presentan en los capítulos anteriores se realizan una interpretación (representado por modelos depositacionales), conclusiones sobre la integración de los resultados y de discusiones. Finalmente, se provee en este capítulo las principales conclusiones del trabajo de tesis, así como las recomendaciones necesarias.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES TEÓRICOS

Numerosos autores han estudiado la geología de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v), en el departamento de Tacna, de los cuales a continuación se resalta brevemente en orden cronológico sus principales resultados.

✓ Wilson & García (1962) presentaron un primer cartografiado geológico de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x), como parte del proyecto de levantamiento sistemático del Mapa Geológico del Perú a la escala 1:100,000 por parte de la Comisión de la Carta Geológica Nacional, nombrando unidades lito-estratigráfica de acuerdo a sus facies locales cartografiables y definiendo por primera vez a las fallas que componen el Sistema de Fallas Incapuquio (~NO-SE).

✓ Jaén & Ortiz (1963), simultáneamente, realizaron el levantamiento geológico de los cuadrángulos contiguos de La Yarada (37u), Tacna (37v) y Huaylillas (37x), describiendo por primera vez en el área a las unidades lito-estratigráficas Chocolate, Guaneros, Moquegua y Huaylillas, mencionando además que los rasgos estructurales tienen un rumbo general NO-SE.

✓ Salinas (1987) presentó su tesis titulada “Evolución paleo-geográfica del Sur del Perú a la luz de los métodos de análisis sedimentológico de las series del Dpto. de Tacna”, realizando estudios petrográficos, paleontológicos y sedimentológicos que revelan el proceso de sedimentación en la Cuenca Mesozoica Sur Peruana, interpretando que en el Pérmico se dieron fases distensivas y se inició un rifting, posteriormente el inicio del Ciclo Andino (Eoceno) y la subducción de placas marcan un segundo periodo desde el Cretáceo superior hasta la época actual con alternancia de plegamientos, magmatismo y sedimentación continental, tal como la Formación Moquegua Superior.

✓ Monge & Cervantes (2000) realizaron en Pachía (36v) y Palca (36x) actualizaciones en la cartografía geológica y en la nomenclatura estratigráfica de Tacna, posterior a Wilson & García (1962), a través de una memoria explicativa el cual considera que el estratotipo de las rocas jurásicas que afloran en Tacna deben tener la nomenclatura

de las que afloran en Yura, Arequipa, es decir, propusieron tomar la denominación estratigráfica de Jenks (1948) y Benavides (1962).

✓ Sánchez et al. (2000) realizaron una memoria explicativa de la revisión geológica de cuadrángulos que componen la Franja 1 (sur de Perú), entre ellos Tacna (37v). Allí, describieron a las unidades estratigráficas “Formación Moquegua Superior” (del cual toma en consideración la nomenclatura propuesta por Marocco et al., 1985 y es utilizada en esta tesis) y “Formación Huaylillas” (ex. “Superficie Huaylillas” de Wilson & García, 1962). Este último fue diferenciada en dos partes, denominando a los conglomerados discordantes como Fm. Huaylillas y la superior sería separada de la Fm. Huaylillas y fue denominada como Formación Millo.

✓ Pino (2003) y Pino et al. (2004) presentaron reinterpretaciones en escala local y regional, señalando evidencias de la generación de una cuenca marginal tipo rift en el intervalo Paleozoico Superior a Cretáceo. Por otro lado, mostraron plantas fósiles halladas en lutitas verdosas que considera pertenecen a la serie sedimentaria equivalente al Grupo Ambo, el cual antes era considerada miembro superior de la Formación Machani de Wilson & García (1962).

✓ Flores et al. (2004) realizaron una síntesis de la estratigrafía del Cenozoico en el extremo sur del Perú, la cual incluye la adición de nuevas unidades estratigráficas que aparecen en el cartografiado localmente (<5 km de extensión), tales como como la Fm. Peña Chica, Fm. Magollo, Fm. Calientes y Fm. Pachía. Según Acosta et al. (2011) estas unidades serían los equivalentes estratigráficos y cronológicos de la Fm. Huaylillas y la Fm. Millo.

✓ Acosta et al. (2011, 2012) realizaron las últimas actualizaciones geológicas y lo presentaron en boletines de INGEMMET, el cual comprende estudios estratigráficos, sedimentológicos, geoquímicos y paleontológicos, y detallaron además que las rocas cenozoicas en Pachía y Palca yacen en dos cuencas sedimentarias intra-montañas, i.e. cuencas Moquegua y Maure, las cuales están divididas por la Cordillera Occidental. Consideran además a la unidad lito-estratigráfica “Conglomerados Calientes” de Flores & Sempere (2002) y la unidad Moquegua “D” (MoqD) de Sempere et al. (2004) estarían incluidos en lo que consideramos como Formación Millo.

Posterior a estos estudios, se ha realizado una gran variedad de análisis con métodos analíticos en rocas cenozoicas que afloran cerca al área de estudios de esta tesis, los cuales tratan en proveniencia sedimentaria y geodinámica de cuencas sedimentarias, y dieron

mayores luces al conocimiento del levantamiento de los Andes Centrales. Trabajos tales como:

✓ Decou et al. (2013) realizaron una investigación en sedimentos siliciclásticos continentales del Cenozoico (Grupo Moquegua) en el sur de Perú (15°-18°S), precisamente a lo largo del valle de Majes (Arequipa), aplicando petrografía de minerales pesados, geoquímica de granos individuales (anfíboles) y termo-cronología (trazas de fisión en zircones detríticos). Estos autores desarrollaron modelos de proveniencia sedimentaria, y definición de cambios en los sistemas erosión-sedimentación en la Cuenca Moquegua de Majes (Arequipa), logrando definir etapas de fuerte levantamiento en el Mioceno superior, siendo ésta vinculada con la evolución cenozoica del Orógeno Andino.

✓ Wotzlaw et al. (2011) estudiaron las rocas sedimentarias del Oligoceno en la Depresión Central (Antearco interno) en el norte de Chile y oeste del Altiplano de Bolivia mediante análisis de minerales pesados y geo-cronología U-Pb en zircones detríticos con fines de definir su proveniencia y pulsos de levantamiento. Sus resultados permitieron conocer la litología de la fuente y definieron la evolución tectónica y magmática del área, deduciendo etapas de fuerte levantamiento de bordes de cuenca en el Oligoceno y Mioceno superior.

✓ Alván et al. (2015) realizaron por primera vez el análisis de proveniencia de sedimentos de la Formación Camaná (Cenozoico) encuadrando un nuevo marco estratigráfico y determinando equivalencias crono-estratigráficas entre la Formación Camaná y el Grupo Moquegua a lo largo del valle de Majes-Camaná. Evidenciaron etapas de levantamientos drásticos ocurridos en la Cordillera Occidental y de la Cordillera de la Costa durante el Mioceno inferior y en el Mioceno superior, por medio del análisis de minerales pesados, geo-cronología U-Pb en zircones detríticos e interpretaciones sísmicas en offshore.

BASES TEÓRICAS

2.2.1 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), 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, Raman, etc. (Pettijohn et al., 1987; Morton, 1991).

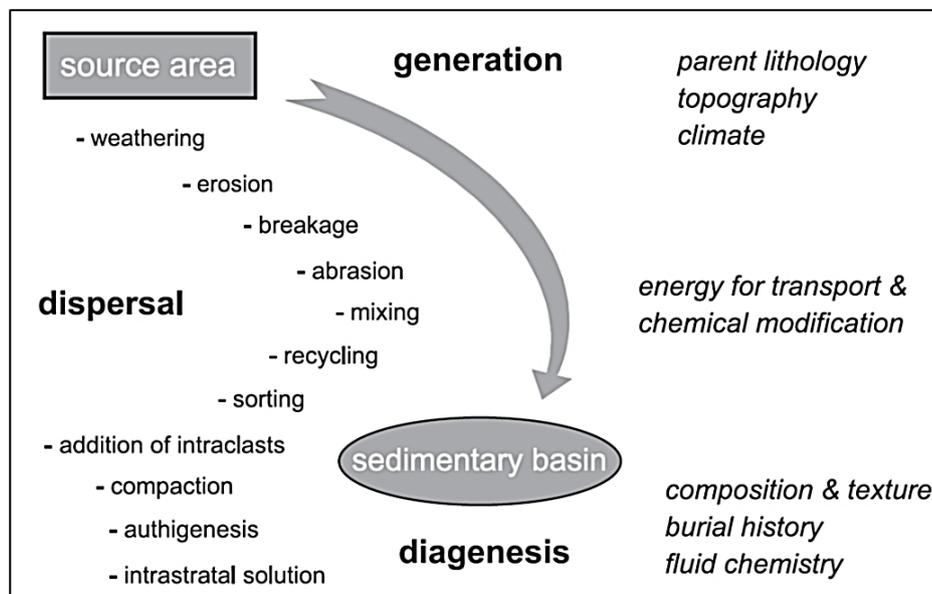


Figura 2. 1. Principales pasos de la evolución sedimentaria (negrita) y procesos principales que modifican la composición de los sedimentos clásticos desde el área fuente a la cuenca sedimentaria. Factores que controlan (itálica) son mostrados a la derecha (Weltje & von Eynatten, 2004).

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 la Formación Moquegua en Tacna.

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 desencadena 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, 2011).

Entender los procesos autigénicos que influyen en la composición de petrofacies ayuda a reconstruir la evolución sedimentaria en una determinada área. Éstos 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 (Figura 2.3). 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 ingles Heavy Mineral Analysis) mostrado en la Tabla 2.1 y 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 2. 1. Ratios de sensibilidad-proveniencia de minerales pesados (Morton, 1994).

Índice	Definición
ATi	Índice apatito–turmalina 100 x conteo apatito/(total de apatito más turmalina)
GZi	Índice granate-zircón 100 x conteo granate/(total de granate más zircón)
RZi	Índice grupo TiO ₂ -zircón 100 x conteo grupo TiO ₂ /(total grupo TiO más zircón)
RuZi	Índice rutilo–zircón 100 x conteo rutilo/(total de rutilo más zircón)
MZi	Índice monazita–zircón 100 x conteo monazita/(total monazita más zircón)
CZi	Índice cromo espinela-zircón 100 x conteo cromo espinela/(total cromo espinela + zircón)

2.2.2 MINERALES PESADOS Y ANÁLISIS (HMA, Heavy Mineral Analysis)

Los minerales pesados son minerales accesorios de mayor densidad que el cuarzo, y constituyen una menor proporción en los sedimentos siliciclásticos y también en rocas ígneas y metamórficas. Su abundancia total rara vez representa más de 1% de la muestra, a menos que se trate de placeres naturales (<10%). Para estudiarlos (análisis), normalmente se realiza a través de la desagregación de la roca y separación de minerales, usando líquidos con densidades de 2,89 g/cm³ (bromoforno) o 2,96 g/cm³ (tetrabromoetano). Los minerales de mayores densidades precipitan en estos líquidos, de ahí el nombre “minerales pesados” (Mange & Maurer, 1992). En esta tesis se utiliza el politungstato de sodio (“líquido pesado”), el cual se accede a este a manera de polvo blanco, y su densidad es graduable (añadiendo o evaporando agua des-ionizada). Siendo muy adecuado para variar su densidad, este líquido es reciclable para posteriores separaciones de minerales.

Los minerales pesados constan de diversas especies minerales (Fig. 2.2), 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).
- ✓ Esquematación, 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.

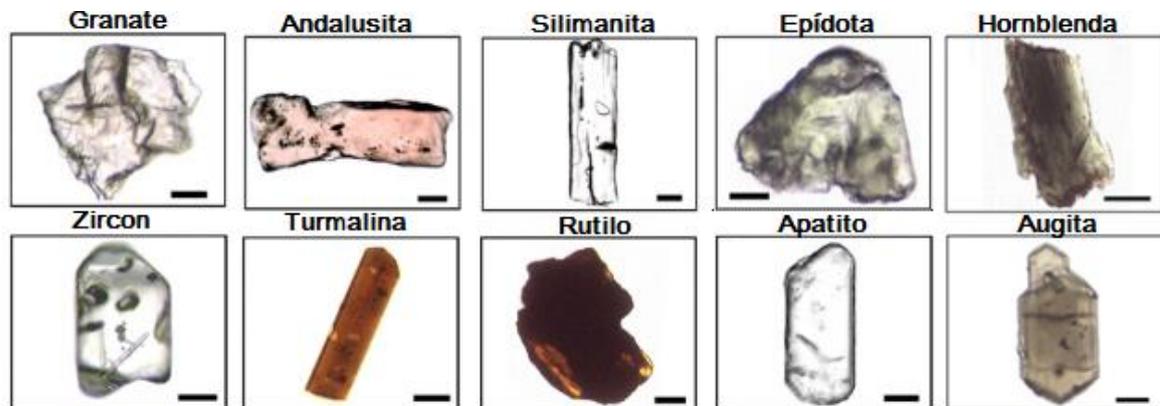


Figura 2. 2. Espectros de minerales pesados. (Modificado de Ando et al., 2010).

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 2.3) 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: (i) selección física (physical sorting), (ii) abrasión mecánica y (iii) 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 sub-aérea 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 (por ejemplo, ortopiroxeno, 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 el ratio de apatito-turmalina es significativamente reducido y la abundancia del granate y clinopiroxeno tiende a declinar con el incremento de la depositación aluvial.

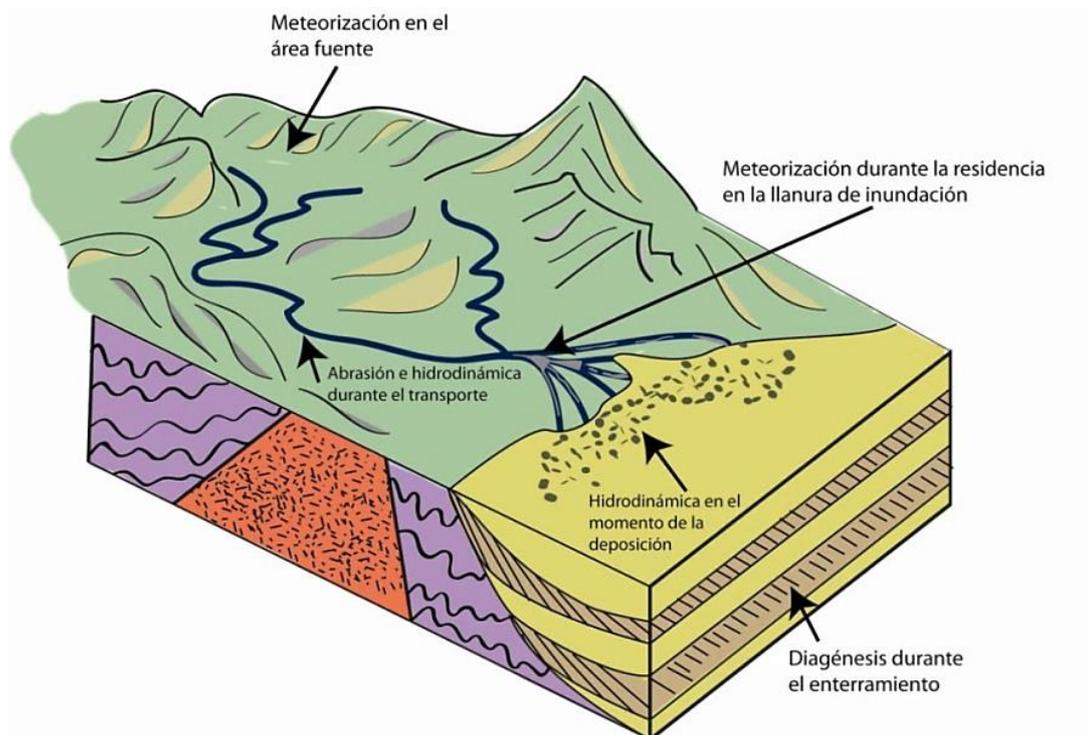


Figura 2. 3. Diagrama esquemático mostrando procesos que controlan ensambles de minerales pesados en areniscas (modificado de Morton & Hallsworth, 1994).

Procesos hidráulicos, ya que los minerales pesados son más densos que los granos de cuarzo y feldspatos, 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 diagenético.

Tabla 2. 2. Comparación de orden de persistencia de minerales pesados, se observa los patrones de estabilidad en meteorización ácida y condiciones de enterramiento. (Morton & Hallsworth, 1999; adaptado de Pettijohn, 1941).

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

ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS MINERALES PESADOS

La estabilidad de especies particulares de minerales pesados puede ser determinada por el pH del ambiente geoquímico, Eh, composición iónica y el comportamiento de los minerales pesados es diferente en ambientes ácidos y alcalinos (Mange & Maurer, 1992), en la Tabla 2.3 se muestra los principales minerales pesados estables presentes en el área de investigación.

Tabla 2. 3. Características generales de principales minerales pesados (modificado de Mange & Maurer, 1992).

MINERAL	COMPOSICIÓN	ρ (g/cm³)	ESTABILIDAD D	ROCAS ASOCIADAS MÁS COMUNES
Zircon	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	ultraestable	Esquistos, gneis, anfibolitas, plutónicas ricas en hornblenda, pegmatitas.

MINERAL	COMPOSICIÓN	ρ (g/cm ³)	ESTABILIDA D	ROCAS ASOCIADAS MÁS COMUNES
Turmalina	Na(Mg, Fe, Mn, Li, 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.
Silimanita	Al ₂ SiO ₅	3.23- 3.27	moderadamente estable	Rocas metamórficas de alto grado, gneises.
Titanita (esfena)	CaTi[SiO ₄](O, OH, F)	3.45- 3.55	moderadamente estable	Pegmatitas, esquistos, gneis-granito, anfibolitas, rocas calcosilicatadas.
Epídota	Ca ₂ Fe ³⁺ .Al ₂ O.OH(Si ₂ O ₇)(SiO ₄)	3.38- 3.49	moderadamente estable	Esquistos verdes, hornfels, granito.

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 ortocuarcitas y en arcosas y grawacas es aproximadamente 2-39% (Hubert, 1962).

2.2.3 PETROGRAFÍA SEDIMENTARIA

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 al 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 R, fragmentos de roca) y en algunos el contenido en matriz (fracción inferior a 30 μ m). Para usar este diagrama (Figura 2.4), es necesario contar en la sección delgada al microscopio entre 200 y 500 granos de minerales

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%.

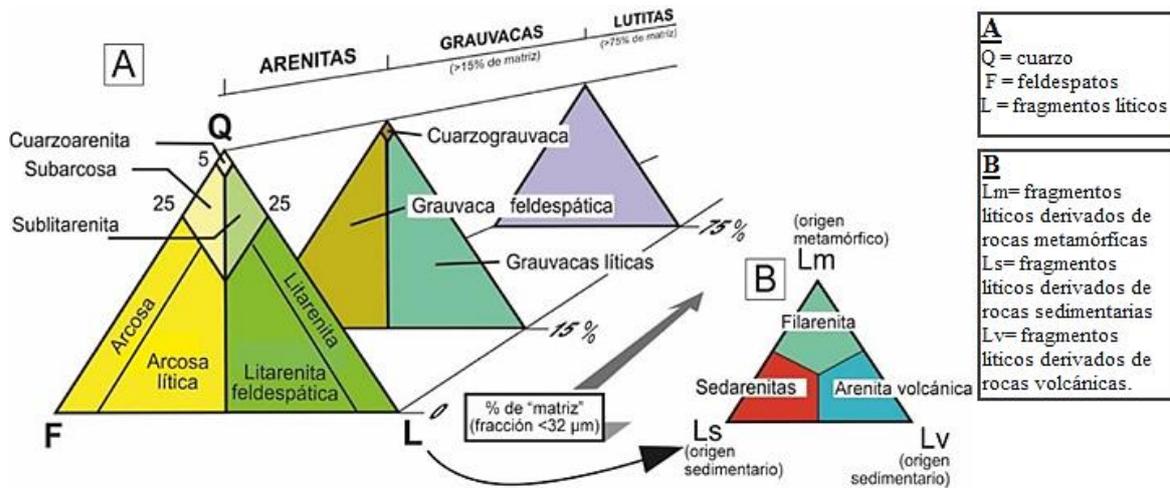


Figura 2. 4. Clasificación de areniscas y grauvacas de acuerdo a su composición. Adaptada de Dott (1964), Dickinson (1970) y Pettijohn et al. (1987).

MÉTODO DE CONTEO DE GRANOS GAZZI- DICKINSON

Se contempla también el análisis de areniscas mediante un corte de roca a manera de sección delgada y se observa al microscopio usando el método de Gazzi-Dickinson (G-D) o moderno que fue desarrollado por el primer autor en 1966 y refinado por Dickinson (1970), argumentando que la identificación y registro de cristales minerales de tamaño de la arena reduce la dependencia composicional del tamaño de granos para determinar la procedencia sedimentaria.

El método Gazzi-Dickinson permite la determinación del modo original del detrito y su procedencia verificando el tamaño cristalino del componente del grano arenoso, si el tamaño es superior a $62 \mu\text{m}$ se considera como el mineral que representa, independientemente de la presencia en la misma sección del grano de otros minerales. Si su tamaño es inferior al límite arenoso ($< 62 \mu\text{m}$) y aparece en asociación con otros componentes de dimensiones equivalentes en la sección del clasto, se considera como un fragmento de roca lítica (abrev. L). Este método no considera los fragmentos de roca faneríticos, sino sus constituyentes minerales por separado (Arribas, 2010), los parámetros de muestran en la tabla 2.4.

La matriz y el cemento no son contados, los granos menores que 0.03mm (matriz) remanente en fracciones tamizadas debido al insuficiente tamizado son ignorados para el conteo, pocos granos gruesos (entre 0.03 y 0.0625mm) son contados en algunas secciones (Ingersoll et al., 1984), en la presente tesis se considera el conteo Gazzi-Dickinson para

algunas láminas delgadas como complementario al método de análisis de minerales pesados.

Tabla 2. 4. Parámetros de granos (Ingersoll et al., 1984; antes Dickinson, 1970; Graham et al., 1976; Ingersoll & Suczek, 1979)

Parámetros contados	Parámetros calculados
Qp = cuarzo policristalino (inc. Chert)	$Q = Q_m + Q_p$
Qm = cuarzo monocristalino	$F = P + K$
P = Plagioclasa	$L = L_v + L_m + L_s + L_p$
K = Feldespato potásico	$L_{vm} = L_v + xL_m$ (donde x oscila entre 0 y 1 [operativamente, por lo general 0])
Lv = líticos volcánicos-hipabisales	$L_{sm} = L_s + (1-x)L_m$ (operativamente, Lsm por lo general equivale a Ls + Lm)
Lm = líticos metamórficos	Framework = Q + F + L + M + D + Misc.
Ls = líticos sedimentarios	$QFL \% Q = 100Q / (Q + F + L)$
Lp = líticos plutónicos (solo método tradicional)	$QFL \% F = 100F / (Q + F + L)$
M = filosilicatos	$QFL \% L = 100L / (Q + F + L)$
D = minerales densos	Framework %M = 100M/Framework
Misc. = diversos y no identificados	Framework %D = 100D/Framework
(x = fracción de metavolcánicos en Lm [señalado por separado])	$L_m L_v L_s \% L_m = 100L_m / (L - L_p)$
	$L_m L_v L_s \% L_v = 100L_v / (L - L_p)$
	$L_m L_v L_s \% L_s = 100L_s / (L - L_p)$
	$Q_p L_{vm} L_{sm} \% Q_p = 100Q_p / (L - L_p + Q_p)$
	$Q_p L_{vm} L_{sm} \% L_{vm} = 100L_{vm} / (L - L_p + Q_p)$
	$Q_p L_{vm} L_{sm} \% L_{sm} = 100L_{sm} / (L - L_p + Q_p)$

PROVENIENCIA SEDIMENTARIA ASOCIADO A UN RÉGIMEN TECTÓNICO

Para Dickinson et al. (1983), las proporciones relativas de diferentes tipos de granos en areniscas nos podría indicar la naturaleza de su roca fuente, así estos autores clasifican las rocas detríticas dentro de ambientes geotectónicos, generados en función de sus petrofacies.

Después de usar el método de conteo Gazzi-Dickinson, el porcentaje de grano se plotea en los diagramas ternarios habiendo sido adaptados al 100%, distinguiendo cuatro tipos principales de procedencia mostrados en la tabla 2.6 que se denominan como: *a*) cratones estables, *b*) basamentos elevados, *c*) arcos magmáticos y *d*) orógenos reciclados. En el diagrama QFL (Figura 2.5), los polos son (1) granos cuarzosos (Q), incluyendo fragmentos líticos policristalinos como el chert y cuarcita; (2) granos de feldespatos monocristalinos (F), y (3) fragmentos líticos policristalinos inestables (L) de rocas ígneos o sedimentarios, incluyendo variedades de metamórficos. Y para el diagrama QmFLt, los polos son (1) granos de cuarzo monocristalino (Qm); (2) granos de feldespatos (F) y (3) fragmentos líticos policristalinos (Lt), incluyendo variedades cuarzosas; Los símbolos geométricos

(llenado, abiertos y a medio llenar triángulos, círculos y cuadrados) en varios campos composicionales indican tipos de procedencia inferidos en diagramas QFL/QmFLt ploteados (mapas paleotectónicos), las marcas enumeradas en la vuelta del triángulo indican líneas de división empíricas de procedencia medidas en unidades porcentuales desde el polo apical más cercano. (Dickinson et al. 1983).

- **Cratones estables.** Las principales fuentes para areniscas cuarzosas derivadas de cratón son exposiciones graníticas y gnéissicas de baja altura, suplementados por reciclaje de sedimentos de plataforma asociados a superficies planas. Las areniscas ya sea acumuladas como depósitos de plataforma en el interior del continente o transportadas a márgenes continentales y flancos de cratones de cuencas antepaís. Un ratio alto de Qm/Qp en areniscas maduras cuarzosas indica que los cuarzos monocristalinos tiene un mayor potencial para sobrevivir en el ciclo sedimentario que los fragmentos líticos policristalinos (Dickinson et al., 1985).

- **Basamentos elevados.** Basamentos levantados limitados por fallas a lo largo de rift incipientes y rupturas transformantes dentro de bloques continentales produce areniscas arcósicas principalmente en pliegues lineales adyacentes o cuencas locales pull-apart. Detritos similares pueden ser derivados de basamentos levantados dentro de provincias antepaís rotas y de plutones erosionados en cortes de arcos magmáticos profundos (Dickinson et al., 1985).

Tabla 2. 5. Principales tipos de procedencia y características composicionales de las arenas asociadas. (Dickinson et al., 1985).

TIPO DE PROCEDENCIA	DE AMBIENTE GEOTECTÓNICO ASOCIADO	COMPOSICIÓN DE LAS ARENAS GENERADAS
Cratones estables	Interior continental o plataformas pasivas	Arenas cuarzosas (ricas en Qt) con altos valores de Qm/Qp y K/P.
Basamentos elevados	Hombreira de rift o falla transformante	Arenas cuarzo-feldespáticas (Qm – F) con bajo contenido en Lt y relaciones Qm/F y K/P similares a la roca original.
Arcos Mágmaticos	Arco isla o arco continental	Arenas feldespatolíticas (F – L), volcanoclásticas con altos valores de P/K y Lv/Ls. Composiciones intermedias con arenas cuarzo-feldespáticas (Qm – F) procedentes de batolitos.
Orógenos reciclados	Complejo de subducción o cadena montañosa (<i>fold & thrust belt</i>)	Arenas cuarzo-líticas (Qt – Lt), con bajo contenido en F y Lv y relaciones variables de Qm/Qp y Qp/Ls.

- **Arcos magmáticos.** Las características de las areniscas derivadas de arcos magmáticos activos construidos paralelos a zonas de subducción son materiales volcanoclásticos de erupción y erosionados de cadenas de estratovolcanes y asociados a mesetas de ignimbritas. La disección en profundidad de conjuntos de arco pueden exponer sus raíces batolíticas y puede dar lugar areniscas cuarzo-feldespáticas indistinguibles de los escombros arcósicos producidos por otros levantamientos del basamento. Escombros derivados de arcos son típicamente depositados en cuencas ante-arco o intra-arco, localmente también en cuencas antepaís (Dickinson et al., 1985).

- **Orógenos reciclados.** Este tipo de sedimentación ocurre durante ajustes tectónicos típicos de rocas estratificadas deformadas, levantadas y erosionadas, tales como en (a) Complejos de subducción, donde los depósitos de taludes oceánicos y fosas son expuestos como divisiones de cabalgamientos, isoclinales recumbentes y fajas juntadas a lo largo de dorsales tectónicas entre cuencas antearco y fosas; (b) Cinturones corridos trasarco, donde estratos sedimentarios y metasedimentarios de derivación continental, plegados, superponen los flancos de cuencas antepaís retroarco; y (c) Cinturones de sutura, donde secuencias estructurales yuxtapuestas de ambos tipos oceánico y continental pueden proveer fuentes de sedimentos para sistemas de dispersión transversal que alimentan cuencas de antepaís periféricas adyacentes, y para sistemas de dispersión longitudinal que alimentan las cuencas oceánicas remanentes cercanas.

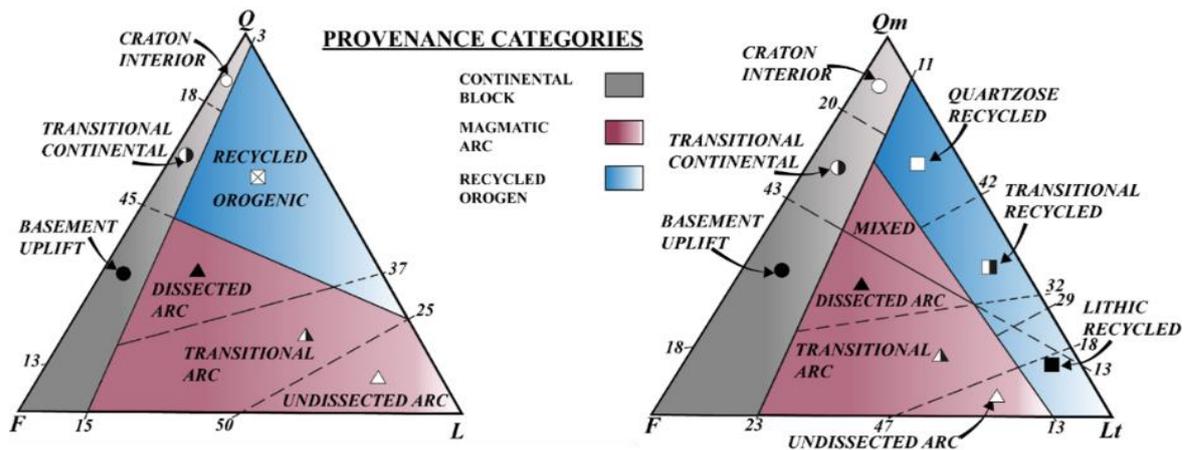


Figura 2. 5. Diagramas QFL y QmFLt para plasmar la cantidad modal de los granos estructurales de areniscas terrígenas, muestran subdivisiones provisionales según el tipo de procedencia inferido. Dickinson et al. (1983), antes Dickinson & Suczek (1979).

Las tierras altas orogénicas también dan nacimiento a los principales sistemas fluviales que pueden transportar sedimentos orogénicos reciclados a través de superficies de bloques continentales adyacentes y en cuencas distantes que tienen una variedad de ajustes

tectónicos. Los sedimentos de orógenos reciclados incluyen proporciones de materiales cuya composición refleja la derivación última de fuentes cratónicas, arcóicas o volcanoclásticas, modificado en parte por procesos de metamorfismo.

2.2.4 FACIES Y AMBIENTES SEDIMENTARIOS

Un ambiente sedimentario se conoce como un espacio geográfico donde se acumulan los sedimentos tal como el diagrama 2.6, producto de la combinación particular de procesos geológicos y condiciones ambientales, la geología con sus ramas afines (estratigrafía, sedimentología, entre otros) reconstruye los ambiente antiguos y las relaciones geográficas de un área en el momento en que las capas sedimentarias depositaron, utilizando para eso el análisis de facies.

La palabra “Facies” es definida en diferentes formas por diversos autores, pero de manera general, se refiere a la suma de las características de una unidad sedimentaria (Middleton, 1973). Estas características incluyen las dimensiones, estructuras sedimentarias, tamaño de grano y tipos, color y contenido biogénico de la roca sedimentaria, para facilitar la interpretación y relación de facies se usa una serie de códigos convencionales propuestos por Miall (1996) los cuales son utilizados en la presente tesis.

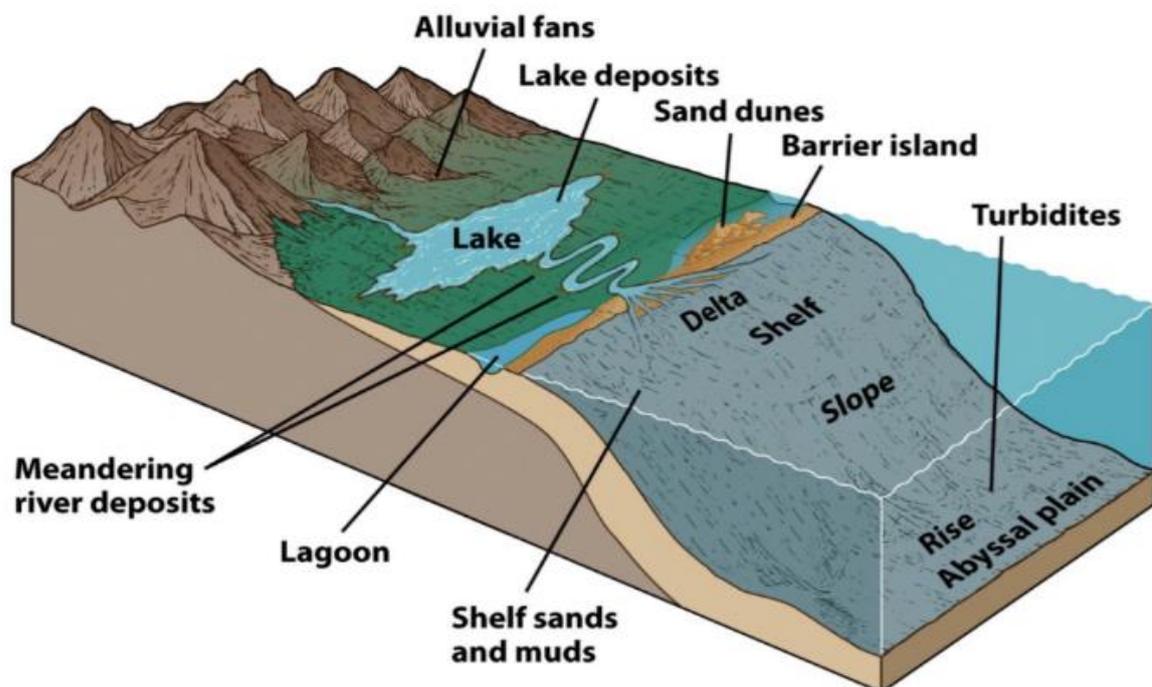


Figura 2. 6. Diagrama de ambientes sedimentarios, muestra ambientes continentales, de transición y marinos. (Fuente: Earth System History, Third Edition). Los ambientes sedimentarios del Grupo Moquegua en Tacna corresponderían a abanicos aluviales, trenzados, y posiblemente lacustres (Marocco et al., 1985).

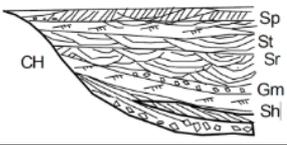
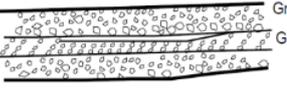
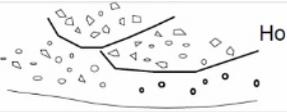
Los códigos de litofacies fueron propuestos inicialmente en facies fluviales, y consisten de dos partes: una letra mayúscula para el tamaño del grano (G, gravas; S, arenas; F, finos) y una letra pequeña que indica una textura o estructura distintiva de cada facies (Gt, gravas con estratificación cruzada; Sh, arenas laminadas; Fsm, finos masivos) como se indica en la tabla 2.6 (Puy, 2006)

Tabla 2. 6. Clasificación de facies fluviales mediante códigos (propuesto por Miall, 1996).

Código de facies	Facies	Estructuras sedimentarias	Interpretación
Gmm	Gravas masivas, matriz soportada	Gradación	Flujo de escombros plásticos
Gmg	Gravas matriz soportada	Gradación normal a inversa	Flujo de escombros pseudo-plásticos
Gci	Gravas clasto soportado	Gradación inversa	Flujos de escombros ricos en clastos
Gcm	Gravas masivas, clasto soportado	Sin estructuras sedimentarias, masivo.	Flujos de escombros pseudoplásticos
Gh	Gravas, clasto soportados	Capas horizontales, imbricación	Formas longitudinales
Gt	Gravas estratificadas	Estratificación de capas cruzadas	Relleno de canales menores
Gp	Gravas estratificadas	Capas cruzadas planas	Formas transversales
St	Arena fina a gruesa	Estratificación cruzada	Dunas de cresta sinuosas y lingoidales (3-D)
Sp	Arena fina a gruesa	Capas cruzadas planas	Formas transversales o lingoidales (dunas 2-D)
Sr	Arena muy fina a gruesa	Ondulitas laminación cruzada	Ondulitas (Regímenes de flujos bajos)
Sh	Arena muy fina a gruesa	Laminación horizontal	Flujos de capas planas (Flujo crítico)
Sl	Arena muy fina a gruesa	Bajo ángulo en capas cruzadas (<15°)	Relleno de canales
Ss	Arena muy fina a gruesa	Depresiones someras	Relleno de canal
Sm	Arena fina a gruesa	Masiva, sin estructuras sedimentarias.	Depósitos de sedimentos de flujos de gravedad
Fl	Arena, limo, lodo	Laminación fina, ondulitas pequeñas	Depósitos de canales abandonados, planicie de inundación
Fsm	Limo, lodo	Masivo	Depósitos de canales abandonados
Fm	Limo, lodo	Masivo, grietas de desecación	Canales abandonados
Fr	Limo, lodo	Masivo, raíces, bioturbación	Depósitos de planicie de inundación
C	Carbón	Plantas	Depósitos de pantano
P	Paleosuelo, carbonato (calcita, siderita)	Rasgos pedogénicos	Suelo con precipitación química

La asociación de facies y los elementos arquitecturales están íntima y genéticamente relacionadas a otro, y están basadas en la observación y descripción puede señalar el ambiente depositacional, además la geometría, escala y composición de facies de un litosoma permite interpretar cambios climáticos y tectónicos a través del tiempo. Miall (1985) sugiere elementos arquitecturales definidos por el tamaño de grano, composición de las capas, secuencias internas y geometría externa que se han formado, por ejemplo, dentro de canales para clasificar depósitos fluviales, entre otros (ver Tabla 2.7).

Tabla 2. 7. Clasificación de elementos arquitecturales para depósitos fluviales. Modificado de Miall (1985, 1996).

Elemento	Símbolo	Principales asociaciones de facies	Geometría y relaciones	Esquema
Canales	CH	Ninguna combinación	Finger, lentes o capas base erosiva cóncava escala y forma altamente variables	
Barras de gravas y bedforms	GB	Gm, Gp, Gt	Lentes, blanket; cuerpos tabulares; comúnmente intercalados con SB	
Bedforms arenosos	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentes, sheet, blanket, wedge, aparecen como canales de relleno, barras menores, crevasse splays.	
Macroforma acreción río abajo	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentes descansando en bases planas o canaladas con superficie de erosión de 3º orden convexa.	
Macroforma acreción lateral	LA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss, menos común Gt, Gp	Wedge, sheet, lóbulos; caracterizado por superficies de 3º orden de acreción lateral	
Sedimentos de flujo de gravedad	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Lóbulos, capas típicamente intercalados con GB	
Capas de arenas laminadas	LS	Sh, Sl, Menor Sp, Sr.	Capas con laminación, blanket	
Sedimentos de planicie de inundación	FF	Fm, Fl	Blankets delgadas a gruesas, comúnmente intercaladas con SB, pueden rellenar canales abandonados	
Canales menores	HO	Fm, Fl	Canales menores con relleno asimétrico	

ANÁLISIS DE FACIES VOLCÁNICAS

El análisis de Facies en sucesiones volcánicas es similar al análisis de Facies sedimentarias, se describe la litología, estructura, tamaño de clastos, selección, composición de cada roca volcánica y el resultado es un conjunto de litofacies volcánicas que tienen carácter de un depósito en base a combinaciones de tales elementos. Es decir, esto no es genético. Por ello, las ignimbritas son descritas con base en un esquema de litofacies no genéticas (Branney y Kokelaar, 2003).

Las litofacies volcánicas son interpretadas en términos de procesos de la zona límite de flujo (Tabla 2.8). Primero se describe la litología la cual incluye para rocas volcanoclásticas: toba (T), lapilli-toba (LT), lapilli (L), brecha (Br) y Aglomerado (Ag) subdividida en litofacies de acuerdo al tipo de estratificación, selección, composición y fábrica, por ejemplo: lapilli-toba masiva (mLT) o lapilli-toba estratificada (sLT).

Tabla 2. 8. Abreviaciones de las litofacies no-genéticas (Branney y Kokelaar, 2003). Por ej. mLT (i) – mLT (nl,ip) es una lapilli-toba masiva con gradación inversa en la parte de arriba y una lapilli-toba masiva con una gradación normal de clastos líticos e inversa gradación con clastos pumicíticos (traducido por Puy,2006).

SIMBOLOGÍA	LITOFACIES
mLT	Lapilli-toba masiva o lapilli-ceniza
mLT (nl,ip)	Lapilli-toba/ceniza masiva con gradación normal de líticos y gradación inversa de pómez
mLTf	Lapilli-toba masiva con una fábrica de grano direccional
sLT	Lapilli-toba/lapilli-ceniza estratificada
dsLT	Lapilli-toba/lapilli-ceniza estratificación difusa
bLT	Capa delgada de lapilli-toba/ceniza (capa de centímetros de espesor)
sT	Toba/ceniza estratificada
//sT	Toba/ceniza estratificación paralela
xsT	Toba/ceniza estratificación cruzada
//bpL	Lapilli pumicítica capa paralela
lenspL	Lentes de lapilli pumicíticos
lenspC	Lentes de pómez gravoso
lenslBr	Lentes de brechas ricas en líticos
fpoorT	Toba/cenizas finas
mLTpip	Lapilli-toba/ceniza masiva con chimeneas finas
mlBr	Brecha lítica masiva
mScAg	Aglomerado de escoria masiva

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

ANTEARCO: (Del inglés “Forearc”) es una región que se forma entre la zona de subducción y cualquier cadena de volcanes asociados en la que el material piroclástico procedente del arco volcánico y los sedimentos erosionados de la masa continental adyacente se acumulan, la clasificación de cuenca fue introducida por Dickinson & Seely (1979).

FACIES: Es la suma total de los aspectos litológicos y paleontológicos de una unidad estratigráfica. (Gressly, 1838).

INTRA-CUENCA: Este término se refiere a las relaciones espaciales en el momento de la sedimentación y es usado para referirse a clastos monominerales y poliminerales que forman el esqueleto de los depósitos arenosos y su presencia informa de las condiciones reinantes en la cuenca de sedimentación, siendo especialmente importante su presencia en depósitos arenosos híbridos generados en cuencas marinas (Arribas, 2010).

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 (Mange & Maurer, 1992).

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).

ORÓGENO: Un orógeno (u 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).

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

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

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 UBICACIÓN POLÍTICA

El área de estudio está ubicada en el sur de Perú, abarcando dos cuadrángulos tales como el de Pachía (36v) y de Tacna (37v), los cuales fueron estudiados por la Carta Geológica Nacional desde la década del 60 por el INGEMMET (ex Servicio de Geología y Minería de Perú). Políticamente, la presente investigación abarca el departamento Tacna, las provincias de Tacna y Tarata, y los distritos de Tacna, Sama Grande, Pocollay, Calana, Pachía y Ciudad Nueva, tales distritos y ubicación se presentan en la Figura 3.1.

3.1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área de investigación se halla al oeste de la Cordillera Occidental, desde su ladera hasta el litoral marino y está limitado al sur por la frontera internacional. Las coordenadas se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Datos de ubicación geográfica de la zona de estudios.

CUADRÁNGULO	COORDENADAS UTM		COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
	ESTE	NORTE	LATITUD	LONGITUD
PACHÍA (36v)	394000	8064000	17.5°S	70°W
	341000	8009000	18° S	70.5°W
TACNA (37v)	341000	8009000	18°S	70°W
	394000	7972000	FRONTERA	70.5°W

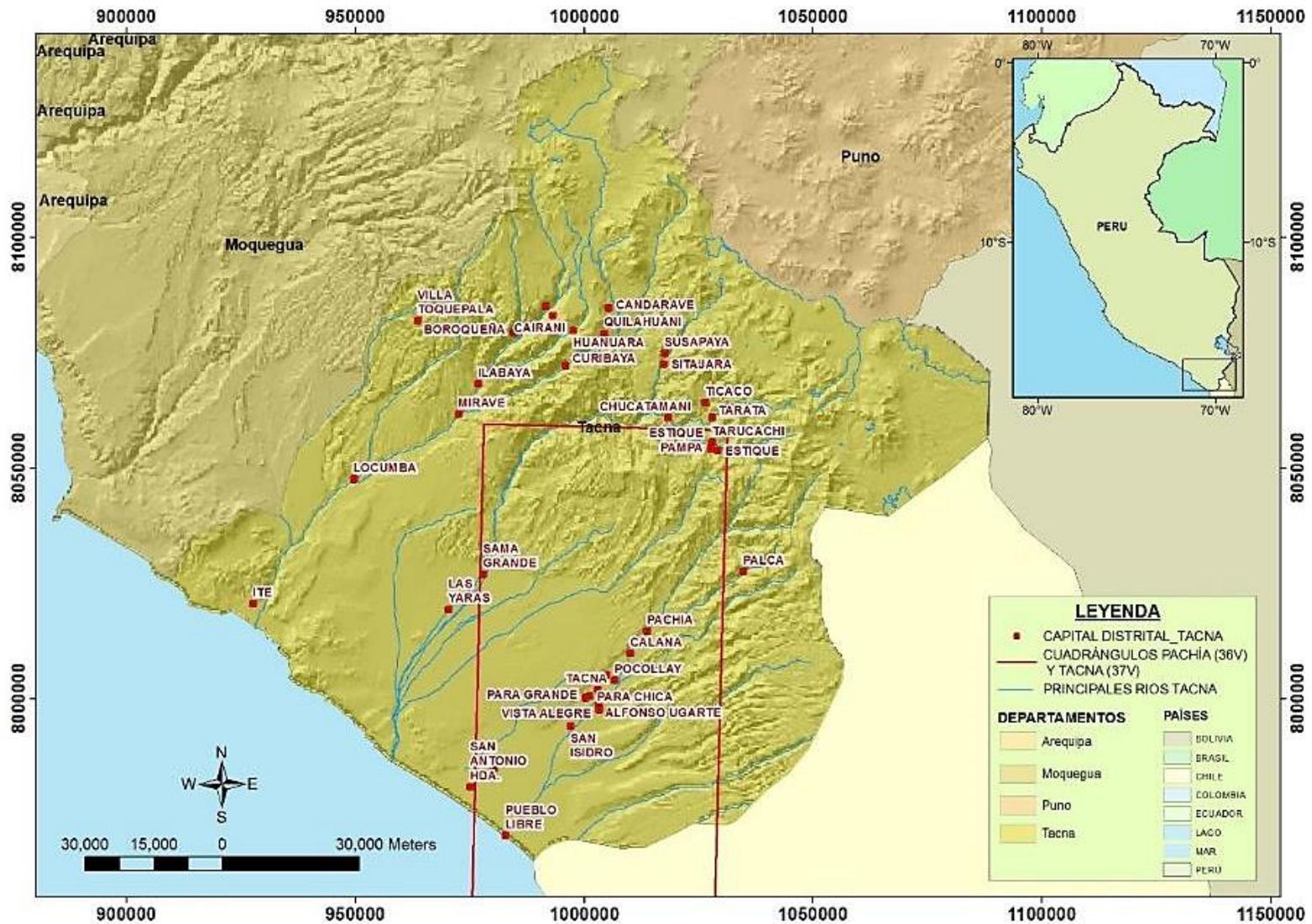


Figura 3. 1. Plano de ubicación del área de investigación (indicada en el cuadrángulo color rojo), sistema WGS-84.

3.1.3 ACCESIBILIDAD

El área del presente estudio es accesible a partir de la ciudad de Tacna, para acceder por vía terrestre: Lima-Tacna con 1 293 km aprox. por la Carretera Panamericana Sur demora 18 horas en auto aproximadamente y por vía aérea se toma vuelos regulares desde Lima a la ciudad de Tacna toma 1 hora 35 minutos aproximadamente; a partir de la ciudad se conecta con otras ciudades y área de estudio con vías asfaltadas y trochas carrozables (señaladas en la Figura 3.2.).

3.1.4 CLIMA

La caracterización climática de la región de Tacna presenta tres zonas climáticas definidas por el SENAMHI (2015) como:

- Clima Semi-Cálido subtropical (Desértico-Árido Sub Tropical), de característica árido, situado desde los 0 hasta los 1000 msnm con temperatura media anual de 20°C. En el litoral costero hay presencia de cielo nuboso y escasa precipitación.
- Clima Templado Sub-Humedad (De Estepa y Valles Interandinos Bajos), típico de la región sierra, situado entre los 1000 y 3000 msnm con temperaturas promedio por debajo de 18°C y la precipitación anual se encuentra por debajo de los 500 mm.
- Clima Lluvioso Semi-Frígido (De Tundra), típico de la región sierra, se extiende entre los 3000 y mayor a 4000 msnm. Se caracteriza por sus precipitaciones anuales promedio de 700 mm y Temperaturas medias anuales de 10°C.

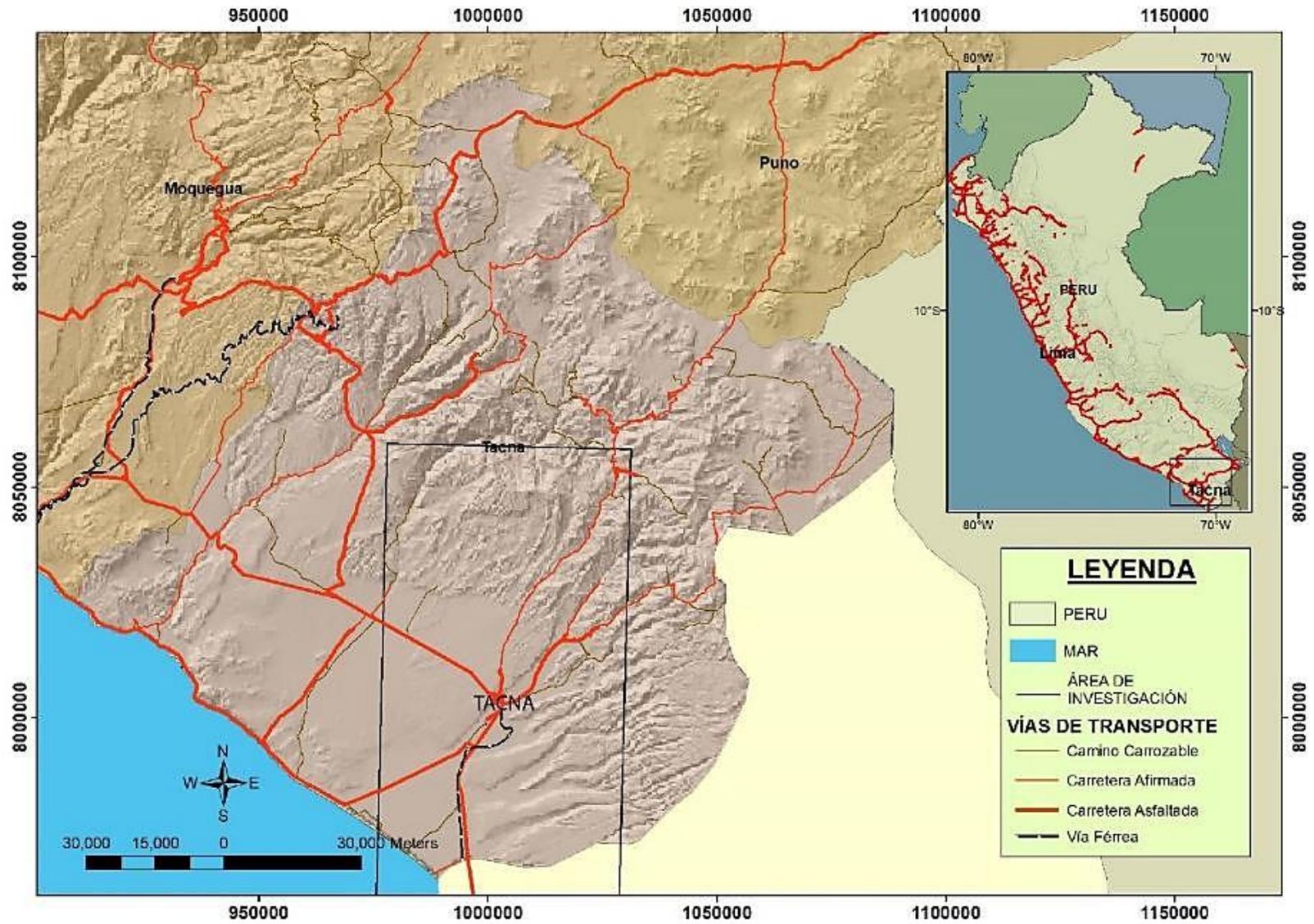


Figura 3. 2. Mapa de las principales vías de acceso en el departamento de Tacna.

3.1.5 GEOMORFOLOGÍA

Las geoformas identificadas en el área de estudio son unidades geomorfológicas regionales, siendo éstas según Bellido (1979): litoral, llanura costanera y Cordillera Occidental. Además existen unidades geomorfológicas formadas por la erosión de los principales ríos, tales como valles, terrazas y la superficie Huaylillas denominada así por Wilson y García (1962), todas estas unidades tienen una orientación principal NO-SE y se representan en la figura 3.7.

Litoral. El litoral se ha denominado al relieve llano que se extiende desde la orilla del mar hasta los ~50 msnm. Presenta un ancho de 3 km en las pampas de La Yarada, disminuyendo hacia el noroeste, donde se desarrolla la cadena de montañas de la Cordillera de la Costa (Acosta et al., 2012).

Llanura Costanera. Esta unidad tiene una dirección general NO-SE, con un ancho promedio de 65 km y altitudes entre 50 msnm y 2500 msnm, limitando al sur-oeste con el litoral y al nor-este con la superficie Huaylillas, su relieve presenta llanuras y Cerros que han sido modelados por ríos y quebradas, formando valles y terrazas, sin embargo con fines de detalle se ha considerado como unidad entre 700 y 2500 msnm la Superficie Huaylillas que abarcaría también la ladera oeste de la Cordillera Occidental.



Figura 3. 3. Vista de la Llanura costanera de Tacna desde el Cerro Chuschuco (Pachia, 36v). Foto horizontalizada.

Cordillera Occidental. Esta unidad geomorfológica consiste en una cadena de montañas divididas por ríos y valles en forma de “V”, presentando un relieve muy accidentado de orientación preferencial NO-SE, además limita al suroeste con la superficie Huaylillas y hacia el noreste con el Altiplano (dominio fuera del área de estudio).

Valles y terrazas. Existen múltiples quebradas y dos principales ríos en la zona, río Sama y Río Caplina, de orientación referente NE-SW, que nacen en la Cordillera Occidental y a lo largo de su recorrido crean valles en forma de “v” y terrazas, principalmente en la llanura costanera, formados en su mayoría por depósitos de origen fluvial.

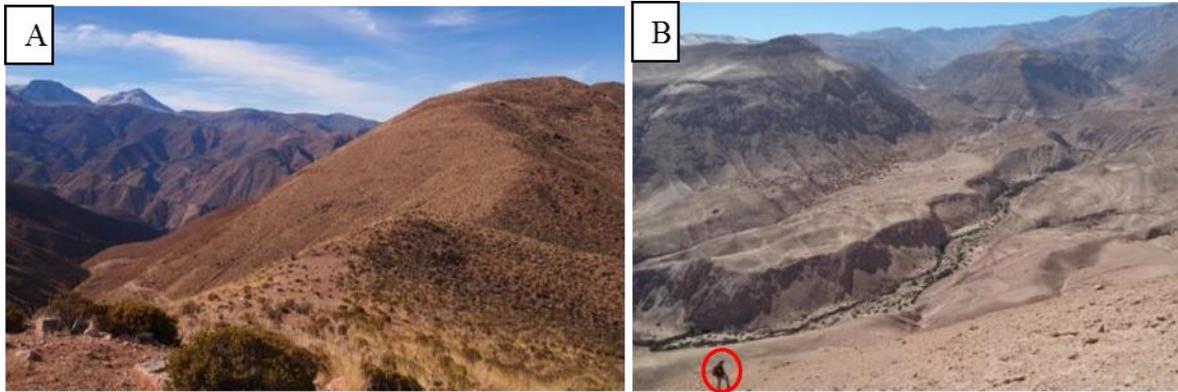


Figura 3. 4. En A) Cadena de montañas correspondientes a la Cordillera Occidental, vista al este de Cerro Talane (Pachía, 36v), y en B) Valles y terrazas en Tacna, vista al noroeste del Cerro Solitario (Tacna, 37v).

Superficie Huaylillas. Topografía asociada a la Formación Huaylillas. Consiste en acumulación sucesiva de tobas compactas y no compactas, distribuida ampliamente con un relieve suave de pendientes promedio 10% y orientados hacia el O y SO, mostrada en la Figura 3.5. A través de estas superficies se ha desarrollado variados drenajes que crearon grandes valles (Wilson & García, 1962).



Figura 3. 5. Vista de la superficie Huaylillas al sureste de Tacna, Quebrada Viñani (Tacna, 37v).

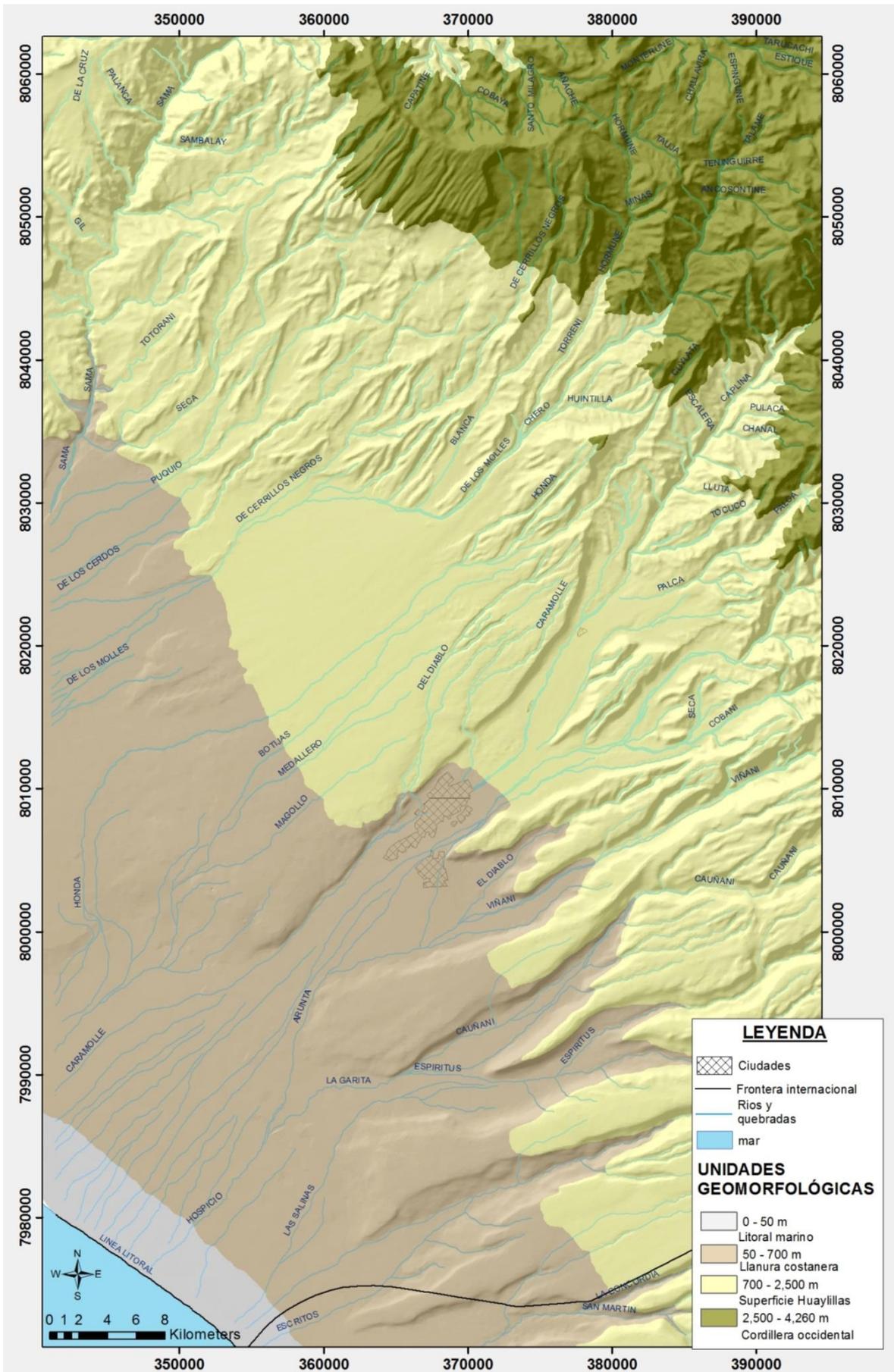


Figura 3. 6. Plano geomorfológico-altitudinal, atributos altitudinales tomados de Wilson & García (1962).

3.1.6 HIDROLOGÍA

El drenaje en el área de estudio está controlado por tres ríos principales Caplina, Uchusuma y Sama, además de abundantes quebradas entre las que destacan Cobani, Viñani, Espíritus, Escritos, entre otras que pertenecen a la región hidrográfica del Pacífico. Posicionados de manera sub-paralela con orientación preferente NE a SO, el cauce de estos ríos y quebradas permanece seco la mayor parte del año tal como se observa en la Figura 3.7, excepto en época de lluvias en la Cordillera Occidental que genera pequeños caudales de agua.



Figura 3. 7. Vista del río Uchusuma al este del Cerro Chuschuco (Pachía, 36v).

3.1.7 GEOLOGÍA

FORMACIONES GEOLÓGICAS: REGIONAL Y DE ESTUDIO

Se provee en esta sección un breve resumen de las principales Formaciones Geológicas de extensión regional presentes en el área de estudio, considerando la descripción litológica y mineralógica de varios autores, haciendo hincapié en las unidades lito-estratigráficas que son tema de la presente Tesis.

Basamento metamórfico (Precámbrico). Denominado como “Complejo Basal de la Costa”, “Macizo de Arequipa”, “Complejo metamórfico de Mal Paso” y “Basamento metamórfico”, esta unidad aflora principalmente en el Cerro Machani y se extiende en dirección NNO-SSE e infrayace en discordancia angular a la Formación Machani (Cabanillas), está conformado por rocas metamórficas foliadas, principalmente gneises y esquistos. Láminas delgadas examinadas a microscopio determinan feldespatos

(plagioclasa, microclina y ortoclasa) levemente alterados a sericita y epídota, cuarzo, ferromagnesianos (anfíboles con fuerte alteración a epídotas), cordierita, micas (muscovita y biotita), cloritas, granates (variedad almandina), sillimanita, zoicita y minerales opacos. (Salinas Zúñiga, 1987).

Grupo Cabanillas (Devónico). Descrito por Wilson y García (1962), Salinas (1987), Pino (2003), entre otros autores como Formación Machani, en los alrededores del Cerro Machani, Chinchillan y Huacano (hoja de Pachía 36v). Se encuentra suprayaciendo en discordancia angular al basamento metamórfico (Pino et al., 2004). Esta unidad es redefinida por Monge y Cervantes (2000) como Grupo Cabanillas, litológicamente está constituido hacia la base por conglomerados con clastos de gneis y esquistos, secuencias de limolitas negras con areniscas cuarzosas y una secuencia superior constituida por intercalación de areniscas pardas con limolitas y algunos niveles de areniscas calcáreas en capas medianas, calizas y conglomerados. El grosor de la unidad se estima aproximadamente en unos 1,200 m (Monge & Cervantes, 2000).

Grupo Ambo (Carbonífero- Misisipiano Superior). El Grupo Ambo es reconocido como unidad sedimentaria en el cuadrángulo de Pachía por Pino et al. (2002), aflora en forma de franja angosta de dirección NNE-SSO y se encuentra infrayaciendo a la Formación Chocolate, constituido de facies sedimentarias, en la base calizas fosilíferas y calcarenitas, continúa una sucesión finamente estratificada de lutitas verdosas intercaladas con calizas negras (abundantes plantas y troncos fósiles) y hacia el tope predominan las areniscas blanquecinas de grano grueso y hasta conglomerádico, que se intercalan con algunos niveles calcáreos (Pino, 2003). Plantas fósiles recolectadas en niveles de lutitas verdosas se identificaron como: *Nothorhacopteris cf. kellybelenensis* y *Tomiodendron* sp. (Pino et al., 2002), indicando la edad del Misisipiano superior (Viseano superior – Serpukhoviano inferior; ~340-325 Ma).

Formación Chocolate (Triásico Superior al Jurásico Inferior). La Formación Chocolate fue localmente definida como Formación Junerata por Wilson & García (1962) en la parte basal del Cerro Junerata de Tacna y redefinida posteriormente por Salinas (1983) como Formación Chocolate, aunque con dos miembros fundamentales, un inferior riolítico destacando minerales de cuarzo, plagioclasa, sanidina y anfíboles cloritizados y un superior andesítico con minerales de plagioclasas, ferromagnesianos alterados a óxidos de hierro y calcita. Sobreyace a la Formación Ambo en discordancia paralela e infrayace a la Formación Pelado. Monge & Cervantes (2000) de igual manera dos unidades, hacia la base

derrames lávicos de composición riolítica y brechas, tobas andesíticas, y la unidad superior de aprox. 1500 m de derrames lávicos de andesitas de textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y cuarzo hialino en matriz afanítica, algunos feldespatos alterándose a cloritas. Todo el conjunto tiene una inclinación hacia el Oeste y Noroeste de 15° a 20°.

Formación Pelado (Jurásico Inferior: Sinemuriano Inferior – Toarciano Superior).

Nombrado así por Wilson & García (1962) y descrita como una secuencia de calizas y lutitas calcáreas que aflora en el Cerro Pelado con dirección NO-SE, formando anticlinales y sinclinales se prolonga al sureste hasta la quebrada Vilavilani con un buzamiento hacia el SSE y al NO, afectado por el Batolito Challaviento. Sobreyace concordante y con superficie erosiva al volcánico Chocolate e infrayace en discordancia paralela a la Formación Socosani, también con un contacto por falla inversa con el Grupo Yura. Monge & Cervantes (2000) detallan que litológicamente está conformado hacia la base por limolitas calcáreas y calizas silicificadas con presencia de fósiles, seguida de limolitas calcáreas gris oscura intercalados con limolitas verdes en capas delgadas y hacia la parte superior calizas gris oscura con limolitas oscuras en capas delgadas a medianas con presencia de fósiles. Su edad está comprendida entre el Sinemuriano inferior y la base del Toarciano superior (Salinas, 1987), es decir entre ~196 y ~184 Ma.

Formación Socosani (Toarciano Superior – Batoniano Superior).

Propuesta por Wilson y García (1962) como Formación San Francisco, con 630m aprox. de areniscas, lutitas y calizas; Monge y Cervantes (2000) denominan esta unidad como Fm. Socosani que sobreyace en contacto gradacional a la Formación Pelado e infrayace conforme al grupo Yura, alterado por el batolito de Challaviento, constituido hacia la base de una secuencia de cuarcitas intercalada con limolitas, seguido de calizas y limolitas calcáreas grises con presencia de Ammonites y la parte superior una secuencia de areniscas calcáreas con fósiles y niveles delgados de calizas limolíticas gris oscuras. Los restos paleontológicos reportados *Catulloceras* sp. y *Pleydellia* sp. asignaron la edad Toarciano final y *Epistranoceras* sp. al Batoniano Superior (Salinas, 1987).

Grupo Yura (Calloviano - Berriasiano).

Denominado por Wilson & García (1962) como Grupo Yura, conteniendo a las Formaciones Ataspaca y Chachacumane. Monge & Cervantes (2000) correlacionaron el Grupo Yura de Tacna con la localidad tipo del valle de Yura (Arequipa), considerado que la Fm. Puente (ex Fm. Ataspaca de Wilson & García, 1962) sobreyace a la Fm. Socosani en un contacto gradacional e infrayace concordante a la Fm. Labra. La Fm. Puente y/o Fm. Cachíos está compuesta en la base por una intercalación

de lutitas y limolitas, en la zona media areniscas con lutitas carbonosas y hacia el techo lutitas grises con intercalación de areniscas cuarzosas en capas delgadas. Se le asigna a estos estratos el Calloviano. La Fm. Labra (ex Fm. Chachacumane de Wilson & García, 1962) presenta en la base limolitas en capas delgadas y capas de areniscas, el nivel medio de lutitas negras con areniscas y al tope en capas medias a gruesas de arenisca cuarzosas, se considera las características sedimentarias de esta formación correspondiente a facies de plataforma y de gran extensión en el sur del Perú, comprendida entre el Tithoniano hasta el Valanginiano. En los niveles superiores, Monge & Cervantes (2000) reportan a los ammonites *Hoplites favrella* (R. DOUVILLE) y los lamelibranquios *Panopea carteroni*. La Fm. Gramadal se deposita en concordancia con la Formación Labra e infrayace concordante a la Fm. Hualhuani. La Fm. Gramadal está constituida litológicamente por areniscas intercaladas con limolitas grises oscuras y ocasionalmente láminas delgadas de óxido de fierro, también algunos niveles de calizas micríticas orgánicas. Los fósiles que reportan Monge & Cervantes (2000) en el cuadrángulo de Palca (36x) son *Windhausenicerias* sp (Tithoniano medio) y *Perisphinctes* sp. (Oxfordiano-Tithoniano). La Fm. Hualhuani comprende el tope del Grupo Yura (antes parte superior de la Fm. Chachacumane), sobreyace concordante a la Fm. Gramadal e infrayace en discordancia angular y erosional con las rocas vulcano-sedimentarias de la Fm. Matalaque (Grupo Toquepala). Litológicamente consiste de cuarzoarenitas con granos de cuarzo redondeado y algunos de zircón. Acosta et al. (2011) asignan la edad Berriasiano.

Grupo Toquepala (Cretácico Superior Al Eoceno Inferior). La nomenclatura estratigráfica “Grupo Toquepala” fue propuesto por Bellido (1962) e identificado en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x) por Wilson & García (1962), quienes lo dividieron en las formaciones Chulluncane, Toquepala y Tarata. Posteriormente, Monge & Cervantes (2000) consideraron que el Grupo Toquepala sólo cuenta con la Formación Quellaveco y su unidad Samanape. Para la presente tesis consideramos el Grupo Toquepala en dos unidades: (i) Fm. Matalaque y (ii) Fm. Quellaveco (Monge & Cervantes, 2000).

Formación Matalaque (Campaniano-Maastrichtiano Superior). Denominado así por Wilson & García (1962) como Formación Chulluncane, y nombrada como Formación Matalaque por Monge & Cervantes (2000) de ~700 m de grosor, suprayace concordantemente a la Formación Hualhuani, e infrayace disconforme al volcánico Huilacollo del Grupo Tacaza. Litológicamente caracterizada por conglomerados y coladas

de lavas andesíticas grises verdosas de textura porfídicas y algunos niveles de lavas afíricas de color brunáceo y niveles muy esporádicos de tobas. En la parte superior se tiene conglomerados con clastos redondeados de cuarcitas, calizas, y andesitas en una matriz andesítica y dacítica (alterada). Acosta et al. (2011) consideraron al miembro inferior del Grupo Toquepala como Fm. Chulluncane, y su estudio petrográfico de una andesita de textura porfídica indica fenocristales de plagioclasa, piroxenos alterando a clorita y minerales opacos, conociendo la edad de 75 Ma por el método K-Ar (Martínez & Cervantes, 2003) hasta ± 65 Ma corresponden al Campaniano-Maastrichtiano superior.

Formación Quellaveco (Paleógeno-Paleoceno) -Unidad Samanape. Esta unidad descrita por Monge & Cervantes (2000) sobreyace disconforme a la Fm. Chocolate e infrayace con ligera disconformidad a la Fm. Moquegua siendo intruida por la Unidad Yarabamba, litológicamente presenta hacia la base secuencia de lavas coherentes de composición química andesítica con intercalación de tobas; secuencia de tobas lapilli gris claras a rojizas estratificadas compuesta de líticos polimícticos (volcánicos) y pómez en una matriz tobácea alterada, algunos sectores presentan textura eutaxítica. Acosta et al. (2011) describieron además canales conglomerádicos, arcosas y limolitas, así como también brechas y aglomerados riolíticos macizos al tope superior. Las dataciones realizadas arrojaron edades de 52.3 ± 1.6 ; 52.43 ± 1.7 (Mina Cuajone, Clark, et.al. 1990) y 53.6 ± 3.0 ; 55 ± 1.10 ; 56.2 ± 2.10 (Yacimiento Quellaveco, Zimmermann & Kihien 1983), correspondiendo al Paleoceno.

Grupo Tacaza - Formación Tarata (Paleógeno). Descrita por Jaén (1962) como Formación Tarata, aflora principalmente al NE de Palca, Monge & Cervantes (2000) diferenciaron dos miembros: (i) Miembro Inferior (P-ta_i), constituido por tobas soldadas, brechas, conglomerados y algunos derrames lávicos porfídicos de andesitas, que se intercalan con tobas poco soldadas gris blanquecina en capas gruesas, esta secuencia suprayace en discordancia angular a los volcánicos de Grupo Toquepala e infrayace a los volcánicos recientes del Complejo Fisural Barroso, hacia el norte se encuentra en contacto fallado con el Grupo Yura (Formación Hualhuani). (ii) Miembro Superior (P-ta_s) constituido por una secuencia volcano-sedimentaria, conformada por tobas gris clara bien compacta con presencia de cuarzo, biotita y pómez, intercalada con areniscas tobáceas, conglomerados y areniscas con estratificación sesgada y un nivel delgado de calizas micrítica (en el Cerro Jacnone formando sinclinal cuyo eje tiene un rumbo N-S) Coronando la secuencia se tiene tobas riolíticas gris claras moderadamente soldadas con

presencia de cuarzo bipiramidal y lámelas de biotita, poca presencia de pómez. Este miembro sobreyace conforme al miembro inferior e infrayace al Grupo Barroso.

Formación Huilacollo (Paleógeno – Neógeno). Cartografiada inicialmente por Wilson y García (1962), sobreyace disconforme a las Formaciones Hualhuani y Matalaque e infrayace en discordancia paralela a la Fm. Huaylillas y en discordancia angular a Barroso; consiste en derrames andesíticos y piroclásticos, con predominio de brechas, aglomerados y tobas. Monge y Cervantes (2000) la describen litológicamente como intercalaciones de brechas andesíticas, tobas dacíticas y riódacíticas con buena estratificación, algunos niveles se les puede considerar como areniscas tobáceas. El grosor de la unidad varía desde 200 m. hasta 1000 m. Las dataciones indican edades de 28.33 ± 3.76 Ma (Oligoceno), a 11 km al este de Causuri (France et al., 1985).

Continuamente se describe las unidades litoestratigráficas del Cenozoico de mayor interés de estudio en la presente Tesis.

Formación Moquegua (Oligoceno – Mioceno). Fue descrita por primera vez en el valle de Moquegua por Adams (1906) como apilamientos de arcillitas y arcillas arenosas, conglomerados y algunos niveles de cenizas volcánicas en su parte superior. Steinman (1930) divide esta Formación en dos pisos: “antiguo”, de areniscas rojas y grises con lentes de conglomerado; y “reciente”, compuesto de conglomerados gruesos y areniscas; Posteriormente Marocco et al. (1985) sugirieron elevar la categoría a Grupo Moquegua (incluyendo los sedimentos rojizos basales) y dividirla en Formación Moquegua Inferior compuesta de areniscas rojas yesíferas y areniscas grises con lentes de conglomerados locales, y Formación Moquegua Superior, compuesta de abundantes conglomerados canalizados de gran escala y areniscas.

Monge & Cervantes (2000) describieron en Pachía y Palca la Formación Moquegua Superior en su miembro superior (PN-mo-s) constituida por conglomerados en capas gruesas a medianas con clastos de hasta 30 cm de diámetro y matriz areno-limosa; Sánchez et al. (2000) detalla la Formación Moquegua Superior (PN-mo_s) en el cuadrángulo de Tacna como areniscas tobáceas intercaladas con areniscas limosas y hacia el techo toba con fragmentos de pómez, que sobreyace en discordancia angular a la Formación Guaneros e infrayace en discordancia erosional a la Formación Huaylillas.

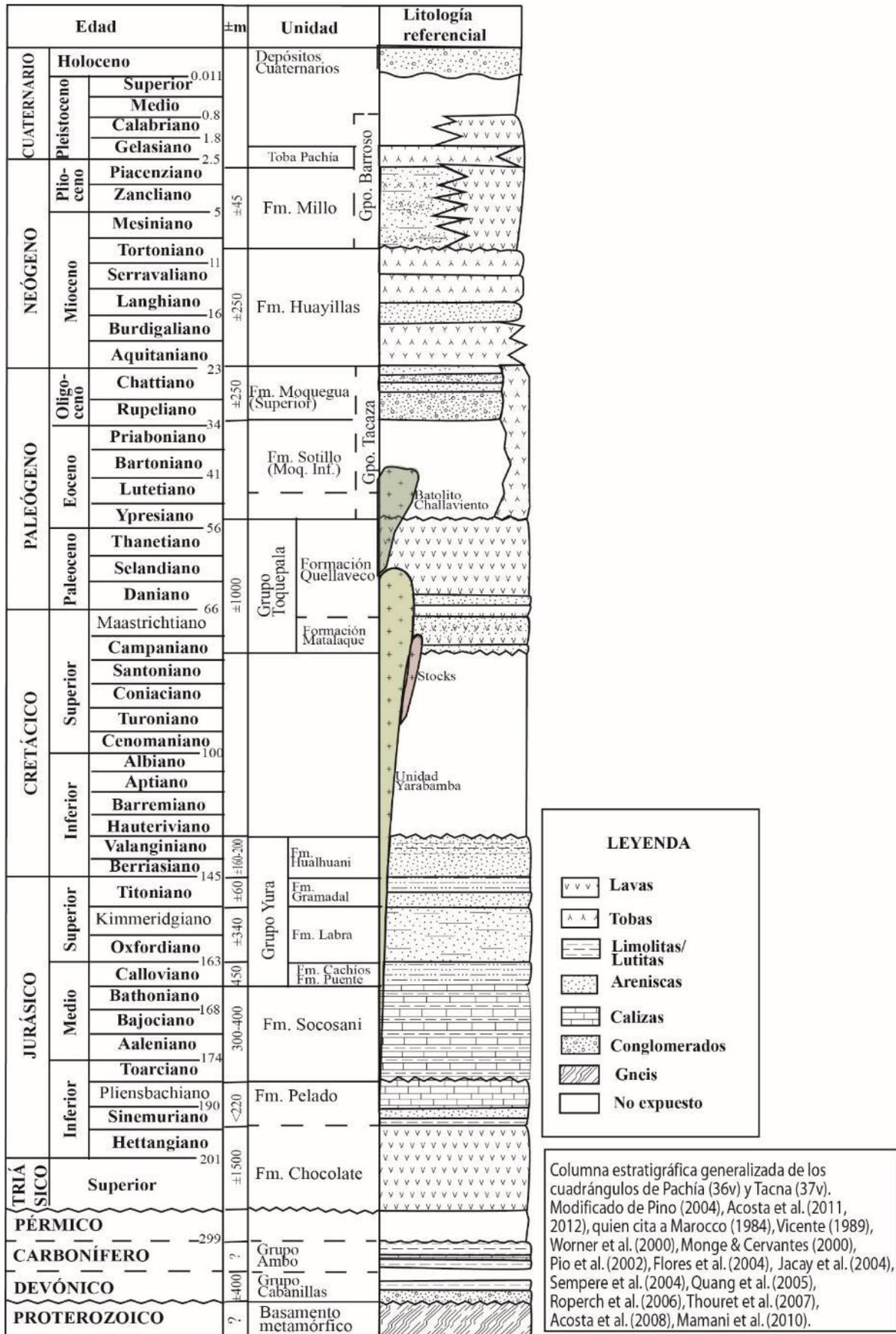


Figura 3. 8. Columna estratigráfica generalizada de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v).

Sempere et al. (2004) exponen sus discrepancias en la cronoestratigrafía del Cenozoico y redefinen la estratigrafía y paleogeografía del Grupo Moquegua dividiendo este grupo en 4 unidades i.e. Moquegua “A”, “B”, “C” y “D” de edades aproximadas de 49 a 45 Ma, 45 a 30 Ma, 30 a 14 Ma y 10 a 2.7 Ma respectivamente. Posteriormente, Flores et al. (2004) señalaron que las facies sedimentarias representativas de la “Formación Moquegua Superior” en Tacna al noreste (zona proximal) se vuelven gradualmente más finas al suroeste (zona distal), y corresponden a la “Unidad Moquegua C” de Sempere et al. (2004) con edad ~30 a 23 Ma (Oligoceno a Mioceno). Los conglomerados de la parte superior de la Formación Moquegua Superior son equivalentes a la Unidad MoqD de Sempere et al. (2004), o llámesele también Formación Millo (Sánchez et al., 2000).

Los siguientes estudios tales como Acosta et al. (2011) y Acosta et al. (2012) afirman que el Cenozoico en Pachía y Palca está representado por la presencia de dos cuencas sedimentarias tales como Moquegua y Maure, las cuales están divididas por la Cordillera Occidental. Además, los depósitos de la “Formación Moquegua Superior” (o “Unidad Moquegua C” de Sempere et al., 2004) tienen variados ambientes de depositación, tales como depósitos de pendiente de borde de cuenca, ambientes de ríos proximales con barras conglomerádicas, con algunas llanuras de inundación, ambientes sedimentarios conformados por ríos entrenzados distales con amplias llanuras de inundación y muy posiblemente ambientes lacustres con algo de influencia de eventos volcánicos vecinos y contemporáneos.

En esta tesis se ha estudiado los afloramientos más extensos, los cuales se sitúan en los Cerros Solitario, Los Cóndores, Perdido, Churcos, Chuschuco, Precipicio, Acirume, Yarahuay, entre los más voluminosos. El Grupo Moquegua aflora en los sectores norte de la zona de estudio, i.e. Cerro Acirume y Huacano, se encuentra sobreyaciendo con ligera discontinuidad a la Formación Samanape, unidad de la Formación Quellaveco (Grupo Toquepala, Monge & Cervantes, 2000), y consiste en conglomerados clasto-soportados (diámetro de clastos varía en 0.8-1 m) e interbarras de areniscas grano grueso. En el Cerro Chuschuco se evidencia secuencias de conglomerado intercalados con areniscas y colmatando la secuencia, lentes de areniscas tobáceas. Así mismo en los afloramientos del Cuadrángulo de Tacna (37v), es notoria la presencia dominante de areniscas de grano fino a conglomerádicas intercaladas con niveles arcillosos, con evidencias de grietas de desecación (p. ej. Cerro Los Churcos y los testigos de pozos de perforación del Proyecto Especial Tacna).

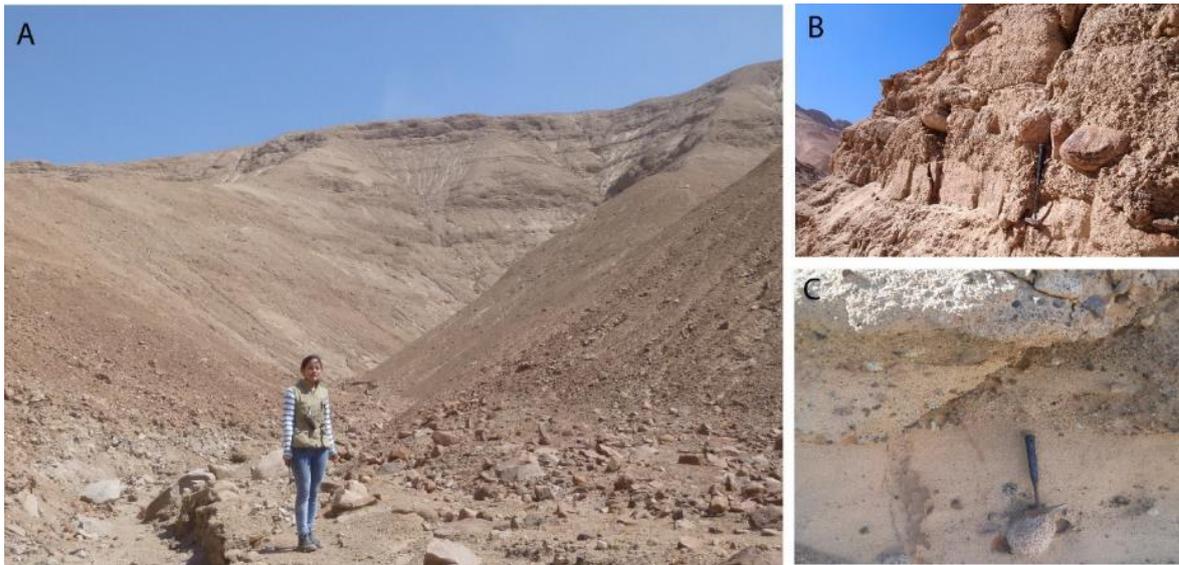


Figura 3. 9. Afloramientos de rocas atribuidas a la unidad Moquegua, en A) Vista al SO en Cerro Chuschuco, en B) y C) Estratos de areniscas en los Cerros Perdido y Cubeta.

Formación Huaylillas (Mioceno Inferior). La Formación Huaylillas (Nm-hu) nombrada por Wilson & García en 1962 detallada litológicamente de tufos ácidos de composición dacítica y riolítica que infrayace al volcánico Barroso, y divide la Formación en tres miembros: inferior de tufo riolítico de color blanco y crema friable, medio de tufo dacítico rosado a rojo macizo y superior de tufo riolítico blanco y rosado friable. Monge & Cervantes (2000) diferenciaron dos unidades de la Formación Huaylillas en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Palca (36x), siendo (i) Miembro Inferior (Nm-hu_i) litológicamente constituido de tobas color beige friables sin estratificación de composición riolítica con niveles pumíceos, y (ii) Miembro Superior (Nm-hu_s) de tobas riolíticas a riolíticas de color rosado. Las edades obtenidas en Tacna son 20.65 ± 0.94 y 23.77 ± 0.48 Ma (K/Ar sobre biotita; France et al., 1984), comprendiendo el Mioceno inferior; Sánchez et al. (2000) diferencia en el cuadrángulo de Tacna dos miembros, el inferior conformado por tobas cristalolíticas blanquecinas no compactas y el superior constituido de tobas marrones bien soldadas, además la Fm. Huaylillas se encuentra en discordancia angular leve sobre la Formación Moquegua.



Figura 3. 10. Fm. Huaylillas con sus tres miembros, vista desde Cerro Blanco, Tacna.

En la presente tesis se ha estudiado afloramientos en los cerros Solitario, Los Cóndores, Perdido, Churcos, Chuschuco y Precipicio. La Formación Huaylillas sobreyace con ligera discordancia angular al Grupo Moquegua y en gran parte de los cuadrángulos de Pachía y Tacna se ha reconocido tres miembros, el inferior compuesto por tobas rosáceas y blanquecinas con abundantes líticos, fiames y cherts, que es interrumpido por $\pm 45\text{m}$ de conglomerados y areniscas (observado sólo en el cerro Chuschuco y Yarahuay); el medio que consiste en tobas riolíticas y riocáciticas compactas con algunos pómez y en sección delgada presentan cuarzo, plagioclasas, sanidina y biotita (Monge & Cervantes, 2000). Finalmente el miembro superior que se sólo en algunos cerros (Solitario, Los Cóndores, Churcos, Cantera) consiste en tobas dacíticas blanquecinas con abundante pómez y esporádicos líticos con diámetro promedio de 1 cm.

Formación Millo. Flores & Sempere (2002) describen una unidad detrítica de $\pm 50\text{m}$ de espesor en el sector del Cerro Magollo como Formación Magollo, que sobreyace en leve discordancia a la Fm. Huaylillas y se divide en dos miembros: el miembro inferior que consta de conglomerados, areniscas, limolitas, niveles de flujo de pómez, capas de yeso al tope; y el miembro superior más arenoso, que consta de conglomerados arenosos, brechas sedimentarias y areniscas gruesas e intercalaciones de limolitas. Además describen como Formación Calientes a la unidad detrítica que aflora dentro de los valles, conglomerados polimícticos intercalados hacia el sur-oeste con micro-conglomerados, areniscas y limolitas, post-Magollo y ante-Pachía, postulando su equivalencia con la “Unidad Moquegua D” (MoqD) de Sempere et al. (2004).



Figura 3. 11. Vista de la Formación Millo en el Cerro Magollo (E: 361843, N: 8005108), situado al oeste de la ciudad de Tacna.

Acosta et al. (2011,2012) consideran a los “conglomerados calientes” de Flores y Sempere (2002) y la unidad Moquegua “D” de Sempere et al. (2004) con edad entre 10 Ma y 2.7 Ma como parte integrante de los sedimentos de la Formación Millo, que consiste en facies conglomerádicas, areniscas y limolitas. En la presente tesis se ha realizado una columna estratigráfica en el Cerro Magollo, considerado en la geología del cuadrángulo Tacna (36v) como Formación Millo (Sánchez et al., 2000).

Depósitos Cuaternarios. En los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v) se presenta toda la variedad de depósitos cuaternarios que se acomodan en la superficie a manera de depósitos fluvio-glaciares, morrenas, aluviales, depósitos de cenizas, bofedales y fluviales, los cuales se encuentran en constante proceso de transporte y depositación (Monge & Cervantes, 2000).

ROCAS INTRUSIVAS

Varios autores han agrupado las rocas intrusivas de la zona de acuerdo a sus características texturales, mineralógicas y dataciones radiométricas principalmente, conocidas como:

Batolito De La Costa - Unidad Yarabamba. Las rocas intrusivas correspondientes a la Unidad Yarabamba presentan extensos afloramientos relacionados al sistema de fallas Incapuquio; limitados por esta falla hacia la parte oeste del cuadrángulo de Palca entre las quebradas Cobani, Vilavilani y Palca (Acosta et al., 2011), e intruyen a las Formaciones

Chocolate (en la quebrada Palca y Vilavilani) y Socosani en la quebrada Palca, al Grupo Toquepala (en la quebrada Cobani), silicificando los contactos con las formaciones intruidas mayormente a los sedimentarios. Litológicamente está compuesta de granodioritas con cristales de plagioclasa, ortosa, cuarzo, biotita, piroxeno y hornblenda, de textura holocristalina, grano grueso, inequigranular, hipidiomórfica con una edad de emplazamiento de 60.3 ± 1.3 Ma en la quebrada de Palca Clark, Farrar, Kontak (1990), asignado al Paleoceno inferior. (Monge y Cervantes, 2000; Acosta et al., 2011).

Batolito Challaviento. Este cuerpo intrusivo aflora en los cerros Coalaya, Patine, Vilacollo y Challaviento y su emplazamiento está asociado al Sistema de Fallas Incapuquio, el cual tiene una dirección NO-SE. Generalmente intruyen a las Formaciones Pelado, Socosani, Grupo Yura, Matalaque y Tarata generando un metamorfismo de contacto en los bordes. El Batolito Challaviento está compuesto de granodiorita de textura porfídica teniendo esencialmente cuarzo y feldespatos (ortosa), minerales accesorios como biotita y ferro-magnesianos. Asimismo, presenta monzodioritas asociados en forma de diques compuestos de ortosa, plagioclasa, hornblenda y como accesorios cuarzo y biotita. También comprende sienogranitos, los cuales afloran como un lacolito al noreste de Ancoma, y están compuestos de ortosa, plagioclasa, hornblenda con cuarzo y biotita, hipidiomórfica (Monge y Cervantes, 2000). Por las dataciones radiométricas existentes en los alrededores de Ataspaca, se tienen edades de 39.9 ± 1.0 Sánchez (1983), 40.22 ± 0.65 , 42.68 ± 0.96 , 45.21 ± 0.21 , 45.21 ± 4.21 Clark, Farrar, Kontak (1990). Se le asigna una edad Paleógeno (Eocena). Monge y Cervantes (2000).

Dique. Denominado Dique Milonita por Monge y Cervantes (2000), son cuerpos que se encuentran asociados al sistema de fallas Incapuquio y forman diques anchos de hasta 0.50 Km., y de una longitud de 4.5 Km., con una dirección NO-SE en la quebrada Ataspaca margen izquierda. Estos intrusivos son de color gris claros verdosos y en algunos sectores con tonos rojizos masivos con escasos cristales máficos, en su mayoría son vítreos. Se hallan intruyendo a las formaciones Chocolate, Socosani, hasta los volcánicos del Grupo Toquepala e infrayacen discordantes a la Formación Moquegua (Monge y Cervantes, 2000).

3.1.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v) pertenecen a un territorio tectónicamente activo, dominado por fallas regionales como el Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio (con siglas SFCLLI) que maniobra el piedemonte de la Cordillera Occidental con una orientación N125°, el SFCLLI se trata de un grupo de fallas transcurrentes sinestrales con una longitud de hasta 400km y no menores de 10km de espesor y ha sido estudiada por numerosos autores, por ejemplo, Wilson & García (1963), Bellido (1979), Vicente (1979), Monge & Cervantes (2000), Jacay (2002), Flores et al. (2005), Acosta et al. (2010, 2011, 2012) entre muchos otros autores, esta falla facilitó la exhumación de rocas del Precámbrico y el Paleozoico y forma un rombo estructural con zonas de intenso metamorfismo. Se considera el límite activo al NE de la Cuenca Moquegua (Jacay et al., 2002), además los intrusivos del Cretácico-Paleógeno se asocian a esta falla, la misma que facilitó el magmatismo en esta edad (Grupo Toquepala); Acosta et al (2012) mencionan que durante el intervalo Coniaciano-Santoniano se dio lugar el inicio de un período de inversión tectónica del SFCLLI tal como se encuentra actualmente de rumbo sinistral con componente inverso y que tuvo principal importancia en la creación de la Cordillera Occidental.

Al sur del SFCLLI se ha cartografiado otro sistema importante de fallas con rumbo N110° denominada Sistema de Fallas Calientes-Chuschuco (con siglas SFCC) y Sistema de Fallas Cerro Desconocido (con siglas SFCD) por Flores et al. (2005) quienes identifican estas fallas de componente sinistral como un grupo de fallas inversas (en échelon) y afecta a las unidades Moquegua Superior, Huaylillas, Millo y la toba Pachía, además el componente inverso ha permitido la exhumación de unidades del Jurásico, Cretácico e intrusivos del Paleógeno; se correlaciona con la falla Ausipar de Chile que tiene vergencia al oeste (Charrier et al. 2005).

En la presente tesis se considera un sistema de fallas al sur de la ciudad de Tacna, que fue descrita por Flores et al. (2005) como Sistema de Fallas Magollo-Escritos (SFME) con orientación N145° definida como fallas normales que afecta principalmente a las unidades Moquegua, Huaylillas y Millo, pues permite la subsidencia de estas unidades al SW de la falla en el Neógeno Tardío.

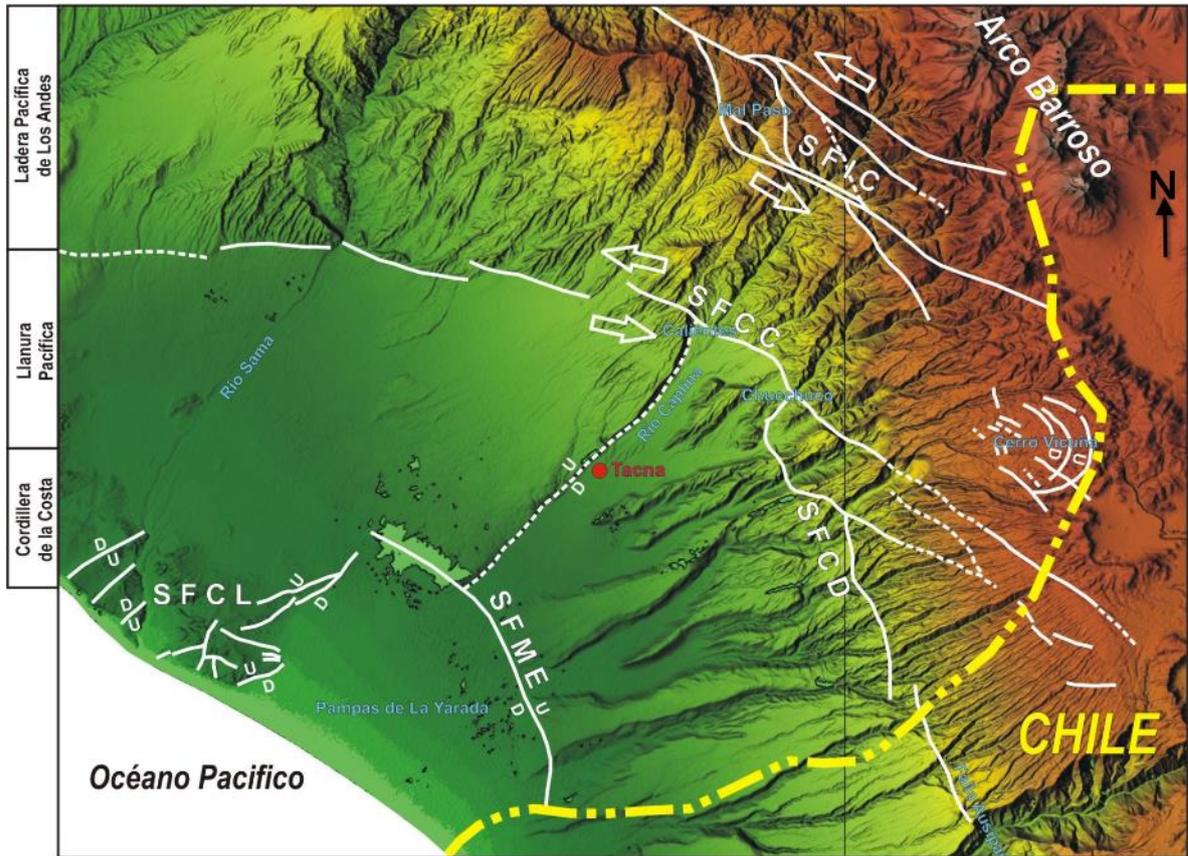


Figura 3. 12. Modelo digital de terreno que muestra principales sistemas de fallas en el antearco del sur de Perú. Tomado de Flores et al. (2005).

3.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En general, la metodología de la investigación proporciona las herramientas teórico-prácticas para solucionar el problema planteado a través del método científico.

3.1.1 TIPO, DISEÑO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es cuantitativa y descriptiva, porque se apoya en bases tales como la observación, análisis y descripción de las rocas, así como la toma directa de datos para, por ejemplo, elaborar columnas estratigráficas y evaluar el lugar de toma de muestra. A la vez, estos datos son considerados como comparables debido a que se puede observar la relación que existe entre las variables, por ejemplo, espectros de minerales pesados y variedades de rocas sedimentarias. Este fundamento permite el acceso a la explicación, debido a que a través de esta investigación se pretende explicar los posibles eventos geológicos que determinaron la formación de las rocas siliciclásticas del Cenozoico en Tacna.

✚ DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La estrategia para obtener la información se realiza siguiendo el esquema de la Figura 3.13.

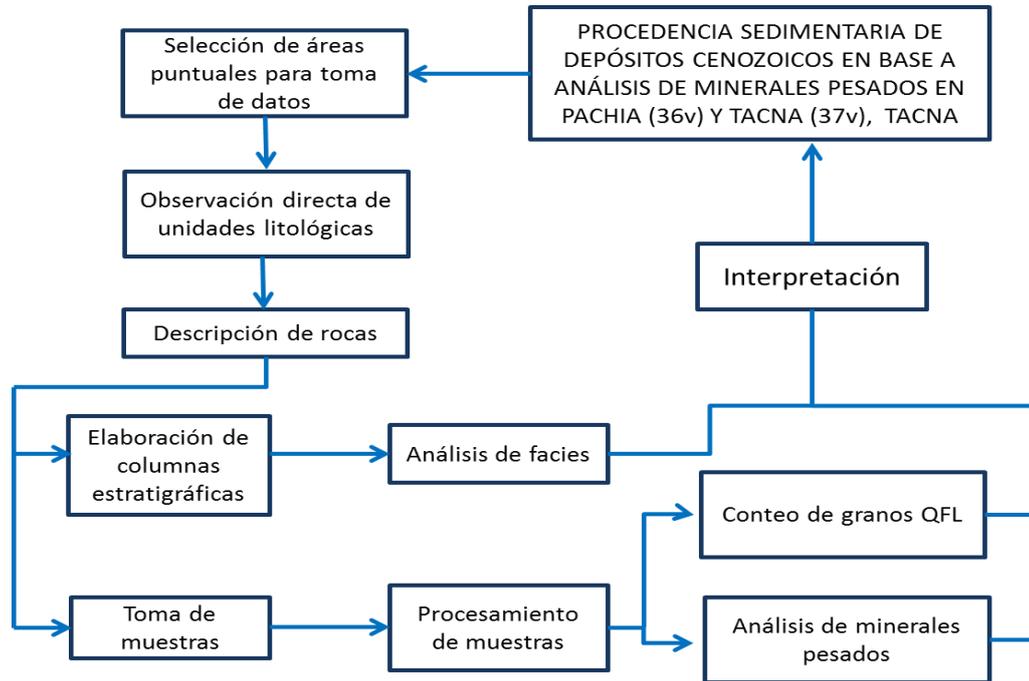


Figura 3. 13. Organigrama del desarrollo de la presente investigación.

✚ MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación es descriptiva, analítica, comparativa y explicativa.

3.1.2 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio son las muestras de rocas sedimentarias de unidades litoestratigráficas del Cenozoico en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v) en el departamento de Tacna, sur de Perú.

3.1.3 MUESTRA

Espectros de minerales pesados y minerales individuales obtenidos de las rocas siliciclásticas (areniscas y areniscas volcanoclásticas) de la parte superior del Grupo Moquegua (Formación Moquegua Superior), Formaciones Huaylillas y Millo en los cuadrángulos Pachía y Tacna.

3.1.4 UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis para esta investigación son los granos de minerales pesados, los cuales son observables a través de slides para uso en microscopía petrográfica. Estos minerales, mediante un riguroso proceso físico-mecánico, son separados de rocas siliciclásticas correspondientes a las unidades litoestratigráficas Moquegua, Huaylillas y Millo (Cenozoico).

3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Los procedimientos y técnicas para obtener los datos inician en la recopilación de información bibliográfica, seguido del trabajo de campo (recolección y tratamiento de muestras) y finalmente procesamiento y análisis de las muestras en laboratorio.

3.2.1 ETAPA PRELIMINAR DE GABINETE

En esta etapa se realiza la búsqueda, revisión y análisis de la información existente del área que se va a trabajar, así como todos los factores externos para realizar esta investigación.

Se ha revisado artículos y boletines de congresos, revistas, journals especializados y simposios internacionales, además de mapas geológicos y topográficos de diversos autores, especialmente del INGEMMET, a escalas 1: 50,000 y 1: 100,000 de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v), así como imágenes satelitales y ortofotos obtenidas de diversos softwares accesibles (por ejemplo, Landsat y Google Earth).

Se determinó la ubicación de áreas estratégicas para la elaboración de columnas estratigráficas que abarquen las principales unidades litoestratigráficas a analizar (tales como Formación Moquegua Superior, Formación Huaylillas y Formación Millo) y que sean buenos candidatos para seleccionar las mejores muestras de rocas; tomando en cuenta los accesos y permisos sociales, tal como se muestra en el bosquejo de la Figura 3.14.

3.2.2 ETAPA DE CAMPO

Se inspecciona los sectores seleccionados en etapa preliminar, verificando los afloramientos de rocas requeridas, así como el acceso para poder tomar los datos y las muestras, después se inicia el trabajo tomando datos de ubicación con GPS, descripción de rocas aflorantes para realizar la columna estratigráfica necesaria y toma de muestras de rocas sedimentarias, clasificando las rocas sedimentarias de acuerdo a su granulometría, textura y composición mineralógica.

La toma de muestras se realizó tomando en cuenta que ésta sea probabilística aleatoria estratificada, recolectándose dentro de cada Formación Geológica especialmente en la base y el tope de ésta, además debe ser una roca siliciclástica con peso considerado óptimo de un mínimo de 2 kg, sin embargo, en casos excepcionales como las muestras obtenidas de testigos de perforación pueden promediar en 1 kg; se debe recolectar lo más fresca posible y anotar el código, ubicación y descripción en la base de datos.

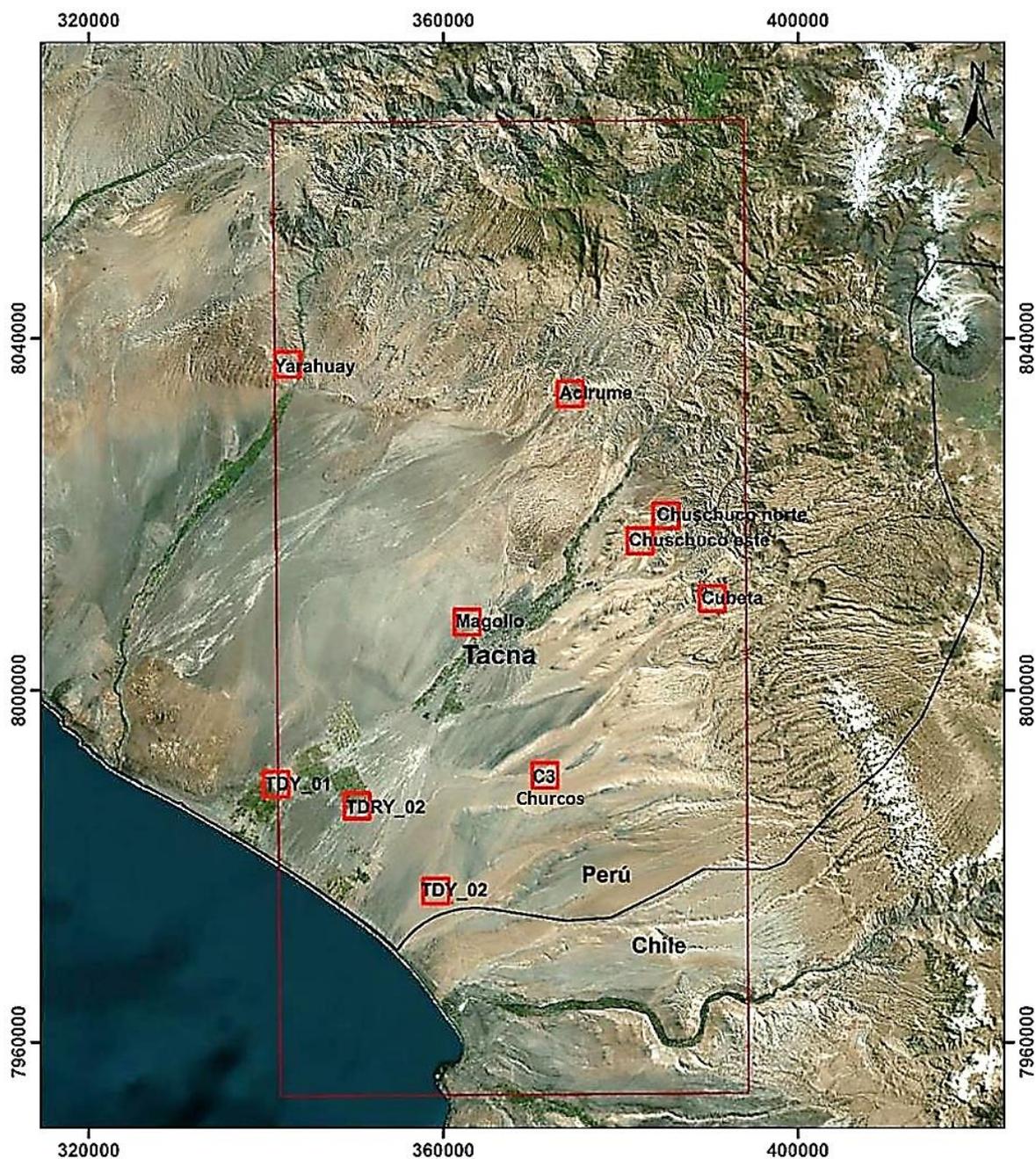


Figura 3. 14. Ubicación referencial de los lugares donde se levantó columnas estratigráficas, Tacna. Los cuadros rojos indican tanto columnas estratigráficas como testigos de pozo de perforación del PET (Tacna).

3.2.3 ETAPA DE LABORATORIO Y TRATAMIENTO DE DATOS

En el procesamiento de datos se ordena la información obtenida en campo e ingresa a una base de datos verificando la validez de los mismos, tales como coordenadas geográficas, rumbo, buzamiento, descripción de muestras, fotos, y su posición en las columnas estratigráficas. Posteriormente se utiliza softwares como ArcGIS, Excel, Word, Adobe Illustrator, entre otros; con la finalidad de vincular los datos con planos geológicos y cortes estructurales. Formalmente, se prepara solicitudes de preparación mecánica de muestras,

sin embargo, la preparación de las muestras corre por responsabilidad del estudiante de tesis.

La etapa de tratamiento de las muestras es la más delicada del proceso, puesto que una falla en el protocolo resultaría en contaminación de la muestra, y necesariamente deberá descartarse. El trabajo de laboratorio consiste en preparar mecánicamente la muestra de roca para su posterior análisis de proveniencia de sedimentos, siguiendo pasos secuenciales desde el chancado de rocas, tamizado, lavado, secado y separación de minerales pesados; así como elaboración de láminas delgadas para el conteo de espectros de minerales pesados.

3.4 PROCESAMIENTO DE MUESTRAS

3.4.1 EQUIPOS Y MATERIALES

Tabla 3. 2. Listado de equipos y materiales utilizados para el desarrollo de investigación.

EQUIPOS EN CAMPO	
- Brújula	- Protáctor
- GPS	- Planos
- Cámara fotográfica	- Libreta de campo
- Picota	- Lápices, plumones y colores
- Lupa	- Bolsas para muestras.
- Rayador	
EQUIPOS DE LABORATORIO	
- Chancadora secundaria	- Sellador de plástico
- Tamizador (RO-TAP)	- Vasos de precipitación
- Mallas N° 10, 60, 100 y 200.	- Probeta
- Limpiador ultrasónico	- Embudos de vástagos.
- Estufa (Horno)	- Embudos de separación/decantación.
- Campana de extracción	- Balanza en miligramos
MATERIALES USADOS	
- Ácido acético concentración al 5%,	- Politungstato de sodio y alcohol.

3.4.2 PROCESAMIENTO DE MUESTRAS Y PROCESO DE OBTENCIÓN DE MINERALES PESADOS

Mange & Maurer (1992) recomienda lo siguiente: La masa de una muestra seca para análisis de minerales pesados puede variar entre 100 g y 1000 g de areniscas, areniscas inmaduras y volcanoclásticos, pero en sedimentos maduros y los que contienen altas proporciones de cemento necesitan mayor muestra, la siguiente secuencia es el usual procedimiento de tratamiento de separación de minerales pesados:

- Disociación de sedimentos cementados, para liberar granos individuales.

- Digestión ácida suave (ácido acético al 5%), para eliminar carbonatos y lavado alternativo con agua des-ionizada para disolver sales solubles.
- Remover sustancias orgánicas y liberar los granos de arcillas y óxidos de hierro.
- Limpieza de muestras bituminosas o saturadas en petróleo crudo.
- Tamizado para extraer el tamaño de grano requerido.

Para la presente investigación se siguió el procedimiento recomendado en el manual de separación de minerales por INGEMMET, detallado a continuación:

i. COLECTA DE MUESTRAS

En campo se colecta la muestra debidamente codificada, para este estudio el código fue: “GR41A-16-N° ORDINAL” (según los instructivos propuestos en INGEMMET, 2015) con un peso promedio de 2.5 kg para las muestras recolectadas en los afloramientos y en sus respectivas columnas estratigráficas, y hasta 1 kg para las muestras recolectadas de testigos de perforación, en la figura 3.15 se observa selección y colecta de muestra.

Usualmente las areniscas de grano medio a fino tienen un rendimiento óptimo en ensambles de minerales pesados (Mange & Maurer, 1992), y en caso de tener afloramientos de conglomerados es recomendado realizar un conteo modal (Dunkl et al., 2009).

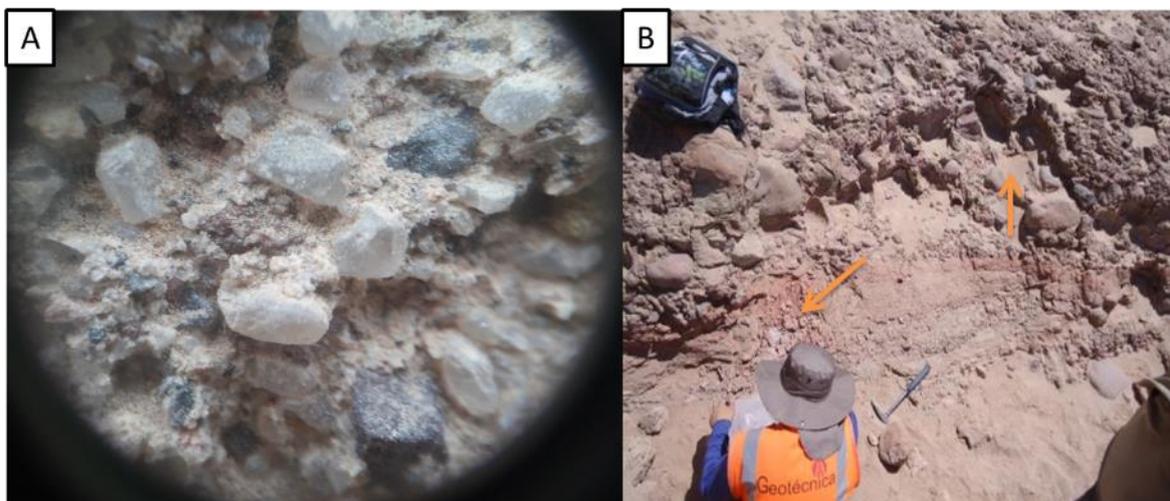


Figura 3. 15. Colecta de muestras de areniscas en la unidad Moquegua, en A) roca observada a la lupa 20X y en B) flechas indican zonas de colecta, lentes de arenisca o matriz areniscosa de los conglomerados.

ii. DISGREGACIÓN DE MUESTRA

Las muestras se han fragmentado en la “chancadora secundaria de mandíbulas” que expulsa la roca en fragmentos de diámetro menor a 2 mm (malla No. 10), en caso de las muestras recolectadas de los testigos de perforación se ha realizado manualmente.

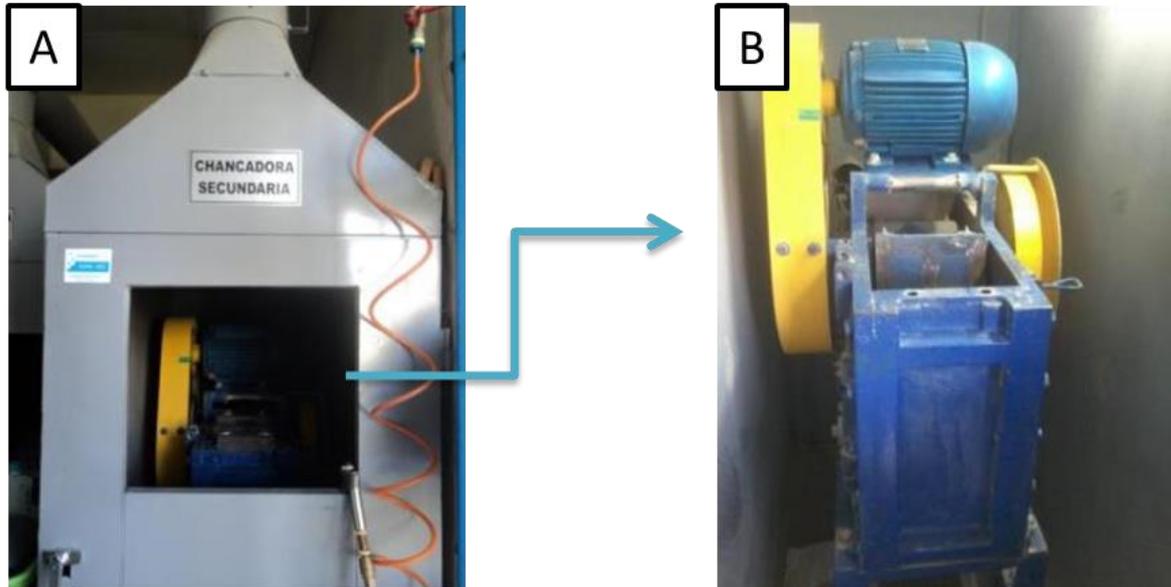


Figura 3. 16. Chancadora secundaria de mandíbulas marca Rhino (en A y B), Área de Preparación Mecánica de muestras del Laboratorio de INGEMMET.

La chancadora secundaria debe ser limpiada antes y después de su uso, desarmando la parte superior usando las herramientas y limpiando la mandíbula móvil con un cepillo de metal y alcohol (90%) (Figura 3.17), también se debe limpiar la canasta de recepción de sedimentos y finalmente se aplica aire comprimido para eliminar las partículas de muestra que queden atrapadas en las trituradoras.



Figura 3. 17. A y B) Limpieza de mandíbula de la chancadora secundaria con alcohol y cepillo metálico.

Las muestras después del chancado están listas para ser tamizadas y seguir con el proceso.



Figura 3. 18. Roca pulverizada por la chancadora secundaria.

iii. TAMIZADO

Una vez obtenida la fracción triturada, se requiere organizar la muestra en función a su granulometría, ya que existe una relación directa entre el tamaño de grano y la abundancia mineral en la muestra, por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente este paso ya que la mayoría de estudios de minerales pesados y de un solo grano se centran en el tamaño de 63-125 μm tanto en la naturaleza como en concentrados dirigidos (von Eynatten & Dunkl, 2012).

Las muestras se clasifican granulométricamente mediante tamices metálicos (marca Tyler), los cuales tienen tamaños estándares, asegurando la separación homogénea, para la presente investigación se separó partículas de tamaño mayores a 2 mm (tamiz N° 10), <2mm-250 μm (Tamiz N° 60), <250 μm -150 μm (tamiz N° 100), <150 μm -75 μm (tamiz N° 200) y finalmente sedimentos <75 μm (tamiz <200), Figura 3.19A.

El tamizado se realiza manualmente o en el tamizador (RO-TAP), siguiendo 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 No. 10, seguida de N° 60, N° 100, N° 200 y la base. Al finalizar el tamizado se guardan las fracciones de sedimentos según su granulometría en bolsas debidamente codificadas (GRA41A-16-NÚMERO DE LA MUESTRA/ \pm N° MALLA).



Figura 3. 19. A) Tamices utilizados para seleccionar la muestra por su granulometría (mallas N°10, N°60, N°100, N°200 y base), en B) muestra triturada lista para ser tamizada y C) tamizador RO-TAP.

2. Los sedimentos $<150 \mu\text{m}$ (malla No. 100) son pasados por la malla de tamaño $75 \mu\text{m}$ (malla No. 200), de modo que se obtenga la fracción $150-75 \mu\text{m}$. Las arcillas no son necesarias en los estudios de proveniencia de sedimentos, por lo tanto, podrán ser desechadas. La medida $150-75 \mu\text{m}$ (obtenido de la malla No. 200) es convencionalmente considerada de tener la mayor concentración de minerales deseados (von Eynatten & Dunkl, 2012) y se guarda para trabajar con esa fracción en el siguiente paso (lavado).



Figura 3. 20. Sedimentos obtenidos del tamizador y guardados en bolsas codificadas.

3. Los tamices deben ser limpiados para continuar el tamizado con la siguiente muestra, para eso se lava las mallas en el limpiador ultrasónico (Figura 3.21), sumergiendo los tamices en agua y encendiendo el ultrasónico por $\sim 15-30$ minutos por tamiz, quedando limpios sin algún grano atrapado en las mallas se limpia con alcohol los bordes, se deja secar 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.

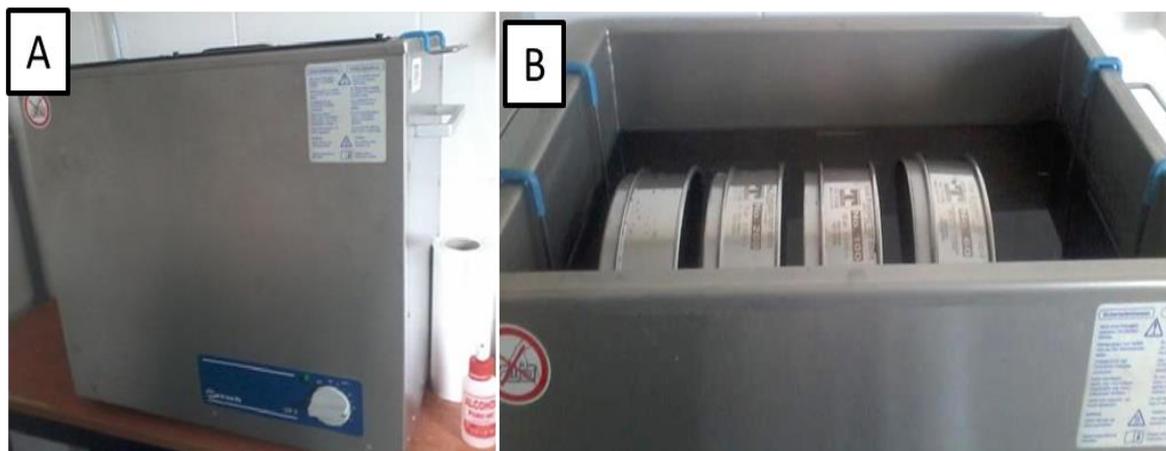


Figura 3. 21. A y B) Limpiador ultrasónico usado para la limpieza de los tamices.

iv. LAVADO

Los sedimentos con granulometría de 150-75 μm (obtenido de la malla No. 200) son lavados en un tamiz No. 200, para eliminar las arcillas que no han podido ser expulsadas durante el tamizado.

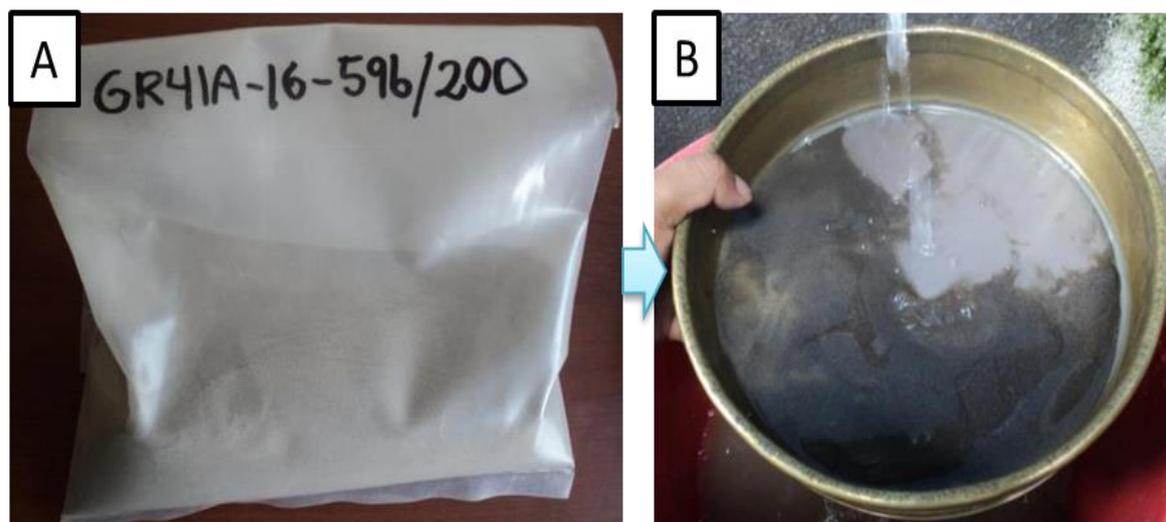


Figura 3. 22. A) Sedimentos de muestra antes del lavado, por ejemplo, se tiene codificada la muestra “GR41A-16-596/200”; B). Lavado de sedimentos en malla N° 200.

v. LAVADO CON ÁCIDO ACÉTICO

Después del lavado de los sedimentos de fracción 125 μm -75 μm se procede al bañado con ácido acético concentrado al 5% (Ac 5%), para eliminar carbonatos que pueden estar como cementantes entre granos o como granos, se usa Ac 5% porque no corroe los minerales más susceptibles (e.g. apatitos, piroxenos, anfíboles). La frecuencia del baño de la muestra en ácido acético dependerá de la abundancia de carbonatos en la muestra.

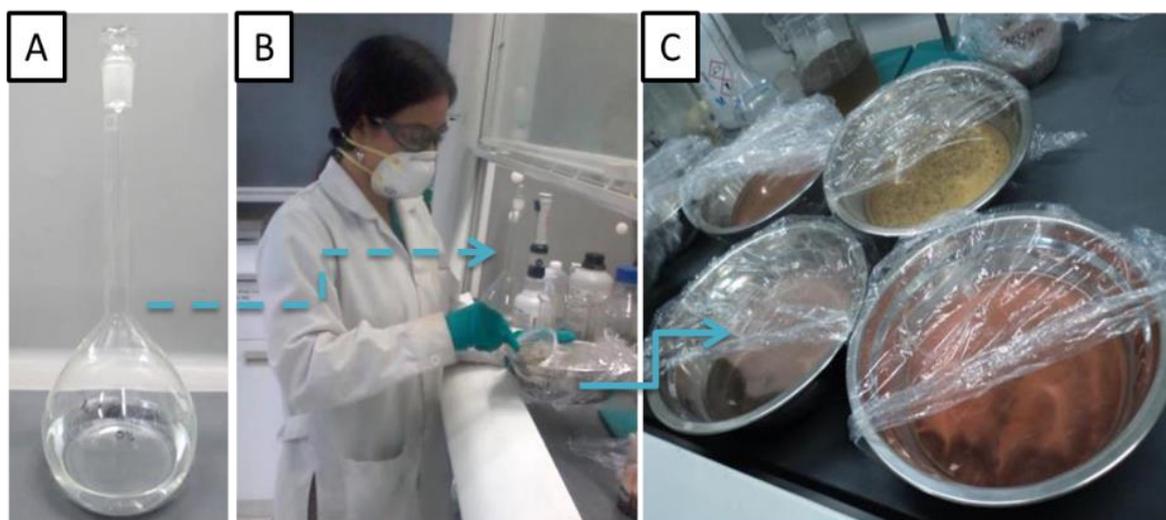


Figura 3. 23. A) Ácido acético concentrado al 5%, B) Incorporación de ácido acético 5% a los sedimentos y C) Muestras en proceso de bañado con ácido acético al 5%.

vi. SECADO

El secado de la muestra es realizado después de esta haber sido bañada en ácido acético y lavado en agua, colocando los sedimentos en la estufa a una temperatura no mayor a 50 ° C por un promedio de 24 horas Figura 3.24, al terminar el secado se pesa.



Figura 3. 24. A) Secado de la muestra en estufa eléctrica a Temperatura $\leq 50^{\circ}\text{C}$: B) Muestra extraída de la estufa, codificada y pesada con balanza de miligramos.

vii. USO DEL LÍQUIDO PESADO

Para poder separar los minerales pesados de los ligeros es necesario realizar la precipitación de los pesados en politungstato de sodio (“líquido pesado”), para que los minerales con densidades mayores a 2.87 g/cm^3 sean separados (según tabla de Boenigk, 1983). Primero se disuelve el Politungstato de Sodio “PS” ($\rho = 5.47 \text{ g/cm}^3$ sólida) en agua ionizada, para obtener la densidad de 2.87 g/cm^3 medida con el densímetro (Fig. 3.25.C), aconsejable es para 3 kg de politungstato de sodio emplear 1 litro de agua ionizada.



Figura 3. 25. A) Representación del Politungstato de sodio en fase sólida, B) PS preparado y C) medida de la densidad de Politungstato de sodio (PS).

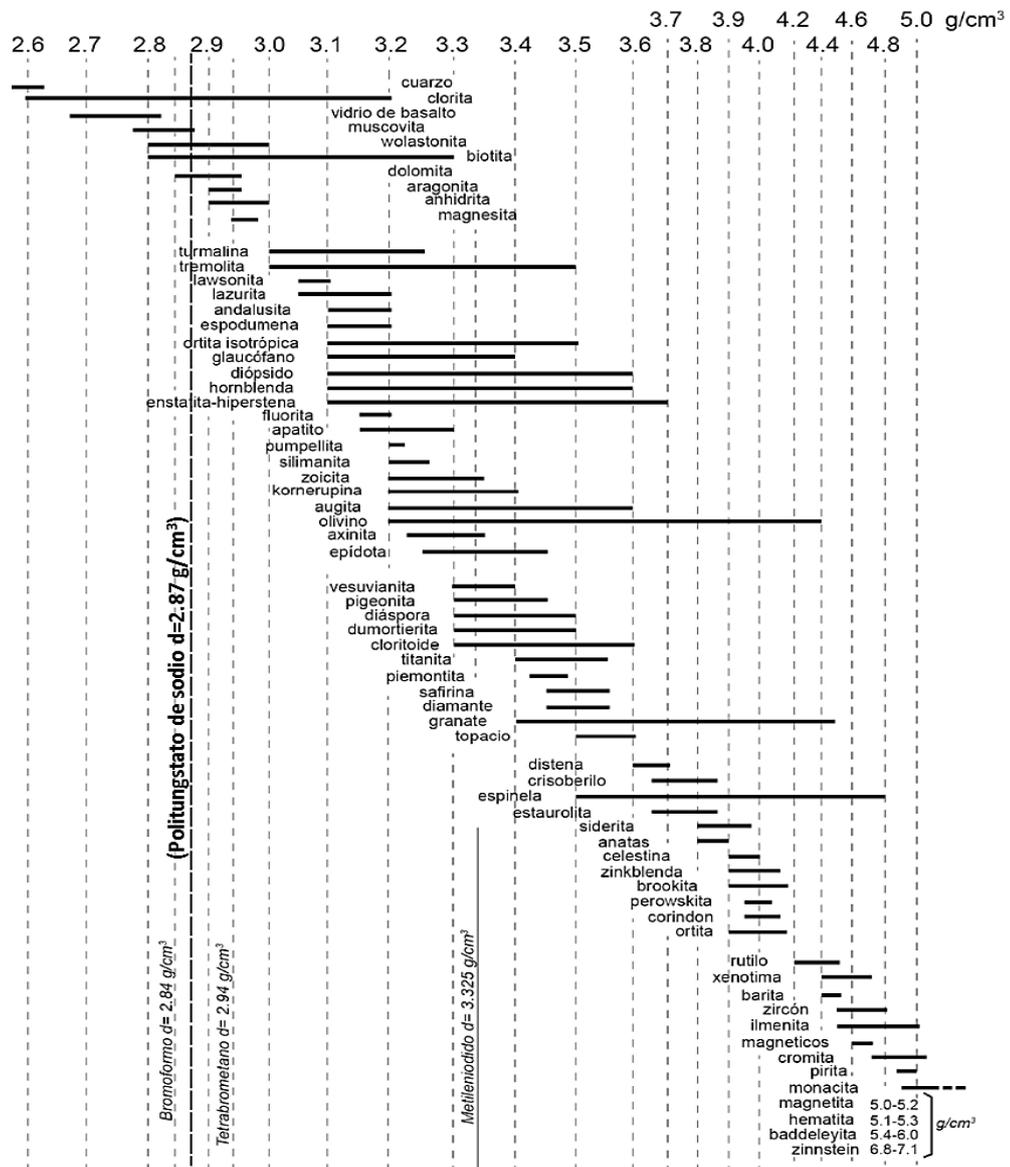


Figura 3. 26. Densidades de los minerales (g/cm^3) y líquidos pesados comúnmente usados (vertical) que tradicionalmente se usaron para separar los minerales (tomado de Boenigk, 1983).

Los pasos para realizar la obtención de los minerales pesados se organizan del siguiente modo:

1. En el laboratorio, se alistará un embudo de separación el cual está soportado en un “soporte universal” (figura 3.27A y 3.27B), el montaje del embudo de decantación se realiza con la ayuda de un aro, sujeto a un “soporte universal”. Se debe instalar debajo del embudo de decantación, dos embudos de vástagos apoyados por dos aros (ajustado al soporte universal).
2. Cada embudo de vástago tendrá un filtro como en la figura 3.27B, uno de ellos tendrá un papel-filtro de $\sim 8 \mu\text{m}$ de porosidad para atrapar los minerales pesados, y el otro tendrá un papel-filtro de $\sim 20 \mu\text{m}$ de porosidad para los minerales ligeros. El líquido pesado fluirá a través del filtro $\sim 8 \mu\text{m}$ hasta el recipiente que está debajo de este embudo. el embudo con el papel de filtro $\sim 20 \mu\text{m}$ receptiona el líquido pesado con los minerales ligeros y el líquido pesado fluye a través del filtro hasta un recipiente debajo del embudo con vástago.

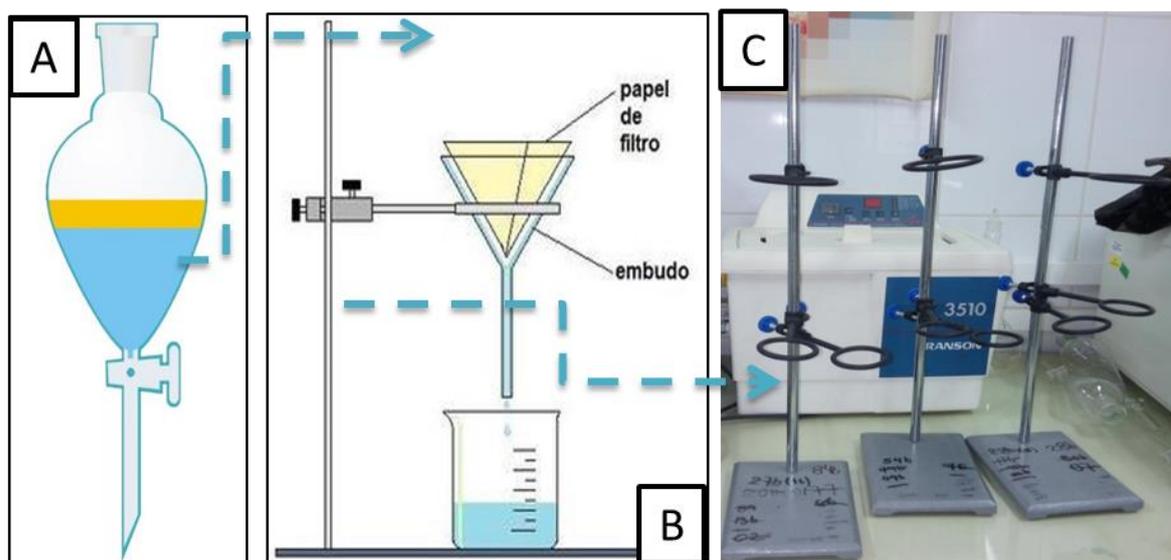


Figura 3. 27. Embudo de decantación y embudo de vástago con papel filtro (A y B), soporte universal (C).

3. Se añadirá $\sim 150 - 200 \text{ ml}$ de politungstato de sodio a 2.87 g/cm^3 dentro del embudo de decantación con la llave del embudo cerrada (Figura 3.28B). Después, dentro del embudo de separación se añadirá entre 40 a 80 g de muestra (después de haberle aplicado el ácido acético y el secado).

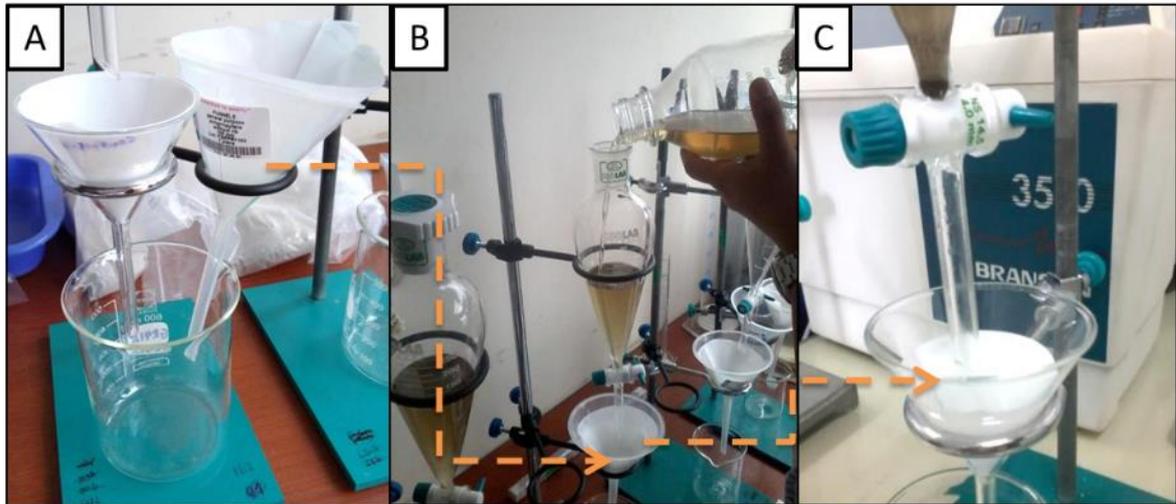


Figura 3. 28. A) Papel filtro ($\sim 20 \mu\text{m}$ y $\sim 40 \mu\text{m}$) ubicado en los embudos para el filtrado de líquido pesado; B) Líquido pesado en el embudo de decantación y C) llave cerrada.

4. El embudo de decantación conteniendo el politungstato de sodio y el sedimento debe ser agitado gentilmente, de modo que se provoque la decantación rápida de los minerales más pesados y flotación de los más ligeros.



Figura 3. 29. Proceso de separación de minerales pesados usando politungstato de sodio. Laboratorio de Preparación mecánica de muestras, INGEMMET.

5. 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 $\sim 8 \mu\text{m}$ capturará los minerales pesados (Figura 3.30A). El politungstato de sodio se filtrará y se ira a un recipiente abajo del embudo.

6. Cuando no haya más minerales pesados que evacuar, el embudo de decantación será girado gentilmente a su derecha al otro embudo con vástago y se evacuará la fracción ligera sobre el filtro $\sim 40 \mu\text{m}$. Los minerales ligeros estarán atrapados en el filtro, y el

politungstato de sodio será filtrado a un recipiente debajo del embudo de decantación (Figura 3.30 B).

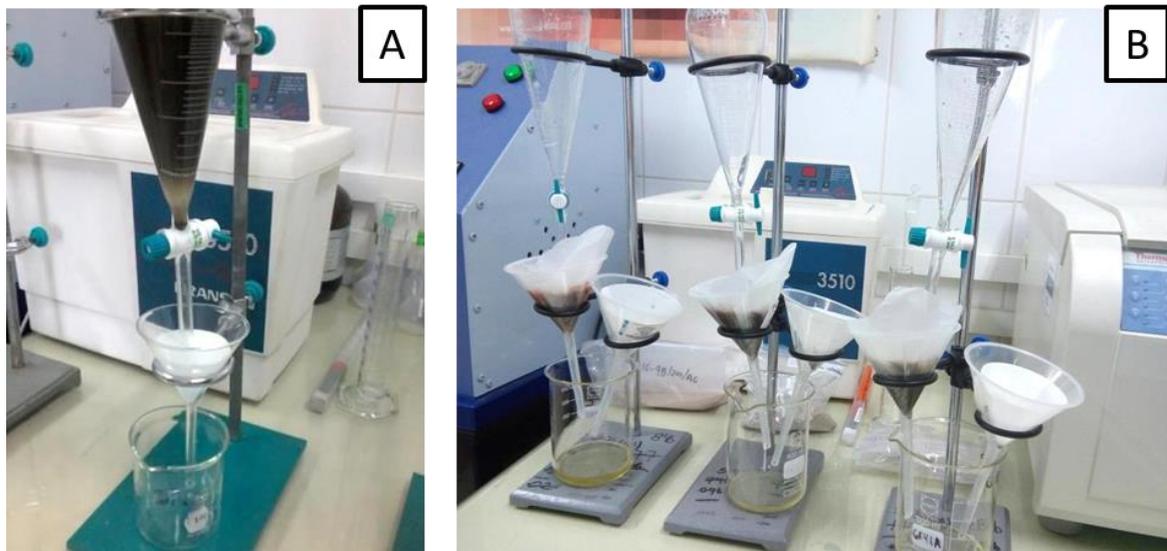


Figura 3. 30. A) Muestra en proceso de decantación de minerales densos dentro de embudo de separación y B) Filtrado de líquido pesado y retención de minerales pesados y ligeros.

Después del proceso de separación de minerales pesados se recupera lo máximo posible del 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:

1. 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 moto 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.
2. Por otro lado, el papel-filtro de $\sim 20 \mu\text{m}$ conteniendo los minerales pesados, serán bañados con agua calentada, hasta limpiar los granos de minerales pesados que tengan adheridos el líquido pesado, 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.
3. Es necesario reciclar el politungstato de sodio, usamos las probetas graduadas y se inserta ahí la mezcla de agua y los residuos de Politungstato de sodio para provocar la decantación de posibles granos y/o arcilla que hayan sido filtrados. El líquido se vierte en

un recipiente diferente y se posiciona en una cocinilla para provocar la evaporación a 50°C (máximo) hasta tener una concentración previa y recuperar el politungstato de sodio. Esta evaporación puede durar hasta 3 días.

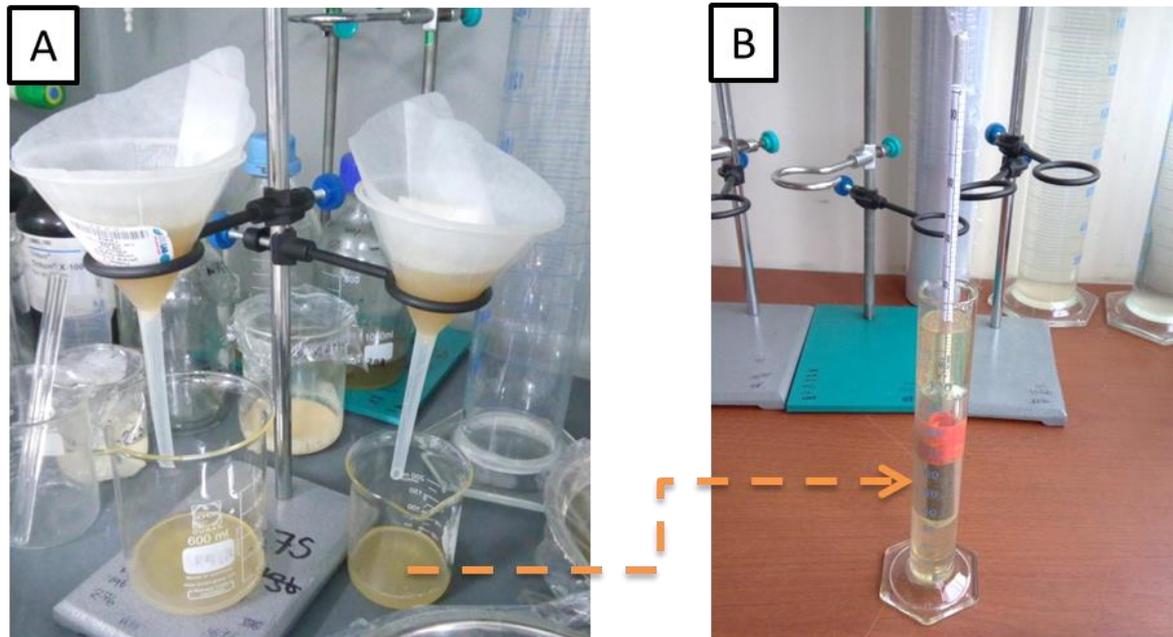


Figura 3. 31. Proceso de recuperación de líquido pesado (A) y medida de densidad (B).

Podemos continuar con la preparación de la muestra de minerales pesados simultáneamente a la evaporación y recuperación del politungstato de sodio. Además, los minerales obtenidos en la decantación, lavados, deben ser secados en el horno a ~50°C como máximo por ~12 horas. Posteriormente se guarda en un recipiente codificado y la fracción pesada estará lista para ser preparada, como lo muestra la figura 3.32.



Figura 3. 32. Frascos codificados conteniendo los minerales pesados y minerales ligeros.

viii. PREPARACIÓN DE SLIDES O LÁMINAS CON MINERALES PESADOS

El objetivo final de la preparación de muestras es articular los minerales pesados en un slide de vidrio, para que cada mineral pesado sea identificado, contado y/o recogido, siguiendo 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 frotar con un imán (envuelto en papel) de modo que éste separe los minerales más magnéticos/ferrosos del resto de la población de los minerales pesados (usualmente esos minerales magnéticos/ferrosos suelen ser los más oscuros y pueden dificultar el conteo de los minerales pesados en el slide), codificándose (por ejemplo, GR41A-16-120/150-75 μ m/Ac/FER) y almacenándose aparte para estudios posteriores.

De la muestra que no es magnética y aun yace en la hoja bond, se pesa ~20 mg y estos sedimentos se colocarán dentro de un embudo de vástago y después sobre un papel (de preferencia graso), para luego ser dividido en 4 partes iguales (figura 3.34) 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.

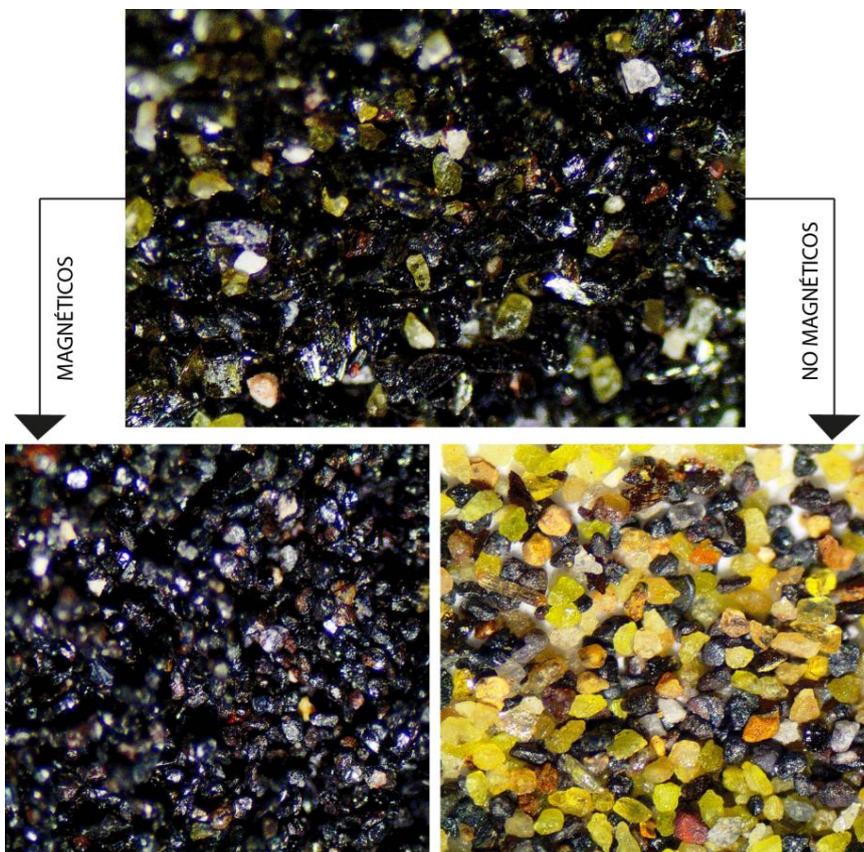


Figura 3. 33. Minerales pesados divididos en magnéticos y no magnéticos (vistos en microscopio estereoscópico), tamaño de los minerales de 75 a 150 μ m.

Se inserta la porción de ~5 mg en el slide para estudiar nuestros minerales pesados. Paralelamente, se recomienda forrar la coccinilla de laboratorio con papel aluminio y calentarla a ~70 °C. Sobre ésta se pone los slides de vidrio, 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.

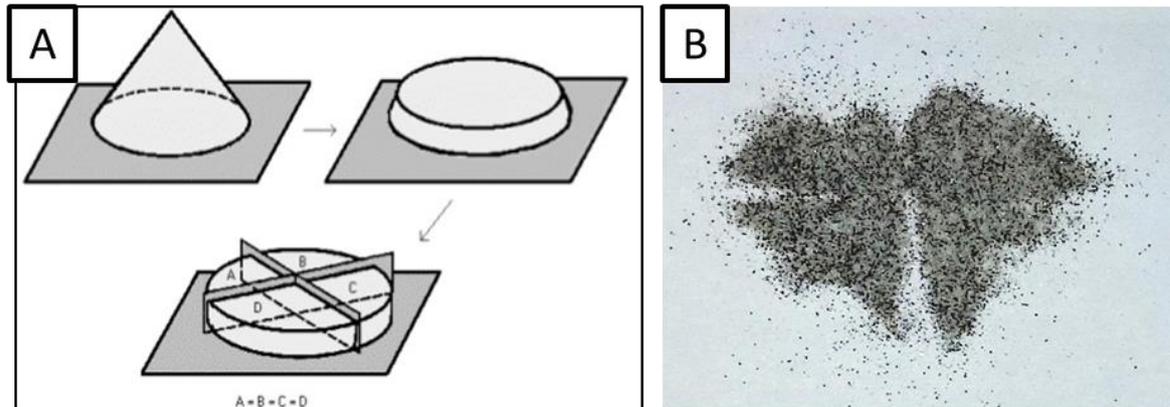


Figura 3. 34. A y B) Cuarteo de la muestra de minerales pesados, realizado para asegurar homogeneidad de granos.

Una vez que esté caliente la resina y las burbujas eliminadas, se vacía la porción de ~5 mg de minerales pesados dispersándose con una aguja metálica por todo el slide. Aún caliente, los minerales y el epoxy son cubiertos por un cubre-slide y después se coloca su código de muestra con un plumón indeleble a un lado del slide de vidrio (figura 3.35). Por lo tanto, la muestra está lista para empezar el conteo de minerales pesados con el microscopio petrográfico.

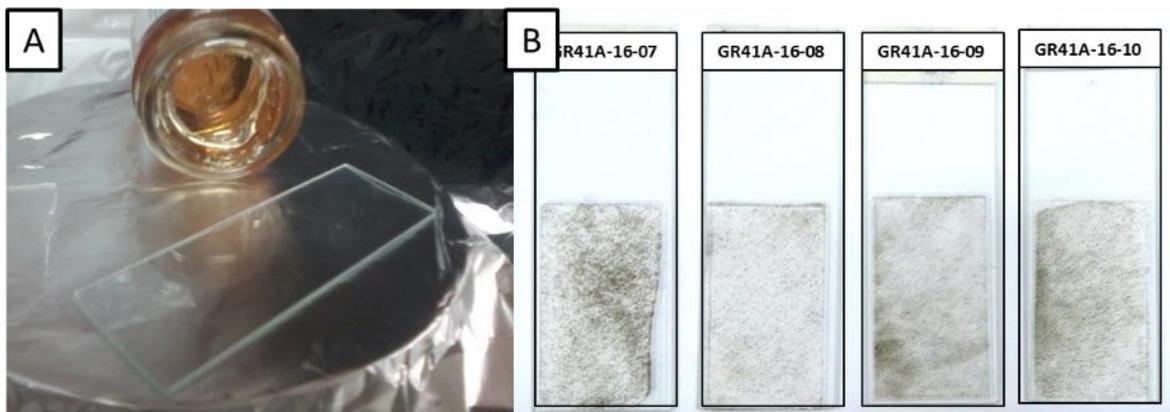


Figura 3. 35. A) Resina calentada a ~70°C y portaobjetos, para ser usada en la preparación de slides con granos de minerales pesados y B) Slides conteniendo minerales pesados para contarlos en el microscopio petrográfico.

viii. RECONOCIMIENTO DE MINERALES PESADOS

Para reconocer los minerales pesados existen diferentes técnicas y para la presente tesis se ha realizado la observación bajo el microscopio de luz polarizada en nicoles paralelos y cruzados (petrografía) que permite reconocer los tipos de minerales que tenemos en una muestra, debido a que tienen propiedades ópticas como color, pleocroísmo, ángulo de extinción, birrefringencia, entre otras; usando para ello manuales de identificación de minerales pesados como “Heavy Minerals in Colour” o “Minerales Pesados en Color” de Mange & Maurer (1992), “Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis” o “Corrosión de minerales pesados durante la meteorización y diagénesis: un catálogo para análisis óptico” de Ando et al. (2012), entre otros que aplican las propiedades ópticas para la identificación de los minerales pesados.

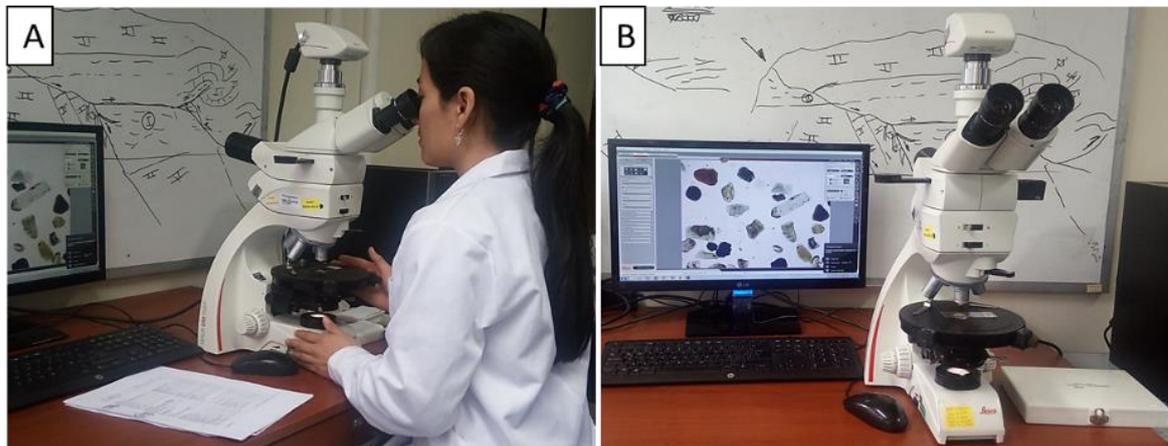


Figura 3. 36. A y B) Identificación de minerales pesados en microscopio petrográfico.

3.5 TRATAMIENTO DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para tratar los datos se ha levantado columnas estratigráficas determinando sus facies sedimentarias de acuerdo a sus características litológicas y texturales observadas y descritas en campo, se presentan a manera de figuras con detalle de su escala, litología, estructuras y facies sedimentarias, análisis composicional de conglomerados.

Para el análisis de los minerales pesados se identifica, clasifica y cuenta de acuerdo a las características observables de los espectros en los slides preparados y se presenta en diagramas estadísticos que muestran la cantidad por tipo de grano identificado en el microscopio petrográfico de luz polarizada tal como en la Figura 3.37, de todas las muestras de la Formación Moquegua Superior, Formación Huaylillas, Formación Millo y potenciales rocas pre-Cenozoico se ha realizado el Análisis de Minerales Pesados (HMA).

El conteo modal de granos QFL (Dickinson, 1970) en determinadas secciones delgadas se realiza siguiendo el método Gazzi-Dickinson y se usa sólo como un método complementario en la presente investigación para conocer la procedencia sedimentaria de las unidades Moquegua, Huaylillas y Millo, el conteo de granos de las secciones delgadas se insertan en una tabla y se plotean en diagramas ternarios que permiten fijar el ambiente de procedencia de estas rocas.

Para la presentación de resultados se usan tablas porcentuales representando el valor de los minerales pesados identificados en las muestras, diagramas ternarios (QFL) de Dickinson (1970, 1985), así como un modelo de procedencia representativo de la evolución del área de investigación, que se ha obtenido según los ratios y análisis de minerales pesados, tomando el cuenta la correlación de columnas estratigráficas realizadas.

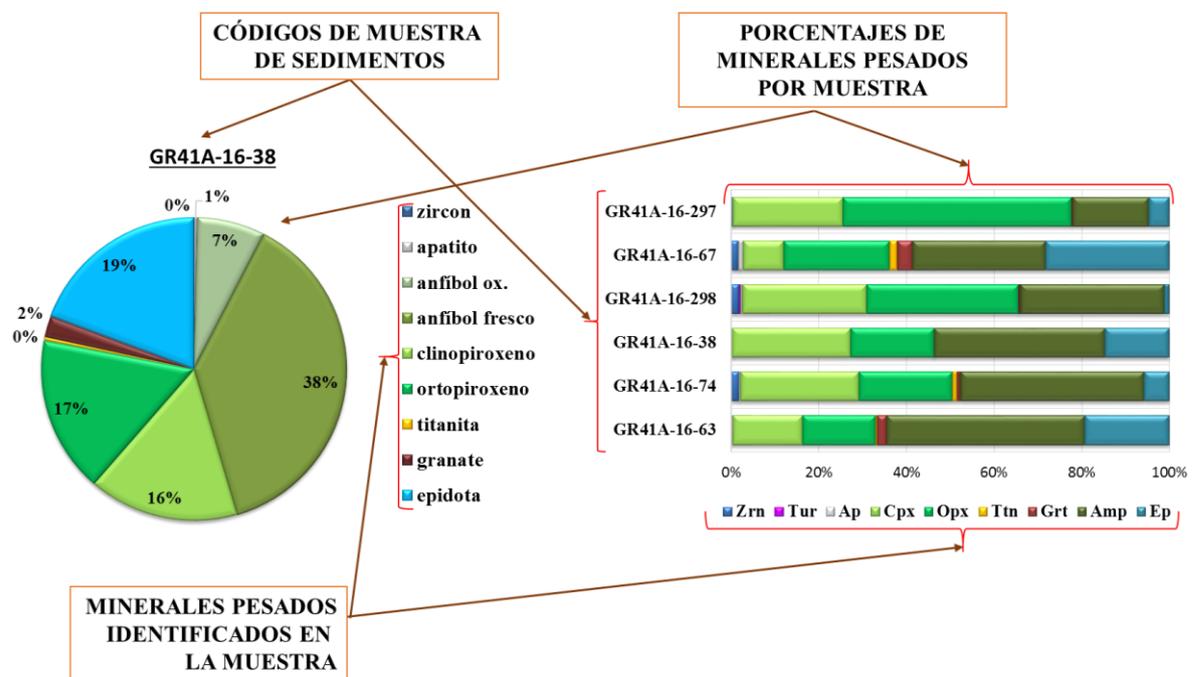


Figura 3. 37. Gráficos representativos del contenido porcentual de minerales pesados por muestra analizada, exhibidos detalladamente en Capítulo IV.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se muestra el análisis de muestras colectadas de las principales columnas estratigráficas desarrolladas en el área de estudio, cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v), así como un análisis de facies de las sucesiones sedimentarias dentro de las unidades Moquegua, Huaylillas y Millo con la finalidad de asociar e interpretar su ambiente depositacional. Las unidades mencionadas tienen estratos de rocas clásticas que permite extraer muestras para el análisis de minerales pesados, las mismas que complementadas con la interpretación sedimentológica de las columnas desarrolladas brindan información particular en la determinación de la procedencia de estos sedimentos.

En la Figura 4.1 se muestra en color amarillo las principales unidades Cenozoicas con componente clástico en el área de trabajo, tomando la geología base de Monge & Cervantes (2000) y Sánchez et al. (2000), los símbolos color rojo hacen referencia a la ubicación de las columnas estratigráficas levantadas en afloramientos rocosos, que son descritos a continuación a lo largo de este capítulo y los símbolos color azul representan los pozos de perforación del Proyecto Especial Tacna.

Las columnas estratigráficas descritas son resumidas y muestran la litología, principales estructuras sedimentarias, facies representativas, asociación de secuencias, ubicación espacial de la muestras para análisis de minerales pesados, orientación preferente de las paleocorrientes y análisis composicional de clastos que se realizó en campo con descripciones macroscópicas de clastos a lo largo de un metro de conglomerados siguiendo el método de Dunkl (2009). En la segunda parte del capítulo se presenta los resultados del conteo de minerales pesados en las unidades de estudio y en las unidades pre-cenozoicas con preferencia a ser rocas fuentes.

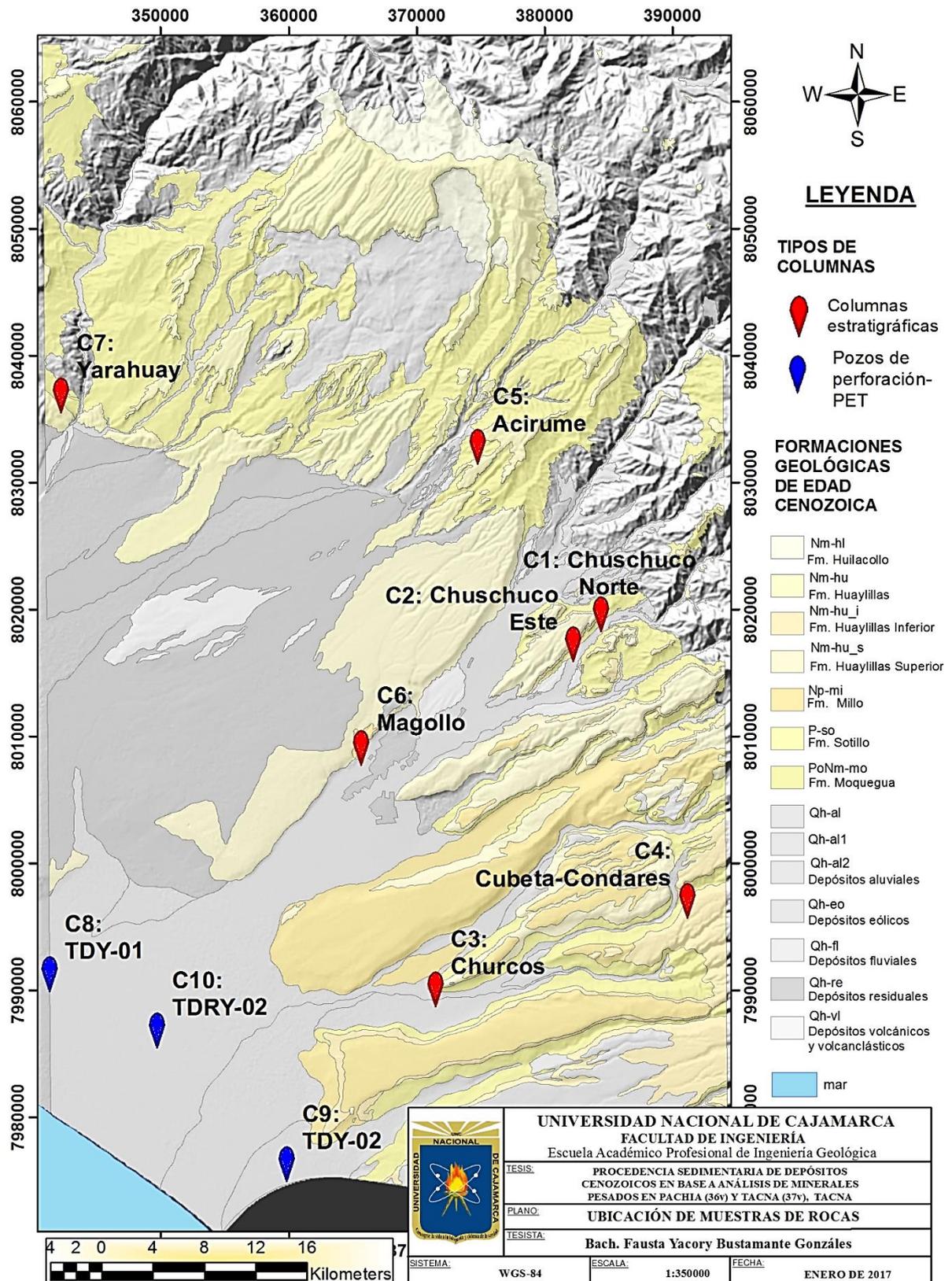


Figura 4. 1. Columnas estratigráficas ubicadas en un plano referencial de las rocas cenozoicas en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v). Tomado de Monge & Cervantes (2000) y Sánchez et al. (2000).

En la figura 4.2 se presenta un plano con la ubicación de las muestras que están señaladas en la Tabla 4.1, dispuestas sobre edades geológicas: Precámbrico, Paleozoico, Mesozoico, Cenozoico y Cuaternario.

Tabla 4. 1. Muestras se rocas sedimentarias para análisis de minerales pesados (n=41).

COD_MUESTRAS	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	LITOLOGÍA	TIPO	LOCALIDAD	CUADRÁNGULO	UTM (ESTE)	UTM (NORTE)	UTM (COTA)
★ GR41A-16-01	Moquegua superior B	Arenisca	Afloramiento rocoso	Chuscuco este	Pachía (36v)	382083	8017333	1206
★ GR41A-16-02	Moquegua superior B	Arenisca	Afloramiento rocoso	Chuscuco este	Pachía (36v)	382071	8017374	1216
★ GR41A-16-05	Huaylillas	Arenisca	Afloramiento rocoso	Chuscuco nor-este	Pachía (36v)	384168	8019578	1615
★ GR41A-16-06	Huaylillas	Litoarenita	Afloramiento rocoso	Chuscuco nor-este	Pachía (36v)	384280	8019635	1579
★ GR41A-16-07	Moquegua superior B	Arenisca cuarzosa	Afloramiento rocoso	Chuscuco nor-este	Pachía (36v)	384631	8019835	1489
★ GR41A-16-08	Moquegua superior A	Arenisca arcósica	Afloramiento rocoso	Chuscuco nor-este	Pachía (36v)	384795	8020038	1485
★ GR41A-16-09	Moquegua superior A	Arenisca cuarzosa	Afloramiento rocoso	Los Churcos	Tacna (37v)	371302	7990083	362
★ GR41A-16-10	Moquegua superior A	Arenisca	Afloramiento rocoso	Los Churcos	Tacna (37v)	371381	7990112	387
★ GR41A-16-13	Huaylillas	Arenisca	Afloramiento rocoso	Los Churcos	Tacna (37v)	371855	7990275	528
★ GR41A-16-38	Millo	Arenisca	Afloramiento rocoso	Magollo	Tacna (37v)	366377	8009915	721
★ GR41A-16-57	Huaylillas	Arcosa	Afloramiento rocoso	Yarahuay	Pachía (36v)	342371	8036355	774
★ GR41A-16-59	Millo	Litoarenita	Afloramiento rocoso	Yarahuay	Pachía (36v)	342198	8036049	947
★ GR41A-16-63	Millo	Litoarenita	Pozo de perforación	TDRY-02, La Yarada	Tacna (37v)	347512	7984881	51.5
★ GR41A-16-64	Moquegua superior B	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDRY-02, La Yarada	Tacna (37v)	347512	7984881	231
★ GR41A-16-65	Moquegua superior A	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDRY-02, La Yarada	Tacna (37v)	347512	7984881	320
★ GR41A-16-66	Moquegua superior A	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDRY-02, La Yarada	Tacna (37v)	347512	7984881	365
★ GR41A-16-67	Millo	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDY-01, Los Olivos	Tacna (37v)	338663	7985951	47
★ GR41A-16-68	Huaylillas	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDY-01, Los Olivos	Tacna (37v)	338663	7985951	144
★ GR41A-16-69	Moquegua superior B	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDY-01, Los Olivos	Tacna (37v)	338663	7985951	165
★ GR41A-16-70	Moquegua superior B	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDY-01, Los Olivos	Tacna (37v)	338663	7985951	189
★ GR41A-16-71	Moquegua superior A	Litoarenita feldespática	Pozo de perforación	TDY-01, Los Olivos	Tacna (37v)	338663	7985951	278
★ GR41A-16-72	Huaylillas	areniscas	Pozo de perforación	TDY-02, santa rosa	Tacna (37v)	359553	7977930	138
★ GR41A-16-73	Moquegua superior B	arenisca	Pozo de perforación	TDY-02, santa rosa	Tacna (37v)	359553	7977930	256
★ GR41A-16-74	Millo	arenisca	Pozo de perforación	TDY-02, santa rosa	Tacna (37v)	359553	7977930	70
★ GR41A-16-75	Moquegua superior A	arenisca	Pozo de perforación	TDY-02, santa rosa	Tacna (37v)	359553	7977930	356
★ GR41A-16-76	Huaylillas	areniscas	Pozo de perforación	TDY-02, santa rosa	Tacna (37v)	359553	7977930	174
★ GR41A-16-176	Moquegua superior A	Areniscas	Afloramiento rocoso	Chuscuco este	Pachía (36v)	385785	8020501	1465
★ GR41A-16-177	Moquegua superior A	Areniscas	Afloramiento rocoso	Chuscuco este	Pachía (36v)	385694	8020138	1386
★ GR41A-16-261	Moquegua superior A	Arenisca	Afloramiento rocoso	Cubeta	Tacna (37v)	390953	7997713	969
★ GR41A-16-263	Moquegua superior B	Arenisca	Afloramiento rocoso	Cubeta	Tacna (37v)	391077	7997522	1064
★ GR41A-16-269	Matalaque	Toba de cristales	Afloramiento rocoso	Huacano	Pachía (36v)	389105	8054823	3261
★ GR41A-16-270	Milonita	Milonita	Afloramiento rocoso	Huacano	Pachía (36v)	387793	8053537	3150
★ GR41A-16-290	Granito	Granito	Afloramiento rocoso	Huacano	Pachía (36v)	381437	8051540	3036
★ GR41A-16-292	Moquegua superior A	Arenisca	Afloramiento rocoso	Acirume	Pachía (36v)	375635	8035455	1733
★ GR41A-16-294	Moquegua superior B	Arenisca arcósica	Afloramiento rocoso	Acirume	Pachía (36v)	375847	8034954	1964
★ GR41A-16-296	Toquepala	Toba	Afloramiento rocoso	Acirume	Pachía (36v)	375708	8035995	1736
★ GR41A-16-297	Millo	Litoarenita	Afloramiento rocoso	Magollo	Tacna (37v)	361798	8005110	539
★ GR41A-16-298	Millo	Arenisca	Afloramiento rocoso	Magollo	Tacna (37v)	362486	8005419	501
★ GR41A-16-301	Yarabamba	Granodiorita	Afloramiento rocoso	Tres cruces	Pachía (36v)	388137	8026316	1813
★ GR41A-16-302	Yarabamba	Tonalita	Afloramiento rocoso	La descubridora	Pachía (36v)	391226	8027875	2139
★ GR41A-16-303	Chocolate	Andesita	Afloramiento rocoso	Huañacahua	Palca (36x)	403713	8031887	3581

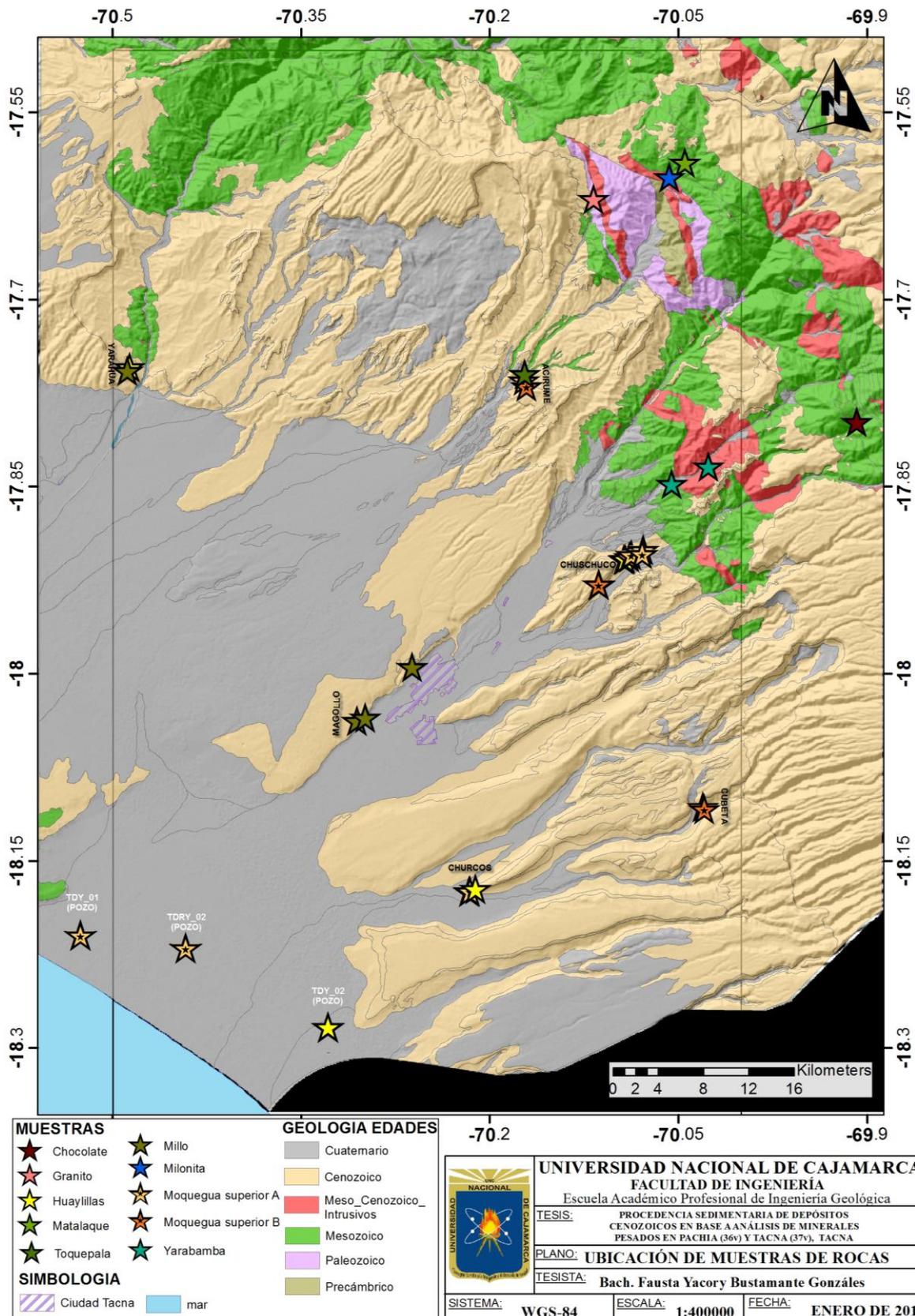


Figura 4. 2. Plano que muestra la ubicación referencial de muestras (n=41) para análisis de minerales pesados.

La siguiente imagen muestra en una vista tridimensional la ubicación de las columnas estratigráficas desarrolladas en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v), el modelo digital de terreno es referencial y abarca los dos mencionados cuadrángulos, las líneas color negro representan las fallas geológicas tomadas esencialmente de Flores et al. (2005), quienes describen principales sistemas de fallas en la cuenca antearco y Cordillera Occidental del sur de Perú de acuerdo a la configuración del relieve.

Las columnas estratigráficas desarrolladas en superficie (C1 a C7) integradas con los pozos perforados (C8: TDY-01, C9: TDRY-02 y C10:TDY-02) caracterizan toda el área, la litología y su principales facies se describen más adelante una a una para asimilar a un modelo de sedimentación específica.

Las muestras ubicadas espacialmente en cada columna estratigráfica se representan con una estrella de color representando la unidad y secuencia de la cual ha sido obtenida y su nombre caracterizado por sus códigos (p. ej. GR41A-16-01), y para mayor referencia se puede buscar en la tabla 4.1 que contiene los detalles de código de muestra, unidad lito-estratigráfica, litología, coordenadas este, norte y cota, tipo de muestra y localidad de recolección.

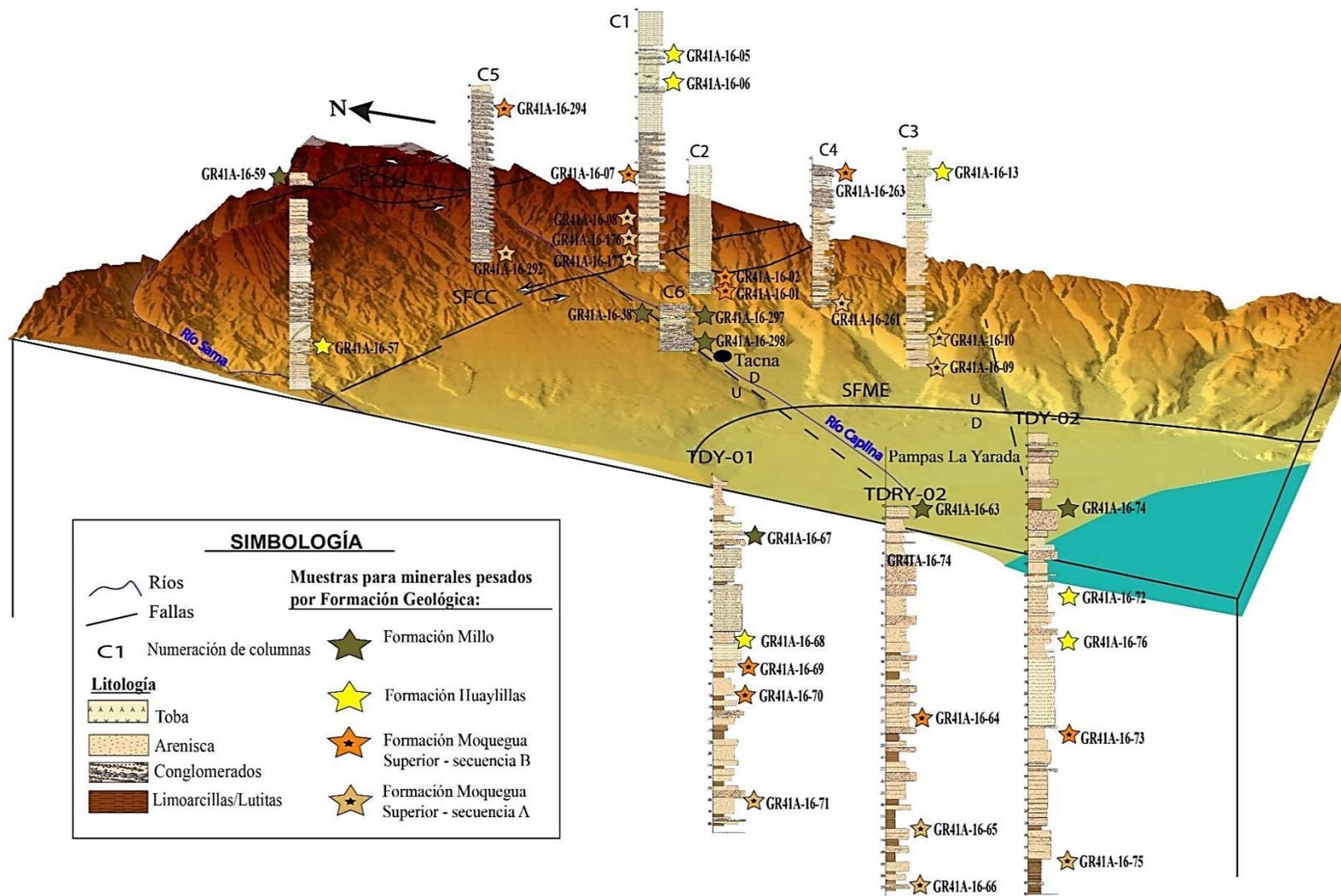


Figura 4. 3. Ubicación espacial de las columnas estratigráficas elaboradas en Pachía (36v) y Tacna (37v). Los registros de los pozos TDY-01, TDRY-02 y TDY-02 son sub-superficiales, mientras el resto de columnas corresponden a afloramientos.

4.1.1 ANÁLISIS DE FACIES Y MINERALES PESADOS

4.1.1.1 COLUMNA N°1. LADERA NOR-ESTE DE CERRO CHUSCHUCO

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 385694	N: 8020138	COTA: 1386msnm	Moquegua, Huaylillas

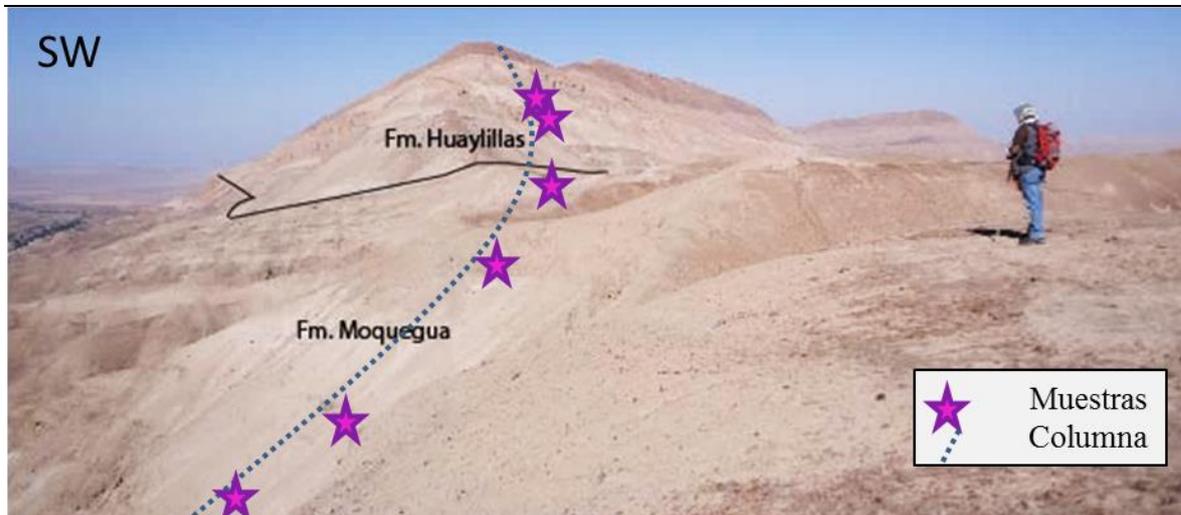


Figura 4. 4. Vista de Cerro Chuschuco, lugar de desarrollo de columna N°1.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~85 m). En la base presenta conglomerados polimícticos (hasta 60% de granodioritas y 20% de andesitas) clasto soportados, subredondeados, con matriz de arenisca de grano medio a grueso, a veces tobácea (facies $Gm+Gh$), intercalados repetitivamente con estratos de areniscas masivas y laminadas de grano medio a grueso, con matriz tobácea gris blanquecina hasta la parte superior (Figura 4.5a). Contiene granos de cuarzo, plagioclasa y fragmentos de granodioritas (facies $Sh+Sl+Sm$), además los minerales pesados de mayor porcentaje ($\pm 50\%$) identificados en las muestras GR41A-16-176, GR41A-16-177 y GR41A-16-08 son los anfíboles y clinopiroxenos (ver más detalle en HMA de esta columna).

Secuencia B (~43 m). Se observa estratos de conglomerados grano-decrecientes (facies $Gh+Gcm+Gmg$) conteniendo clastos de diámetro promedio ~15 cm. de composición riolítica ($\pm 50\%$), andesítica ($\pm 45\%$), cherts y pómez. Se observa además canales a manera de interbarras, compuestas de areniscas grises (facies $Sh+Sm+Sl$) de grano medio a grueso, tobáceas, conteniendo granos de cuarzo, plagioclasas, ferromagnesianos y óxidos de hierro (Figura 4.5b), en la muestra GR41A.16-07 los anfíboles presentan más del 50%.

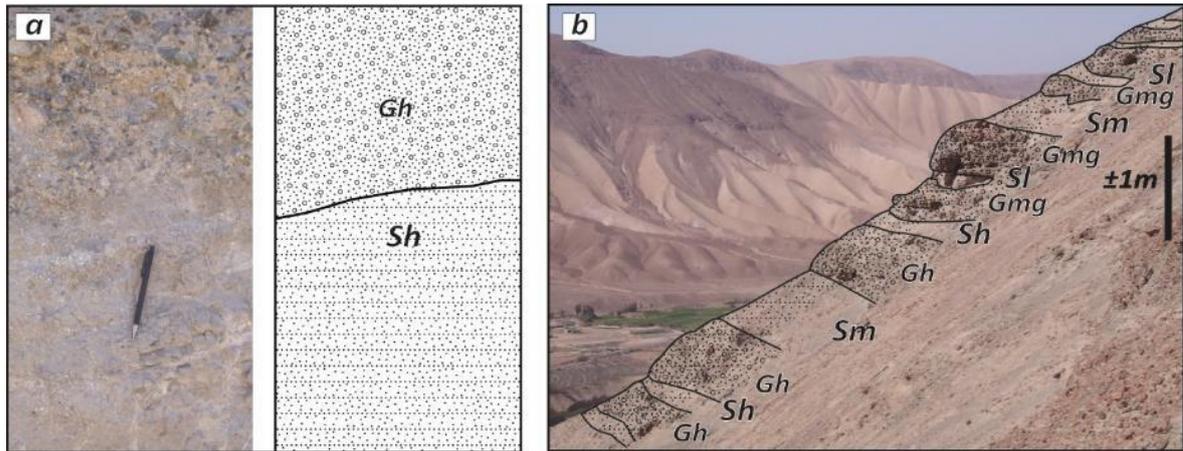


Figura 4. 5. Facies sedimentarias en las secuencias A y B en Chuscuco Norte.

Secuencia a (~40m). Se trata de un paquete de toba lapilli (*mLT-p,l,v*) con fragmentos de pómez de diámetro promedio 3cm, andesitas, chert de hasta 20 cm de diámetro, granodioritas, así como cristales de cuarzo, biotitas y feldespatos.

Secuencia b (52m). Exhibe en la base paquetes de conglomerados polimícticos, con clastos de diámetro promedio 15 cm y máximo 50cm (facies *Gcm + Gh*) el 50% de composición riolítica ($\pm 50\%$), riolita ($\pm 20\%$) y granodiorita ($\pm 20\%$) en matriz de arenisca arcósica grano grueso, superpuesta por areniscas con laminación oblicua (facies *Sl*) y areniscas tobáceas (facies *Sh + Sm*) con canales de conglomerados (facies *Gmg*), así como sets de ~30 cm de conglomerados (facies *Gmg*) grano-decrecientes a areniscas de grano grueso compuestas de cuarzo, líticos y matriz tobácea (facies *Sl + Sh*) observable en la Figura 4.7a, colmatando la secuencia niveles de tobas riolíticas con pómez intercalados con areniscas tobáceas con clastos de andesitas ϕ prom. 3cm (*mLT-p,l*).

Secuencia c (32m). Esta secuencia pone a la vista tobas de cristales masivas compactas de composición riolítica, color rosáceo con abundante cuarzo, sanidina, biotita y pómez esporádicos como se muestra en la Figura 4.7b, (facies *mLT-cr,p,l*), con aparente orientación de flujo N95/30SW.

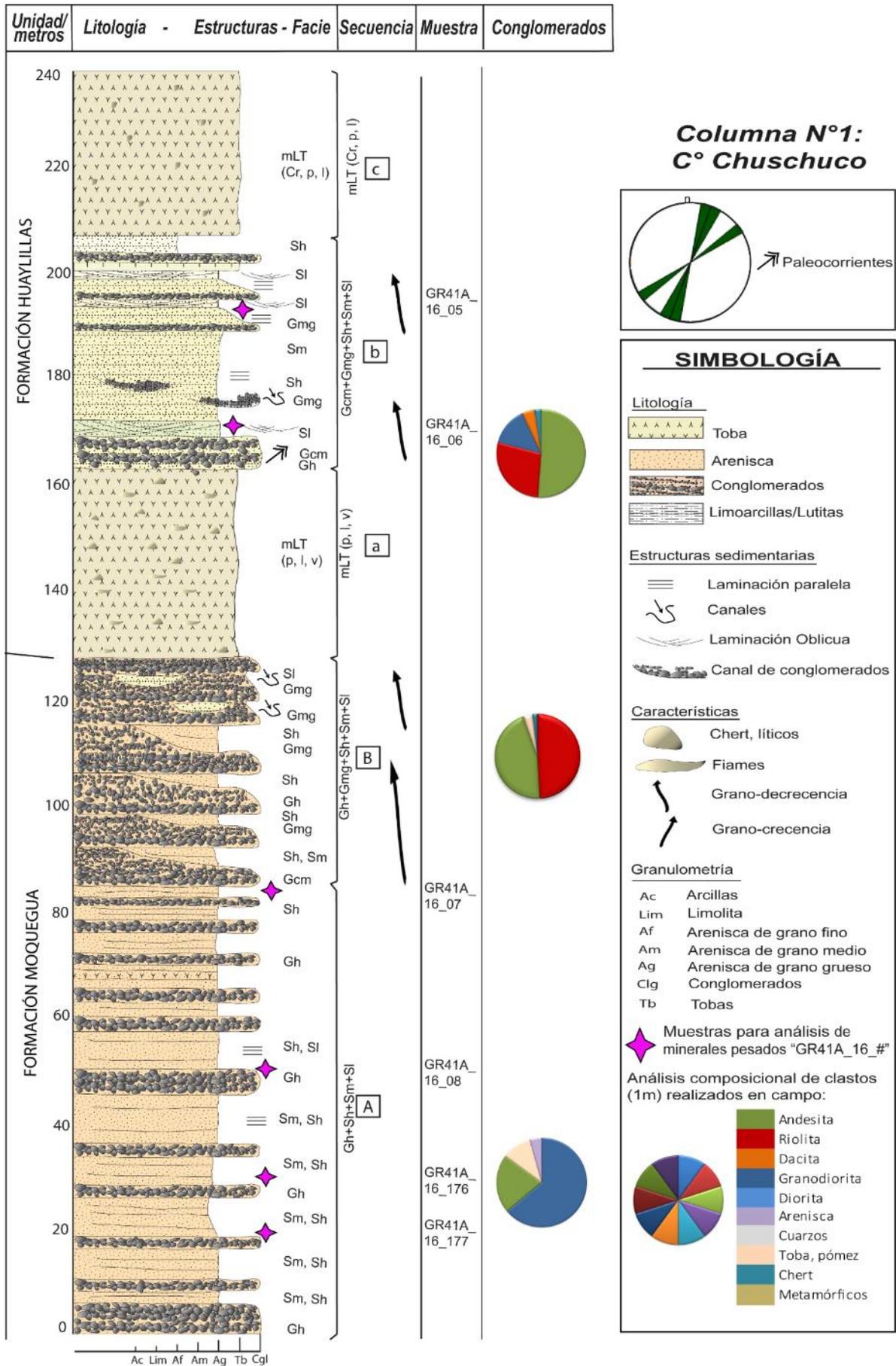


Figura 4. 6. En página anterior: Columna estratigráfica resumida de Cerro Chuscuco Norte.

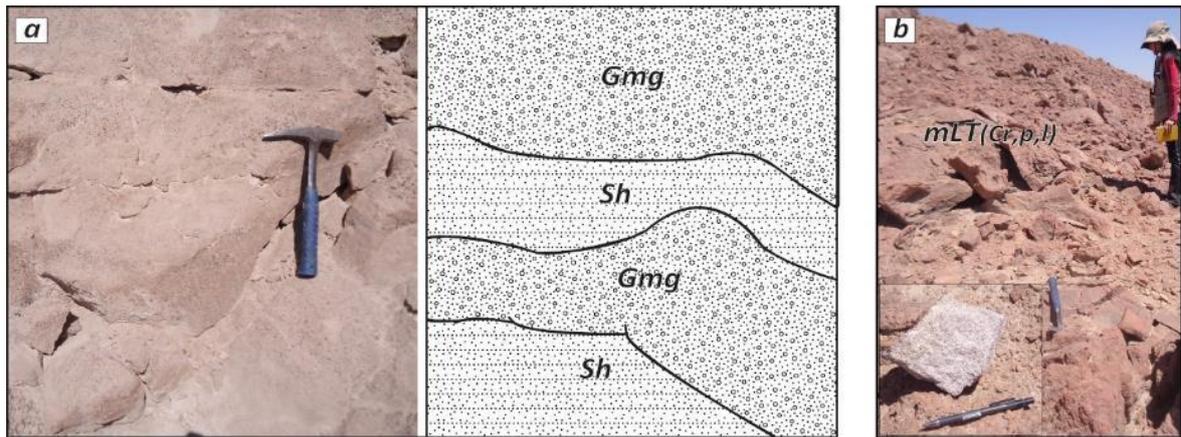


Figura 4. 7. En a y b se muestran facies sedimentarias de las secuencias b y c de la Fm. Huaylillas.

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

La asociación de facies (AF) en las secuencias A y B de la Formación Moquegua (o Formación Moquegua superior) ha dado argumentos para elaborar y asociar elementos arquitecturales de cuerpos tabulares de conglomerados y lentes de arenisca (elementos $GB+SB+CH$), y estos sugieren en esta área el ambiente de depósito de la Fm. Moquegua es aluvial-fluvial. El tamaño promedio de los clastos es configurado por alta energía del sistema y la intercalación con areniscas que representa temporadas de baja estabilidad relativa podrían reflejar constantes elevaciones de la zona de aporte y/o aumento del régimen fluvial (cf. Miall, 1996), así como la imbricación de clastos con orientación de flujo al SO indica que la zona de aporte está al NE de la cuenca (i.e. Cordillera Occidental); Jacay et al. 2004 reconoce en esta misma área facies de ríos proximales en sus niveles superiores y la influencia volcánica hacia el tope de esta unidad como transición con la Formación Huaylillas.

El análisis de las Secuencias a, b y c sugieren dos principales episodios volcánicos interrumpidos por un periodo de depositación de sedimentos con componente volcánico típicos de procesos explosivos (Jacay et al., 2004); la secuencia “a” compuesta de tobas con abundantes líticos, chert y pómez (fiames) son reflejo de un flujo piroclástico inicial que es entrecortado por elementos arquitecturales $SB+GB+CH$, indicando secuencias aluviales y superpuestos por flujos piroclásticos masivos compactos.

4.1.1.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°1

FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR. Las muestras recopiladas en la unidad Moquegua se han tratado y contado los minerales pesados descritos a continuación:

Tabla 4. 2. Datos de las muestras obtenidas de la unidad Moquegua en Chuschuco.

CÓDIGO MUESTRAS	CUADRÁN-GULO	LOCALIDAD	C_ESTE	C_NORTE	LITOLOGÍA
GR41A-16-07	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	384631	8019835	Arenisca cuarzosa
GR41A-16-08	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	384795	8020038	Arenisca arcósica
GR41A-16-176	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	385785	8020501	Arenisca
GR41A-16-177	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	385694	8020138	Arenisca

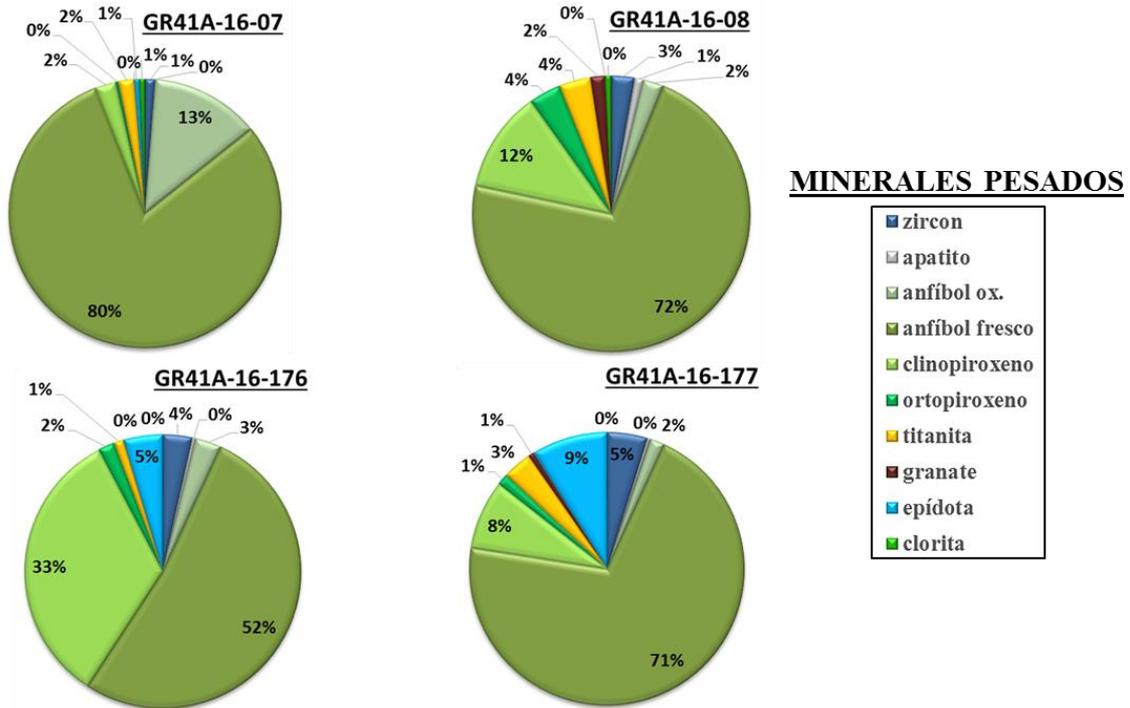


Figura 4. 8. Conteo de minerales pesados en muestras de unidad Moquegua – Chuschuco.

En esta área las rocas de la Formación Moquegua Superior reflejan un alto contenido de anfíboles color verde o verde translúcidos (50%-80%) cuyas formas indican primeros estadios de meteorización, así como erosión en grado inicial o ligero que permite deducir una fuente de procedencia cercana, seguido en abundancia de clinopiroxenos (hasta 33%) especialmente en la base de la columna, caracterizados por ser poco corroídos y mantener su estructura original, resalta también la presencia de zircones con formas piramidales y su grado de erosión es inicial a ligero, componentes en menor proporción se encuentran los anfíboles oxidados, ortopiroxenos, titanitas, granates, apatitos y epídotas.

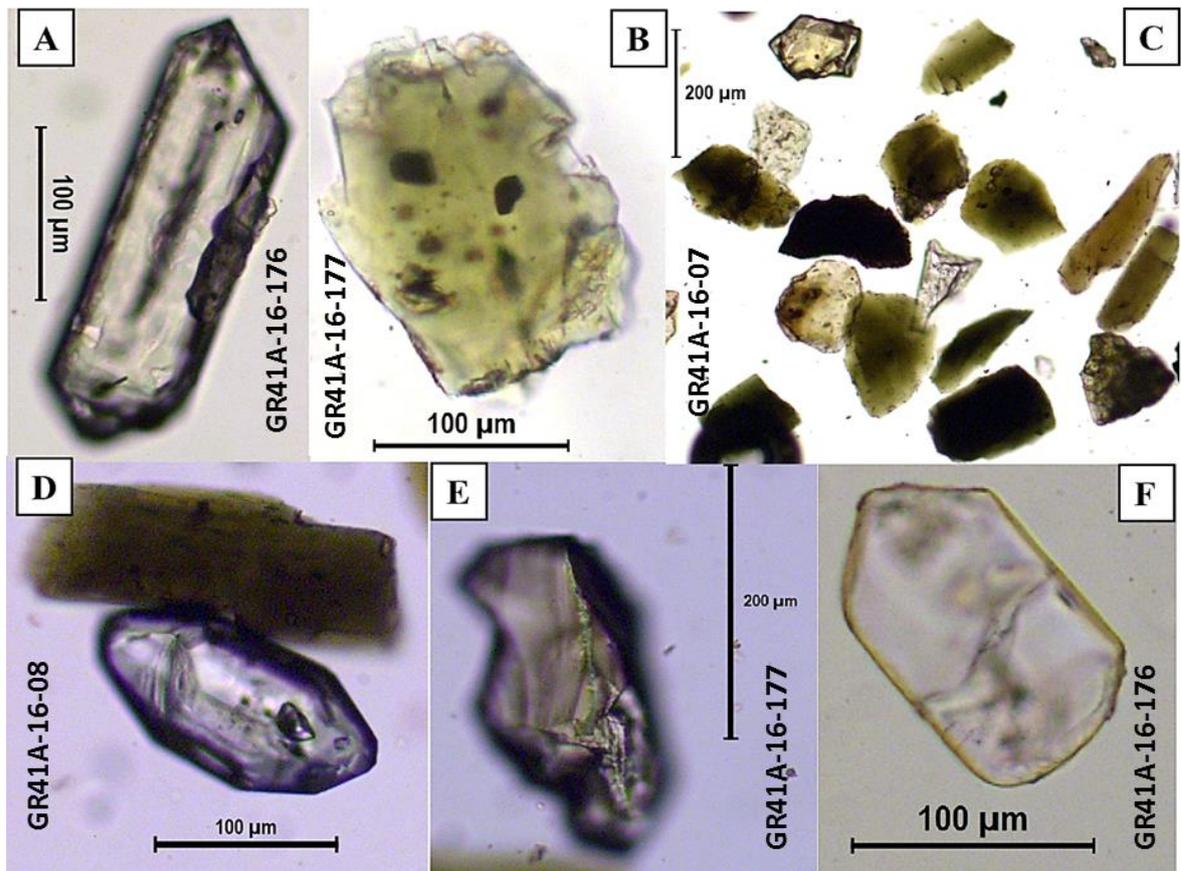


Figura 4. 9. Minerales pesados identificados en A y D) zircones, B) clinopiroxeno, E) titanita, F) apatito y C) varios minerales observados al microscopio obtenidos de la Formación Moquegua Superior.

FORMACIÓN HUAYLILLAS. Se ha obtenido dos muestras del nivel clástico descrito como Secuencia “b” de la Formación Huaylillas para el tratamiento y conteo de minerales pesados:

Tabla 4. 3. Muestras obtenidas de la Formación Huaylillas, Cerro Chuschuco

COD_MUESTRAS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-05	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	384168	8019578	Arenisca
GR41A-16-06	Pachía 36v2	Noreste Cerro Chuschuco, Pachía	384280	8019635	Litoarenita

Las muestras de rocas volcano-sedimentarias colectadas de la secuencia “b” de la Formación Huaylillas poseen como minerales pesados predominantes al anfíbol verde (22%-36%), ortopiroxenos (24%-46%) y clinopiroxenos (16%-25%). En la muestra GR41A_16_05 los anfíboles se ven verdes translúcidos al microscopio petrográfico en nicols paralelos, con formas alargadas, subhedrales y el grado de corrosión de ligero hasta avanzado en algunos casos; los piroxenos manifiestan un color verde translúcido a amarillo por su pleocroísmo, además su grado de corrosión es de leve a avanzada, notable también

la presencia de granates que indican una fuente posiblemente metamórfica y apatitos que permiten inferir un ambiente poco ácido de formación de estas rocas, además existen titanitas subredondeadas y corroídas.

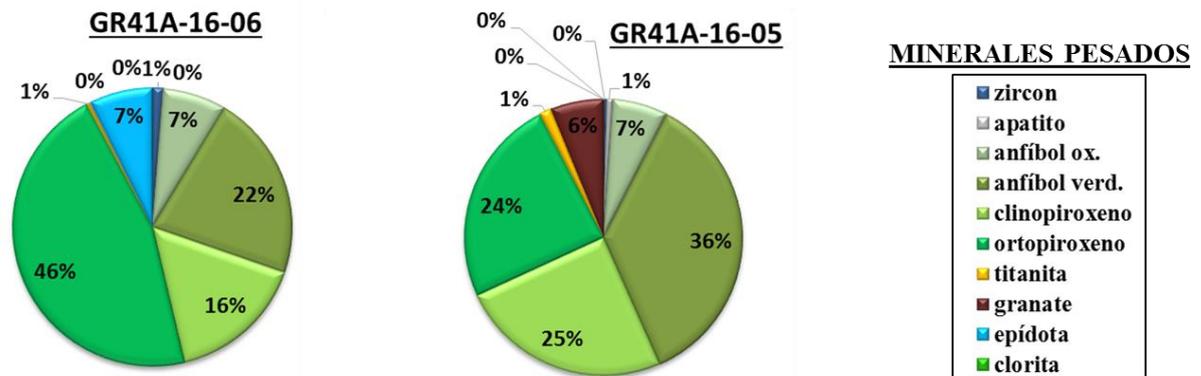


Figura 4. 10. Minerales pesados en muestras de la Formación Huaylillas en Cerro Chuschuco.

La muestra GR41A_16_06 ubicada en la base de la secuencia “b” (Figura 4.6) presenta granos de minerales pesados con cobertura de mineral oscuro (posibles óxidos), predominantes ortopiroxenos verdosos translúcidos (24-46%), anfíboles frescos (22-36%) y clinopiroxenos con leve grado de corrosión (16-25%), los minerales en menor proporción están los anfíboles oxidados (7%), epídotas (7%), granates (6%), zircones (<1%) y titanitas (<1%).

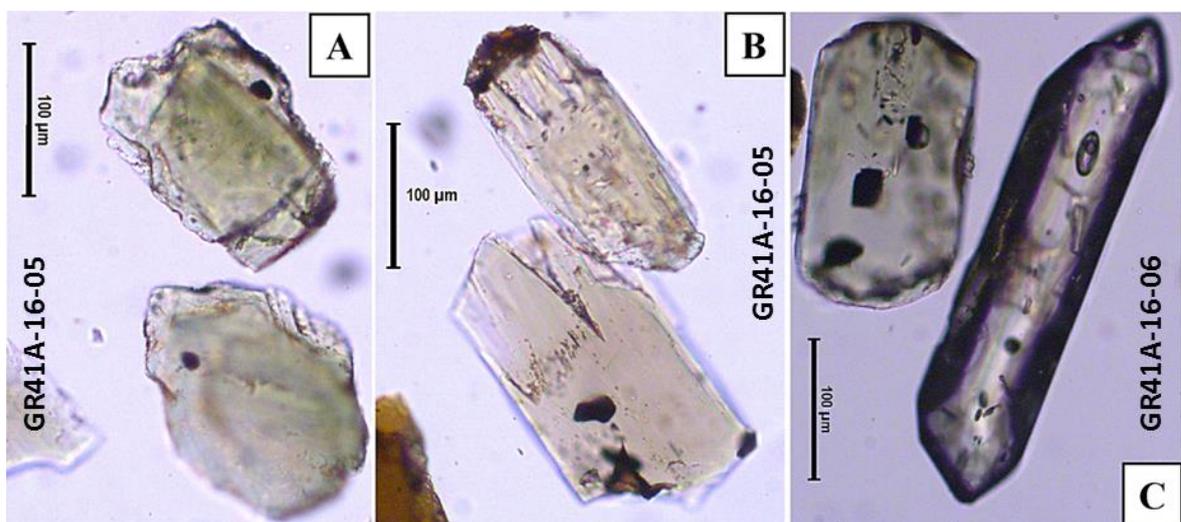


Figura 4. 11. Minerales pesados identificados al microscopio en nicóles paralelos; en A) Clinopiroxenos, B) Ortopiroxenos y C) ortopiroxeno y zircon obtenidos de la Fm. Huaylillas.

4.1.2.1 COLUMNA N°2. LADERA ESTE DE CERRO CHUSCHUCO

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 382083	N: 8017333	COTA: 1206	Moquegua, Huaylillas

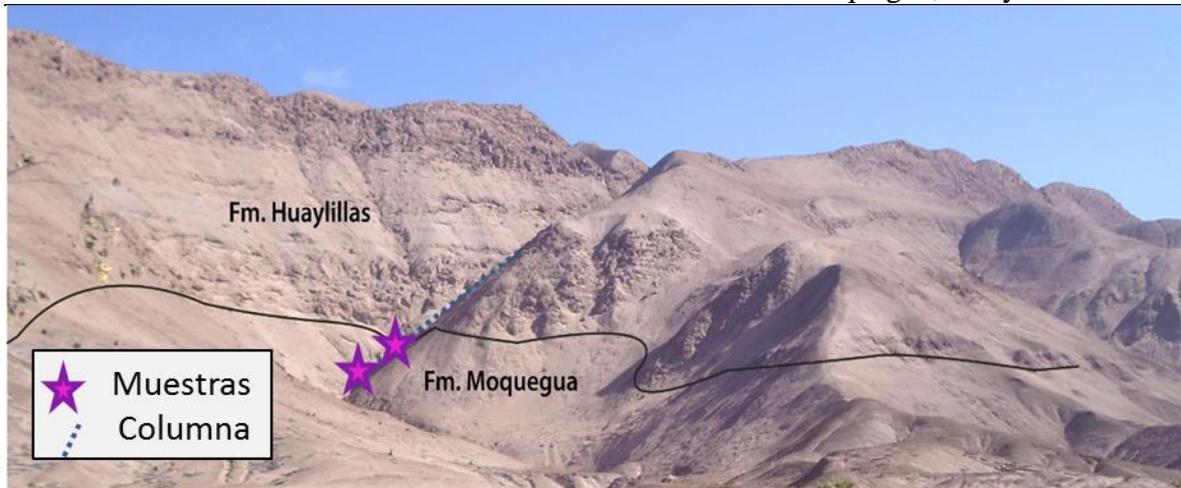


Figura 4. 12. Panorámica con vista al oeste del Cerro Chuschuco.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~20 m). En la base se observa areniscas tobáceas de grano grueso (facies $Sl+sLT$) con fragmentos de riolita, pómez, dacitas, cuarzo y yeso. En el tope se nota estratos gruesos de conglomerados polimícticos (andesitas, tonalitas, granodioritas, cherts y areniscas) grano-decrecientes clasto soportados y conglomerados matriz soportados de arenisca tobácea (Facies $Gmg+Gh$), así como canales compuestos de areniscas ($Sl+Sh$) como se observa en la Figura 4.13a ocasionalmente con laminaciones paralelas, oblicuas y pómez “flotantes”.

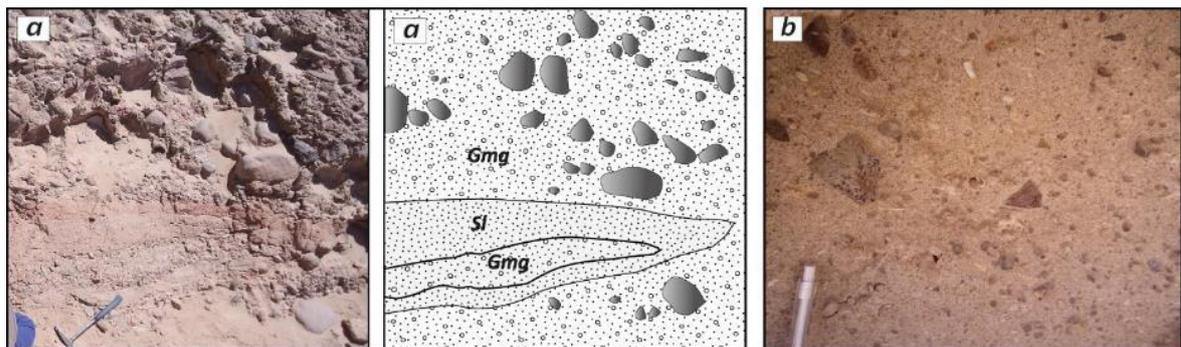


Figura 4. 13. Facies Formación Moquegua y B) Facies Formación Huaylillas, este de Cerro Chuschuco.

Secuencia a (>90m). Se observa toba lapilli ($mLT-p,l,v$) con fragmentos de andesitas, granodioritas, dacitas, cherts, pómez, y cristales de biotitas, feldespatos y cuarzo, tal como se muestra en la Figura 4.13b, además en la base presenta mayor cantidad de fiames, en el centro y tope predominan los chert y líticos de andesitas.

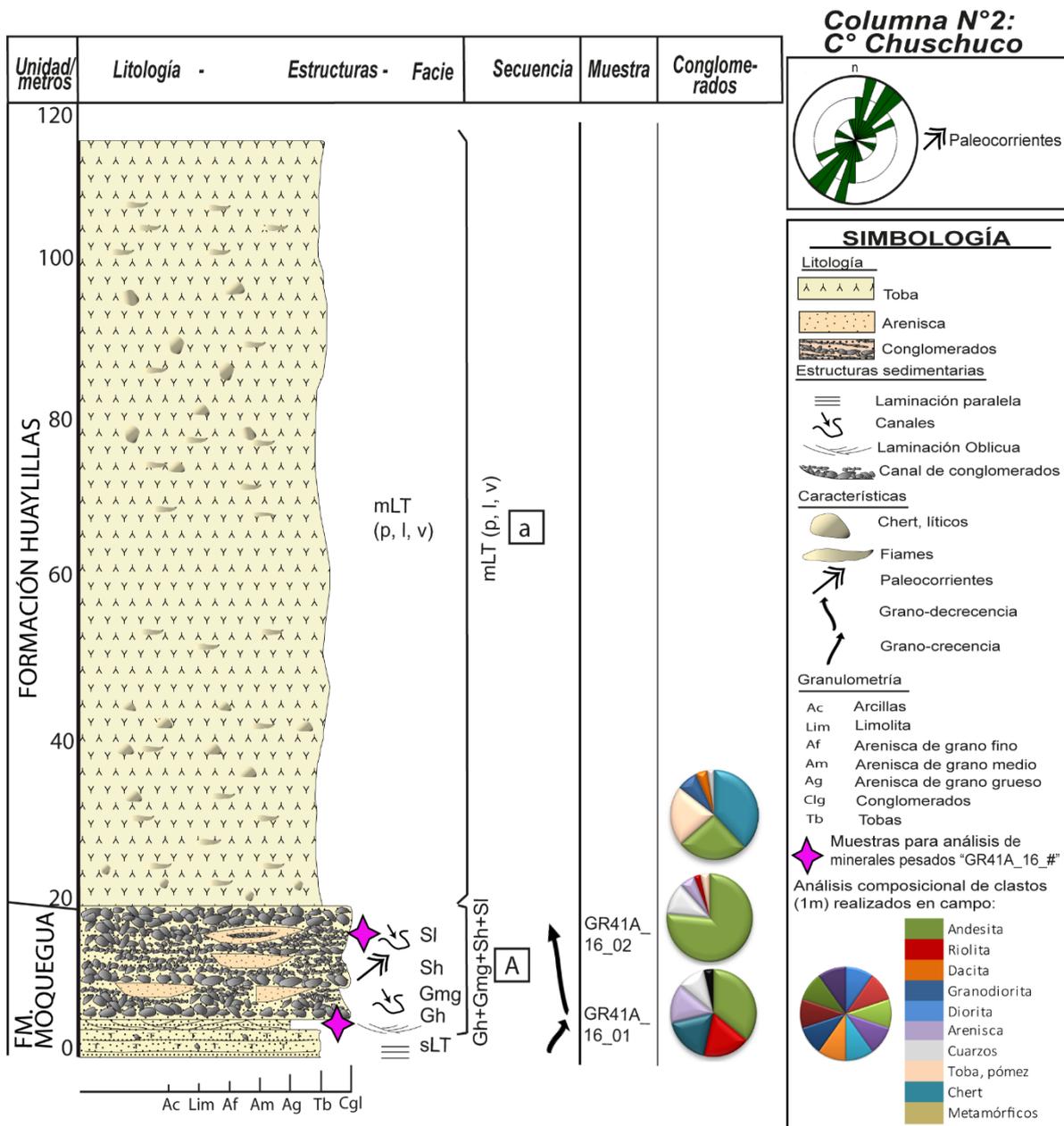


Figura 4. 14. Columna estratigráfica resumida, parte este de Cerro Chuschuco

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

Esta pequeña columna desarrollada en el Cerro Chuschuco muy cercana a la columna 1, presenta dos secuencias principales la primera "A" pertenece al nivel superior de la unidad Moquegua y se asocia a elementos arquitecturales como *CH*, *GB* y *SB* por la predominancia de conglomerados y lentes de arenisca, que sugiere una etapa de ríos braided proximales con orientación al sur-oeste, indicado por la medida de imbricación de clastos, además por la redondez y abundancia de clastos podemos inferir un alto régimen fluvial en esa época influenciado por rocas de la Cordillera Occidental.

La secuencia “a” en la Formación Huaylillas se caracteriza por la abundancia de líticos, cherts, pómez y fiames, evidenciando un evento de ignimbritas (explosivo) cuyo espesor en referencia a la columna 1 nos indica que hubo una fuerte depresión en esta área al momento de su depositación, hasta el punto desarrollado de la columna no se encontró el nivel clástico intermedio de Huaylillas (que había sido ubicado como secuencia “b” en la columna1), que hace deducir que sólo se trataba facies muy locales horizontalmente.

4.1.2.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°2

FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR. A estas muestras se ha realizado el proceso físico y mecánico de separación y posteriormente conteo de granos de minerales pesados:

Tabla 4. 4. Muestras recolectadas de la unidad Moquegua, Cerro Chuschuco

CÓDIGOS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-01	Pachía 36v2	Flanco este Cerro Chuschuco	382083	8017333	Arenisca
GR41A-16-02	Pachía 36v2	Flanco este Cerro Chuschuco	382071	8017374	Arenisca

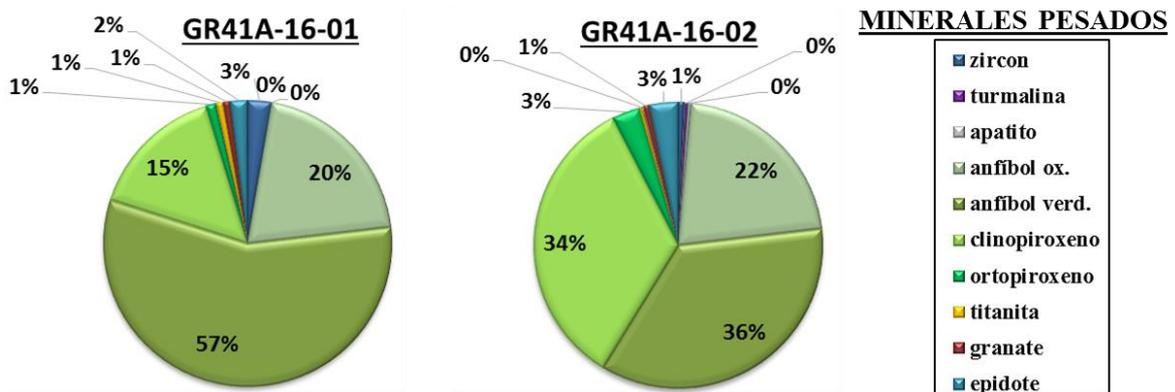


Figura 4. 15. Resultado del conteo de granos de minerales pesados en la unidad Moquegua.

El conteo de granos en las muestras “GR41A_16_01” y “GR41A_16_02” exhibe el predominio de anfíboles verdes y verdes translúcidos (36%-57%) con formas bien desarrolladas a pesar de la leve corrosión por el transporte, los clinopiroxenos (15-34%) presentan color verde translúcido, la presencia de anfíboles oxidados (20-22%) coincide con la muestra “GR41A_16_07” de la secuencia “B” en la columna 1, y el bajo porcentaje de ortopiroxenos permite correlacionar estos niveles y confirmar el inicio de la Formación Huaylillas; los minerales en menor proporción son los zircones, apatitos, turmalina, epídotas, titanitas.

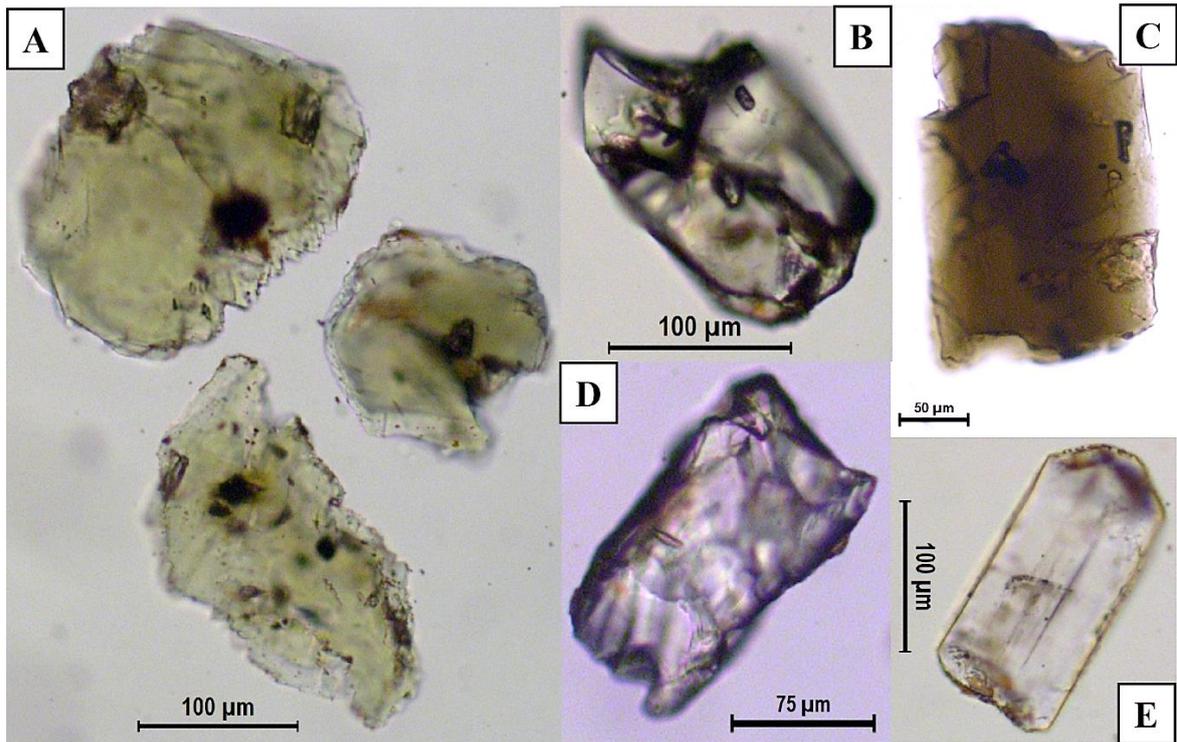


Figura 4. 16. Minerales pesados observados al microscopio, en A) piroxenos, B) zircón, C) anfíbol, D) titanita y D) apatito.

4.1.3.1 COLUMNA N°3. LADERA SUR DE CERRO CHURCOS

DATOS

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 371302	N: 7990083	COTA: 362msnm	Moquegua, Huaylillas

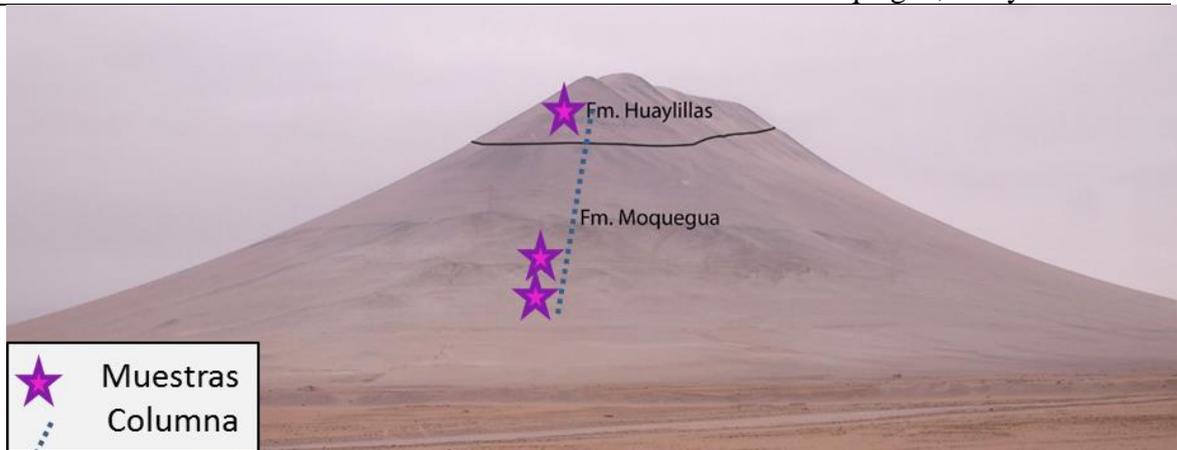


Figura 4. 17. Vista al W-E del Cerro Churcos, al este de la ciudad de Tacna.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~30 m). Presenta areniscas de grano grueso con granos de cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos de color negro, verdosos, y óxidos de hierro (facies *Sh*). Estas areniscas están cementadas por yeso y halita, además están intercaladas con lutitas

marrones laminadas (facies *Fl*). Al tope se observa grano-crecencia de areniscas grano fino y medio a areniscas conglomerádicas (facies *Gmg*).

Secuencia B (~105 m). Constituida por series grano-crecientes con espesor <1 hasta 3m compuestas por lutitas laminadas de color marrón (facies *Fl*) a areniscas conglomerádicas (facies *Gmg*), tal como se muestra en la Figura 4.18a. En el centro de la Secuencia B se tiene lutitas marrones laminadas con grietas de desecación (facies *Fm*) y en la parte superior, se observa areniscas de grano medio y grueso mal clasificadas con granos de cuarzo, biotitas, feldspatos, fragmentos líticos, todos cementados por halita y yeso (facies *Sh*). Es notoria la presencia recurrente de clastos arcillosos en estas areniscas.

Secuencia a (~8m). Paquete de arenisca tobácea de grano medio con abundantes cuarzos, feldspatos, biotitas, líticos y cherts (facies *Sh*) intercalada niveles de yeso y halita, así como tobas (mLT-v,l,p).

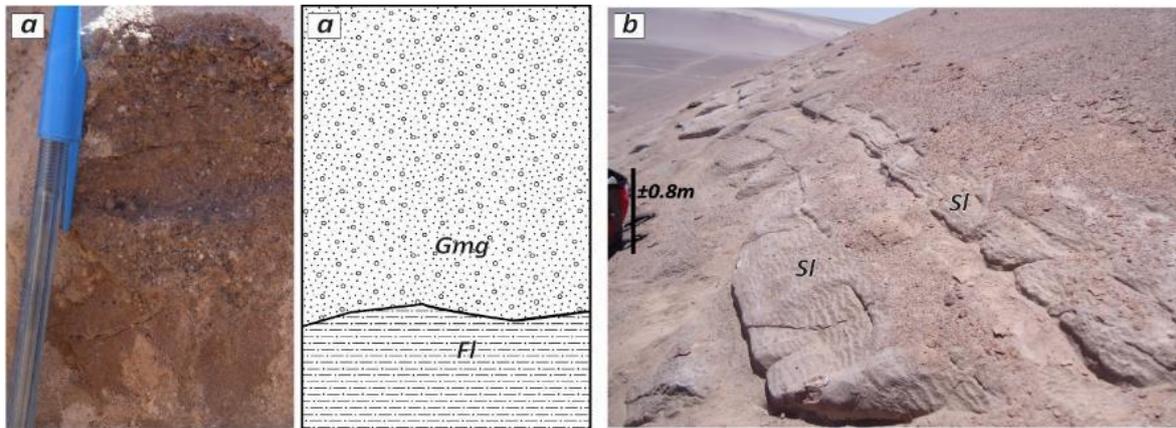


Figura 4. 18. Secuencias observadas en el Cerro Churcos.

Secuencia b (~48m). Nivel de areniscas tobáceas masivas grano grueso a conglomerádicas, con aparente laminación horizontal y estratos con laminación oblicua observado en la Figura 4.18b (facies *Sh +Sl +Sm*), presenta abundante pómez, cuarzo, biotitas, cementado con yeso-halita.

Secuencia c (> 6m). Presencia de tobas soldadas masivas de color rosácea, descritas macroscópicamente con abundante cuarzo, sanidina, plagioclasas, de composición riolítica y aparente orientación de flujo (mLT-cr,p).

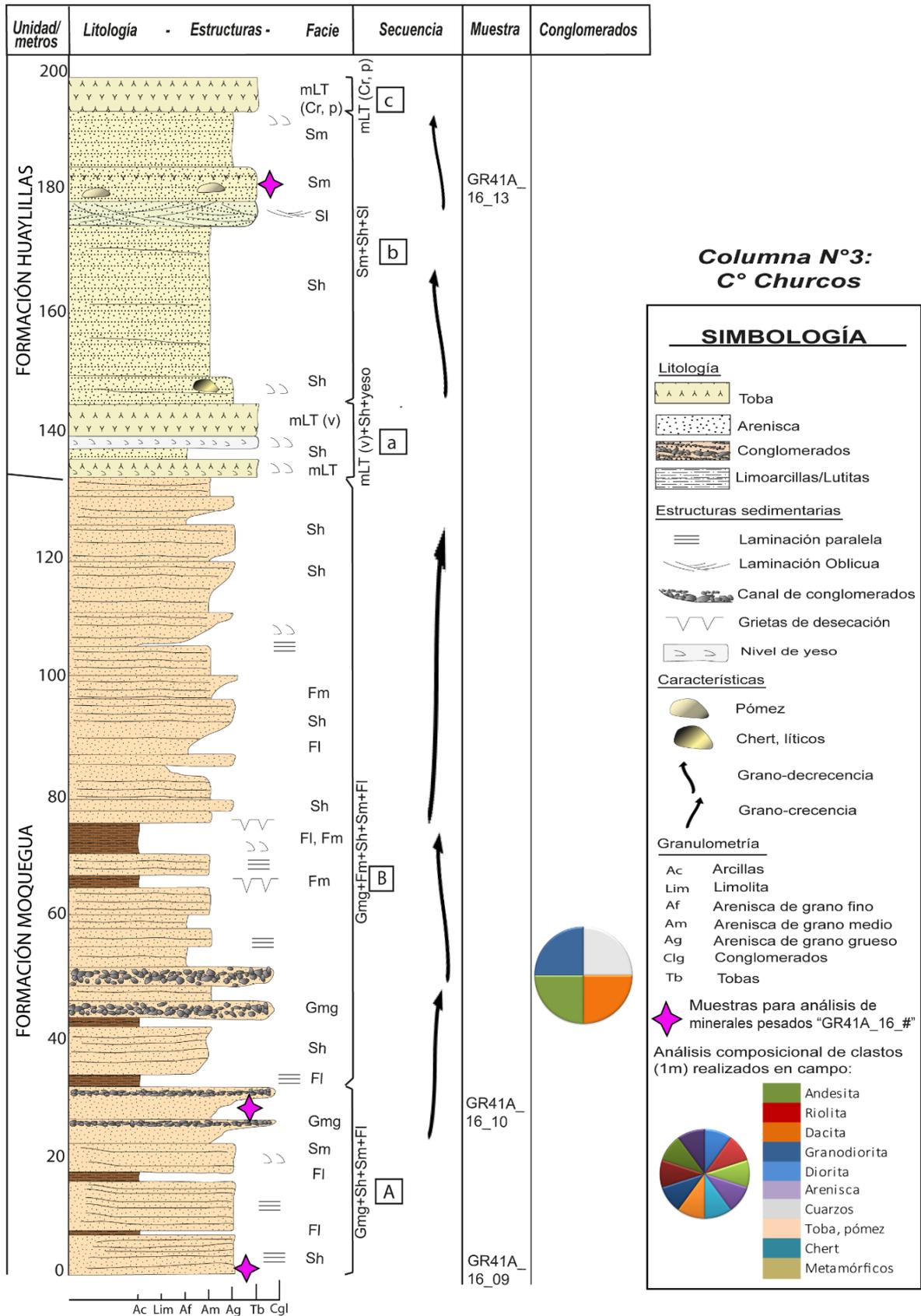


Figura 4. 19. Columna estratigráfica resumida, Cerro Churcos.

INTERPRETACIÓN O ANÁLISIS DE LAS FACIES

Esta columna estratigráfica se ha resumido en 5 secuencias, de las cuales “A y B” formarían la Formación Moquegua Superior, cuyos ensambles de facies sedimentarias en la secuencia “A” (elementos *GB+LS+FF*) sugieren un sistema fluvial de planicie, la secuencia B está compuesta por series grano-crecientes con bastante componente de yeso y halita (evaporitas) así como estructuras sedimentarias (mud cracks) peculiaridades del tipo run-off típicos de la parte distal de un sistema aluvio-fluviales de climas áridos.

En estratos superiores se tiene capas de la Fm. Huaylillas; también dividido en tres secuencias “a”, “b” y “c” como en el Cerro Chuscuco 1, estas series son asociadas a elementos arquitecturales LS y niveles tobáceos, “a” señala la mezcla de material piroclástico y evaporitas de un sistema de depositación de baja energía, luego “b” con areniscas de un flujo laminar con niveles de ondulitas indicarían el tope del sistema aluvial fluvial distal de la fuente, justo antes del depósito de tobas que ahora se ven compactas y masivas (“c”).

4.1.3.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°3

FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR. Se ha recopilado dos muestras en esta unidad compuesta de material clástico para el análisis de minerales pesados:

Tabla 4. 5. Datos de muestras tratadas para análisis de minerales pesados.

CÓ_MUESTRAS	CUADRÁN-GULO	LOCALIDAD	C_ESTE	C_NORTE	LITOLOGÍA
GR41A-16-09	Tacna 37v	Ladera suroeste del Cerro Los Churcos	371302	7990083	Arenisca cuarzosa
GR41A-16-10	Tacna 37v	Ladera suroeste del Cerro Los Churcos	371381	7990112	Arenisca

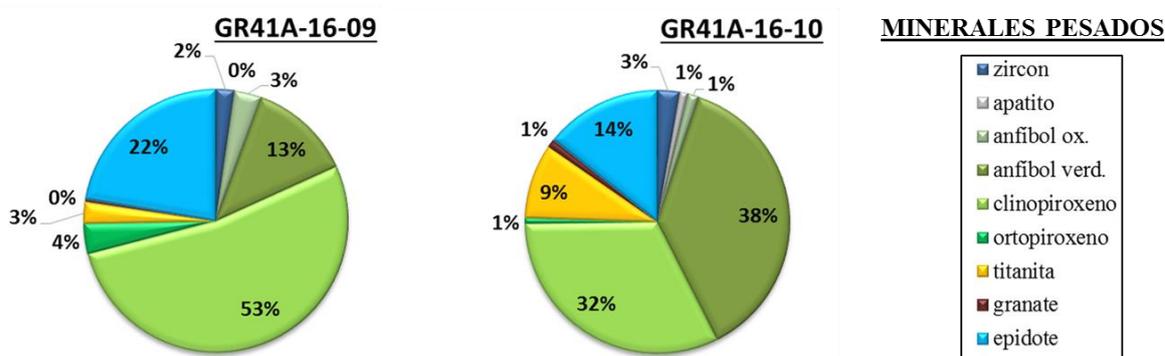


Figura 4. 20. Resultado del conteo de minerales pesados en la unidad Moquegua.

Estas muestras reflejan la abundancia de anfíboles (13% a 38%) y clinopiroxenos (32%-53%) tal como las muestras de la unidad Moquegua anteriormente descritas, la muestra

GR41A_16_09 presenta abundantes clinopiroxenos de color verde translúcido (53%), la mayoría con formas subredondeadas y grado de corrosión inicial; seguido en cantidad de anfíboles verdes y verdes translúcidos alargados en estados iniciales de corrosión (13%), zircones sub-piramidales, rómbicos y algunos rotos con evidencia de leve desgaste y corrosión, titanitas, epidotas como minerales subordinados (22%) y apatitos. La muestra GR41A_16_10 presenta abundantes anfíboles verdes (38%) que se correlaciona con la cantidad de granos de las muestras GR41A_16_176 y GR41A_16_177 pertenecientes a la secuencia A de Chuschuco N°1, la abundancia de clinopiroxeno, anfíboles oxidados, titanitas, zircones y epidotas son también proporcionalmente coincidentes, evidenciando la correlación de estas secuencias.



Figura 4. 21. Minerales pesados identificados al microscopio, en A) piroxenos y titanita de GR41A-16-09, B) zircón y C) titanita de la muestra GR41A-16-10 (ver proporciones en la Figura 4.20).

FORMACIÓN HUAYLILLAS. Se ha recopilado una muestra para HMA:

Tabla 4. 6. Detalles de la muestra de la Formación Huaylillas.

CÓDIGO MUESTRAS	CUADRÁN-GULO	LOCALIDAD	C_ESTE	C_NORTE	LITOLOGÍA
GR41A-16-13	Tacna 37v	Ladera suroeste del Cerro Los Churcos	371855	7990275	Arenisca

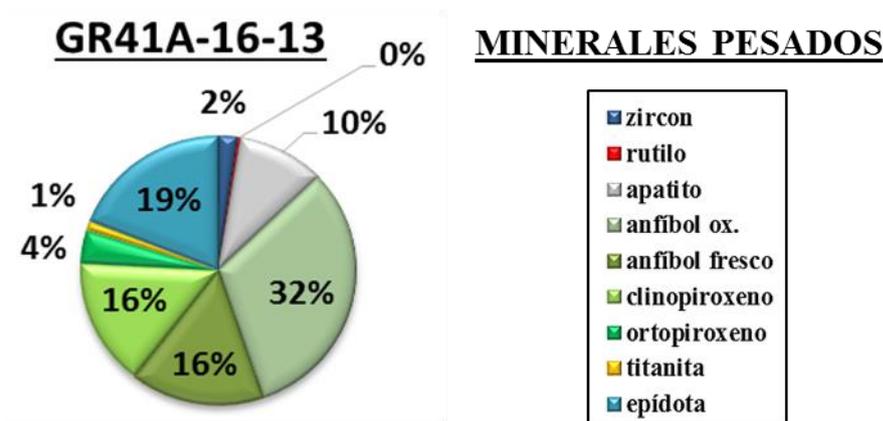


Figura 4. 22. Resultado del conteo de minerales pesados en GR41A-16-13.

Esta muestra GR41A_16_13 extraída de la secuencia “b” en la indicada unidad Huaylillas, presenta muchos minerales cubiertos de vidrio volcánico, abundantes anfíboles oxidados que conservan su forma alargada con leve desgaste de bordes, la cantidad de ortopiroxenos (4%) y clinopiroxenos (16%) es correlacionable con la secuencia “b” de la columna Chuscuco 1, éstos últimos minerales muestran leves y avanzados estados de desgaste coexistiendo, además los apatitos inalterados o con estados iniciales de corrosión son abundantes (10%) con zircones y titanitas en menor proporción (1-2%), las cantidad de epídotas puede señalar aportes de fuentes metamórficas (19%).

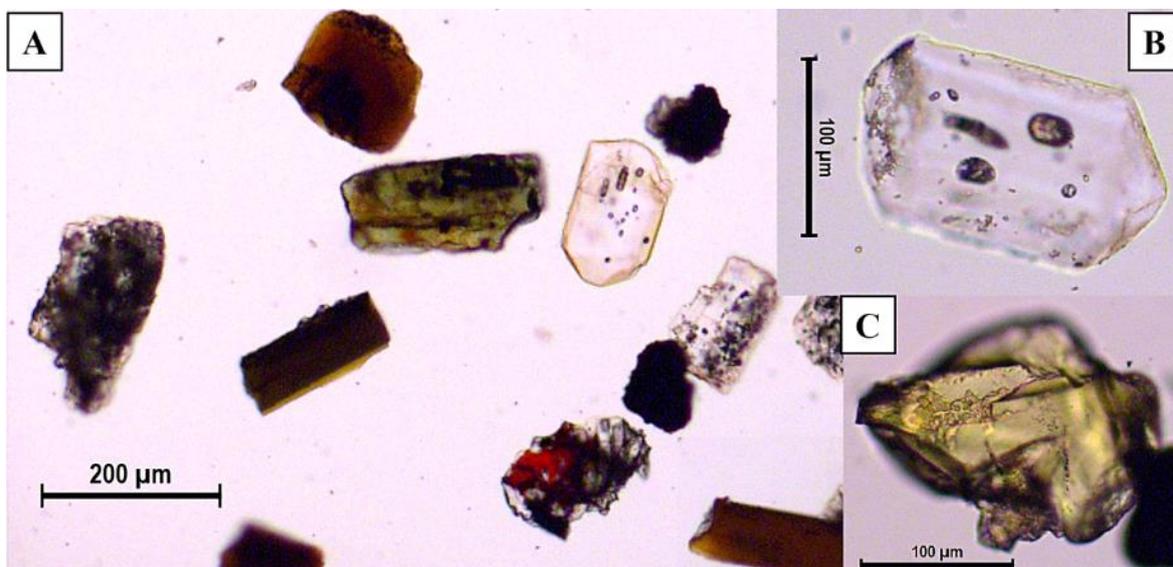


Figura 4. 23. Minerales pesados identificados en microscopio, en A) anfíboles verdes y oxidados, apatito y epídotas, B) Apatito y C) Titanita, pertenecientes a la unidad Huaylillas.

4.1.4.1 COLUMNA N°4. LADERA OSTE DE CERRO CUBETA-LOS CÓNDORES.

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 390944	N: 7997544	COTA: 979msnm	Moquegua



Figura 4. 24. Vista al S-E del Cerro Los Cóndores, se distingue la unidad Moquegua Superior.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~30 m). Presenta en la base areniscas grano fino de laminación oblicua con laminaciones de lutitas y clastos blandos (facies *Sl*, *Sr*, *Fm*) observable en la Figura 4.25, canales de conglomerados polimícticos con clastos de diámetro promedio <15cm redondeados de diorita, granodiorita, andesitas, areniscas (descripción macroscópica) en matriz de arenisca grano grueso (facies *Gmg*) e intercalaciones de lutitas de fina laminación e incluso grietas de desecación (facies *Fl*, *Fm*).



Figura 4. 25. Laminaciones oblicuas en estratos de la Formación Moquegua dirigidas al sur-oeste.

Secuencia B (~60m). Esta serie se caracteriza por la abundancia de areniscas grano fino, medio, grueso y areniscas conglomerádicas a manera de grano-decrecencia, laminaciones

paralelas y oblicuas, así como algunos canales de conglomerados clasto y matriz soportados (Figura 4.26 a y b). En la base presenta areniscas grano fino de aspecto noduloso con laminación paralela (facies *Sh*), seguida de secuencias de canales de conglomerados clasto soportados y sets granodecrecientes desde areniscas conglomerádicas a areniscas grano grueso con laminaciones oblicuas y paralelas (facies *Gmg*, *Sl*); sobrepuestas con areniscas grano medio a grueso de laminación oblicua de bajo ángulo (Figura 4.27b) compuestas de cuarzo (>80%), líticos, accesorios y poca matriz tobácea e inyecciones de sal, pequeño nivel de lutitas con grietas de desecación (facies *Sl*, *Sr*, *Fm*).



Figura 4. 26. Secuencia B, en a) Estratos de areniscas y en b) areniscas intercaladas con lutitas.

Secuencia C (~16m). Se diferencia mejor los paquetes de conglomerados matriz soportados con clastos de diámetro promedio <20-30cm en matriz de arenisca grano grueso tobácea, canales de conglomerados clasto soportados (diorita, andesita, arenisca), redondeados de diámetro promedio <25cm, tal como se observa en la Figura 4.27 a.

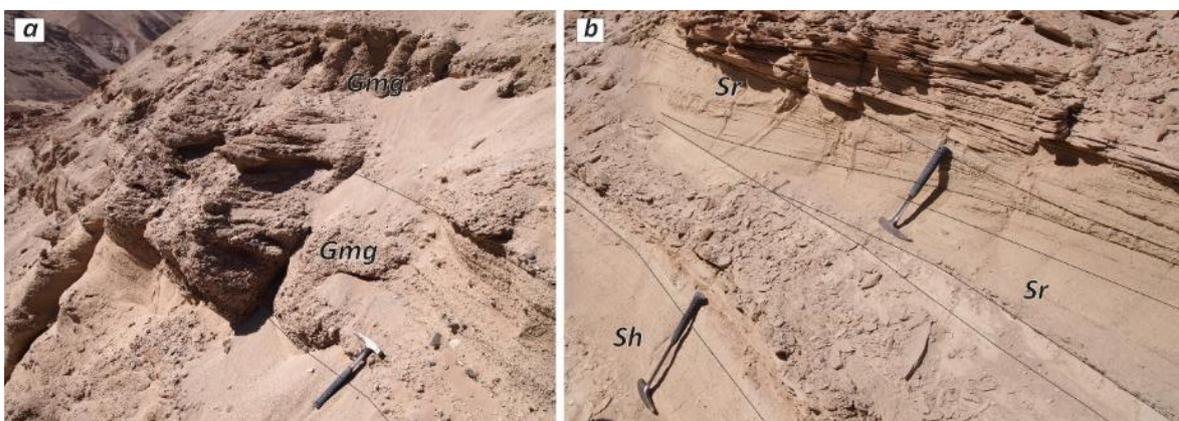


Figura 4. 27. En a) Sets de conglomerados matriz soportados y b) areniscas con laminación oblicua dirigidas al SO.

Secuencia D (~9m). Presencia de tobas lapilli masivas de color blanco rosáceo con líticos subangulosos y pómez (*mLT-l,p*), tal como en la figura 4.29.

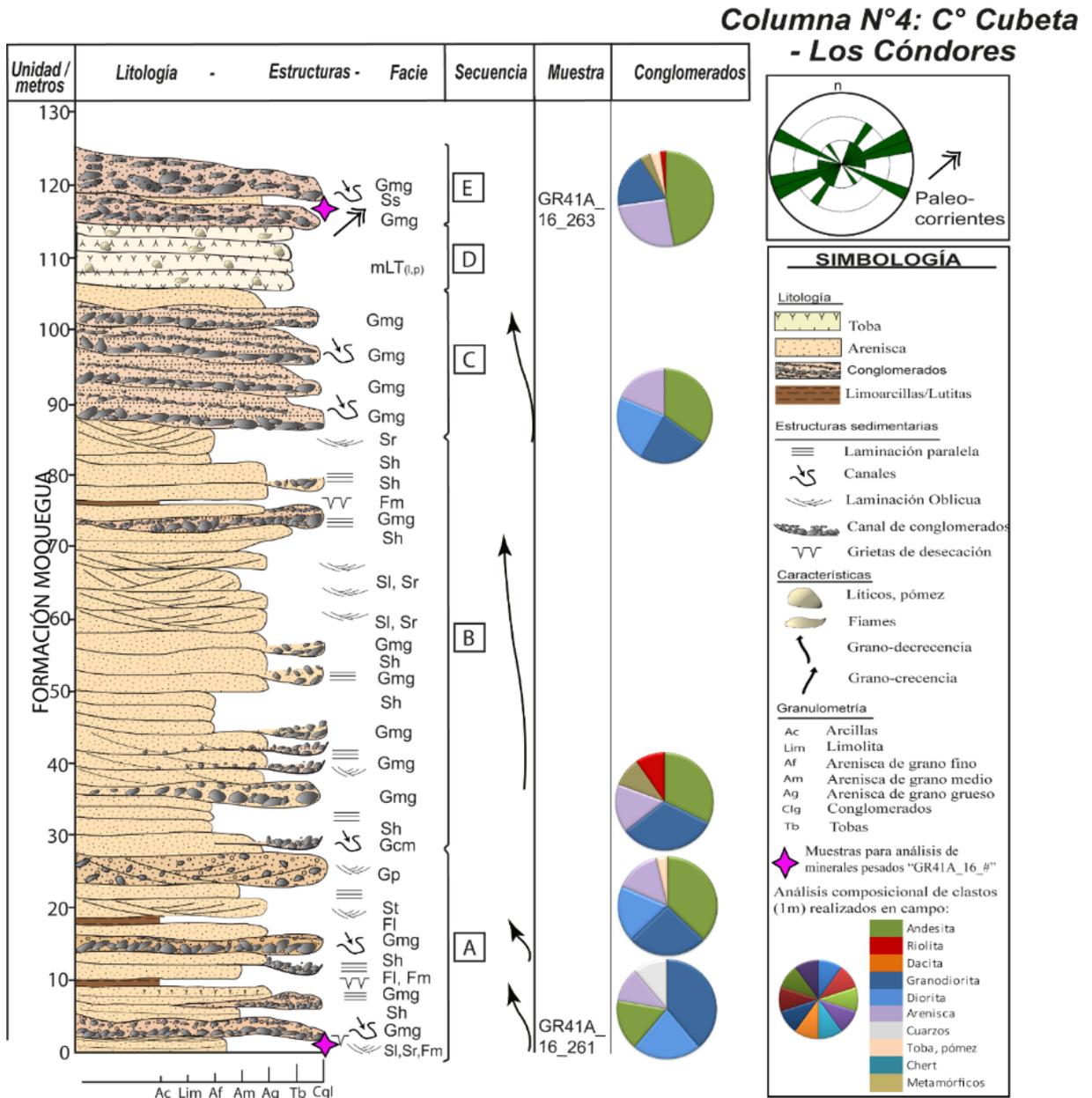


Figura 4. 28. Columna resumida de la Formación Moquegua en el Cerro Cubeta y Los Cóndores.

Secuencia E (>10m). Conglomerados polimícticos matriz soportados (matriz <20%) observados en Figura 4.29, con clastos subredondeados de andesita, arenisca y granodiorita principalmente (facies *Gmg*), lentes de arenisca grano grueso compuestas de cuarzo, feldspatos y micas (facies *Ss*).



Figura 4. 29. Conglomerados de la secuencia “D” y “E” sobre las tobas lapilli.

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

Esta columna estratigráfica se ha desarrollado en el extremo más oriental del área de estudio, se ha dividido en cinco principales secuencias, la secuencia “A” se asocia a los elementos **SB+FF+GB**, vinculado a un sistema de moderada energía, de ampliación del área de la cuenca con canales de mayor estabilidad y el elemento **LA** formado en el tope de los estratos basales de arenisca revelando un incremento del buzamiento de las superficies de acreción lateral; la secuencia “B” dejar ver un aumento en canales de conglomerados y lentes de areniscas con laminación paralela y oblicua asociados a los elementos **GB + SB + FF + DA** que caracterizarían un área con ríos entrelazados de alta sinuosidad con areniscas de acreción lateral al tope de la secuencia; cubiertos por series grano-decrecientes de conglomerados como muestras de un incremento de aporte de clastos influenciado por algún periodo de inestabilidad tectónica en la fuente, la cobertura de toba blanquecina con líticos y pómez podría correlacionarse a los primeros eventos de la Formación Huaylillas y al tope de la columna los conglomerados y pocos canales de arenisca cuyo patrón de paleocorrientes, indicada por las imbricaciones de clastos, señala un régimen de alta energía orientado al sur-oeste y nor-este; concluimos que el estilo fluvial que caracteriza esta área corresponde a “Donjek type” o ríos Braided tipo trenzados, de bajo a intermedio nivel de energía.

4.1.4.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°4

FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR. Se ha recopilado dos muestras, una en la base y otra en el tope de la columna, con la finalidad de realizar el tratamiento e identificar granos de minerales pesados:

Tabla 4. 7. Muestras analizadas en columna estratigráfica del Cerro Cubeta.

COD_MUESTRAS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-261	Tacna (37v)	Cerro cubeta	390953	7997713	Arenisca
GR41A-16-263	Tacna (37v)	Cerro cubeta	391077	7997522	Arenisca

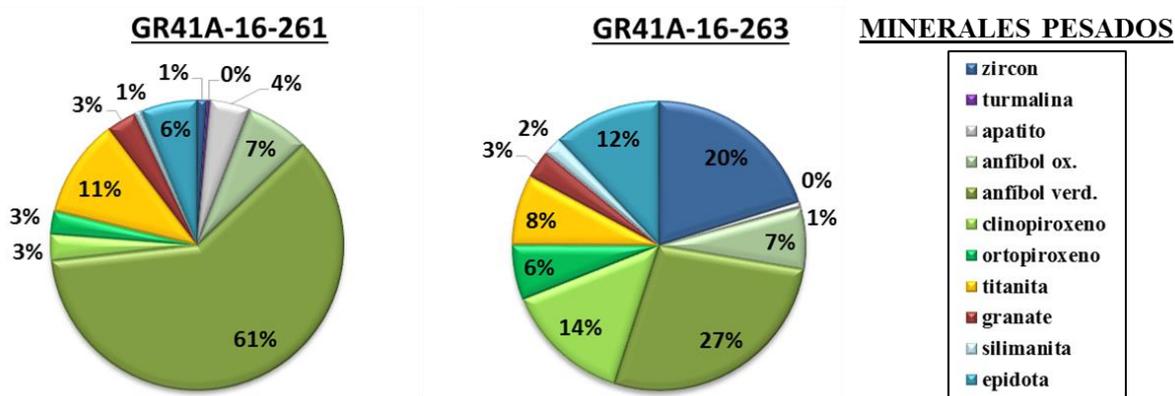


Figura 4. 30. Resultado del conteo de minerales pesados, Cerros Cubeta – Los Cóndores.

En la base de la columna estratigráfica se ha obtenido la muestra GR41A_16_261, la cual expresa como minerales predominantes los anfíboles color verde hojosos la mayoría, con bordes corroídos y señales de moderado desgaste (61%), minerales subordinados titanita (11%) y minerales menores las epidotas (6%) indicando fuentes de rocas metamórficas o intrusivas, así como los granates que se ven con tonalidades verdosas, con formas redondeadas a subredondeadas (hasta 3%) y la abundancia relativa de apatitos (4%) refleja poca influencia de aguas ácidas en esta área; minerales en menor proporción se encuentran los ortopiroxenos, zirrones y turmalinas. La muestra GR41A_16_263 obtenida al tope de la columna, muestra la abundancia de anfíboles verdes (27%), con predominantes zirrones tabulares y prismáticos con señal de grados iniciales de corrosión (20%), los clinopiroxenos de color verde translúcido tienen formas subhedrales con moderado a avanzado grado de corrosión (14%), las epidotas son subredondeadas (12%), la proporción relativa de los clinopiroxenos y ortopiroxenos es similar a las secuencias clásticas atribuidas a la unidad Huaylillas en los Cerros Chuschuco y Churcos; las cantidades de

epidota, silimanita, titanita y granate nos orienta a deducir procedencia de rocas metamórficas e ígneas, en menor cantidad apatito y turmalina.

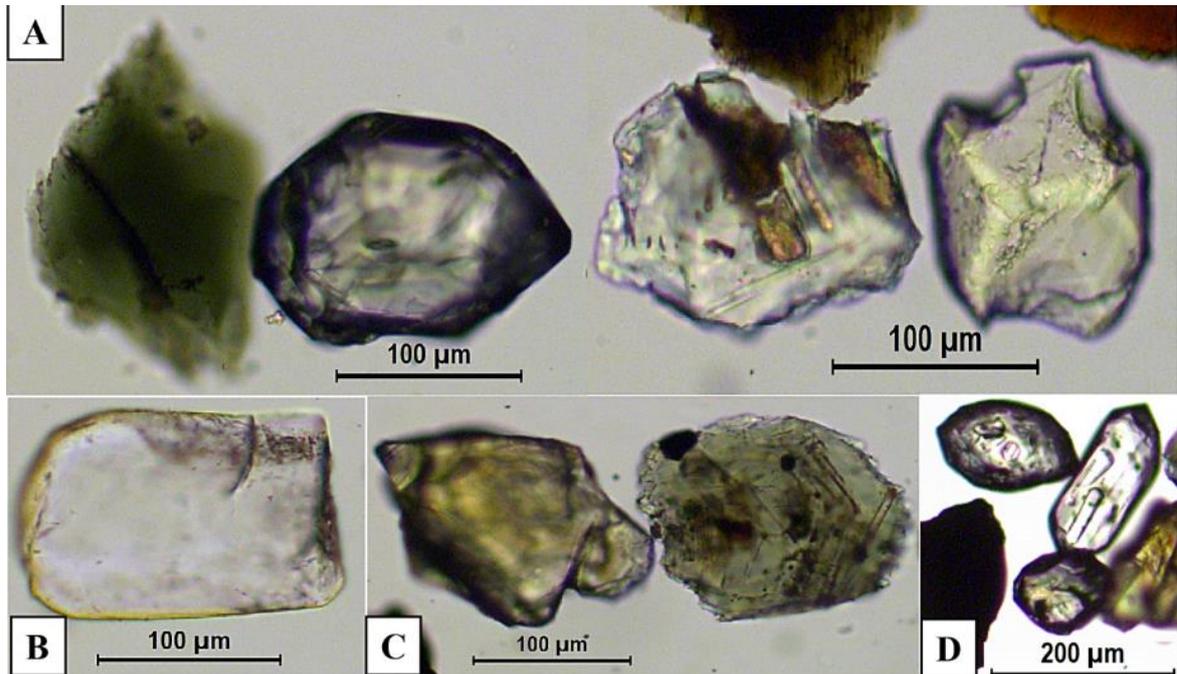


Figura 4. 31. Minerales pesados en A) anfíbol, zircón, granate y titanita de la muestra GR41A-16-261, en B) Apatito, C) epidota y ortopiroxeno, D) zircones de la muestra GR41A-16-263.

4.1.5.1 COLUMNA N°5. LADERA OESTE DE CERRO ACIRUME



Figura 4. 32. Vista al norte, ladera del Cerro Acirume.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

En la parte basal, antes de iniciar a levantar la columna estratigráfica de la Formación Moquegua en el Cerro Acirume se localiza una secuencia de conglomerados matriz soportados, polimícticos con predominancia de clastos subredondeados de diorita, granodiorita, andesita y algunas calizas, en aparente estratificación con tobas lapilli con abundantes líticos, que por la ubicación estratigráfica indicaría el contacto local entre Fm. Toquepala y la unidad Moquegua Superior.

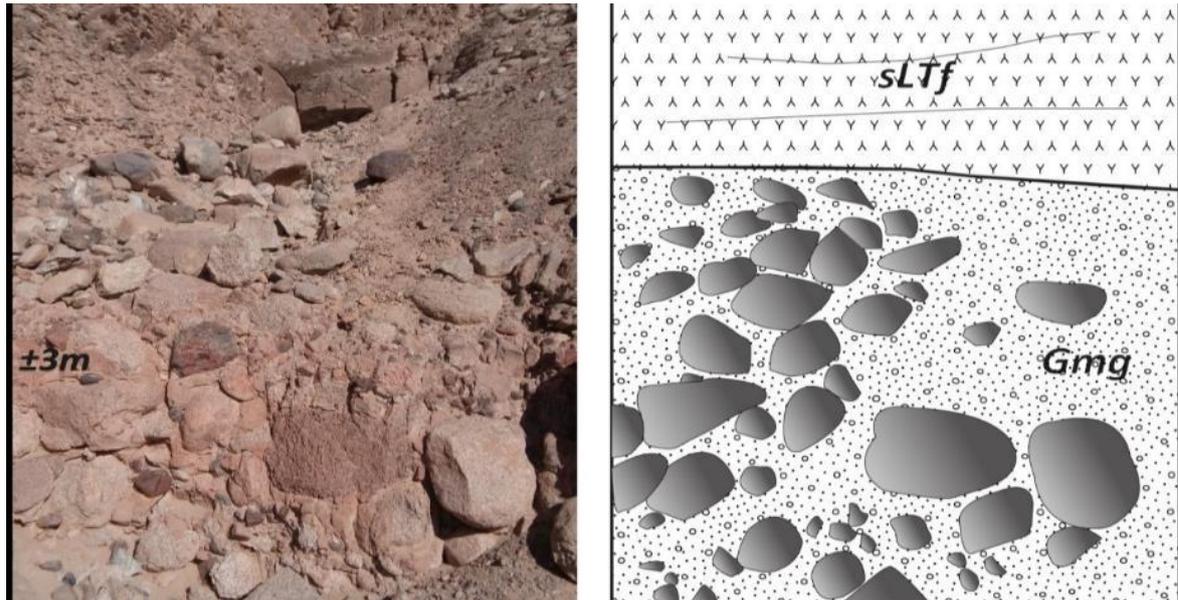


Figura 4. 33. Nivel basal mostrando el contacto entre los conglomerados y la depositación piroclástica sobreyacente. Cerro Acirume.

Secuencia A (~70 m). En la base presenta conglomerados con clastos de diámetro promedio 20cm y máximo 60cm, redondeados, polimícticos (andesita, granodiorita, diorita, areniscas), matriz soportados (<20%) de arenisca retrabajada volcanogénica (facies *Gmg*) con interbarras de arenisca (*Sl*), así como sets de conglomerados matriz soportados (<15%) grano-decrecientes con clastos de intrusivos, areniscas, calizas y lutitas negras de diámetro máximo 30-50cm.

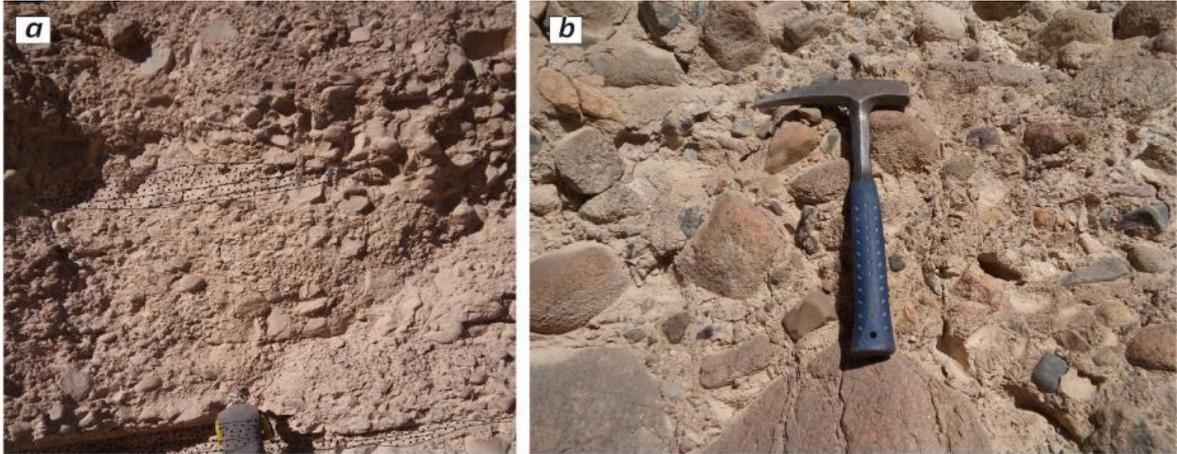


Figura 4. 34. a) Conglomerados y facies de areniscas interbarras, b) Conglomerados de la secuencia A-Acirume.

Secuencia B (~70 m). Localmente se ve cierta discordancia angular y cambio de color de la secuencia A gris blanquecina a esta secuencia de color gris beige, disminución de clastos de intrusivos y aumenta clastos de arenisca; en general consiste de conglomerados con clastos redondeados hasta sub angulosos de matriz limo-arenisca con tendencia grano-decreciente (facies *Gmg*, *Gh*), es notable la aparición de esporádicos clastos con diámetro de hasta 1 m, y continúan los sets de conglomerados grano-decrecientes con clastos promedio 10-15cm de diámetro.



Figura 4. 35. a) Clastos esporádicos de hasta 1m de diámetro y b) sets de conglomerados granodecrecientes de ± 30 cm.

Sobre la secuencia B se localiza toba de cristales con líticos esporádicos de diámetro menor a 1cm, de color rosado blanquecino (*mLT*), pertenecientes a la Fm. Huaylillas.

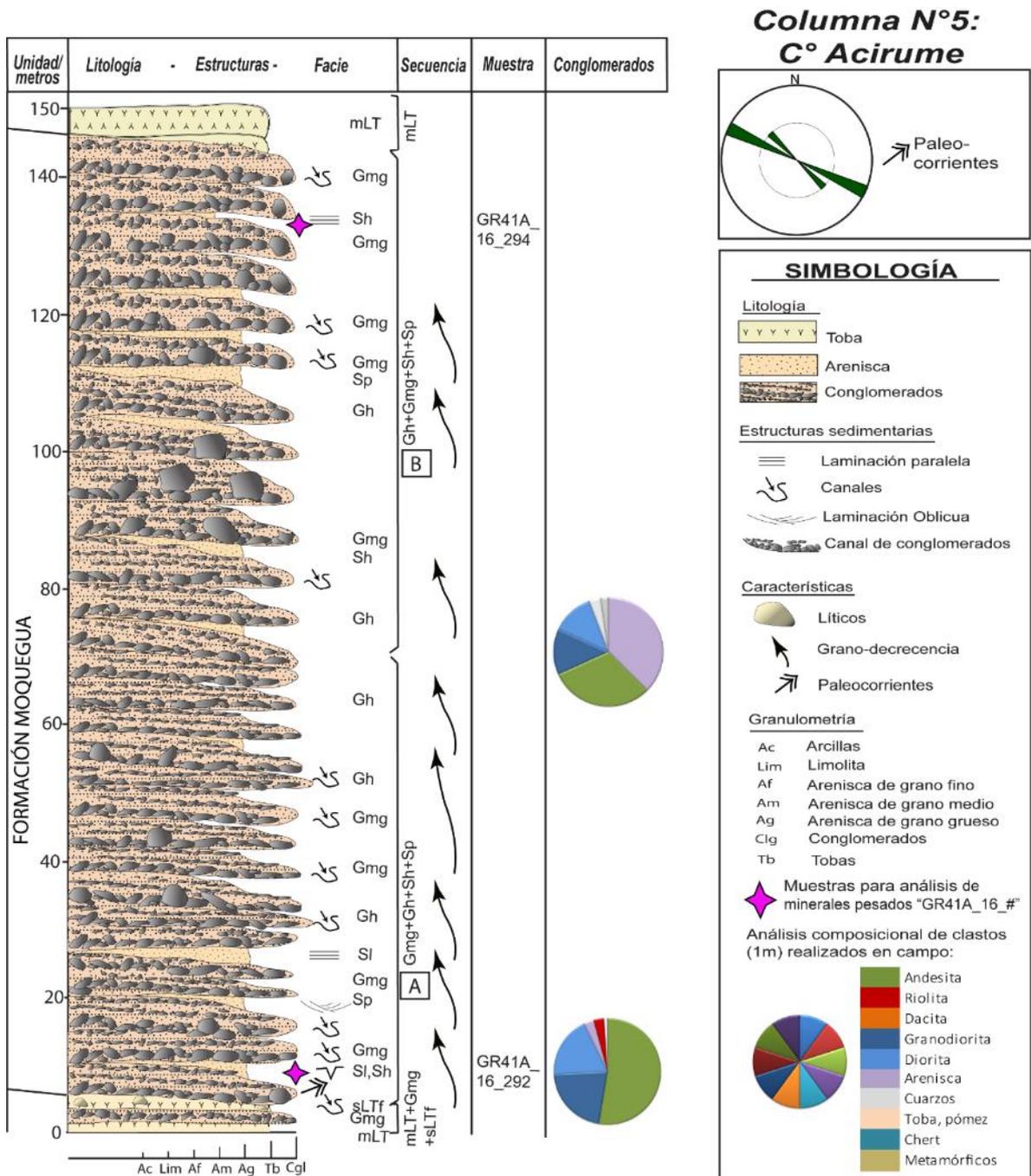


Figura 4. 36. Columna estratigráfica resumida de la unidad Moquegua en el Cerro Acirume.

INTERPRETACIÓN O ANÁLISIS DE LAS FACIES

Esta columna estratigráfica dominada por conglomerados con clastos redondeados a subangulosos ha sido dividida en dos secuencias localmente diferenciadas por un cambio de color y ligera discordancia, la descripción de las facies en la secuencia "A" se asocia a los elementos arquitecturales *GB* (bancos de gravas) y *SB* (lentes de areniscas, facies de interbarras) típicos de un sistema de alta energía muy proximal a la fuente, la Secuencia "B" se coliga con *GB+SB* con añadidura de clastos esporádicos de diámetro promedio 1m

indica facies con posible influencia *debris flow* o de conos aluviales; las paleocorrientes locales orientas los clastos al nor-oeste y en secuencias superiores buzan en bajo ángulo al sur-oeste, se trata del estilo fluvial tipo braided proximal tipo “Scott” (Miall, 1996) cuya ubicación espacial muy cercana a la Cordillera Occidental, permite fijarla como su principal zona de aporte.

4.1.5.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°5

FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR. En esta área se ha extraído dos muestras para el tratamiento y análisis de minerales pesados, descritas a continuación:

Tabla 4. 8. Detalle de las muestras de areniscas tomadas en campo, Cerro Acirume.

COD_MUESTRAS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-292	Pachía (36v)	Cerro acirume	375635	8035455	Arenisca
GR41A-16-294	Pachía (36v)	Cerro acirume	375847	8034954	Arenisca arcósica

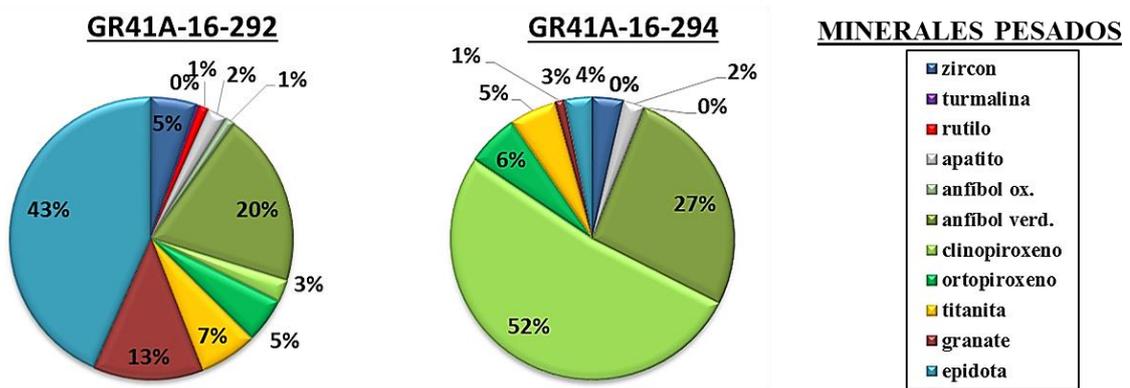


Figura 4. 37. Resultado del conteo de granos de minerales pesados en las muestras de Acirume.

El conteo de granos en la muestra GR41A_16_292 ubicada en la base de la columna muestra el predominio de epidotas (43%) con formas subredondeadas a redondeadas de color verde-amarillo, algunas son el resultado de la alteración de otros minerales, anfíboles verdes hojosos (20%), minerales subordinados granates (13%) con formas subredondeadas de coloraciones verde y amarillo, titanitas subredondeadas (7%), en menor proporción piroxenos (8%), rutilos (1%) y turmalinas (<1%).

El conteo de la muestra GR41A_16_294 ubicada al tope de la unidad Moquegua, contacto con Huaylillas refleja la predominancia de clinopiroxenos (52%) con formas subhedrales, reflejando moderado grado de desgaste en sus bordes, seguido en abundancia por anfíboles alargados de color verde y marrón (27%), y como minerales de menor proporción titanitas

(5%) y zircones prismáticos (4%), apatitos que conservan aún su forma original (2%) y en mínima cantidad granates verdosos (1%).

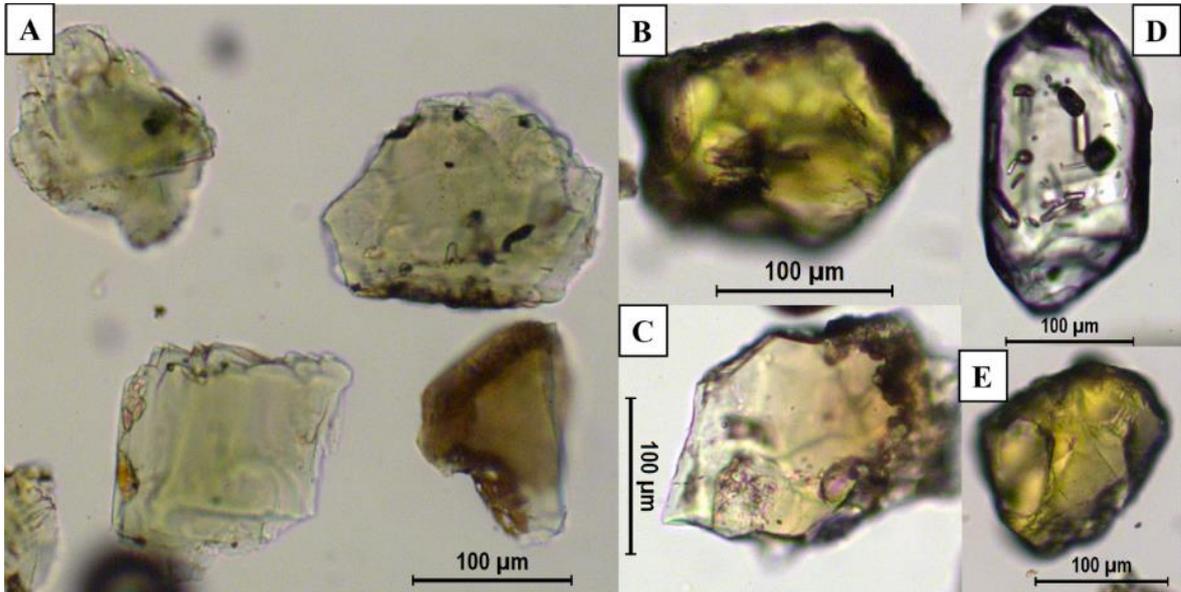


Figura 4. 38. En A) clinopiroxenos de la muestras GR41A-16-294, en B y C) granates, D) zircón y E) titanita pertenecientes a la unidad GR41A-16-292.

4.1.6.1 COLUMNA N°6. CERRO MAGOLLO

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 362486	N: 8005419	COTA: 501msnm	Millo



Figura 4. 39. Vista al este en el Cerro Magollo.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~27m). La base de esta secuencia descansa de manera erosiva sobre la Formación Huaylillas a manera de canales de conglomerados, siendo la mayoría de los clastos soportados entre ellos, polimícticos (riolitas, tobas, andesitas) , redondeados y de diámetro máximo 35cm (facies *Gcm*, *Gt*, *Gmg*) tal como se observa en la Figura 4.40.

Usualmente se presenta, con intercalaciones de areniscas grano grueso mal ordenadas compuestas de cuarzo y fragmentos líticos en matriz de arenisca muy fina (facies *St*), con algunas venillas de yeso; y la segunda parte de esta secuencia contiene sets de conglomerados grano-decrecientes ($\pm 30\text{cm}$) clasto soportadas hasta areniscas de grano medio (facies *Gcm*, *Sp*, *St*).

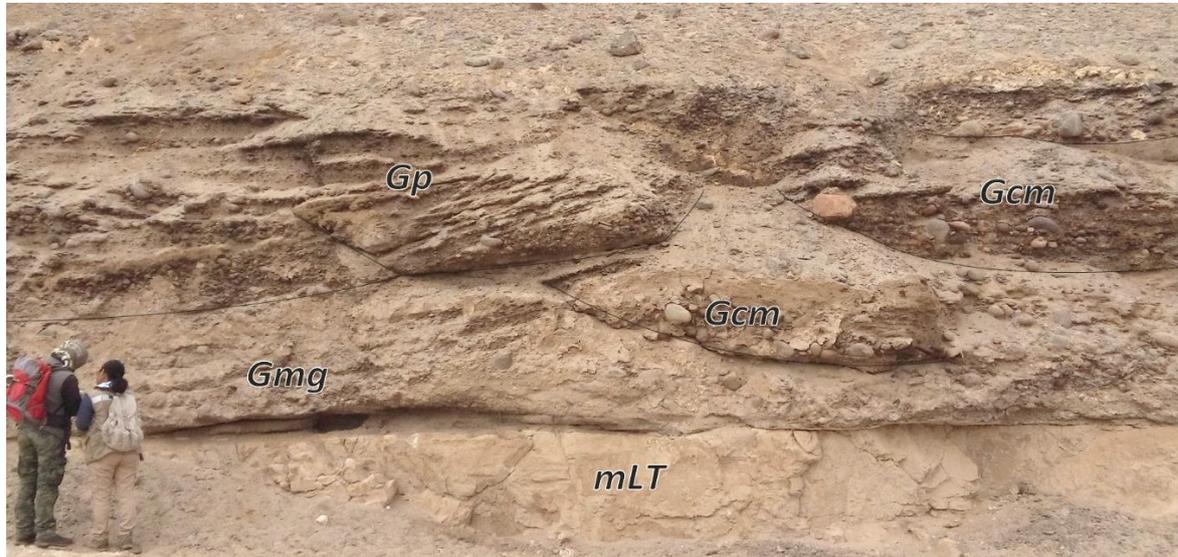


Figura 4. 40. Contacto entre conglomerados de la unidad Magollo (Secuencia A) y Fm. Huaylillas.

Secuencia B (~10m). Niveles areniscas grano medio con laminaciones sub-horizontales (facies *Sh*, *Sl*) intercaladas con tobas lapilli (facies *sLT*), observándose pómez flotadas (Figura 4.41 a y b) con estructuras de sismitas (convolutas muy deformadas), laminación paralela y oblicua.

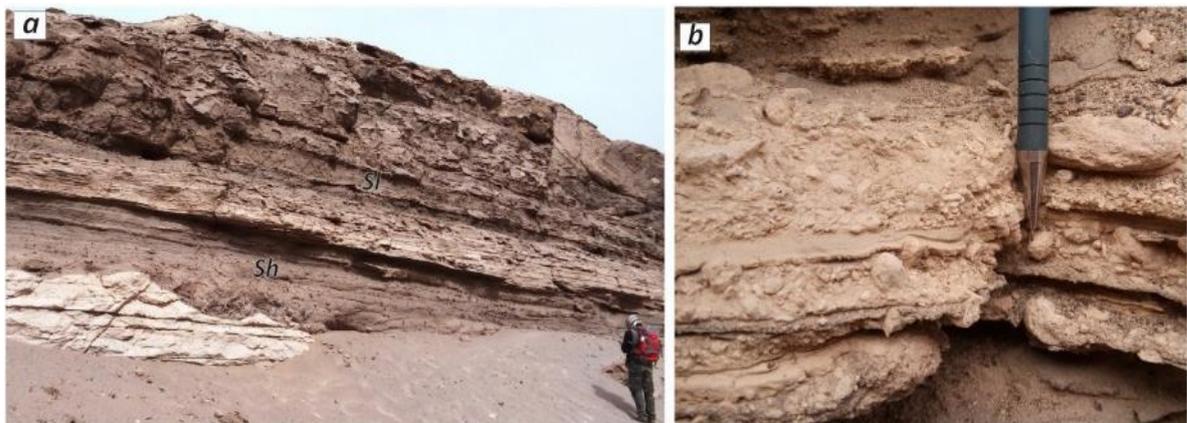


Figura 4. 41. En a) Areniscas intercaladas con niveles de tobas y en b) pómez flotadas en niveles de areniscas.

Secuencia C (>8m). Esta secuencia descansa de manera erosiva a la Secuencia B. Consiste en conglomerados matriz soportados con clastos subangulosos de diámetro máximo de

80cm con abundantes basculamientos (facies *Gmg*) como se observa en la Figura 4.42. Al tope se observan lentes muy finos de limolitas con aparentes grietas de desecación, además de areniscas y tobas retrabajadas con fragmentos líticos y de pómez.

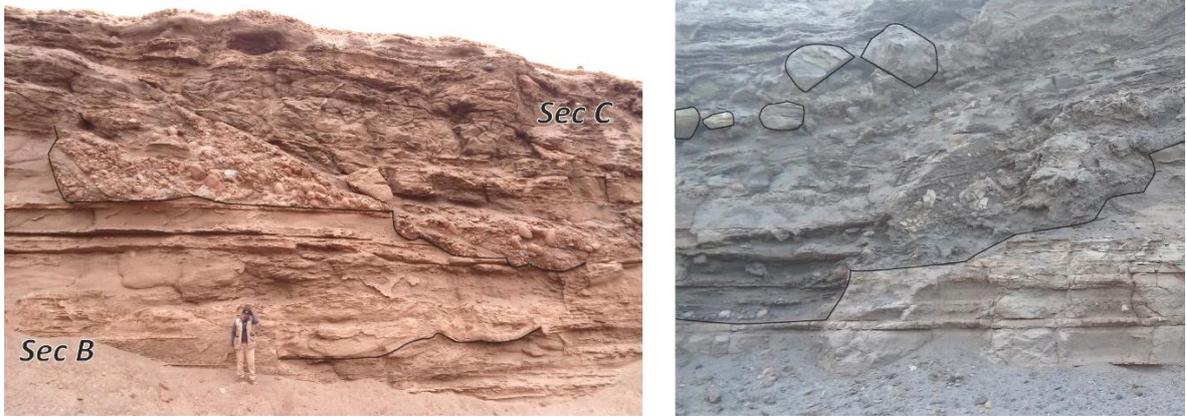


Figura 4. 42. Secuencia C en superficie erosiva a la secuencia B.

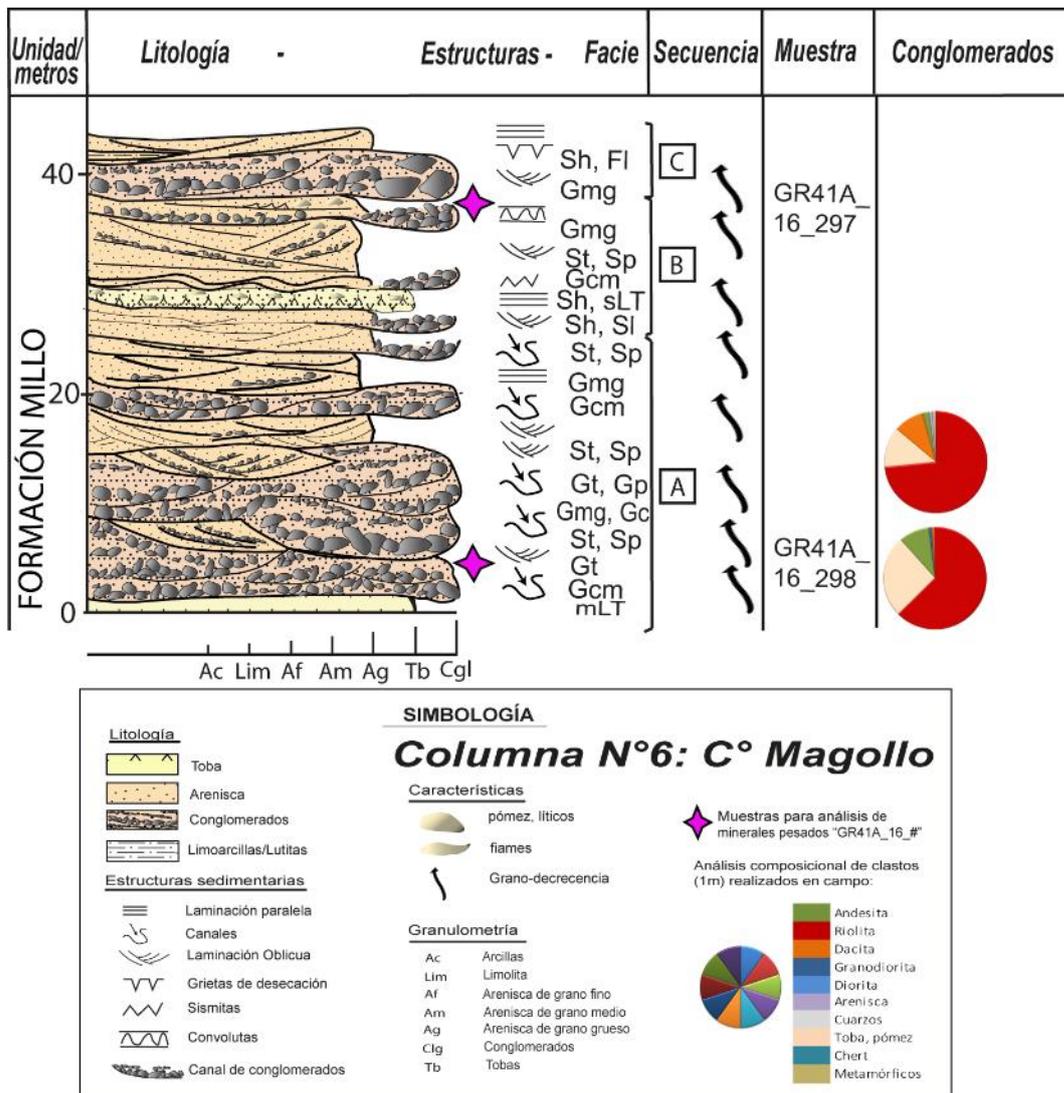


Figura 4. 43. Columna resumida de la unidad Millo, Cerro Magollo.

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

Esta unidad litológica representa remanentes de terrazas colgadas depositadas durante etapas tempranas de la profunda incisión del valle de Tacna (Flores et al., 2004). En la columna estratigráfica levantada en Cerro Magollo, al oeste de la ciudad de Tacna, se ha considerado tres secuencias principales; la primera “A” asociada a múltiples canales conglomerádicos y lentes de areniscas (elementos *SG+GB+SB*) como canales móviles en un régimen de energía moderada, se trataría de un evento posterior a la actividad Huaylillas (~24-10 Ma), siendo este último la principal fuente de aporte de clastos, mencionado en el análisis composicional de los clastos (tobas y rocas de composición riolítica). La Secuencia “B” consiste en niveles acumulados de oleadas piroclásticas junto a niveles de areniscas y lutitas que indican sedimentación en un ambiente de baja pendiente y de baja energía en el sistema, además la presencia de sismitas y convolutas evidencia un periodo de inestabilidad, eventualmente un evento sísmico. La secuencia “C” asociada a conglomerados matriz soportados con clastos de pómez buzando en promedio 12°SW tiene una base erosiva y basculamientos que indicarían un periodo de cambio en el sistema, aumento de energía, que erosiona los niveles arenisca-piroclastos y deposita clastos que evidencian su ruptura próxima al área de aporte. Se coliga a un ambiente fluvio-aluvial de baja pendiente con mayor aporte de la Formación Huaylillas.

4.1.6.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°6

FORMACIÓN MILLO. Se ha recopilado dos muestras en la columna señalada (GR41A-16-297 y GR41A-16-298), y GR41A_16_38 al oeste de Arco de la alianza, Ciudad de Tacna.

Tabla 4. 9. Muestras para análisis de minerales pesados, Cerro Magollo.

COD_MUESTRAS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-38	Tacna (37v)	Oeste de Arco de la Alianza	366377	8009915	Arenisca
GR41A-16-297	Tacna (37v)	Cerro Magollo	361798	8005110	Litoarenita
GR41A-16-298	Tacna (37v)	Cerro Magollo	362486	8005419	Arenisca

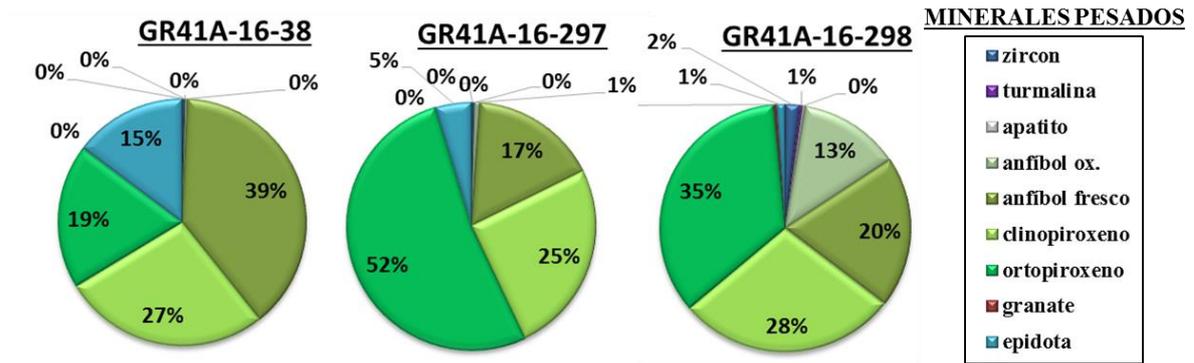


Figura 4. 44. Resultados del conteo de granos de minerales pesados, unidad Millo.

La proporción de minerales en las muestras 297 y 298 es muy similar, sin embargo GR41A_16_38 presenta una curva inversa, aunque con similares componentes. Los minerales contados en GR41A_16_298 reflejan el predominio de ortopiroxenos (35%), clinopiroxenos (28%), y anfíboles verdosos frescos (35%), de color verde translúcidos con leve corrosión, y como minerales menores se tiene zircons piramidales alargados bien formados (euhedrales) con mínimo desgaste en sus bordes (2%) aparentemente por sedimentación. En la muestra GR41A_16_297 los minerales presentan cobertura de aparente vidrio volcánico como reflejo de la influencia piroclástica en estos sedimentos, con moderado grado de corrosión en los bordes y aparente redondeamiento de granos, además se observa un aumento de epídotas producto de la alteración de ferromagnesianos (de <1% a 5%), donde se encontró sólo un zircón en el slide y aparentemente está fragmentado, ésta muestra se correlaciona con GR41A_16_38 compuesto por anfíboles alargados de color verde translúcido (39%), clinopiroxenos (27%) alargados y subredondeados con tonalidades verdosas y ortopiroxenos (19%) alargados y redondeados con tonalidades verdosas, muchos de estos granos están cubiertos de vidrio volcánico, las epídotas (15%) son redondeadas y algunas son sólo alteración de ferromagnesianos.

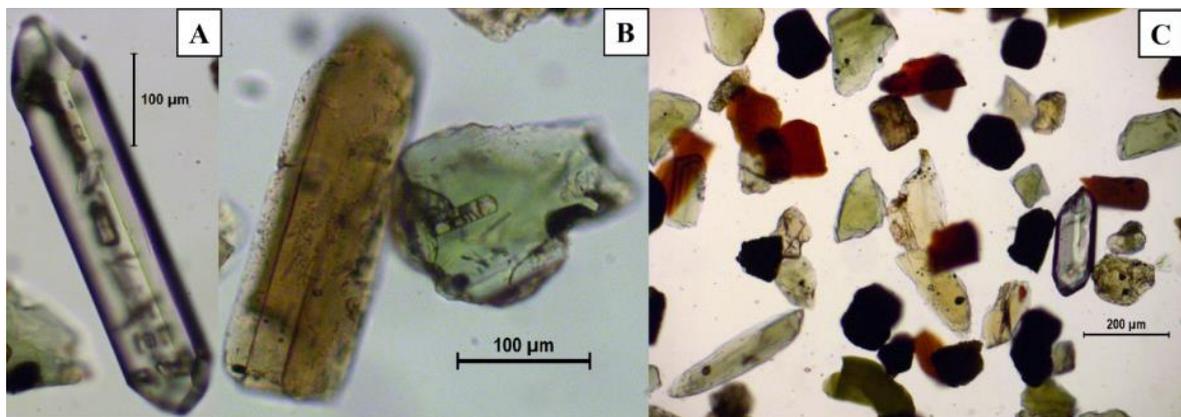


Figura 4. 45. Minerales pesados en A) zircón, en B) ortopiroxeno y anfíboles y en C) variados minerales pesados de piroxenos, anfíboles y zircón en muestras de la unidad Millo.

4.1.7.1 COLUMNA N°7. YARAHUAY

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 342466	N: 8036389	COTA: 725msnm	Huaylillas, Millo



Figura 4. 46. Vista al nor-este, lugar de levantamiento de columna estratigráfica.

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (~10m). Se observa un paquete de toba de cristales, soldada, descrita macroscópicamente compuesto por cuarzo, feldespatos, biotita, pómez y esporádicos líticos, color violáceo (*mLT*) como se observa en la fotografía 4.47 a.

Secuencia B (~33m). Constituida por areniscas volcanogénicas (retrabajadas) observadas en la Figura 4.47b con abundantes granos de cuarzo, feldespatos, biotitas y fiamas, e intercalado con lentes de conglomerados mal sorteados o areniscas conglomerádicas (facies *Gmg+Sh*), resalta en estas capas un nivel de calcita.

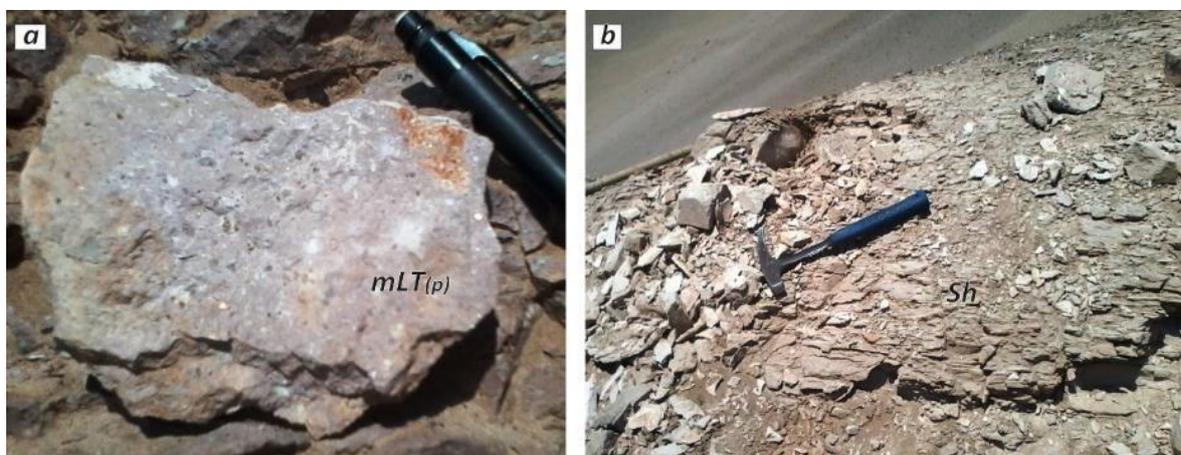


Figura 4. 47. En a) toba de cristales con esporádicos pómez y b) areniscas tobáceas laminadas horizontalmente.

Secuencia C (~15m). Se observa nivel de toba de color blanco violáceo, descrito macroscópicamente de composición riódacítica (mLT), se encuentra cortada por un dique andesítico verdoso de ± 3 m de espesor, cierto nivel de calcita.

Secuencia D (~35m). En la base exhibe conglomerados matriz soportados con fragmentos volcánicos en matriz de arenisca tobácea (Figura 4.48) y areniscas con laminación oblicua (facies *Gmg*, *Sp*), seguidos de un nivel marcado de toba (facies *sT*) y conglomerados con clastos subangulosos de areniscas, andesitas, riolitas, pómez (facies *Gmg*) con canales de areniscas volcanogénicas (facies *Sl*); al tope areniscas de laminación oblicua y conglomerados con niveles de yeso y calcita (facies *Sp*, *Gmg*).

Secuencia E (~28m). Formada por toba lapilli con abundante pómez de diámetro promedio 1.5cm, con cristales de cuarzo, feldespato potásico y biotitas (facies *mLT-p*), al tope aumenta el contenido clástico como arenisca volcanogénica y conglomerados de matriz tobácea (facies *Sh* y *Gmg*).



Figura 4. 48. Conglomerados matriz soportados y componente volcánico

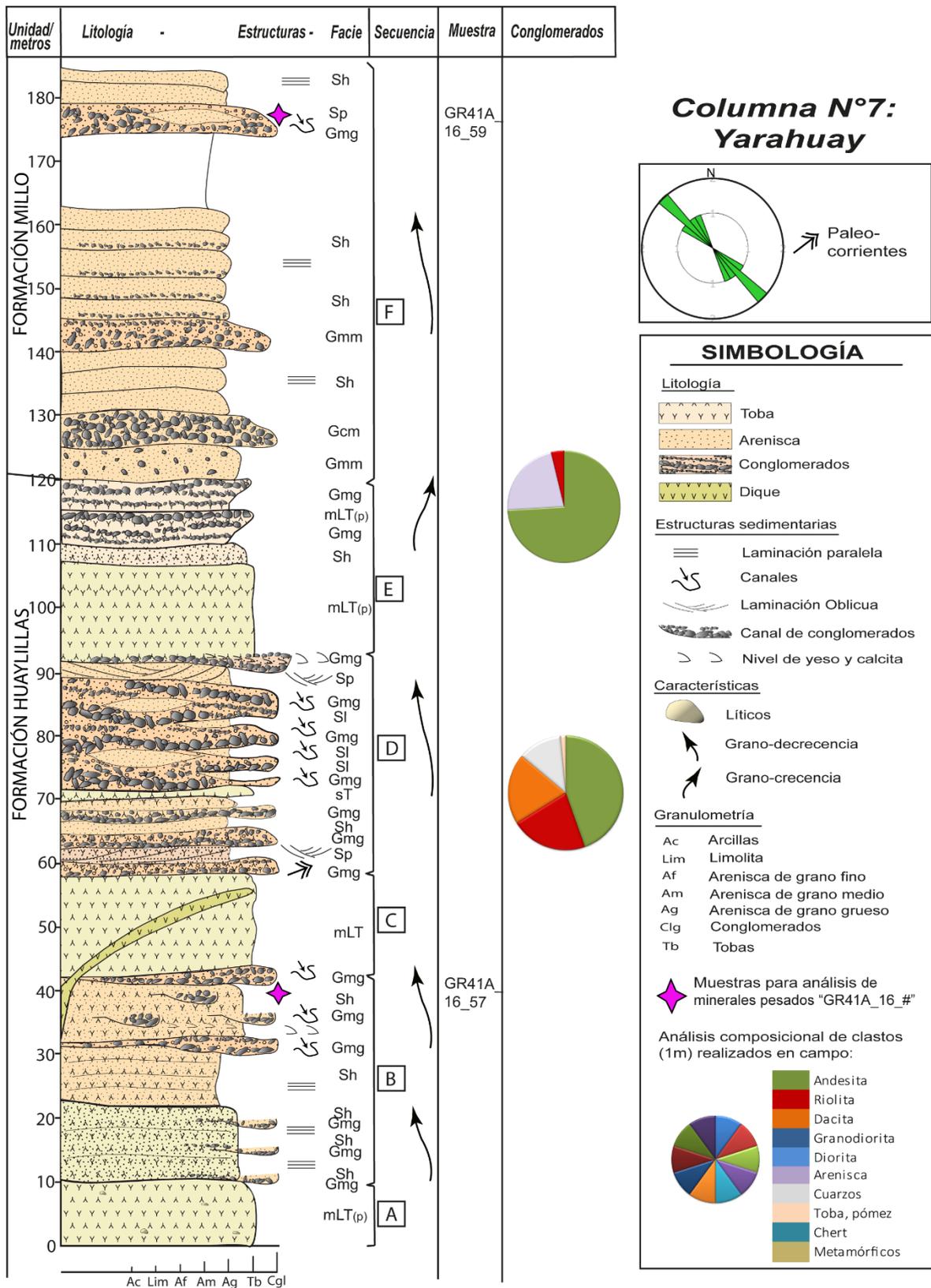


Figura 4. 49. Columna estratigráfica resumida desarrollada en la localidad Yarahuay.

Secuencia F (>75m). Esta secuencia se caracteriza por ser dividida en dos sub-secuencias, siendo la primera grano-decreciente y la segunda grano-creciente. Se nota la disminución

del componente volcánico. Estos niveles presentan en la base areniscas conglomerádicas granocrecientes compuestas de clastos pequeños en matriz de arenisca volcanogénica de grano medio (facies *Gmm*) que gradan a conglomerados clasto-soportados de diámetro máximo 30 cm subredondeados compuestos principalmente de andesita y areniscas (facies *Gcm*); en la parte media se observan estratos de areniscas con componente volcánico y conglomerados en matriz de arena grano media a gruesa (facies *Sh*, *Gmm*). La parte superior de la secuencia F tiene tendencia grano-decrecientes y consiste en areniscas conglomerádicas y areniscas grano grueso de selección moderada, granos subangulosos a subredondeados de cuarzo, feldspatos y líticos oscuros (facies *Sh*), al tope puede observarse paquetes de conglomerados polimícticos de andesitas y riolitas principalmente con clastos de diámetro promedio 5cm, máximo 30cm y lentes de arenisca cuarzosa de granos redondeados (facies *Gmg*, *Sp*), cubiertos al final por areniscas (facies *Sh*) y depósitos eólicos recientes.

INTERPRETACIÓN O ANÁLISIS DE LAS FACIES

Esta columna estratigráfica ha sido descrita al oeste de la localidad de Yarahuay (Sama Grande en Figura 3.1) y se ha dividido en seis secuencias. De manera resumida se tiene en la base tobas soldadas de composición riolítica masiva, indica un estadio explosivo lejano del centro que fue interrumpida por periodos de depositación de sedimentos (elementos *SB* + *GB*) con influencia tobácea en un sistema fluvial de régimen moderado, cubierta por tobas riolíticas con influencia de un dique andesítico. La Secuencia “D” consiste en conglomerados grano-decrecientes y lentes de arenisca, que se asocian a elementos arquitecturales *GB* y *SB*, canales de baja sinuosidad y moderada estabilidad de un tipo aluvial; el cual es cubierta por un paquete de tobas lapilli que representaría el tercer evento de la Formación Huaylillas, los mismos que se han podido observar en el cuadrángulo de Tacna. La secuencia superior consiste en >70 metros de espesor, y se atribuyen sus estratos a la unidad Millo, debido a a abundancia de material detrítico; sin embargo, el análisis de minerales pesados resalta el gran parecido composicional de la muestra GR41A-16-59 y la muestra GR41A-16-06 perteneciente a la Secuencia “c” de la columna 1 en Cerro Chuschuco, debido al aporte de sedimentos básicamente de la unidad Huaylillas, no descartando que sea sólo una secuencia de período de calma en esta unidad. En conclusión, se representa en su base un sistema aluvial y en el tope canales con moderada carga de sedimentos que indicaría un sistema de alta energía.

4.1.7.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN COLUMNA N°7

Se ha tomado muestras para análisis de minerales pesados en niveles detríticos, base y tope de la columna estratigráfica, cuyas unidades son Huaylillas y Millo.

Tabla 4. 10. Detalles de las muestras obtenidas para el análisis de minerales.

COD_MUESTRAS	CUADRÁNGULO	LOCALIDAD	X	Y	LITOLOGÍA
GR41A-16-57 (Fm. Huaylillas)	Pachía 36v3	Yarahuay, noroeste de Tacna	342371	8036355	Arcosa
GR41A-16-59 (Fm. Millo)	Pachía 36v3	Yarahuay, noroeste de Tacna	342198	8036049	Litoarenita

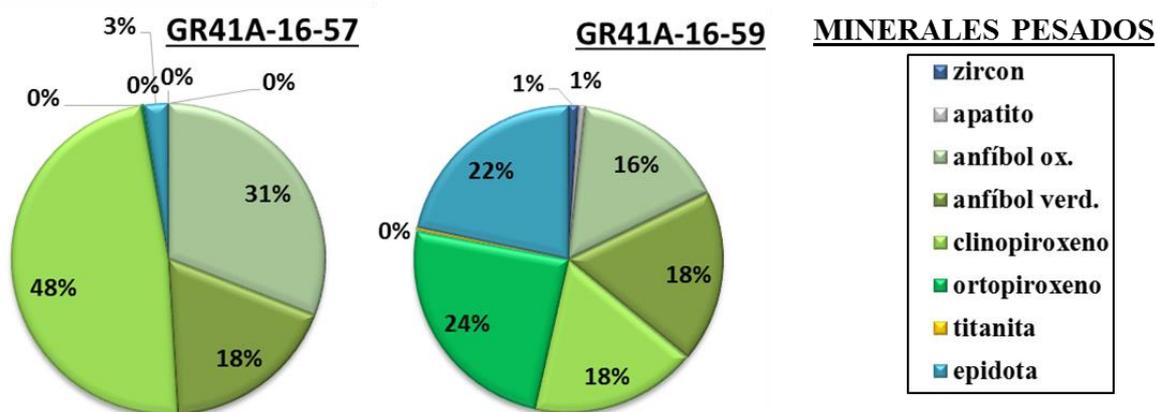


Figura 4. 50. Resultado del conteo de granos en muestras de Yarahuay.

La muestra de roca extraída de la unidad Huaylillas GR41A_16_57 contiene abundantes clinopiroxenos verdes translúcidos con cierta cobertura de vidrio volcánico (48%), seguido anfíboles oxidados (31%) y subordinados anfíboles verdosos (18%) alargados con leve corrosión, y menos cantidades de epidotas (3%); a diferencia de GR41A_16_59 que contiene abundancia de ortopiroxenos (24%) alargados y subredondeados con moderado grado de desgaste, seguida de clinopiroxenos (18%), anfíboles verdosos (18%) y oxidados (16%) con profusa cobertura de vidrio volcánico, epidotas predominantes (22%) y muy escasos zircons prismáticos (1%), apatitos y una titanita.

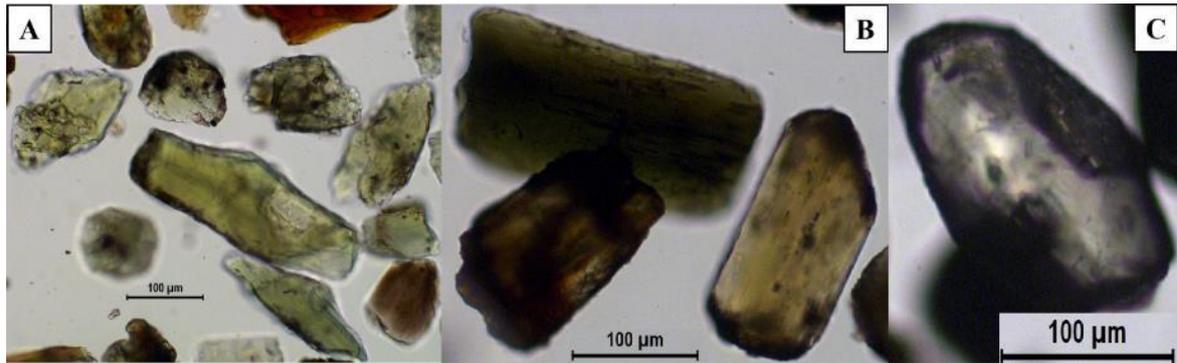


Figura 4. 51. Minerales identificados en A) clinopiroxenos y anfíboles de GR41A-16-57, en B) ortopiroxeno y anfíbol y C) zircón de la muestra GR41A-16-59.

POZOS DE PERFORACIÓN

El desarrollo de los pozos de perforación diamantina realizados en Tacna tenía la finalidad de conocer el subsuelo del valle del río Caplina, correlacionar unidades y delimitar acuíferos que en la actualidad están en explotación.

La presente tesis ha tomado información de tres pozos perforados con autorización del Proyecto Especial Tacna (PET) siendo estos “TDY_01, TDY_02 y TDRY_02” (ver Figuras 3.14 y 4.1 para conocer su ubicación), realizado un logueo rápido de los testigos conservados y también se ha extraído muestras con la finalidad de analizar los minerales pesados y utilizarlos de manera productiva.

4.1.8.1 COLUMNA N°8. LOGUEO POZO TDY_01

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 338550	N: 7986000	COTA: ±35msnm	Moquegua, Huaylillas, Millo

DESCRIPCIÓN DE FACIES Y SECUENCIAS SEDIMENTARIAS

Secuencia A (>140m). Formada por rocas clásticas de la parte inferior del pozo sin alcanzar el basamento, se describe en su base areniscas lito-clásticas cuarzosas con laminación oblicua intercalada con niveles de lutitas de laminación paralela, continuado por areniscas grano medio y grueso compuestas de cuarzo, feldespatos y líticos volcánicos, así como algunos paquetes de conglomerados matriz soportados con clastos de andesitas principalmente con diámetro promedio 4mm y lutitas y un nivel muy delgado de yeso (facies *Gm*, *Sh*, *Sl*, *Fl*).

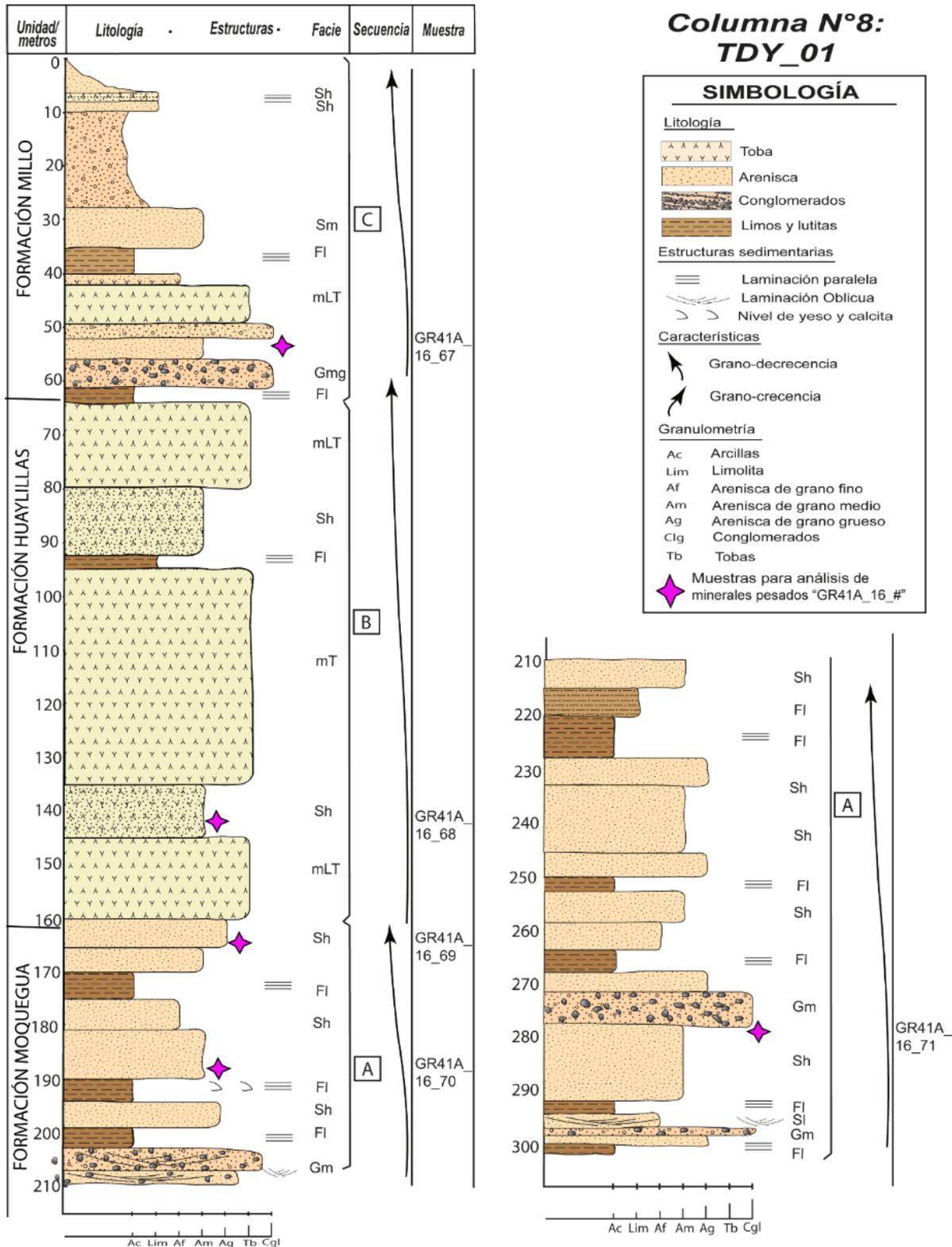


Figura 4. 52. Columna estratigráfica resumida del pozo TDY_01.

Secuencia B (~95m). Caracterizada por el dominio de material volcánico, en la base toba de cristales con cuarzo, feldespatos y esporádicos líticos (mLT) alternada con arenisca grano medio y grueso compuestas de cuarzo, plagioclasas, fragmentos líticos y pómez, cementadas con yeso (Sh), cubierta por toba de cristales con cuarzo y feldespatos (mT) y al

tope se describen lutitas y areniscas tobáceas de grano medio con cuarzo, feldespatos y micas (facies *Fl*, *Sh*, *mLT*).

Secuencia C (~65m). Se marca el inicio de esta secuencia por lutitas laminares (facies *Fl*), conglomerados matriz soportados con clastos de andesita, arenisca cuarzosa, granos de cuarzos, feldespatos y calcita (facies *GmG*), areniscas grano grueso de cuarzo, feldespatos, ferromagnesianos y toba volcánica alterada (facies *Sh*, *mLT*), al tope predominan lutitas laminadas y arenisca grano fino y medio laminar.

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

Los datos de este pozo se ha dividido en tres secuencias principales basados en cambios de litología que varía entre rocas sedimentarias y volcánicas; la Secuencia “A” ubicada en la base del pozo no ha alcanzado el basamento de la cuenca, y se conforma de areniscas, limolitas y conglomerados en matriz areno-arcillosa, asociados especialmente a elementos arquitecturales como *LS+FF*, que se interpretan como depósitos de llanuras de inundación o planicies con algunas barras intercanales, en un sistema con régimen de flujo crítico. La Secuencia “B” está compuesta de tobas lapilli y se pueden asociar a los eventos de la Formación Huaylillas (~24-10 Ma), el cual tiene evidencias un nivel de calma observado en superficie también, presentando areniscas *Sh* y niveles de *Fl* que señalan periodos de calma con sedimentos en terrenos casi llanos. La Secuencia “C” comprende más de 60 m de espesor y dispone nuevamente sedimentos clásticos (post-Huaylillas), los cuales asociamos a la unidad Millo. Estas presentan algunas sub-secuencias, conformados por material clástico más disgregado e indiviso del material cuaternario superficial. Los elementos *SG+LS+FF* serían los principales elementos arquitecturales asociados que se ubican en el rango de depósitos aluviales.

4.1.8.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDY-01

Se ha descrito cinco muestras y se ha procesado para el conteo de espectros de minerales pesados, resultados mostrados en la Tabla 4.11 y la Figura 4.53 que expone sus porcentajes.

Tabla 4. 11. Descripción de las muestras obtenidas del pozo TDY_01.

COD_MUESTRAS	LOCALIDAD	POZO	PROFUNDIDAD (m)	LITOLOGÍA	UNIDAD
GR41A-16-67	La Yarada, Los Olivos	TDY-01	46 - 49	Litoarenita feldespática	Millo
GR41A-16-68	La Yarada, Los Olivos	TDY-01	143.5	Litoarenita feldespática	Huaylillas
GR41A-16-69	La Yarada, Los	TDY-01	165	Litoarenita	Moquegua

	Olivos			feldespática	
GR41A-16-70	La Yarada, Los Olivos	TDY-01	189	Litoarenita feldespática	Moquegua
GR41A-16-71	La Yarada, Los Olivos	TDY-01	277.3	Litoarenita feldespática	Moquegua

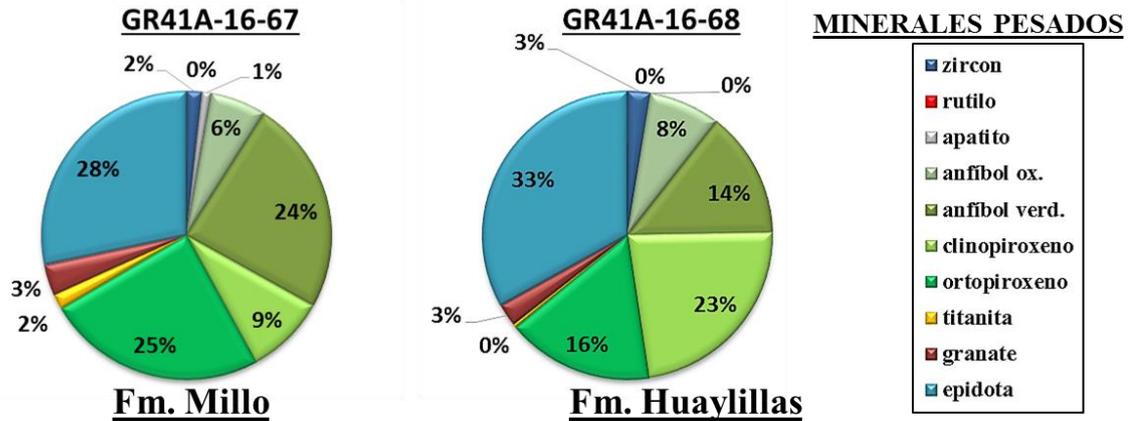


Figura 4. 53. Conteo porcentual de MP en unidades Millo y Huaylillas.

Los minerales encontrados en la muestra GR41A-16-67 (Figura 4.53, izquierda) son proporcionales a los contados en las muestras del Cerro Magollo; contiene como minerales predominantes los ortopiroxenos (25%), anfíboles verdosos (24%) y clinopiroxenos en menor proporción (9%). Estos minerales presentan bordes sub-redondeados con señales de moderada corrosión, así como recubrimiento parcial por vidrio volcánicos. Otros componentes en menor proporción son los granates de tonalidades verdosas (3%), titanitas (2%), apatitos (1%) y zircones (2%). La abundancia de epidotas detríticas (28%) indica una fuerte y consistente influencia de cuerpos rocosos alterados de metamorfismo de baja temperatura o factores sedimentarios que alteran minerales pre-existentes.

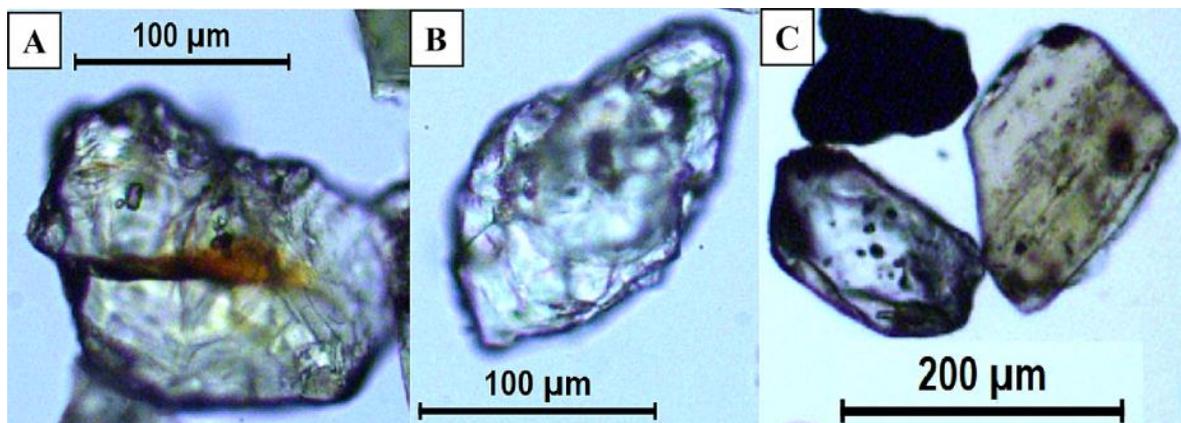


Figura 4. 54. Minerales pesados identificados en GR41A-16-67, en A) titanita, B) granate y C) zircón y ortopiroxeno pertenecientes a la unidad Millo.

La muestra GR41A-16-68 pertenece a la Fm. Huaylillas muestra abundancia en piroxenos (39%) como en las muestras anteriormente analizadas en otras áreas. Se presentan parcialmente cubiertos con vidrio volcánico y con formas subredondeadas, los anfíboles en cantidades subordinadas (14%) muestran poco desgaste y moderada corrosión en sus bordes. Las epidotas son predominantes en abundancia (33%) y aparentan elevado grado de corrosión y desgaste, también se observa zircons prismáticos (euhedrales) en menores proporciones (3%) y granates (3%).

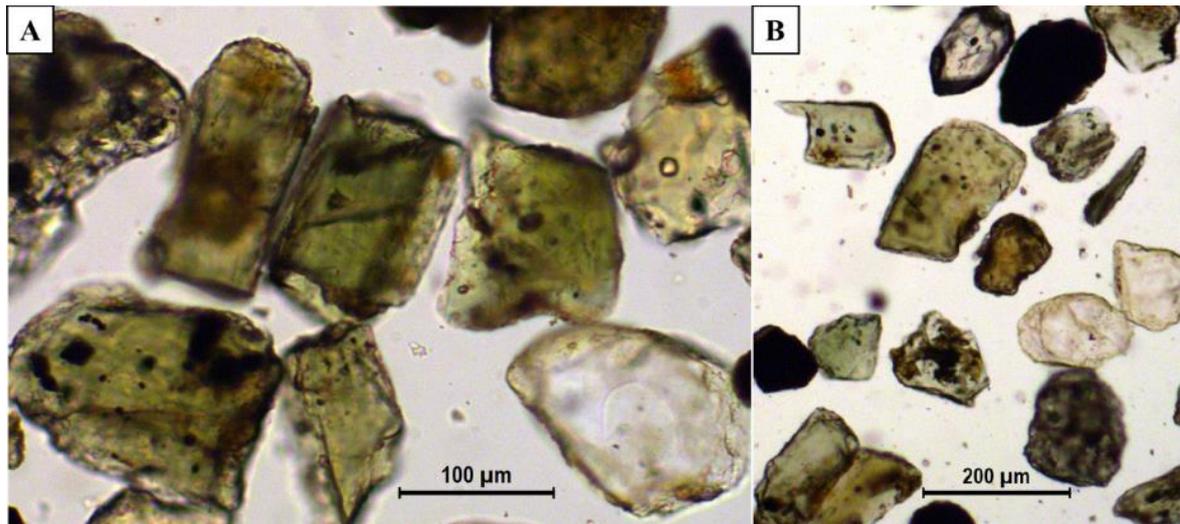


Figura 4. 55. Múltiples minerales pesados identificados en GR41A-16-68, en A) piroxenos y anfíboles, en B) piroxenos, zircón y epidotas.

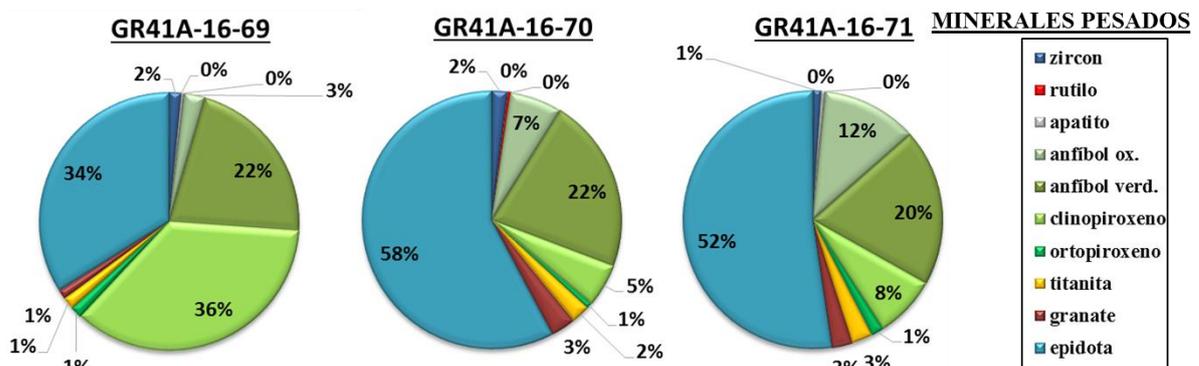


Figura 4. 56. Resultado de conteo de granos de muestras en unidad Moquegua.

Las muestras analizadas en la denominada Formación Moquegua (Superior), reafirmarían la hipótesis, debido a la abundancia de anfíboles (20 – 22%) y clinopiroxenos alargados (desde 5 a 36%), pero con bordes subredondeados debido al transporte, las epidotas corroídas y redondeadas son predominantes (34-58%), y como minerales de proporciones menores se encuentran granates verdosos (1-3%), zircons prismáticos (1-2%), titanitas (1-2%) subredondeadas levemente corroídas y escasos apatitos (<1%).

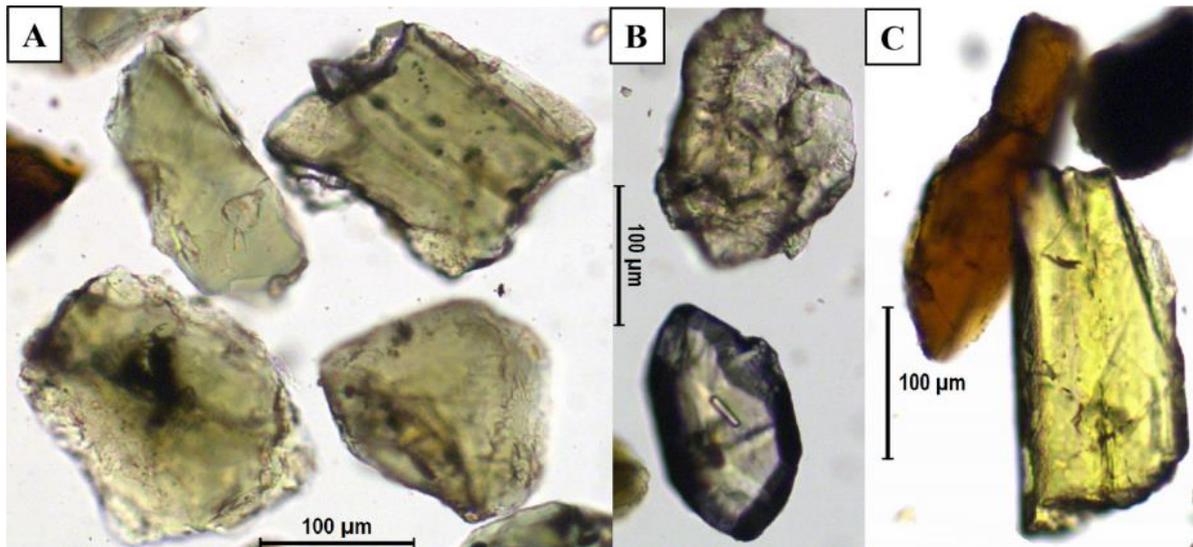


Figura 4. 57. Minerales identificados en la unidad determinada como Moquegua en el pozo TDY-01, en A) clinopiroxenos y anfíbol, en B) epidota (arriba) y zircón (abajo), en C) anfíbol oxidado y epidota (verde claro).

4.1.9.1 COLUMNA N°9. POZO TDY_02

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIONES
E: 359500	N: 7977500	COTA:87 msnm	Moquegua, Huaylillas, Millo

DESCRIPCIÓN DE FACIES Y SECUENCIAS SEDIMENTARIAS

Secuencia A (>143m). Se describe niveles de limolitas con intercalaciones de areniscas grano fino con fragmentos de pómez de hasta 7 cm de diámetro (facies *Fl*), superpuesto por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso con abundantes litoclastos volcánicos (*Sh*) y matriz de limos, continuados por areniscas cuarzo-feldespáticas con material tobáceo con clastos blandos y evidencias de grietas de desecación (facies *Sh*), intraclastos de roca volcánica (andesitas y tobas) de diámetro máximo 2-4 cm.

Secuencias B, C y D (~172m). La secuencia B de ~57m compuesta de toba de cristales con minerales de cuarzo, biotitas, algunos fiamas e intraclastos de diámetro máximo 2-3 cm (*mLT*), interrumpida por la secuencia C de ~37 m, compuesta por areniscas cuarzo feldespáticas con esporádicos clastos de tobas (diámetro máximo de 1-3 cm) y conglomerados con clastos (principalmente andesitas y tobas) de hasta 3 cm de diámetro en escasa matriz arenosa (facies *Sh*, *Gmg*); cubriendo estos sedimentos se encuentra la Secuencia D (~68m) que consiste en areniscas de color gris oscuro, con granos de cuarzo y feldespatos, laminadas y con presencia de líticos volcánicos (tobas, pómez) de diámetro menor a 2 cm y matriz arcillosa o tobácea, intercaladas con tobas de ceniza y líticos menores a 3 mm.

Columna N°9: TDY_02

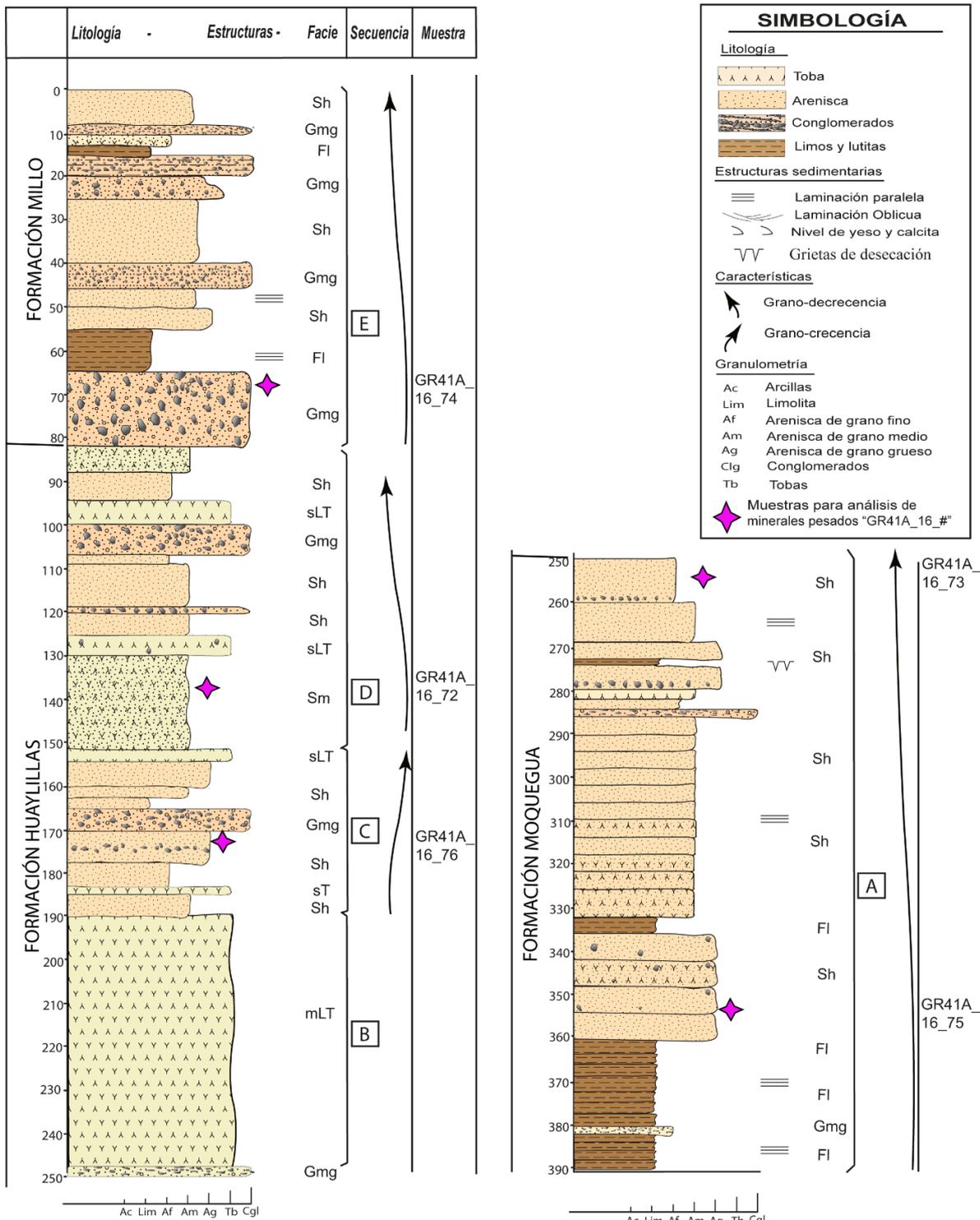


Figura 4. 58. Columna estratigráfica resumida del pozo TDY_02.

Secuencia E (~80m). Se presentan areniscas feldespáticas con biotitas en matriz de limos (facies *Sh*) conteniendo líticos de diámetro <5mm, así mismo niveles de conglomerados, matriz soportados, con clastos de hasta 5 cm de diámetro (facies *Gmg*), areniscas grano

medio en matriz tobácea y limolitas de laminación paralela (facies *Sh, Fl*); los niveles de conglomerados del nivel superior de la secuencia (ver la columna TDY_02) contienen clastos de hasta 10cm de diámetro de granodiorita principalmente en matriz de arena fina cuarzosa (facies *Gmg*).

INTERPRETACIÓN O ANÁLISIS DE LAS FACIES

Este pozo está ubicado en la frontera con Chile (al pie del cerro Espíritus), y ha sido dividido en cinco grandes secuencias conformadas por rocas sedimentarias y volcánicas en su mayoría. La Secuencia “A” se le atribuye a la unidad Moquegua y se asocia a los elementos arquitecturales *FF+LS+SG* de geometría plana, relacionado a sedimentos de llanura de inundación. Las secuencias “B, C y D” corresponden a la Formación Huaylillas, “B” indica el depósito de tobas Lapilli seguida de “C” la cual se interpreta que su depositación sucedió en un periodo de acumulación de sedimentos de forma grano-crecientes en su mayoría que se relacionan a sistemas del tipo aluvial, posibles terrazas. La Secuencia “D” está caracterizada por areniscas volcanogénicas con pómez que expresan la simultaneidad de los procesos volcánicos explosivos y la sedimentación. Finalmentela Secuencia “E” se encuentra vinculada a la Formación Millo, en base a su composición litológica. La abundancia de limolitas y arcillas (elementos *FF*) en esta unidad y los materiales poco consolidados conglomerádicos observados en estas capas son determinantes para la definición de un ambiente de planicie aluvial y suave pendiente, con incrementos temporales de la energía del sistema de sedimentación (e.g. Miall, 1985).

4.1.9.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDY-02

Tabla 4. 12. Detalle de las muestras obtenidas del pozo TDY_02.

COD_MUESTRAS	LOCALIDAD	POZO	PROFUNDIDAD (m)	LITOLOGÍA	UNIDAD
GR41A-16-74	santa rosa, Est. Hidro. - La Yarada	TDY-02	69.8	arenisca	Millo
GR41A-16-72	santa rosa, Est. Hidro. - La Yarada	TDY-02	138	arenisca	Huaylillas
GR41A-16-76	santa rosa, Est. Hidro. - La Yarada	TDY-02	173.8	arenisca	Huaylillas
GR41A-16-73	santa rosa, Est. Hidro. - La Yarada	TDY-02	255.8	arenisca	Moquegua
GR41A-16-75	santa rosa, Est. Hidro. - La Yarada	TDY-02	355.5	arenisca	Moquegua

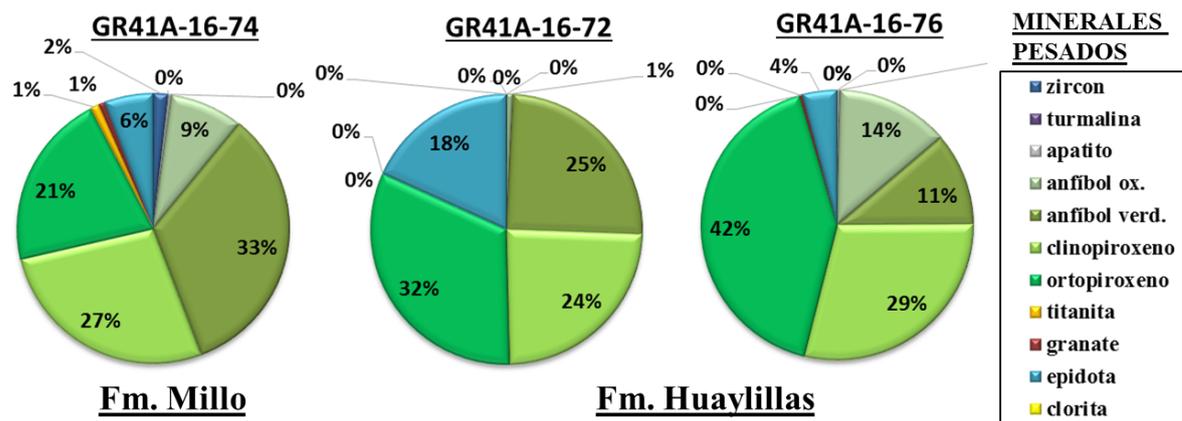


Figura 4. 59. Resultado del conteo de granos en las Formaciones Millo y Huaylillas, pozo TDY_02.

La muestra GR41A-16-74 presenta predominantes anfíboles verdosos (33%) que conservan sus formas euhedrales con grados moderados de corrosión, piroxenos subredondeados (48%) con moderado grado de desgaste y corrosión en sus bordes, así como epídotas de proporciones menores (6%) redondeadas en grado avanzado de corrosión, así como los zircones (2%), titanitas (1%), granates (1%) y apatitos (<1%).

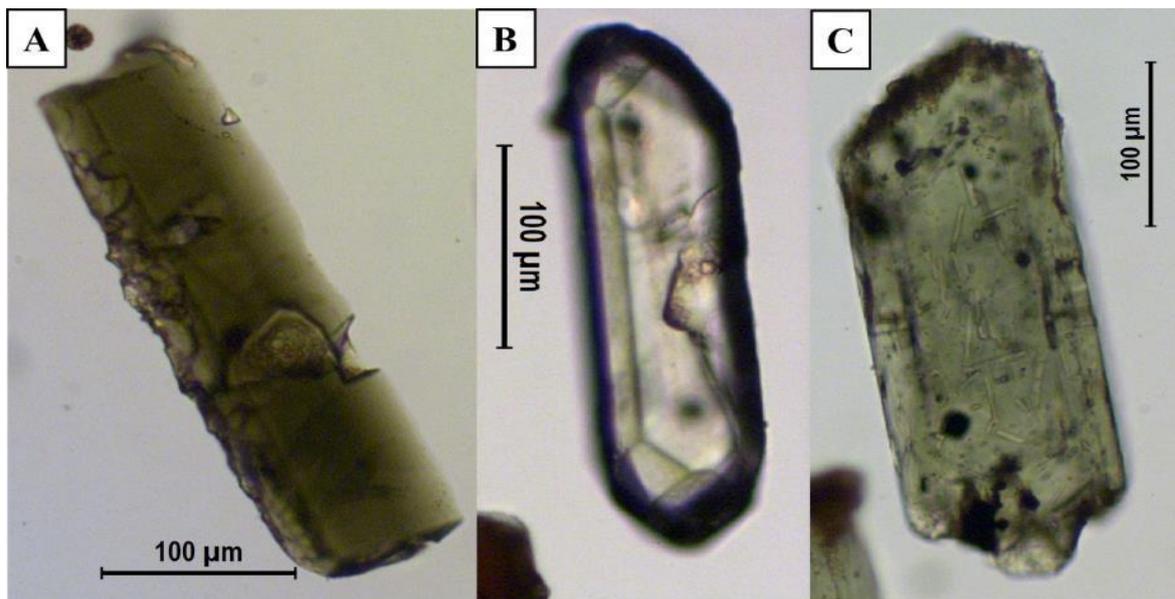


Figura 4. 60. Minerales pesados identificados en la muestra GR41A-16-74, en A) anfíbol, B) zircón y C) ortopiroxeno.

En la unidad Huaylillas dominan los piroxenos bien formados, pero con bordes desgastados, ortopiroxenos (32 – 42%) y clinopiroxenos (24 – 29%), anfíboles de color verde translúcido (11 – 25%) y epídotas (<18%) redondeadas y con grados muy avanzados de desgaste y corrosión.

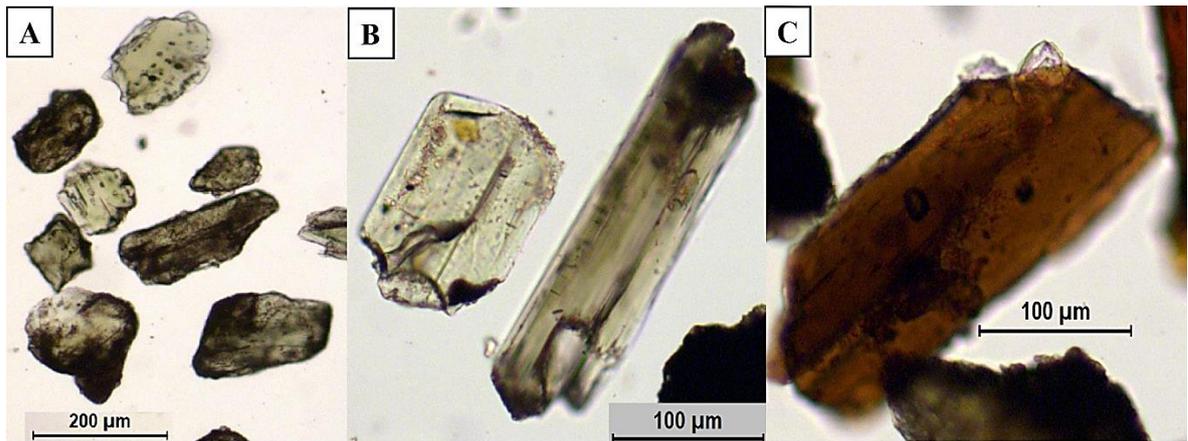


Figura 4. 61. Minerales pesados en Ay B) piroxenos y en C) anfíbol, de la unidad Huaylillas.

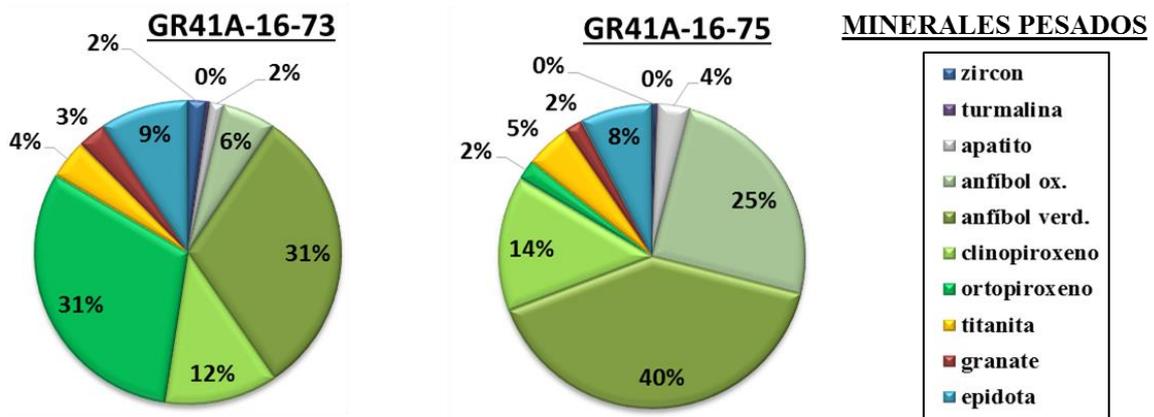


Figura 4. 62. Resultado del conteo de MP en muestras de la unidad Moquegua, pozo TDY_02.

En estas muestras los minerales dominantes son los anfíboles verdosos (31 – 40%) y oxidados para el caso de GR41A-16-75 que es de mayor profundidad hasta un 25%, la cantidad predominante de ortopiroxenos (31%) en GR41A-16-73 se relaciona a la influencia de Huaylillas en estos sedimentos; estos minerales se presentan subredondeados, las epidotas (8 -9%) indicarían aportes de ambientes metamórficos o ígneos; existe menor cantidad de granates verdosos (2 – 3%), titanitas (4 – 5%) y apatitos (2 – 4%).

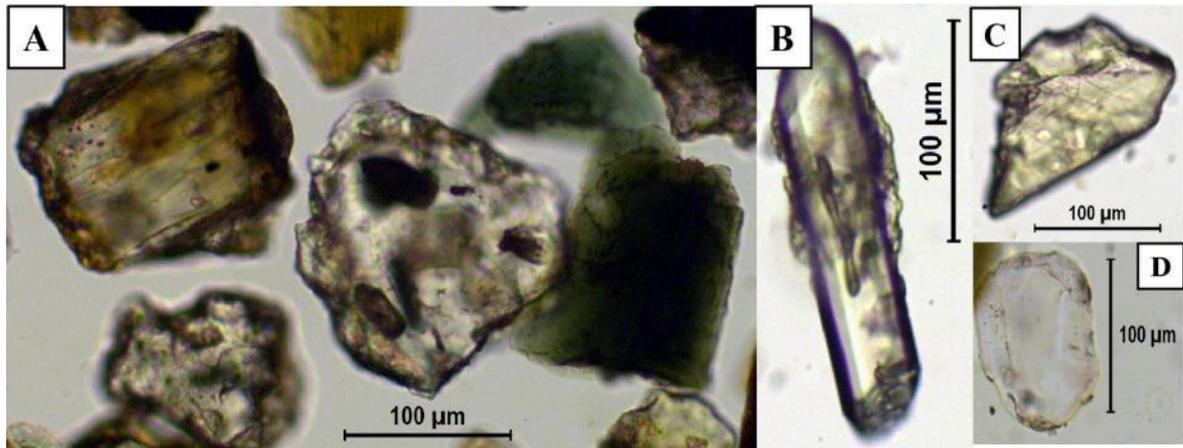


Figura 4. 63. Minerales pesados identificados en microscopio, en A) piroxeno, granate, anfíbol, en B) zircón, C) titanita y D) apatito.

4.1.10.1 COLUMNA N°10. POZO TDRY_02

UBICACIÓN – COORDENADAS UTM			FORMACIÓN
E: 347500	N: 7985000	COTA: 70msnm	Moquegua, Huaylillas, Millo

DESCRIPCIÓN DE FACIES

Secuencia A (>90m). Se trata de un nivel basal de conglomerados con clastos de diámetro menor a 1cm de arenisca cuarzosa, andesitas y riolitas en matriz de arenisca con cuarzo, feldespatos y líticos (facies *Gmg*); areniscas de grano grueso con laminaciones oblicuas compuestas de cuarzo, líticos, biotitas, algunos feldespatos (facies *Sl*), hacia el contacto presenta clastos blandos; además se describe niveles de lutitas color pardo (facies *Fl*) con delgados niveles de areniscas de grano grueso y medio compuestos de cuarzo, feldespatos y micas en matriz arcillosa (facies *Sh*).

Secuencia B (~105m). Se observa capas de conglomerados con clastos de diámetro menor a 4cm, con clastos de andesitas, areniscas, riolitas y tobas (facies *Gmg*), con capas de areniscas compuestas de cuarzo, epídotas, líticos cementados por yeso (facies *Sh*); niveles de lutitas blanquecinas con esporádicas biotitas (facies *Fl*) y venillas de calcita.

Secuencia C (~82m). Compuesta por conglomerados de clastos angulosos a subredondeados con matriz de limos (facies *Gmg*), arenisca de grano medio a grueso (facies *Sh*) compuestos de cuarzo, feldespatos e intraclastos de andesitas menores a 1cm de diámetro; en la parte superior abundan conglomerados granocrecientes subangulosos con niveles de arenisca grano grueso, clastos de andesitas principalmente.

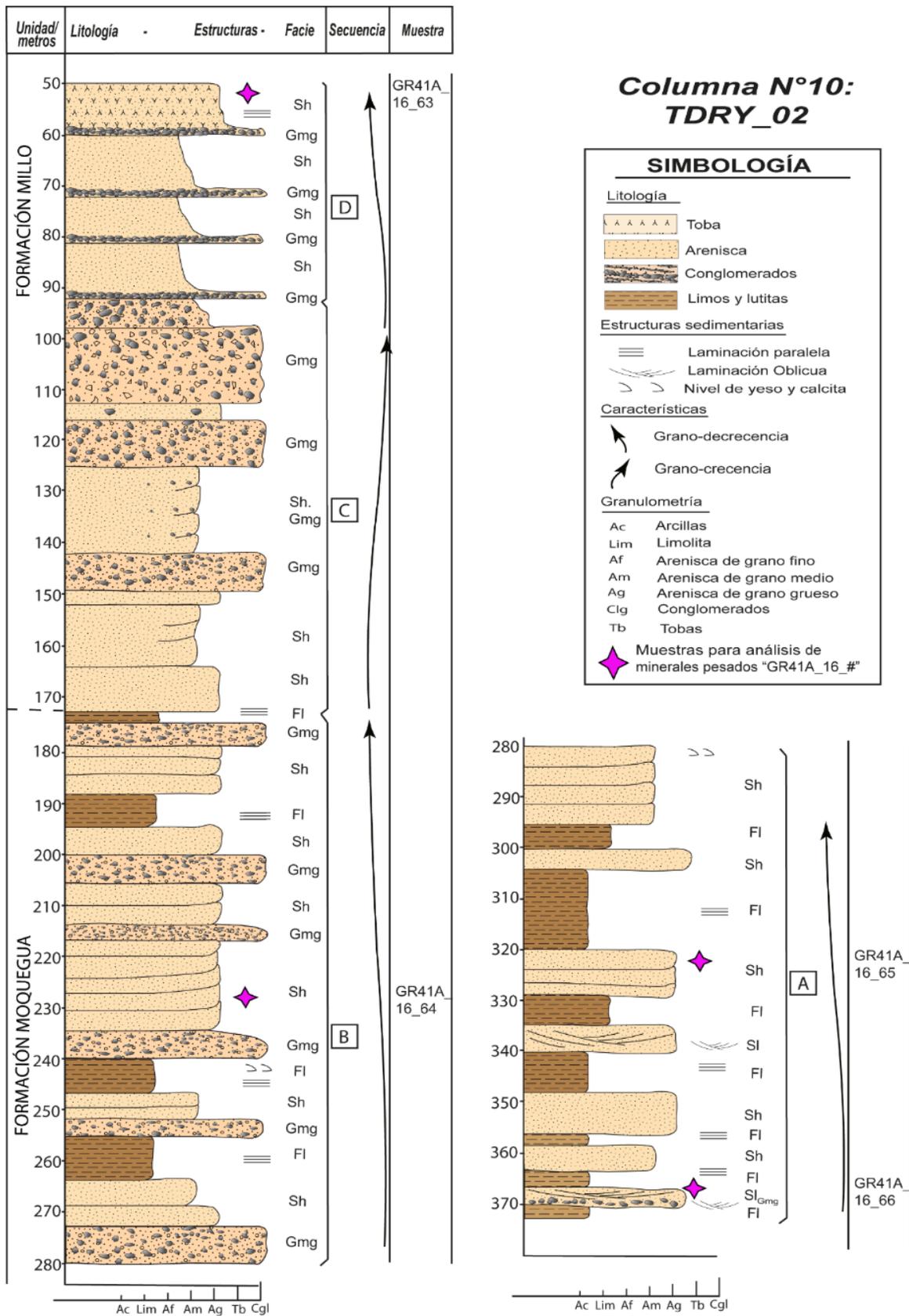


Figura 4. 64. Columna estratigráfica resumida del pozo TDRY-02.

Secuencia D (>43m). Formada por subsecuencias repetitivas granodecrecientes desde conglomerados matriz soportados con clastos de tobas e intrusivos de hasta 15cm de diámetro, hasta areniscas feldespáticas de color gris oscura de grano medio a fino compuestas de cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca de hasta 2cm (facies *Gmg, Sh*); al tope se observan areniscas tobáceas. En los primeros 50m no se tiene testigos de perforación.

INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS

La ubicación de este pozo se relaciona mucho a la ubicación espacial actual del río Caplina, se ha determinado tres principales asociaciones de facies en esta columna (A, B y C), Las secuencias A y B grano-decrecientes de conglomerados, areniscas y lutitas se asocia a los elementos arquitecturales *FF, SL, SG, LA* con influencia de evaporitas caracterizan un ambiente sedimentario “llanura aluvial” de tipo entrelazado, “C” con mayor tendencia grano-creciente se acomoda a sistemas con intermitentes aumentos del régimen fluvial como ríos inestables, no se encuentra un nivel marcado de tobas Huaylillas debido a la erosión constante, los ~90m de sedimentos recientes (secuencias C) grano-decrecientes se relaciona a ríos de baja sinuosidad con barras alternantes.

4.1.10.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN POZO TDRY-02

Tabla 4. 13. Detalles de las muestras obtenidas en el pozo TDRY-02

CÓDIGO	LOCALIDAD	POZO	PROF. (m)	LITOLOGÍA	UNIDAD
GR41A-16-63	Fundo Santa Catalina, pampa la Yarada	TDRY-02	51.5 - 55.8	Litoarenita	Millo
GR41A-16-64		TDRY-02	224.5-231	Litoarenita feldespática	Moquegua
GR41A-16-65		TDRY-02	318.5 - 328	Litoarenita feldespática	Moquegua
GR41A-16-66		TDRY-02	363.5 - 370.5	Litoarenita feldespática	Moquegua

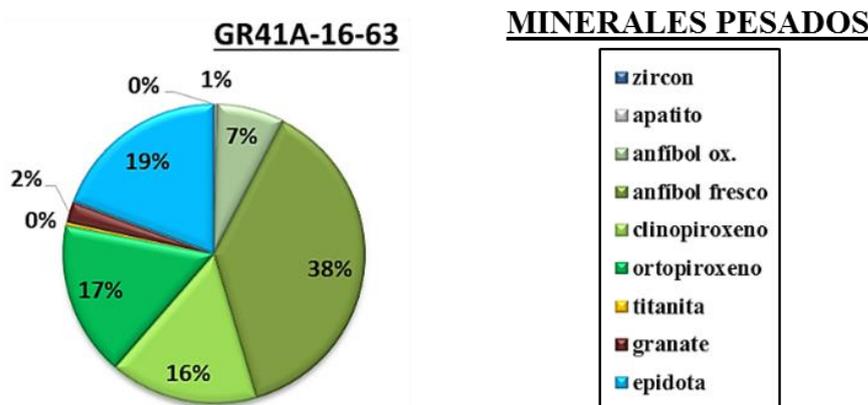


Figura 4. 65. Resultado del conteo de MP, muestra atribuida a la unidad Millo, pozo TDRY_02.

En la muestra GR41A_16_63 predominan los anfíboles frescos (38%) con formas euhedrales, y subhedrales, hojosos, color verde y verde translúcido, piroxenos (33%) euhedrales y subhedrales de colores verdes translúcidos, epidotas (19%) subhedrales, granates verdosos y apatitos en menor cantidad, en la Figura 4.66 se observa los espectros de los minerales anfíbol, piroxeno, granate y titanita, observados en microscopio petrográfico de luz transmitida.

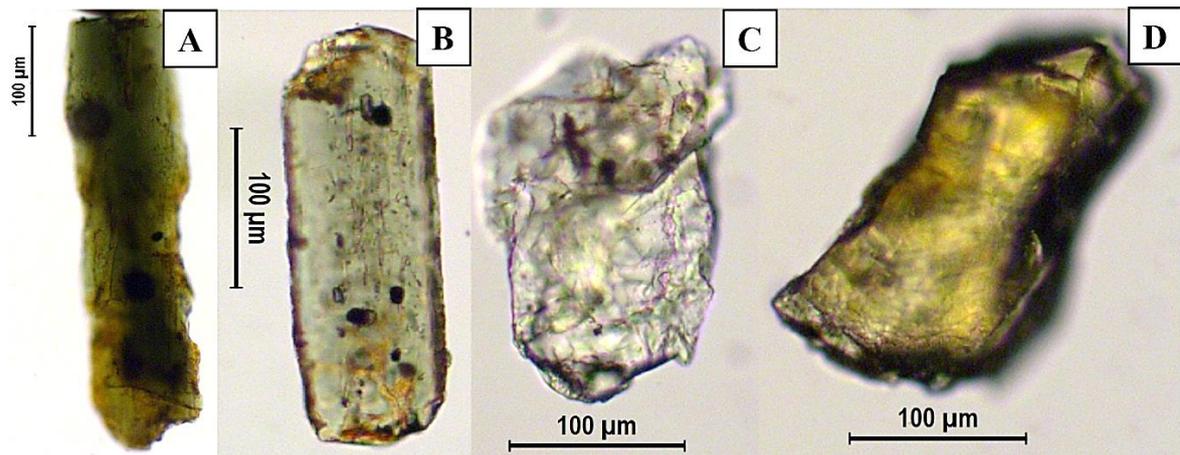


Figura 4. 66. Minerales pesados identificados en GR41A-16-63, en A) anfíbol, B) ortopiroxeno, C) granate y en D) titanita.

Las muestras GR41A-16-64, GR41A-16-65 y GR41A-16-66 pertenecientes a la unidad Moquegua, tienen la predominancia de epidotas (71 a 75%) con alto grado de desgaste y corrosión, seguido en cantidad de granate (mayor a 1% hasta 7%) con ligera alteración, titanitas (3 – 7%) con leve desgaste en los bordes, anfíboles verdosos (2 -4%) con avanzado grado de corrosión y zircones inalterados (de 5 a 8%) con leve corrosión, con piroxenos (4 – 6%) muy desgastados y avanzado nivel de corrosión, algunos minerales pesados son observados en la Figura 4.68.

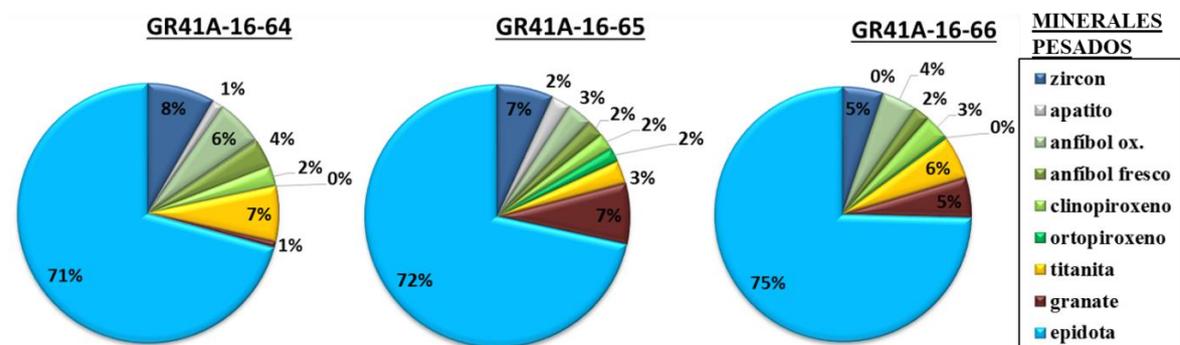


Figura 4. 67. Resultado del conteo de MP en muestras de la unidad Moquegua, pozo TDRY_02.

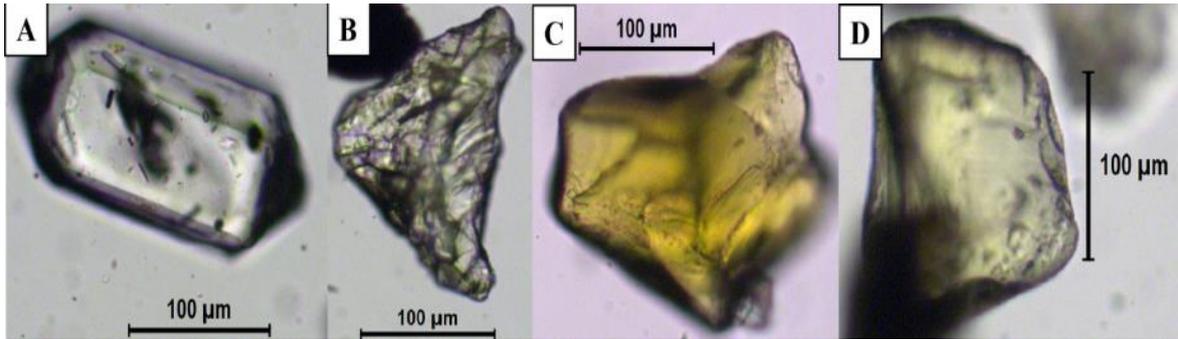


Figura 4. 68. Minerales pesados identificados en A) zircón, B) titanita, C y D) granates de la unidad Moquegua en TDRY_02.

4.1.2 ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN UNIDADES PRE-CENOZOICAS BASAMENTO METAMÓRFICO (Proterozoico): Complejo Basal de la Costa.

Se colectó la muestra GR41A-15-67b en el Cerro Chero (Pachía, 36v), clasificada petrográficamente como ortogneis, y tiene como mineral pesado predominante al granate (~43%), seguido de piroxenos (~19%), zircons (~17%), titanita (~15%) y en menor proporción turmalina (Trinidad, 2017).

GRUPO AMBO (Paleozoico, Carbonífero- Mississippiano Superior).

La muestra GR41A-15-68b se colectó en el Cerro Machani (Pachía 36v), clasificada como arenisca, si se excluyera las epidotas en éstas muestras prepondera el mineral pesado zircón (>41%) con forma prismática y bordes redondeados, titanita (>28%) y componentes de menor proporción tales como Rt, Amp, Pxn, Grt, Ap y Tur. (Trinidad, 2017).

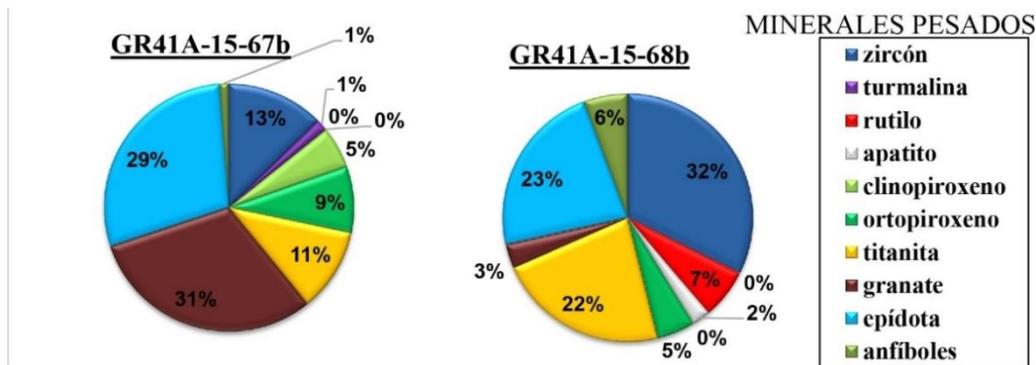


Figura 4. 69. Resultado de conteo de minerales pesados en rocas del Basamento metamórfico y Grupo Ambo.

FORMACIÓN CHOCOLATE (Mesozoico, Triásico superior al Jurásico Inferior)

La muestra GR41A-15-22b ha sido colectada en el Cerro Morro de Sama (Locumba, 36u) y han sido clasificadas como dacitas, mientras que las muestras GR41A-15-72b y GR41A-15-74b han sido colectadas en la Playa Vila Vila (La Yarada, 37v) y clasificadas petrográficamente como andesitas. El conteo de granos de minerales pesados (excluyendo la cantidad de epidotas) reveló que existe predominancia de piroxenos (~70% - 40%) en las

muestras GR41A-15-22b y GR41A-15-74b, así como predominancia de Ap (> 25%) en la muestra GR41A-15-72b, mientras que componentes de menor proporción (<10%) corresponden los minerales pesados Ttn, Amp, Grt, y Tur en las tres muestras, ver figura 4.70. (Trinidad, 2017).

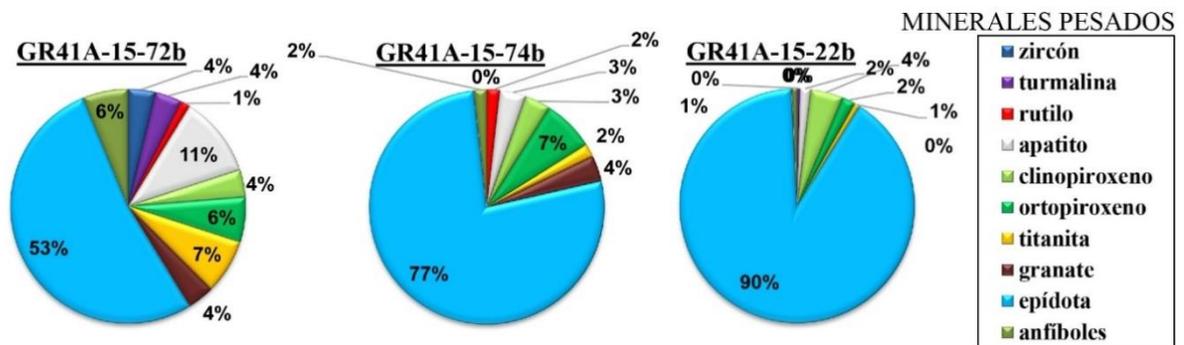


Figura 4. 70. Resultado del conteo de minerales pesados de la Formación Chocolate.

FORMACIÓN PELADO (Sinemuriano inferior – Toarciano superior)

Se colectó la muestra GR41A-15-70b en el Cerro Palquilla (Palca, 36x), precisamente en la base de la Formación Pelado, la cual consiste en un conglomerado. Se observó (excluyendo las epídotas) la predominancia de minerales pesados tales como el Pxn (~80%), mientras que la muestra GR41A-15-71b se tomó de un nivel intermedio de la Formación Pelado (posición estratigráfica), y fue clasificada como areniscas conglomerádicas donde predomina el piroxeno en >34%, y contiene minerales subordinados tales como Amp (~18%) y Tur (>14%), y aún en menor proporción (<10%) al Grt, Ttn, Rt y Ap (Figura 4.71, centro y derecha).

FORMACION SOCOSANI (Toarciano superior al Batoniano superior)

La muestra analizada ha sido tomada de la quebrada Palca (Pachía, 36v) de canales de arcosas, GR41A-15-37b, y se caracteriza por poseer como minerales pesados predominantes al Grt (>45%). Los componentes subordinados son Zrn (~16%) y Tur (~10%), y en menores proporciones (<10%) son Amp, Ttn, Pxn, Ap y Rt. La Figura 4.71 considera el porcentaje de epídotas. (Trinidad, 2017).

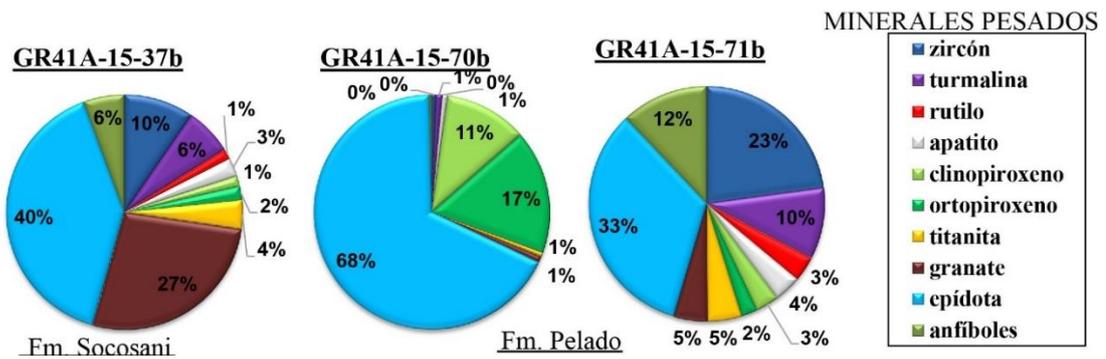


Figura 4. 71. Granos de minerales pesados en las Formaciones Pelado y Socosani.

GRUPO YURA (Calloviano - Berriasiano)

Se tomaron muestras que son representativas del Grupo Yura, en especial a areniscas de las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani (Figura 4.72). Por ejemplo, para el análisis de la Formación Puente colectaron muestras en el Cerro Chachacumane (Palca, 36x), clasificadas como areniscas (GR41A-15-93b) y presenta minerales pesados predominantes de Pxn (>41), subordinados son Ttn (~15%), Tur (~12%), Zrn (~11%) y Amp (~11%). Los componentes de menores proporciones (<10%) son Grt, Ap y Rt.

Para la Formación Labra, se analizaron muestras en areniscas del Cerro Chachacumane (Palca 36x), GR41A-15-98b y GR41A-15-95b, correspondiendo al nivel intermedio y superior respectivamente. La cuantificación de minerales pesados arrojó como resultados que la muestra GR41A-15-98b los componentes predominantes son Tur (>38%) y Amp (>24%) y en GR41A-15-95b los Zrn (>65%) y Ttn (>20%), mientras que sus componentes subordinados son Pxn (~17%) y Zrn (~11%) y en menores proporciones Ap y Rt. Trinidad (2017) analizó la muestra GR41-15-101b (Fm. Hualhuani), arenisca cuarzosa del nivel superior de esta unidad, Cerro Chachacumane (Palca 36x) con abundancia de Zrn (>45%) y Ttn (>25%) si se excluye el porcentaje de epidotas. En conclusión, podemos afirmar que el común denominador de los minerales pesados que caracterizan al Grupo Yura corresponde al zircón, turmalina, granate y piroxeno.

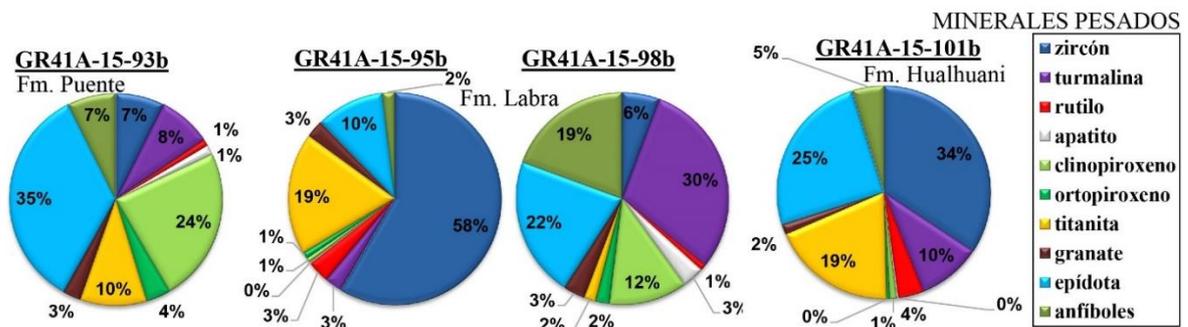


Figura 4. 72. Resultado del conteo de minerales pesados en rocas del Grupo Yura.

GRUPO TOQUEPALA (Cretácico Superior al Eoceno Inferior)

FORMACION MATALAQUE (Campaniano al Maastrichtiano superior)

Para caracterizar a esta unidad se ha obtenido una muestra (GR41A-16-269) del Cerro Huacano (E: 389105, N: 8054823, Pachía 36v) clasificada petrográficamente como toba de cristales con abundantes plagioclasas y epídotas. El conteo de granos de minerales pesados (mostrado en la Figura 4.73) nos sugiere que abundan minerales con cobertura oscura (posiblemente vidrio) reconociendo principalmente epídotas y cloritas, en menor cuantía anfíboles, clinopiroxenos y ortopiroxenos.

FORMACION QUELLAVECO (Paleógeno-Paleoceno)- UNIDAD SAMANAPE

Se ha colectado una muestra (GR41A-16-296) en la base del Cerro Acirume (E: 975708, N: 8035995, Pachía 36v), clasificada como toba de cristales, y se caracteriza por su abundancia en plagioclasas y anfíboles. El conteo de granos de minerales pesados revela la abundancia de epídotas y ortopiroxenos verde limón translúcidos, seguido de clinopiroxenos, anfíboles de color verde translúcidos, apatitos, granates verdosos y grisáceos, en menor cantidad zircons prismáticos y subredondeados (Figura 4.73).

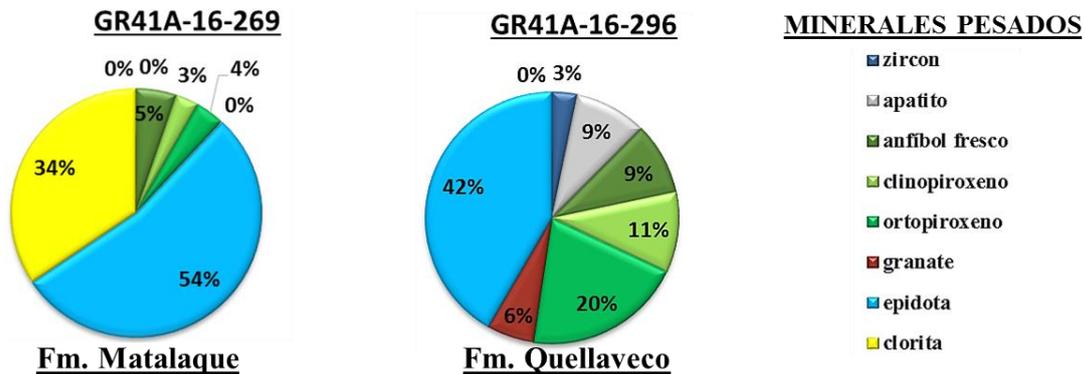


Figura 4. 73. Resultado del conteo de granos de MP en el Grupo Toquepala.

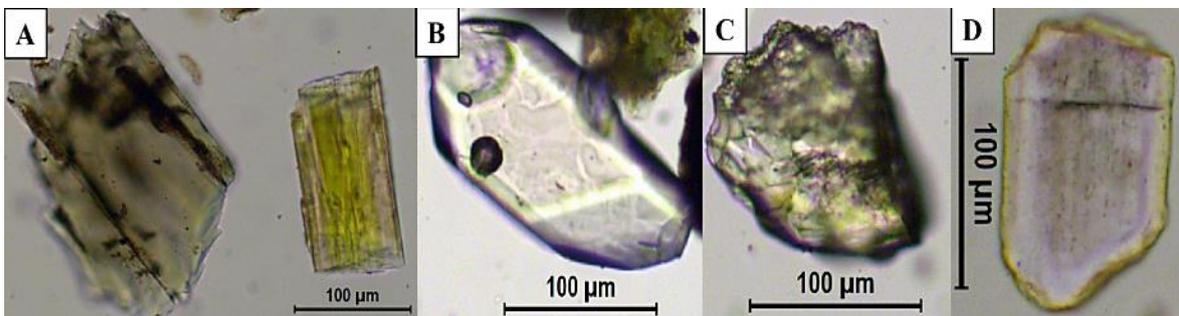


Figura 4. 74. Minerales pesados identificados en el Grupo Toquepala, en A) ortopiroxeno y epidota, en B) zircón, en C) granate y en D) apatito.

GRUPO TACAZA

Alvan (2015) presenta el conteo de granos de una muestra “diorita” colectada en Cotahuasi, al noreste de Caravelí, compuesta principalmente por epidotas (>47%), anfíboles (26%) y piroxenos (21%) considerando estos minerales como los más abundantes en el Grupo Tacaza.

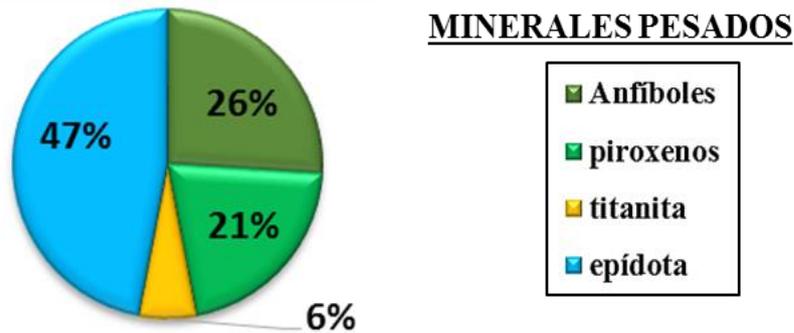


Figura 4. 75. Conteo de granos de minerales pesados, Grupo Tacaza (Alván, 2015).

INTRUSIVOS

SUPER UNIDAD YARABAMBA

Para analizar esta unidad se ha obtenido dos muestras de “Tres Cruces” y “La Descubridora” (Pachía, 36v) descritas macroscópicamente como granodiorita (muestra GR41A-16-301) y como tonalita (muestra GR41A-16-302) ver en figura 4.77, arriba. El resultado del conteo de minerales pesados revela que en la muestra GR41A-16-302 (La Descubridora) existe un mayor porcentaje de anfíboles verdes y verdes translúcidos, seguido de clinopiroxenos, epidotas, zircones de bordes redondeados, así como escasos granates con tonalidades verdosas y amarillentas.

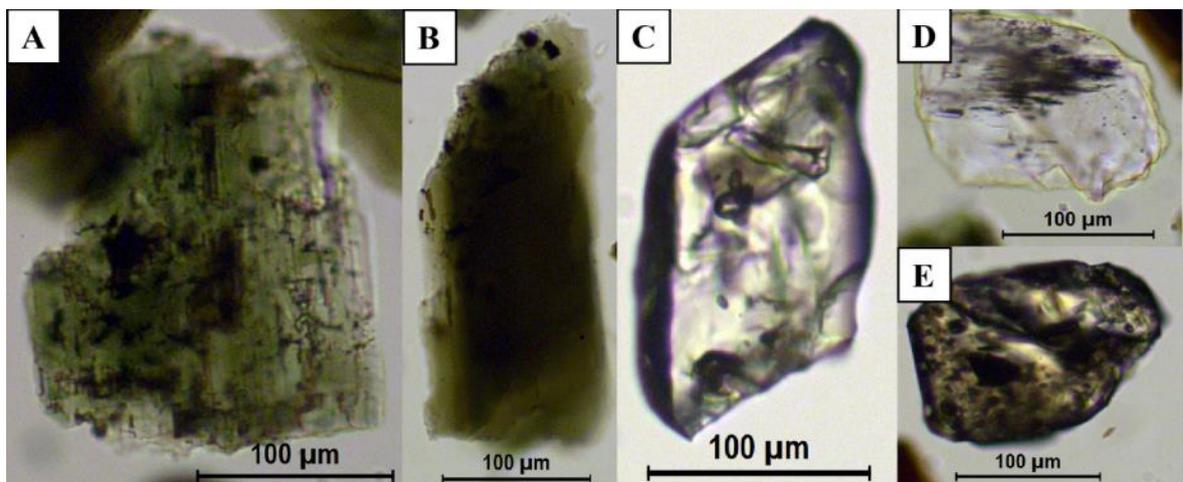


Figura 4. 76. Minerales pesados identificados en rocas intrusivas de la unidad Yarabamba. A y B) anfíboles, C) zircón, D) apatito y E) titanita.

DIQUE MILONITA

Se ha colectado una muestra del Cerro Huacano (GR41A-16-270), en rocas que fueron denominadas por Monge & Cervantes (2000) como “Unidad Milonita”. Estas rocas consisten en rocas intrusivas alteradas (aparentemente silicificadas), cuyo conteo de minerales pesados en esta tesis resalta su abundancia de zircons (la mayoría redondeados y euhedrales), anfíboles verdosos subredondeados, piroxenos con bordes subredondeados y epidotas (Figura 4.77 y 4.78 abajo).

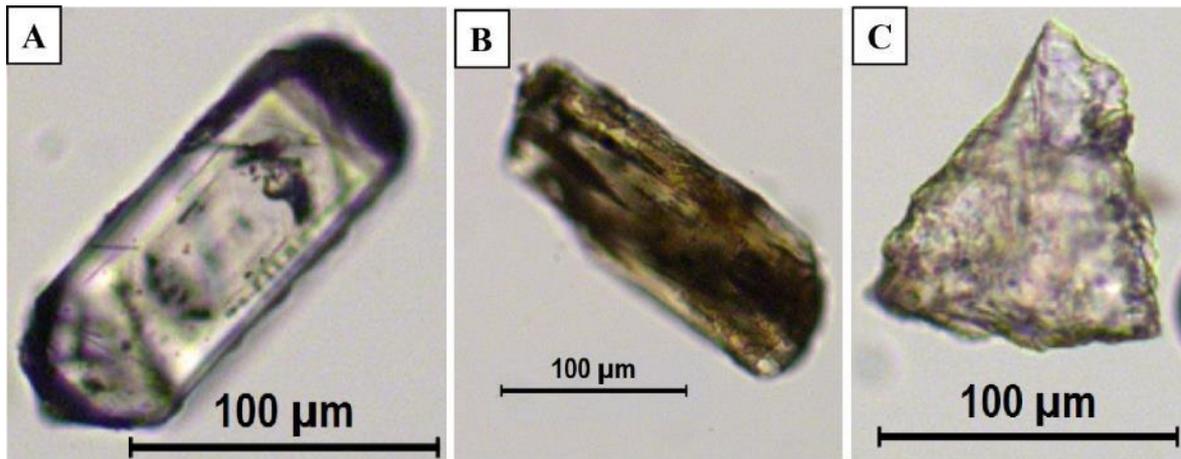


Figura 4. 77. Minerales identificados de la unidad Milonita, en A) zircón, B) ortopiroxeno y C) epidota.

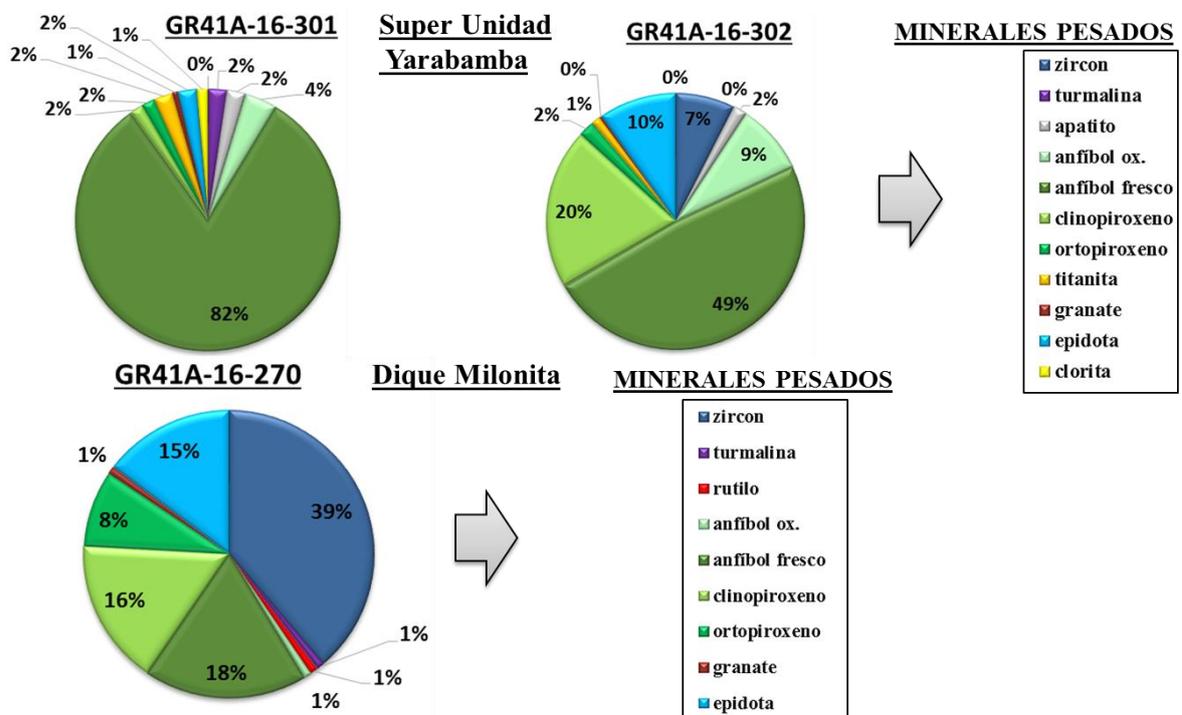


Figura 4. 78. Resultado del conteo de MP en Unidad Yarabamba y Dique Milonita.

4.1.3 CONTEO DE GRANOS QFL

En esta tesis se ha realizado el análisis QFL de cinco muestras 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 de conglomerados, QFL, lito-geoquímica, etc.), se aclara que todos ellos buscan definir la composición mineral y química de los sedimentos (cf. Morton & Hallsworth, 1994, 1999). Tomando en consideración estas declaraciones, la presente tesis se basa en los análisis de minerales pesados, facies sedimentarias y una breve integración con el análisis composicional de areniscas mediante el método de conteo de granos (QFL).

Se ha seleccionado cinco muestras representativas de las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo, y de acuerdo a su composición han sido clasificadas, considerando los componentes esenciales (cuarzo, feldespatos, líticos) en secciones delgadas con el método Gazzi-Dickinson, explicado en el Capítulo II (Marco Teórico).

Tabla 4. 14. Datos de las muestras y resultado del conteo de granos de secciones delgadas en las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo; Qm= Cuarzo monocristalino, Qp= Cuarzo policristalino, F= Feldespatos y L= Líticos. Qm+Qp=Qt.

COD_MUESTRAS	X	Y	LITOLOGÍA	UNIDAD	Qm	Qp	F	L
GR41A-16-09	371302	7990083	Arenisca cuarzosa	Moquegua	206	9	54	42
GR41A-16-177	385694	8020138	Areniscas	Moquegua	239	23	74	32
GR41A-16-06	384280	8019635	Litoarenita	Huaylillas	45	5	76	220
GR41A-16-38	366377	8009915	Arenisca	Millo	102	1	162	74
GR41A-16-59	342198	8036049	Litoarenita	Millo	134	4	224	101

DESCRIPCIONES

La muestra GR41A-16-09, perteneciente a la unidad Moquegua (Secuencia A, Columna 2) ha sido descrita macroscópicamente como arenisca cuarzosa. El estudio de la sección delgada indica la abundancia de cuarzo monocristalino (Qm), feldespatos, líticos, en matriz tobácea de vidrio volcánico + arcillas + cristales de plagioclasa con minerales accesorios como piroxenos (ver Figura 4.79).

La muestra GR41A-16-177, perteneciente a la unidad Moquegua (Secuencia A, Columna 1), ha sido descrita macroscópicamente como una arenisca gris blanquecina. En el microscopio petrográfico se describe cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico, plagioclasas y líticos, así como minerales accesorios tales como anfíboles, todos estos envueltos en matriz tobácea (ver Figura 4.80).

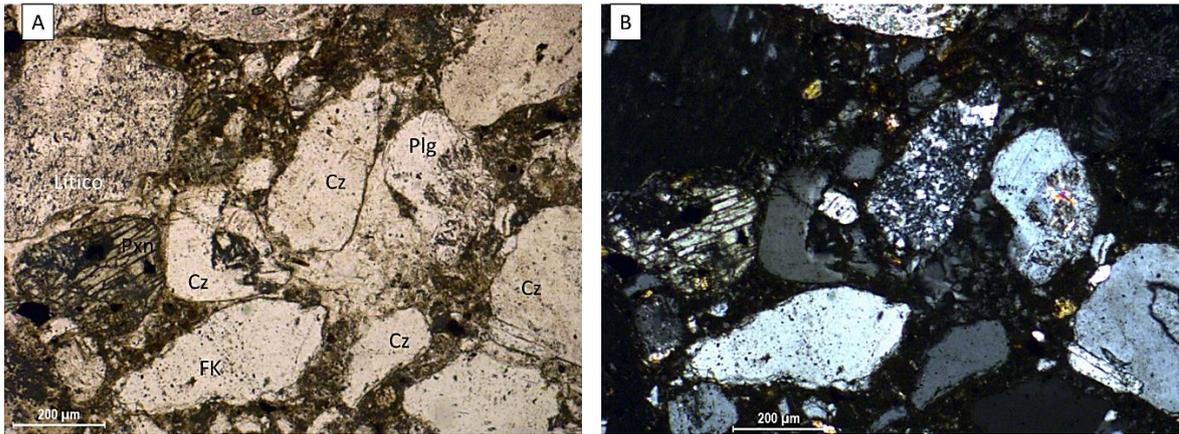


Figura 4. 79. Minerales en la muestra GR41A-16-09 vista en nicols paralelos (a) y cruzados (b), obsérvese cuarzo policristalino en el centro de la imagen.

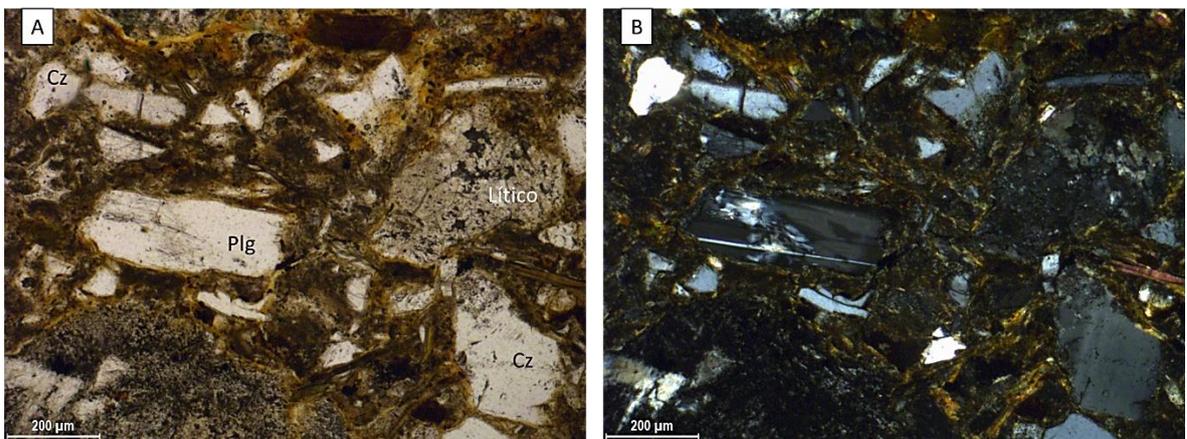


Figura 4. 80. Minerales de GR41A-16-177 vista en nicols paralelos (a) y cruzados (b).

La muestra GR41A-16-06, perteneciente a la unidad Huaylillas (Secuencia b, Columna 1), ha sido caracterizada macroscópicamente como una litarenita, en sección delgada pueden observarse principalmente fragmentos líticos, cuarzos monocristalinos y policristalinos, plagioclasas y feldespato potásico, con minerales accesorios tales como anfíbol y piroxeno, matriz tobácea. La muestra es porosa (abundantes espacios).

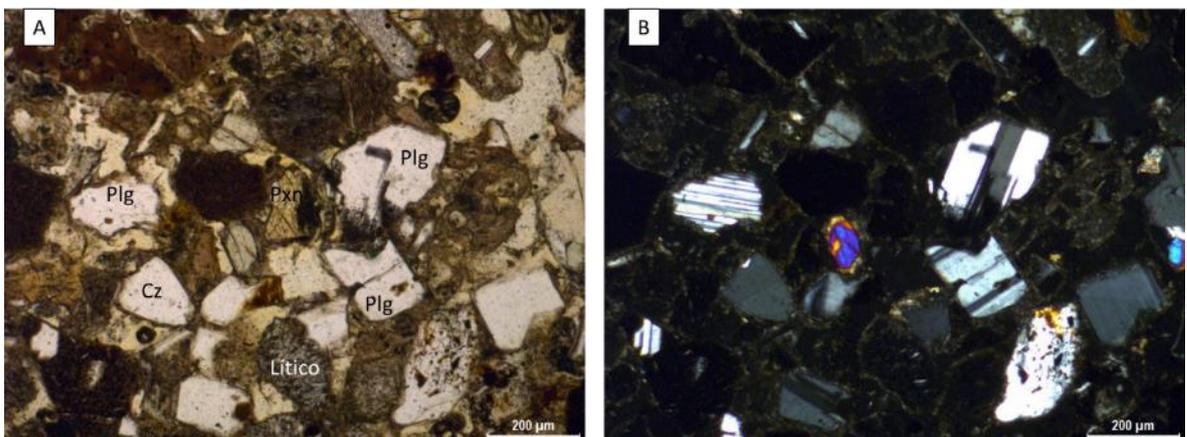


Figura 4. 81. Minerales ligeros en la muestra GR41A-16-06 vista en nicols paralelos (a) y cruzados (b).

La muestra GR41A-16-38 fue colectada en el lado oeste de Alto de la Alianza, Tacna, se trata de una arenisca de color pardo, cuyo estudio petrográfico indica la abundancia de cuarzo monocristalino (Qm), feldespatos y fragmentos líticos envueltos en matriz de arcillas con algunos cristales y minerales accesorios de piroxenos principalmente.

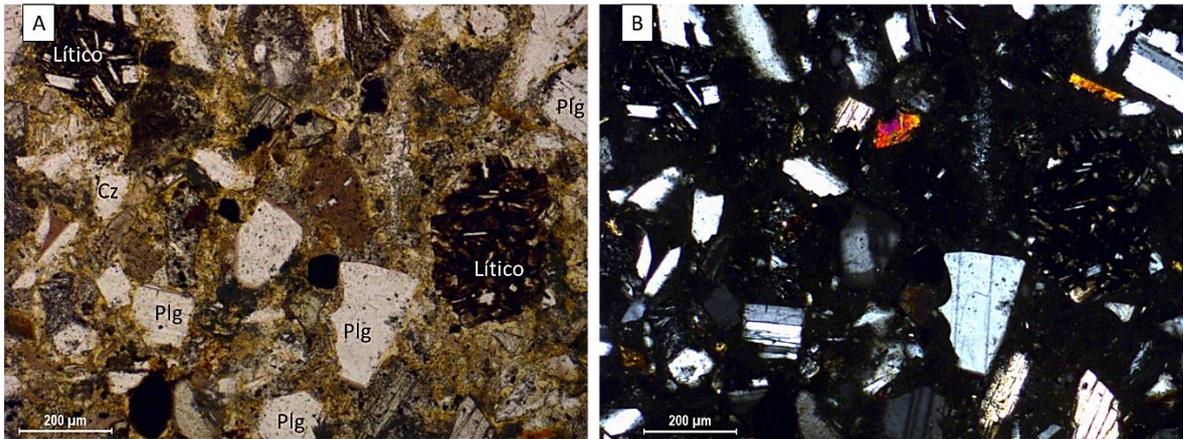


Figura 4. 82. Minerales en GR41A-16-38 vista en nicoles paralelos (a) y cruzados (b).

La muestra GR41A-16-59, corresponde a la unidad Millo (Secuencia E, Unidad Millo en Columna la 7), se describe macroscópicamente como una litarenita y el estudio petrográfico señala abundancia de feldespatos, cuarzo y líticos en matriz arcillosa con minerales accesorios de anfíbol, piroxeno y biotitas.

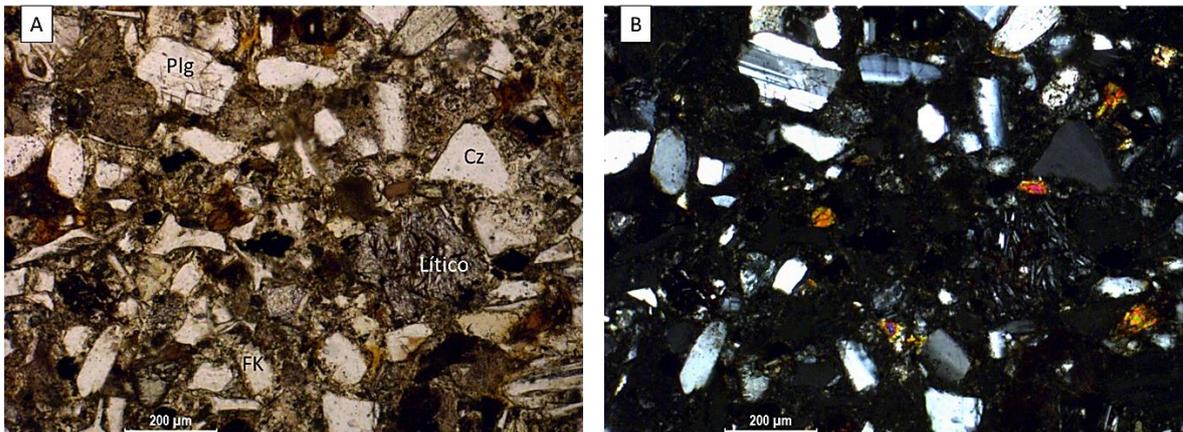


Figura 4. 83. Minerales ligeros en la muestra GR41A-16-59, vista en nicoles paralelos a) y cruzados (b).

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La correlación de las columnas estratigráficas de los afloramientos rocosos (C1 a C7) y los pozos de perforación del Proyecto Especial Tacna (PET) (C8 a C10) perforados en el área de los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna (37v) se ha realizado tomando en cuenta sus facies sedimentarias y queda resumida en la Figura 4.84. Los polígonos de colores detrás de las columnas estratigráficas guían las facies similares o correlacionables, siendo apreciable y distinguible las facies de la Formación Moquegua Superior y Formación Huaylillas. Estos niveles guían al momento de trazar las geometrías de depositación. El contacto entre la Formación Moquegua Superior y la Formación Huaylillas se ha graficado de manera lineal; sin embargo, el paleo-relieve del territorio que diferencia las rocas clásticas de las rocas volcánicas, fue muy accidentado, debido a múltiples eventos tectónicos y sedimentarios sucedidos principalmente en el Cenozoico.

Las columnas estratigráficas elaboradas para esta tesis han resultado de trabajos de campo del Proyecto GR41A del INGEMMET, habiéndose realizado la correlación de columnas espacialmente alineadas y se muestran con una vista de N-E a S-O. A estas columnas estratigráficas se le han integrado datos de abundancias de minerales pesados por secuencia (Figura 4.86) y brindan información consistente en temas de correlaciones estratigráficas, las cuales refuerzan las observaciones en correlaciones de facies.

La variación de la litología de mayor relevancia y más notorio es observado lateralmente (Figura 4.84), esencialmente bajo el modelo “conglomerados-areniscas-lutitas” que se asocian al modelo sedimentario de cuenca aluvial-fluvial y lagunar. El aporte principal de los sedimentos proviene contundentemente de las rocas que conforman la Cordillera Occidental, que se encontraba en pleno proceso de exhumación. Los sedimentos denudados y transportados consiguen su depositación en un régimen de descenso de energía fluvial al SO de la cuenca caracterizado por abundancia de lutitas y evaporitas que posiblemente sea un ambiente sedimentario lagunar.

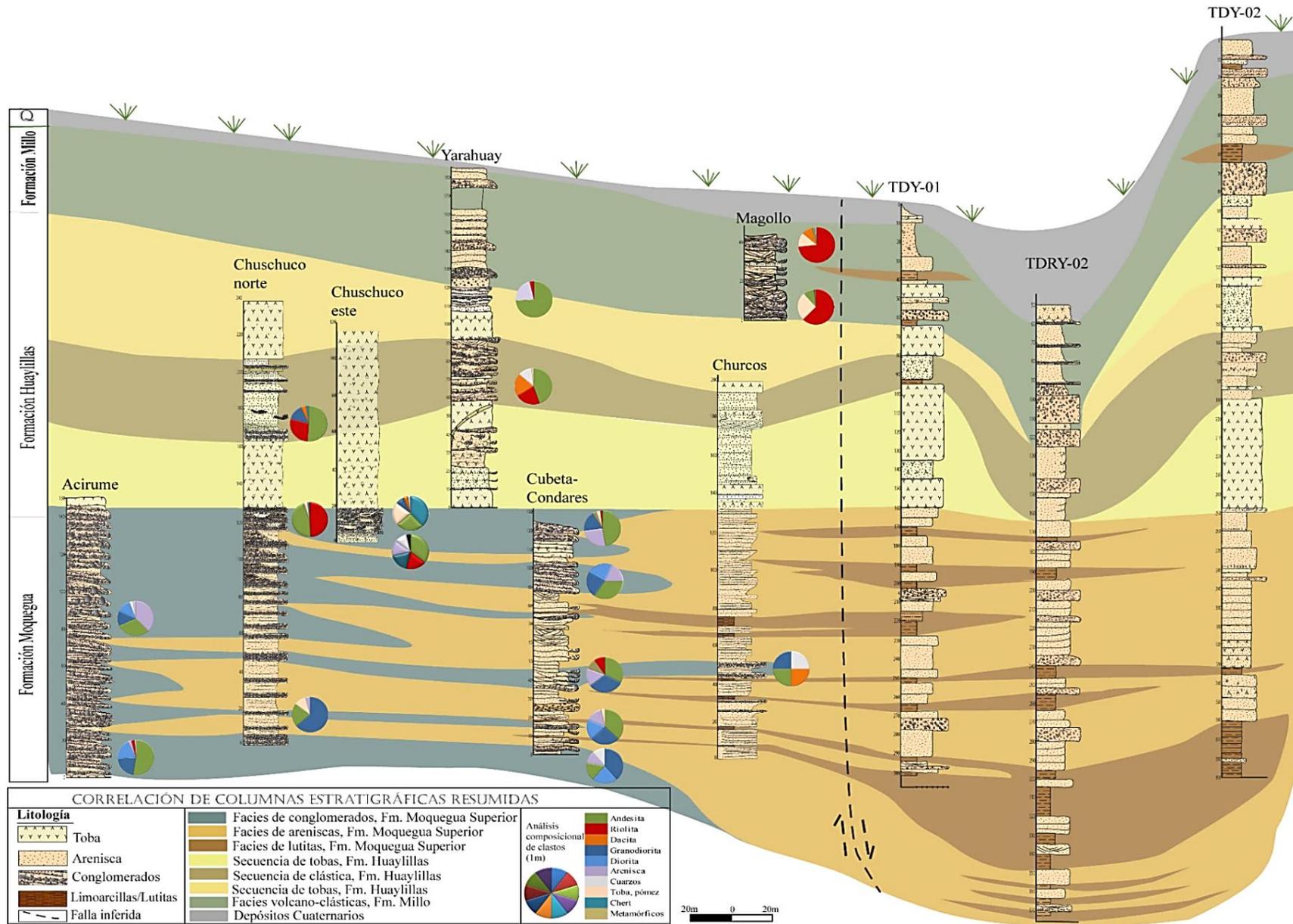


Figura 4. 84. Correlación de columnas estratigráficas simplificadas, en base a sus facies sedimentarias, para las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo (ver anterior página número 131), su integración con análisis composicional de conglomerados.

Los minerales pesados identificados en las muestras de sedimentos (listados en la Figura 4.85 y ubicados en las columnas de la Figura 4.86) permiten dividir en dos principales secuencias a la Fm. Moquegua Superior (en consistencia con lo propuesto por Decou et al., 2011), a la Fm. Huaylillas y a la Fm. Millo, con notables diferencias en base a índices de minerales pesados. Por ejemplo, el valor porcentual de los índices se ha realizado sin considerar epidotas, el ZTR (índice Zircón-Turmalina-Rutilo, Hubert, 1962) es mayor en la unidad Moquegua (>20%), asumiéndose madurez en sus areniscas. Este índice es mayor que los reportados en las unidades Huaylillas y Millo. Por otro lado, los ratios Apatito-Turmalina (ATi, Morton & Hallsworth, 1994) reflejan un ambiente de depositación aluvial, además la abundancia de apatito indicaría areniscas de ambiente marino-marginales y la escasez un ambiente fluvial (cf. Morton, 1986) indicando también climas estacionales, el índice Granate-Zircon (GZi, Morton & Hallsworth, 1994) es mayor en la primera secuencia de la unidad Moquegua, indicando poca disolución de granate durante el enterramiento y diagénesis de los sedimentos debido a la cercanía de la fuente aportante rica en granates. Es resaltante la cantidad de anfíboles, la cual es mayor en la Formación Moquegua Superior que disminuye a partir de las muestras más cercanas a la Cordillera Occidental hasta las muestras pertenecientes a los pozos de perforación (menor al 20% hacia la línea de costa) que en cambio tienen mayor contenido de epidotas (Figura 4.85), concluyendo que en ese recorrido el anfíbol se disuelve por transporte sedimentario.

Es notorio el porcentaje muy reducido de ortopiroxeno en las muestras pertenecientes a la unidad Moquegua, cuya posible disolución se puede deber a condiciones desérticas o condiciones climáticas estacionales áridas (Morton & Hallsworth, 1999), tal como lo corresponde el Cenozoico de los Andes Centrales (Hartlry, 2003; Evenstar et al., 2005), sin embargo la abundancia de clinopiroxenos permite reducir el factor climático y relacionar su abundancia a la roca fuente.

Seguidamente, la correlación de las columnas levantadas en Cerro Acirume, Cerro Chuschuco este, Cerro Churcos con lo descrito del pozo de perforación TDY-01, permite relacionar las facies conglomerádicas, de areniscas y lutáceas con los minerales pesados (Figura 4.86).

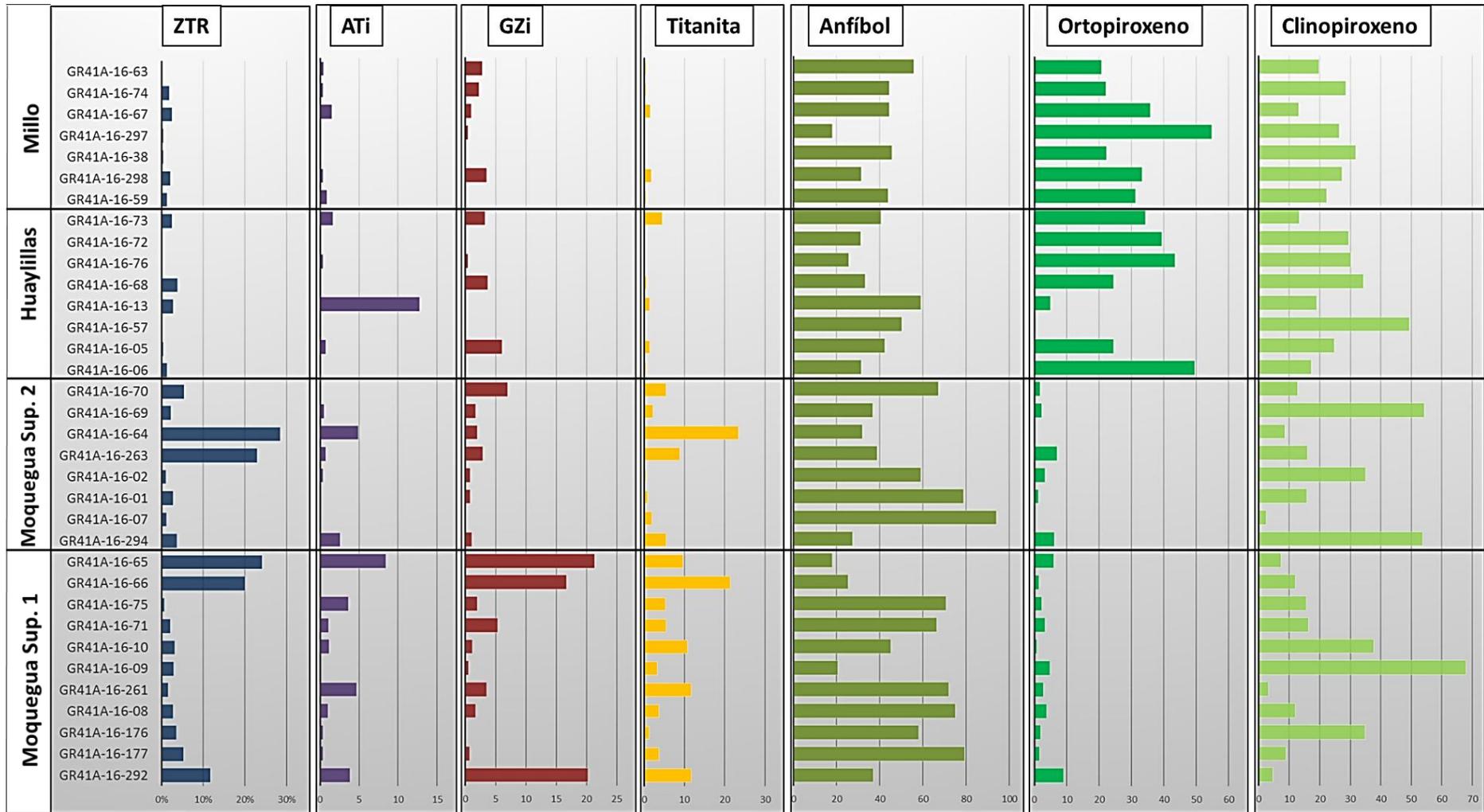


Figura 4. 85. Ratios de Minerales Pesados relacionados a la proveniencia sedimentaria. (ZTR: Zircón+Turmalina+Rutilo, GZi: índice Granate-Zircón, ATi: índice Apatito-Turmalina; Hubert (1962), Morton & Jhonsson (1993)).

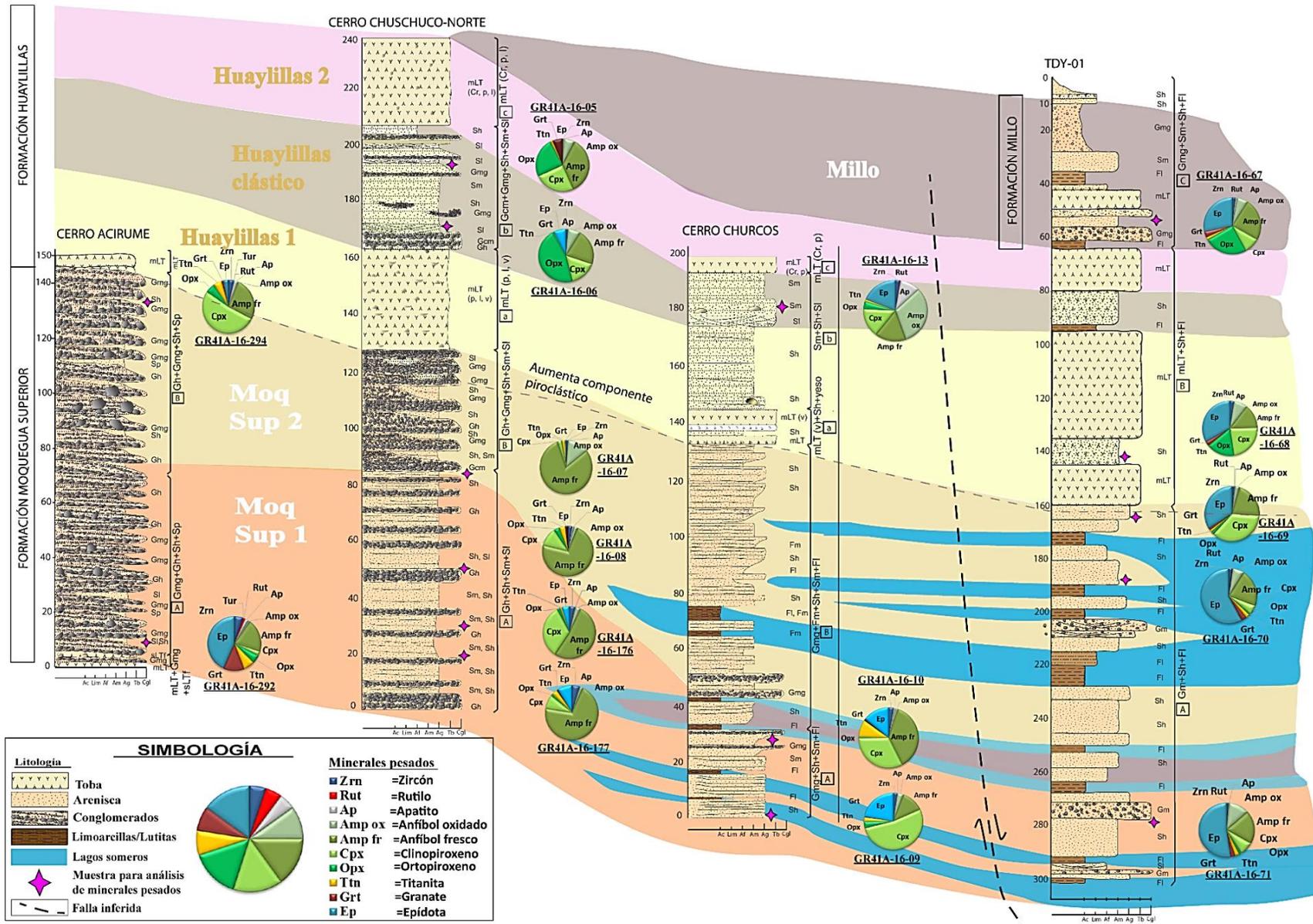


Figura 4. 86. Correlación entre columnas estratigráficas elaboradas para esta tesis y pozos de perforación en La Yarada (PET), integración con análisis de minerales pesados (anterior página número 134).

En la Figura 4.87 se presenta un resumen ilustrativo en porcentaje de minerales pesados existentes en las principales unidades litológicas del Proterozoico y Mesozoico, que podrían haber sido aportantes significantes de detritos para las formaciones Moquegua Superior, Huaylillas (niveles sedimentarios) y Millo (extraído de Trinidad, 2017; Alván et al., 2015 y muestras analizadas para la presente tesis).

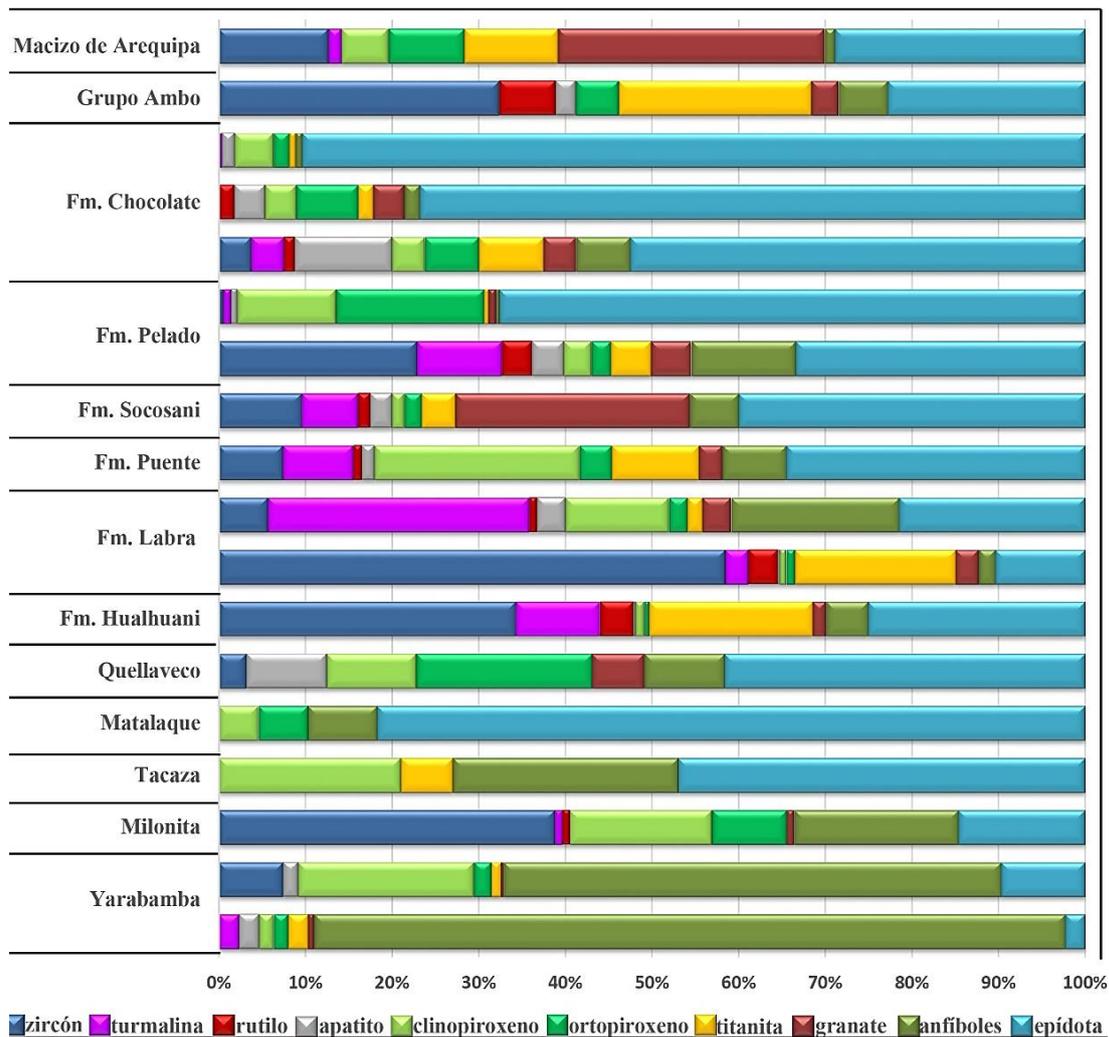


Figura 4. 87. Resumen del valor porcentual de minerales pesados en unidades Pre-Cenozoicas aflorando en los cuadrángulos de Pachía y Palca aumentado de los datos provistos en Trinidad (2017) y Alván et al. (2015).

Para mayor ayuda en la interpretación de la proveniencia de sedimentos, se toma en consideración la Figura 4.87 y la Tabla 4.15, que contienen los minerales pesados identificados por Decou et al. (2011, 2013) y Alván et al. (2015) y sirven en esta tesis para discriminar rocas-fuente que sirvieron para la generación de sedimentos en la Cuenca Moquegua.

Tabla 4. 15. Resumen de espectros de minerales pesados de potenciales rocas fuente y Moquegua C y D, los símbolos xxx =abundante, xx= común, x= presente, o=ausente; (*) indica muestras analizadas por Decou et al. (2011) y Alván et al. (2015).

Litología		Zrn	Tur	Ap	Rt	Sil	Grt1	Grt2	Ttn1	Ttn2	Pxn	Ep	Amp1	Amp2
Potencial roca fuente	Arco Barroso inferior (10-3 Ma) ignimbrita(*)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	xx	0
	Arco Barroso inf. (10-3 Ma) andesitas, dacitas(*)	0	0	x	0	0	0	0	0	0	xxx	0	0	0
	Arco Huaylillas (24-10 Ma) ignimbritas(*)	x-xx	0	x-xx	0-x	0	0	0	0	0	0	0	xx-xxx	0
	Arco Huaylillas (24-10 Ma) andesitas(*)	0	0	x	0	0	0	0	0	0	xxx	0	0	0
	Arco Tacaza (30-24 Ma) andesitas(*)	0	0	xx	0	0	0	0	0	0	xxx	0	0	0
	Arco Tacaza (30-24 Ma) dioritas(**)	0	0	0	0-x	0	0	0	0	x	xx-xxx	xxx	0	xxx
	Arco Anta (45-30 Ma) andesitas, dioritas(*)	x	0	0-xx	0	0	0	0	0	0	xxx	0	0-x	0
	Arco Toquepala (91-45 Ma) riolita(**)	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	xx
	Arco Toquepala (91-45 Ma) plutónicos(**)	0-x	0	x-xx	0	0	0	0	0	0	0	0	0	xx-xxx
	Batolito de la costa (190-60 Ma) plutónicas(**)	0-x	0	x	0	0	0	0	0	x	x	x	xxx	x
	Grupo Yura (Jurásico-Cretácico)(**)	xxx	xx	x	xx-xxx	0	0	0	0	0	0-x	x	0	0-x
	Grupo Mitu (Pérmico-Triásico)(**)	xxx	xx	x	xx-xxx	0	x	0	0	0	0-x	x	0	0-x
	Batolito San Nicolás (Silúrico - Ordovícico)(**)	x	0	x	0	0	0-x	0	xxx	0	0	x	0	x
	Macizo de Arequipa (Proterozoico) gneis(**)	xx	0	x-xx	0-x	0	0	x-xx	0	x	0	xx-xxx	0	xx-xxx
	Macizo de Arequipa (Proterozoico) granulitas(**)	xx	x	0-x	0	x	xxx	0	0	x	x	x	0	x
Macizo de Arequipa (Proterozoico) anfibolitas(*)	xx	0	xx	0	0	0	0	0	0	0	0	0	xx-xxx	
Grupo Moquegua	Moq D(*) (≈ Fm. Millo)	0-x	0	x	0-x	x	0	xx	0	x	xxx	xxx	x-xx	xx-xxx
	Moq C2(*) (≈ Moquegua Superior - Sec B)	xx	0-x	x	0-x	0	0-x	0-x	0	0-x	xx-xxx	xx-xxx	x-xx	0-x
	Moq C1(*) (≈ Moquegua Superior - Sec A)	x-xx	0	xx	x	0	0-x	0-x	0	0-x	x-xxx	xx-xxx	0-x	x-xx

Según la tabla (4.15) las Unidades litológicas que aportaron sedimentos (mediante su denudación) a Moquegua C1 (Decou et al., 2011) serían el Macizo de Arequipa, los Arcos Toquepala, Anta y Tacaza, así como el Grupo Yura, mientras para a unidad Moquegua C2 (Decou et al., 2011) aportan principalmente la denudación de las rocas plutónicas del Batolito de la Costa, las ignimbritas del arco Volcánico Huaylillas y finalmente para la unidad Moquegua D (≈ Formación Millo), se tiene como rocas fuentes las procedentes de los Arcos volcánicos Tacaza, Huaylillas y Barroso.

4.2.1 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN MOQUEGUA SUPERIOR

La Formación Moquegua Superior ha sido dividida en dos grupos en el área de estudio, agrupando sus principales secuencias sedimentarias para la presente tesis en “Secuencia C1” y “Secuencia C2”, las mismas que equivaldrían a la clasificación Moquegua C1 y Moquegua C2 definidas por Decou et al. (2011), estas grandes secuencias presentan variaciones significativas en el contenido de minerales pesados, así como en sus facies sedimentarias, conteniendo Moquegua Superior - Secuencia C1 elementos arquitecturales propios de un sistema fluvio-aluvial y Moquegua Superior - Secuencia C2 elementos arquitecturales de un sistema fluvial de alta energía.

Secuencia C1: Esta secuencia sería la equivalente a la Unidad MoqC1 de Decou et al. (2011). La abundancia de zircones, granates y titanitas (prom. 15%), atendiendo las proporciones de epídotas especialmente en la muestra GR41A-16-292 (Cerro Acirume, zona proximal a la Cordillera Occidental), indican alto aporte del Grupo Toquepala, así como Formación Chocolate, y Macizo de Arequipa (Basamento Metamórfico Mal Paso) y moderado aporte de sedimentos de Grupo Ambo y Grupo Yura; el porcentaje de apatitos (prom. 5% considerando abundancia de epídotas), zircones, granates, titanitas y anfíboles indican moderada contribución de sedimentos de las formaciones Socosani y Grupo Yura (aportantes reciclados); el valor porcentual de piroxenos (<5% de Ortopiroxenos y >30% de clinopiroxenos en promedio considerando epídotas) y anfíboles (>40%) indican cuantioso aporte de sedimentos del Batolito de la costa, arco volcánico Andahuaylas Anta y Tacaza, así como moderado aporte de Quellaveco y Matalaque; La abundancia de epídotas en GR41A-16-71, GRA41A-16-66 y GR41A-16-65 (muestras de pozos de perforación del PET, Tacna) se debería al mayor grado de transporte de sedimentos y alteración de ferromagnesianos. No se observa abundancias de ortopiroxenos, salvo algunas excepciones donde las muestras sugieren un tenue incremento de este mineral (por ejemplo, ~8% en la muestra GR41A-16-192, y ~6% en la muestra GR41A-16-08).

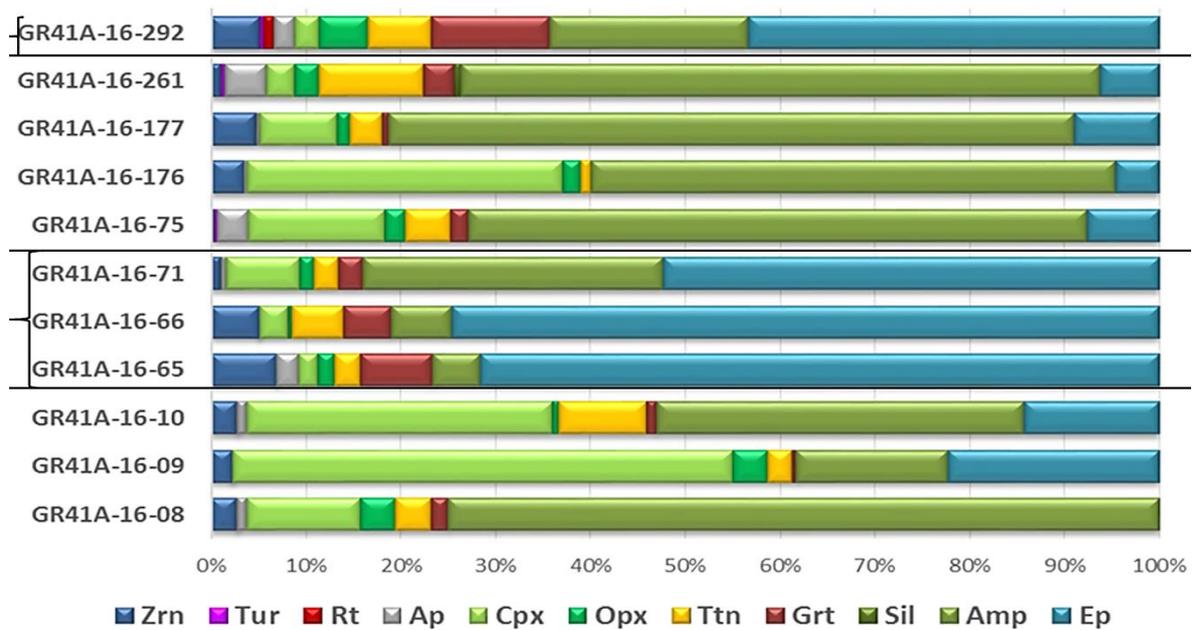


Figura 4. 88. Resumen del valor porcentual de espectros de minerales pesados en la Formación Moquegua Superior, Secuencia C1 (\approx Unidad Moquegua C según Sempere et al., 2004 y Decou et al., 2011).

Secuencia C2: Esta secuencia se correspondería con la unidad Moquegua C2 de Decou et al. (2011), conteniendo mayor cantidad de facies conglomerádicas y alto aporte de sedimentos de origen volcánico. De acuerdo a las abundancias de minerales pesados precisamente de piroxenos y anfíboles, se afirma que el principal aporte de sedimentos corresponde a las rocas de la Super Unidad intrusiva Yarabamba (Batolito de la Costa) y Grupo Tacaza (ver contenido mineral en la Figura 4.87 y la Tabla 4.15). La cantidad de granates, zircones y titanitas evidencian un aporte moderado o poco de las formaciones Quellaveco, Macizo de Arequipa, Formación Pelado, Formación Socosani y Grupo Yura debido a la abundancia de turmalinas y poco anfíbol en estas formaciones geológicas. La presencia de $>20\%$ de zircones en GR41A-16-263 probablemente esté influenciada por el Macizo de Arequipa, Grupo Ambo, Milonita, reciclados del Grupo Yura, el promedio de 50% de epidotas en GR41A-16-64, GR41A-16-69, GR41A-16-70 se debe a que los minerales (especialmente ferromagnesianos) estuvieron expuestos a mayor transporte y alteración. Es necesario resaltar que no se observa abundancias de ortopiroxenos, salvo algunas excepciones donde las muestras sugieren un tenue incremento de este mineral (por ejemplo, $\sim 6\%$ en la muestra GR41A-16-294 y GR41A-16-263).

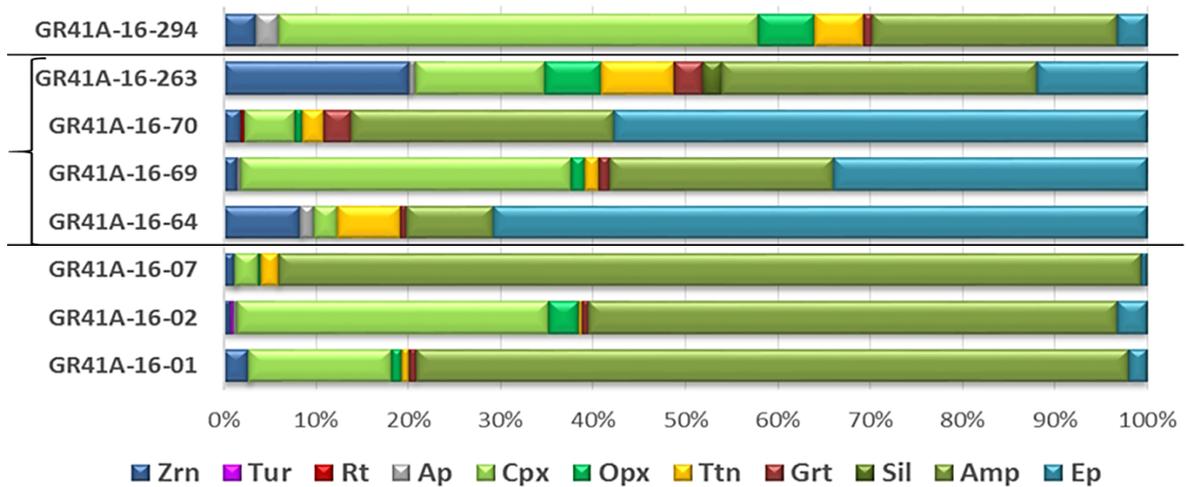


Figura 4. 89. Resumen del valor porcentual de espectros de minerales pesados en la Formación Moquegua Superior, Secuencia C2.

4.2.2 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN HUAYLILLAS

Los granos de minerales pesados en los niveles clásticos de Huaylillas difieren de la unidad Moquegua por el predominio de piroxenos sobre anfíboles, La abundancia de clinopiroxenos >20% caracterizaría al propio Huaylillas (primeras secuencias) como principal aportante y ortopiroxenos >30% indican alto aporte contemporáneo de las unidades Quellaveco, Matalaque, Milonita y Pelado principalmente, además la presencia de anfíboles (>30%) sugiere aportes sedimentarios procedentes de las unidades Yarabamba y Tacaza.

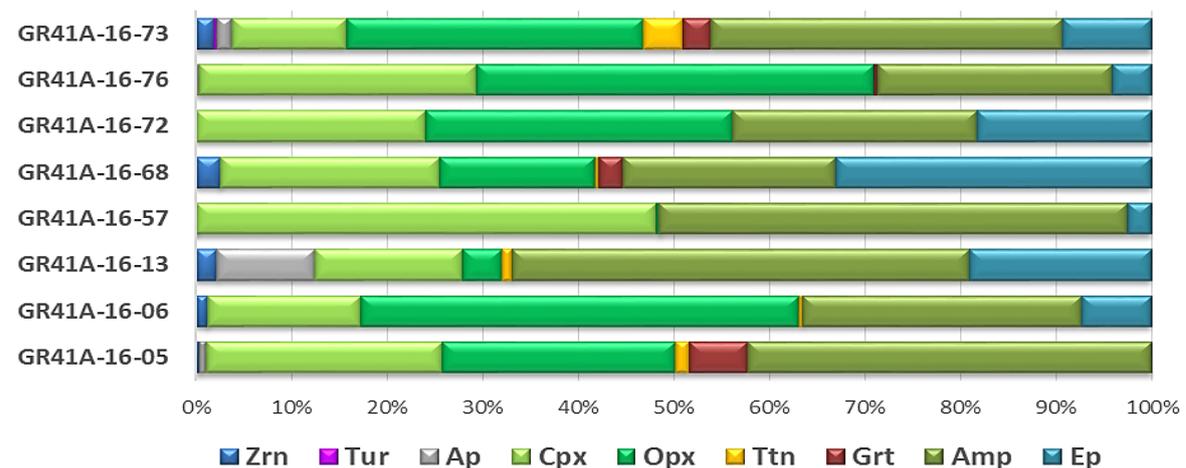


Figura 4. 90. Resumen del valor porcentual (espectros) de minerales pesados en secuencias clásticas de la Formación Huaylillas.

4.2.3 CONTENIDO MINERAL EN LA FORMACIÓN MILLO

La abundancia de minerales pesados en la unidad Millo es muy parecida a la observada en las rocas de la Fm. Huaylillas (especialmente en el contenido de piroxenos que

adicionalmente está provisto en la tabla 4.15). La Formación Huaylillas se comporta como la principal unidad volcánico-clástica aportante de sedimentos a la Fm. Millo; sin embargo, la presencia moderada de granates en los sedimentos de la Fm. Millo hace considerar que unidades exhumadas en la Cordillera Occidental los últimos 10 Ma, tales como el Macizo de Arequipa ha servido como roca fuente de aporte moderado de sedimentos. Adicionalmente, el Grupo Toquepala (Formación Matalaque y principalmente la Formación Quellaveco), Fm. Tacaza, Fm. Barroso y las rocas intrusivos del Eoceno (sobresaliendo minerales tales como piroxenos y anfíboles) también sirvieron como roca fuente. En estos espectros se resalta la predominancia de ortopiroxenos sobre clinopiroxenos (Figura 4.91), y con mayor énfasis aun en comparación con la proporción de ortopiroxenos en las unidades subyacentes (donde se nota la escasez de estos minerales pesados).

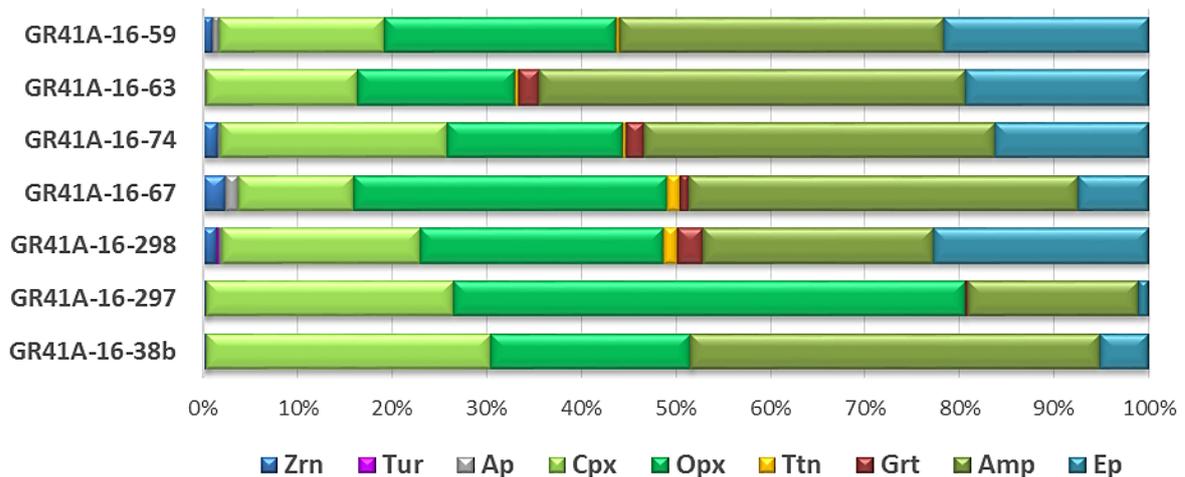


Figura 4. 91. Resumen del valor porcentual de minerales pesados (espectros) en Formación Millo.

4.2.1 MODELO DE PROVENIENCIA SEDIMENTARIA DEL CENOZOICO EN TACNA

Los resultados del análisis de la composición mineral de los sedimentos de las formaciones Moquegua Superior, Huaylillas y Millo son mostrados en esta tesis de acuerdo a los porcentajes de abundancias de minerales pesados. Se presenta espectros de minerales pesados tanto de rocas potencialmente “fuentes” como de los mismos sedimentos cenozoicos, en los cuales se muestra un cuadro evolutivo mostrando la proveniencia de cada unidad lito-estratigráfica, y se resume en la Tabla 4.16. En general, entendemos que la Cuenca Moquegua tiene como principal borde a las rocas de la Cordillera Occidental de sur de Perú. El objetivo es conocer los momentos de exhumación de las rocas que lo conforman, de modo que podemos establecer tanto correlaciones estratigráficas (e historias

de sedimentación), como proveer entornos que se atribuyan a la movilidad de fallas cartografiadas (modelo geodinámico) al menos en esta parte de la cuenca (Tacna).

Los espectros de minerales pesados observados en la Formación Moquegua Superior se caracterizan por su predominancia de anfíboles, piroxenos (precisamente clinopiroxenos), granates, titanitas y zircones, los cuales sugieren predominancia de sedimentos derivados de rocas metamórficas muy antiguas (e.g. Macizo de Arequipa/Basamento Metamórfico Mal Paso), de la denudación de las rocas del arco Toquepala (formaciones Quellaveco y Matalaque), de rocas intrusivas (granodioritas) de la Super Unidad intrusiva Yarabamba y de arcos magmáticos jóvenes tales como las dioritas del Grupo Tacaza (cf. Decou et al., 2011), sin embargo una menor proporción de minerales pesados tales como zircón y apatito sugieren aportes de rocas que contemporáneamente estaban siendo exhumadas y denudadas tales como el Grupo Ambo, Formación Pelado, Formación Socosani, Grupo Yura, y el Grupo Toquepala al mismo tiempo que las rocas intrusivas de finales del Cretácico y Paleógeno.

La depositación de la secuencia volcanoclástica de la Formación Huaylillas se trata de una fuente predominantemente piroclástica, contiene proporciones significantes de sedimentos retrabajados de los componentes volcánicos de esta unidad (generados por la actividad del Arco Volcánico Huaylillas, 24-10 Ma según Mamani et al., 2010). Estas capas tienen intermitencia de sedimentos canalizados, de los cuales tienen aunque en muy menor proporción, sedimentos derivados de otras fuentes, por ejemplo, de sedimentos que son derivados del Grupo Yura. Se encontraron clastos de andesitas, dacitas, riolitas y cuarzos abundantes (reconocimiento macroscópico) en las secuencias clásticas de Huaylillas, así como abundancia de anfíbol y piroxeno (clinopiroxeno).

Respecto a la Formación Millo, los espectros de minerales pesados observados en estas rocas muestran predominancia de clinopiroxenos, ortopiroxenos y anfíboles, es decir, toda la gama de minerales pesados provenientes localmente de rocas plutónicas y volcánicas (cf. Mange & Maurer, 1992), reflejando un claro aporte del grupo Toquepala. Sin embargo, se observa una menor proporción de minerales que existen comúnmente en rocas metamórficas, tales como granates y titanitas, sugiriendo un aporte significativo nuevamente de las rocas del Macizo de Arequipa/Basamento Metamórfico Mal Paso (ver Tabla 4.16), así como del Grupo Ambo. Las rocas fuente que dominan en la Formación Millo son el Grupo Tacaza, Fm. Huaylillas y la Fm. Barroso, en concordancia con Decou

et al., 2011. Además sus índices ZTR, ATi y GZi son los más bajos de todos los depósitos sedimentarios cenozoicos de Tacna.

Se observa cambios en la composición de los sedimentos viéndolo (de manera vertical). Se puede apreciar en la Figura 4.85 la ausencia de ortopiroxenos en la Formación Moquegua Superior, este dato es contundente para la definición de correlaciones estratigráficas a lo largo del área de estudio, así como también para definir que afloraba un cuerpo metamórfico de alto grado de metamorfismo (UHT, cf. Martignole & Martelat, 2003) durante la depositación de la Formación Moquegua Superior. Luego de la depositación de la Fm. Huaylillas, nuevamente se tiene predominancia de rocas metamórficas, pero con otro grado de metamorfismo, acompañado con minerales típicos de bloques intrusivos plutónicos y volcánicos. Esta tendencia es parecida a la reportada por Decou et al. (2011), con la diferencia que para el intervalo Mioceno superior-Plioceno de Tacna, se tiene evidencias de exhumación de rocas proterozicas del Macizo de Arequipa/Basamento Metamórfico Mal Paso. El proceso de levantamiento y exhumación de estas unidades ha sido definido por diversos autores como un pulso rápido en el levantamiento de los Andes Centrales (e.g. Schildgen et al., 2009; Decou et al., 2013; Alván et al., 2015), los cuales debieron estar asociados (o facilitados) al efecto cinemático del sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio (SFCLLI).

La abundancia de conglomerados cercanos a la Cordillera Occidental corresponden a una respuesta sedimentaria debida al levantamiento tectónico, incremento de pendiente (por ende mayor aporte) y mayor exhumación de unidades geológicas, así mismo la disminución del tamaño de grano conforme se avanza a la parte distal de la cuenca (hacia el SO), donde se deposita en un régimen de “calma” en la geodinámica/sedimentación, correspondería a un esquema evolutivo ideal asociado a un frente montañoso activo que se erosiona a manera de abanicos aluviales transicionando a una llanura aluvial con zonas cenagosas (mud flats) para desembocar en lagos someros tal como se muestra en el esquema de la Figura 4.86. Además se observa las medidas promedio de paleocorrientes que tienen tendencia NE-SO; Las facies estudiadas en Moquegua Superior se acomodan al modelo de Miall (2006) en la Figura 4.92.

Tabla 4. 16. Rocas fuente y la estimación de contribución a las formaciones Moquegua Superior, Huaylillas y Millo.

CENOZOICO		CONTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS ESTIMADA		Unidades Geológicas	
		Abundante	Moderado		Poco
					
Paleógeno	Oligoceno	Moquegua Superior	Secuencia C1	Basamento metamórfico	
			Secuencia C2		
Neógeno	Mioceno	Huaylillas	Secuencias volcánicas locales	Grupo Ambo (Carbonífero)	
			Plioceno	Millo	Arco Chocolate (~310-91 Ma)
				Moq D	Fm. Pelado (Jurásico inferior)
Holoceno	Pleistoceno	Millo		Fm. Socosani (Jurásico medio)	
				Grupo Yura (Jurásico superior- Cretácico inferior)	
				Arco Toquepala (91-45 Ma) - Fm. Matalaque	
				Arco Toquepala (91-45 Ma) - Fm. Quellaveco	
				Arco Andahuaylas - Anta (45-30Ma)	
				Arco Tacaza (30-24 Ma)	
				Arco Huaylillas (24-10 Ma)	
				Arco Barroso (10-3 Ma)	
				Batolito de la costa - Unidad Yarabamba (Paleoceno)	
				Intrusivos (Eoceno)	

Desde el Oligoceno, el proceso de sedimentación en la cuenca Moquegua se dio a partir de las montañas pertenecientes a la Cordillera Occidental (Marocco et al., 1985) en sentido suroeste, con unidades geomorfológicas que han estado exhumadas y siendo denudadas durante el proceso de Orogenia Andina. El transporte de sedimentos ha sido realizado a través de extensos abanicos aluviales y ambientes fluviales proximales (e.g. Acosta, 2004). Adyacente al borde de cuenca (Cordillera Occidental) predominan los conglomerados con eventuales lentes de arenisca, reflejando alta energía en el sistema (influencia debris flow, conos aluviales y ríos tipo Braided “Scott”) y constantes elevaciones en la zona de aporte (Miall, 1996).

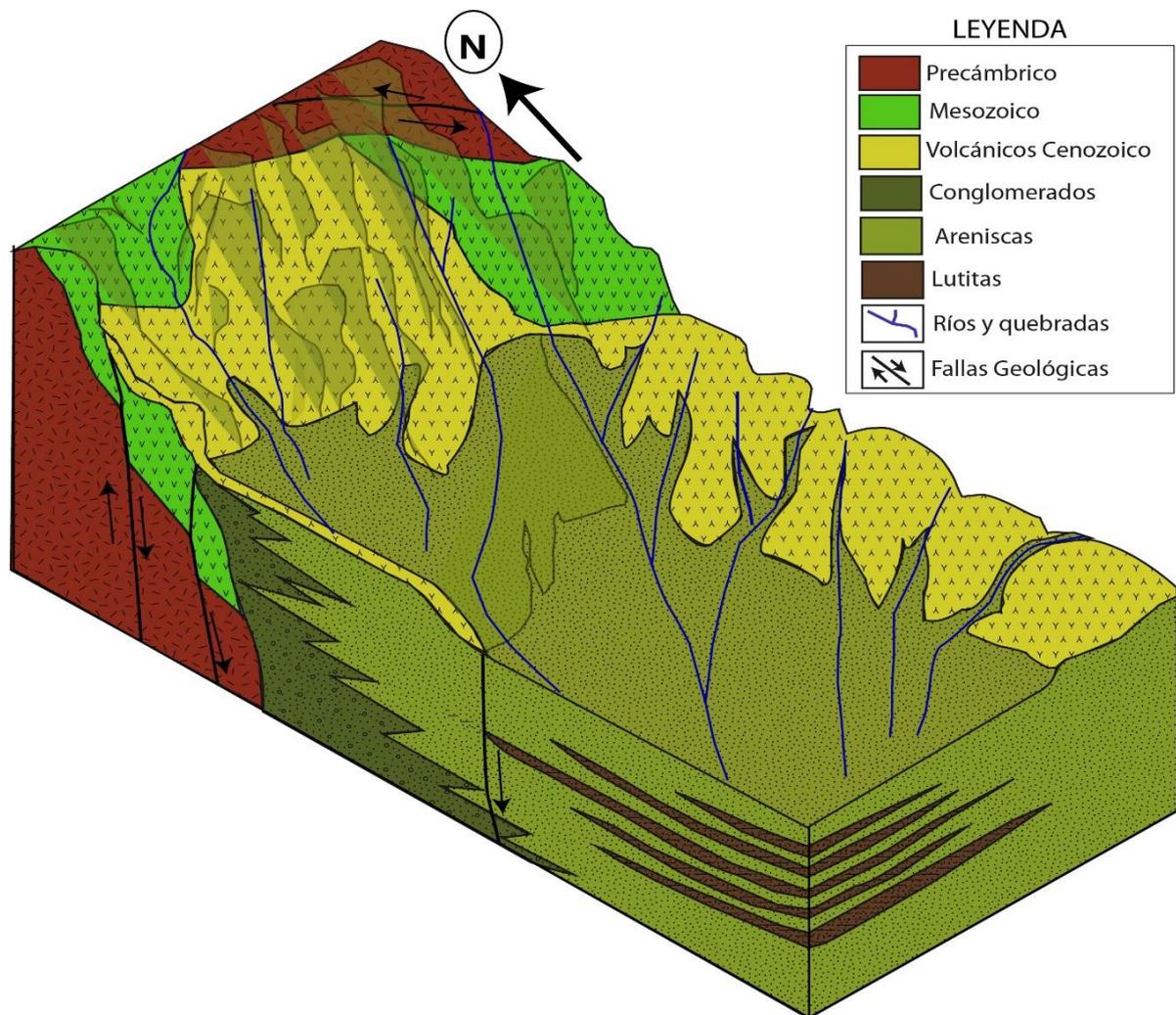


Figura 4. 92. Modelo depositacional del ambiente fluvio-aluvial en el departamento de Tacna. (Adaptado de Miall, 2006).

El tramo medio de la cuenca habría estado afectada por ríos entrelazados de moderada sinuosidad y quebradas que llevan esencialmente cantos y areniscas hacia un ambiente de lago superficial ubicado al suroeste de la cuenca, éste último ambiente se corresponde a

depósitos de llanuras de inundación, lagos superficiales estacionarios y evaporítico. Actualmente el contexto de depositación sedimentaria es similar, sin embargo el clima especialmente árido provoca intensa evaporación en la región ocurriendo escasez de agua, además los caudales de los ríos son muy bajos.

4.2.4 PROVENIENCIA EN RELACIÓN AL AMBIENTE TECTÓNICO

El resultado del conteo de granos con el método Gazzi-Dickinson de las secciones delgadas de las formaciones Moquegua, Huaylillas (nivel clástico) y Millo, permite reforzar nuestras observaciones en términos de correlaciones, relacionar la composición de estas areniscas (QFL) a un ambiente tectónico específico al que se asocia la cuenca sedimentaria durante la depositación de sus sedimentos.

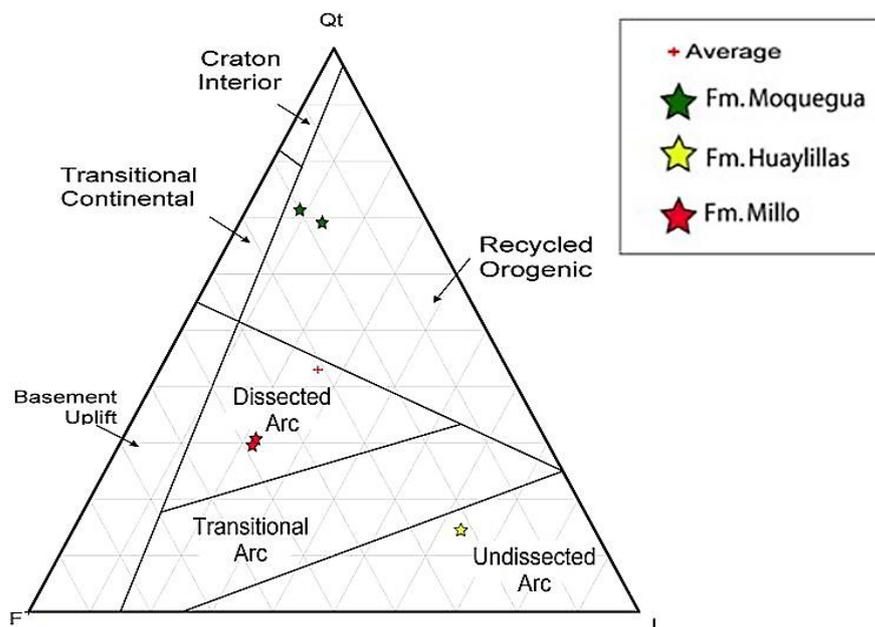


Figura 4. 93. Datos de areniscas de las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo en un diagrama “QtFL” de Dickinson (1983).

Las areniscas de la Formación Moquegua Superior (estrellas verdes) en la Figura 4.93 se plotean en el campo de proveniencia de un “orógeno reciclado” y según Dickinson (1985) el ambiente tectónico se relacionaría a Complejos de subducción o cinturones de pliegues y cabalgaduras, concluyendo su derivación continental y su estrecha relación a sistemas fluviales que transportarían sedimentos de orógenos reciclados juntamente a una variedad de ajustes tectónicos; además en esta tesis se aclara que la proveniencia de los sedimentos que conforman la Fm. Moquegua Superior es consistente con las afirmaciones sugeridas por los minerales pesados, por ejemplo las rocas fuente del Grupo Ambo (muy recicladas). La Figura 4.94 (Diagrama QmFLt), plotea los datos de la Formación Moquegua Superior en el campo de “orógeno reciclado y mezcla”, indicando que sus sedimentos han sido

proporcionados de rocas de arco magmático y bloque continental, incluyendo rocas volcanoclásticas.

La Formación Huaylillas se ubica en el diagrama QtFL (Figura 4.93) dentro del campo de “Arco no seccionado o activo” (Undissected Arc), permitiendo insertar las rocas de esta formación claramente en la categoría de procedencia de un arco magmático que afirma que estos sedimentos forman parte de una cuenca ante-arco construida con materiales volcanoclásticos. En complemento, en la Figura 4.94 las muestras de la Fm. Huaylillas se plotean en un arco volcánico transicional, así se podría relacionar a la misma unidad Huaylillas como principal aportante de sedimentos en su nivel clástico.

Finalmente, las areniscas de la Formación Millo se ubican en el diagrama QtFL (Figuras 4.93) y el diagrama QmFLt (figura 4.94), ambos dentro del campo de “Arco disectado”, que permite insertar esta formación en la categoría de procedencia de un Arco Magmático. Por ende, la cuenca de depósito es de tipo ante-arco compuesta de sedimentos de origen principalmente volcanoclástico.

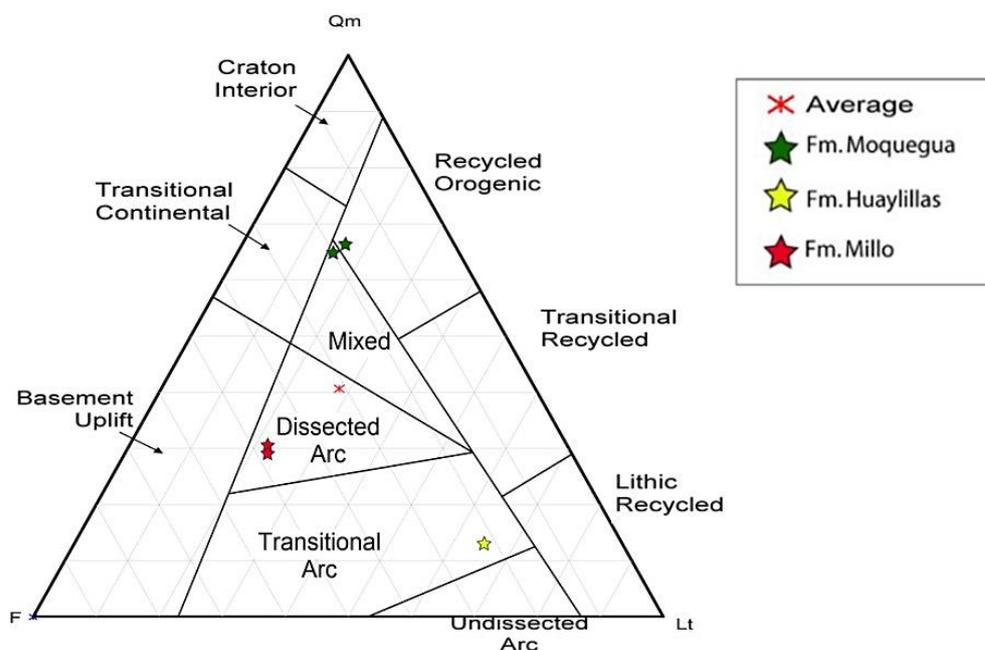


Figura 4. 94. Datos de areniscas de las formaciones Moquegua, Huaylillas y Millo en diagrama “QmFLt” de Dickinson (1983).

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante esta investigación ha sido posible conocer la procedencia sedimentaria de las rocas sedimentarias de edad Cenozoica en los cuadrángulos de Pachía (36v) y Tacna(37v), estimada primeramente mediante el análisis de minerales pesados, donde se ha reconocido minerales tales como anfíboles, piroxenos, titanitas, apatitos, granates y zircones; de esta manera se define la Formación Moquegua Superior en dos Secuencias C1 y C2 con aportes de sedimentos preponderantes del Basamento metamórfico, Grupo Ambo, Grupo Yura, Arco Chocolate, Arco Toquepala, Arco Tacaza y Batolito de la Costa; la Formación Huaylillas (niveles clásticos locales en Tacna) se asocia a los Arcos Tacaza y Huaylillas como principales aportantes de sedimentos y la Formación Millo refleja su procedencia principalmente de arcos volcánicos contemporáneos tales como Tacaza, Huaylillas, Barroso, Arco Toquepala y unidades del Precámbrico. Las formaciones del Basamento metamórfico, así como del Jurásico y Cretácico que han servido de fuente de sedimentos, fueron exhumadas contemporáneamente al proceso de depositación de las unidades investigadas, actividad relacionada al inicio del levantamiento de los Andes, específicamente fase Quechua I, debido a la actividad del Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Icapuquio en su proceso de inversión tectónica (Inversas con componente de rumbo sinistral desde Cretáceo Superior-Paleógeno, Acosta et al., 2012) y muy posiblemente esté relacionado a la abundancia de piroclastos del Arco Volcánico Huaylillas, de los cuales sus estrato-volcanes estuvieron ubicados tanto en la Cordillera Occidental como en el Altiplano del sur de Perú y del norte de Chile (Wörner et al., 2000; Mamani et al., 2010). La segunda herramienta utilizada en esta investigación ha sido la petrografía sedimentaria que plotea el valor porcentual de cuarzo, feldspatos y líticos en diagramas ternarios e indican la proveniencia tectónica para las unidades estudiadas desde arcos volcánicos y orógenos reciclados; finalmente la tercera herramienta de la presente tesis fue el análisis de facies que muestran un modelo de sedimentación caracterizado como ambiente tipo fluvial-aluvial, lo cual refuerza la hipótesis de la Cordillera Occidental como principal borde de cuenca y por ende principal zona de aporte de sedimentos. Así mismo, la caracterización de las facies sedimentarias de los afloramientos han podido ser correlacionadas con la información de los testigos de pozos de perforación, por lo cual se entiende que a lo largo de las planicies de Tacna existen fallas normales (e.g. Magollo-Escritos por Flores et al., 2005) que han permitido el desplazamiento vertical de bloques, típicos de un ambiente de extensión (cuenca antearco) que coexisten en plena Orogenia Andina.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

✓ Se ha logrado determinar la proveniencia de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias del Cenozoico en la Provincia de Tacna (18°S), a través de análisis de minerales pesados. La proveniencia de sedimentos de la Formación Moquegua Superior (Oligoceno), sugiere al Arco Tacaza, Batolito de la Costa, Arco Toquepala, y Basamento Metamórfico Mal Paso como rocas-fuente principales, y como contribución moderada del Grupo Ambo, Fm. Chocolate, Grupo Yura y Fm. Huaylillas. La Secuencia volcanoclástica de la Fm. Huaylillas (Mioceno inferior-medio) tiene como principales unidades aportantes a Arco Toquepala, Grupo Ambo y principalmente el Arco Huaylillas. La Formación Millo (Mioceno superior a Plioceno) indica proveniencia del Basamento Metamórfico Mal Paso, Grupo Ambo, Arco Toquepala y principalmente del Arco Tacaza, Arco Huaylillas y Arco Barroso, como roca-fuente.

✓ Se elaboró diez columnas estratigráficas (afloramientos y testigos de perforación), llegando a identificarse dos secuencias estratigráficas principales en la Formación Moquegua Superior, un nivel litoclástico en la Formación Huaylillas y tres niveles en Formación Millo; asociados a una cuenca de antearco continental, con un esquema evolutivo de frente montañoso-abanicos aluviales con facies de río trenzado proximales de alto régimen y lagos someros, con predominio de conglomerados al noreste de la cuenca (piedemonte de la Cordillera Occidental), facies fluvio-aluviales en la parte media de la cuenca asociada a ríos trenzados de moderada sinuosidad (cerro Cubeta), y flujo de bajo régimen con facies de llanura aluvial, ríos inestables y evaporitas en la parte más cercana al mar (sur-oeste de la cuenca, Pampas La Yarada).

✓ Se realizó el análisis de minerales pesados de 34 muestras de areniscas y litoarenitas, reconociendo espectros generalmente de anfíboles (frescos y alterados) y piroxenos (clinopiroxenos y ortopiroxenos) de porcentaje promedio mayor al 35%, así como minerales subordinados menores al 20% tales como zircones, granates, apatitos, titanitas, y epidotas que preponderan en muestras de los pozos de perforación. La abundancia (y ausencia) de éstos minerales caracterizan cada unidad litoestratigráfica.

✓ Se ha utilizado la petrografía sedimentaria (Diagrama QFL) y aunque se analizaron pocas muestras (cinco) el resultado es consistente con las afirmaciones provistas del análisis de minerales pesados. La Formación Moquegua Superior indica procedencia de un “orógeno reciclado” o de origen continental, sedimentos retrabajados tales como los correspondientes al Grupo Ambo. Los sedimentos de la Fm. Huaylillas (nivel clástico) sugiere la procedencia de un “arco magmático activo”, retransporte de productos piroclásticos. Los sedimentos de la Fm. Millo refuerzan la idea del aporte de sedimentos de la Fm. Huaylillas, y del retrabajamiento de productos volcánicos, los cuales procederían de un “Arco disectado”, y puede ser insertado en la categoría de procedencia de un Arco Magmático.

✓ El modelo de proveniencia propuesto en esta tesis para explicar la evolución sedimentaria de las rocas sedimentarias Cenozoicas de Tacna sugiere que durante la sedimentación de la Fm. Moquegua estaban exhumados rocas volcánicas del Arco Chocolate, Arco Toquepala, Arco Tacaza, la Super Unidad Yarabamba y posiblemente rocas proterozoicas metamórficas debido a la actividad del Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Icapuquio en su proceso de inversión tectónica (Inversas con componente de rumbo sinistral desde Cretáceo Superior-Paleógeno, Acosta et al., 2012) y muy posiblemente esté relacionado al Arco Huaylillas, cuyos estrato-volcanes estuvieron ubicados tanto en la Cordillera Occidental, Altiplano del sur de Perú y norte de Chile (Wörner t al., 2000; Mamani et al., 2010); Así mismo, la caracterización y correlación de facies sedimentarias permiten indicar fallas normales a lo largo de las planicies de Tacna (e.g. Magollo-Escritos por Flores et al., 2005) que han permitido el desplazamiento vertical de bloques, típico de un ambiente de extensión que coexiste en plena Orogenia Andina.

5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Estudiar las morfologías externas y grados de corrosión de los minerales pesados en Tacna, para definir patrones de dispersión y rutas de transporte de sedimentos, definiendo con mayor precisión las rocas fuente.
- ✓ Evaluar el potencial económico que representan los minerales pesados en la región de Tacna, tales como titanita, apatito, anfíbol y zircón (realizar catodoluminiscencia a los apatitos y zircones).
- ✓ Aprovechar los estudios de proveniencia de sedimentos en trabajos de cartografiado geológico, prospección de recursos hídricos y establecimiento de correlaciones estratigráficas en territorio peruano, así como en la búsqueda de potenciales reservas minerales.
- ✓ Aplicar la técnica de análisis de minerales pesados en otras Formaciones Sedimentarias a lo largo del Perú, tal como el Grupo Goyllarisquizga en Cajamarca, y dar luces de sus procedencias sedimentarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H; Alván, A; Mamani, M; Oviedo, M; Rodríguez, J. 2011. Geología de los Cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x). Escala 1:50 000. *Serie A: Carta Geológica Nacional*. Vol. Boletín No. 139. Lima, Peru: Dirección de Geología Regional, INGEMMET. ,pp. 96)
- Acosta, H; Alván, A; Mamani, M; Rodríguez, J; Cutipa, M. 2012. Geología de los Cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas, Hojas 37-u, 37-v y 37-x. Escala 1:50 000. *Serie A: Carta Geológica Nacional* (Vol. Boletín No. 45, pp. 114). Lima, Peru: Dirección de Geología Regional, INGEMMET.
- Acosta, J. 2004. Facies y ambientes sedimentarios de la Formación Moquegua Superior en los alrededores de la ciudad de Tacna. Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú, 183 p.
- Adams, J. L. 1906. Caudal, procedencia y distribución de aguas de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. *Boletín del Cuerpo de Ingeniero de Minas del Perú*, 45, 56-63.
- Alván, AA. 2015. Geodynamic significance of the Cenozoic deposits in the southern Peruvian forearc (16°25'S to 17°15'S): constraints by facies analysis and sediment provenance. (PhD Thesis), University of Gottingen, Gottingen, Germany.
- Alván, A; von Eynatten, H; Dunkl, I; Gerdes, A. 2015. Zircon U-Pb geochronology and heavy mineral composition of the Camaná Formation, southern Peru: Constraints on sediment provenance and uplift of the Coastal and Western Cordilleras. *Journal of South American Earth Sciences*, 61, 14-32.
- Amorosi, A; Zuffa, GG. 2011. Sand composition changes across key boundaries of siliciclastic and hybrid depositional sequences. *Sedimentary Geology*, 236, 153-163. sch
- Ardill, J; Chong-Diaz, G; Flint, S. 1993. *Stratigraphic analysis of the Domeyko basin, Northern Chile*. Paper presented at the Second ISAG, Oxford, UK.
- Arribas, J. 2010. Análisis de procedencia en depósitos arenosos. Sedimentología Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Editor Alfredo Arche. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Basu, A; Young, SW; Suttner, LJ; James, WC; Mack, G.H. 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.
- Bellido, E. (1979). Geología del Cuadrángulo de Moquegua Hoja 35-u. *Serie A: Carta Geológica Nacional* (Vol. Boletín No. 15, pp. 78). Lima, Perú: Dirección de Geología Regional, INGEMMET.
- Branney, MJ; Kokelaar, P. 2003. Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. Geological Society Memoir no. 27. 143pp. Geological Society of London.
- Decou, A; von Eynatten, H; Mamani, M; Sempere, T; Wörner, G. 2011. Cenozoic forearc basin sediments in Southern Peru (15–18°S): Stratigraphic and heavy mineral constraints for Eocene to Miocene evolution of the Central Andes. *Sedimentary Geology*, 237, 55-72.
- Decou, A; von Eynatten, H; Dunkl, I; Wörner, G. 2013. Late Eocene to Early Miocene Andean uplift inferred from detrital zircon fission track and U-Pb dating of Cenozoic forearc sediments (15-18°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 6-23.
- Dickinson, WR. 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(2), 695-707.

- Dickinson, WR; Seely, DR. 1979. Structure and stratigraphy of fore-arc regions: American Association of Petroleum Geologist Buletin, v.63, p. 2-31.
- Dickinson, WR; Beard, LS; Brakenridge, GR; Erjavec, JL; Ferguson, RC; Inman, KF; Knepp, RA; Lindberg, FA; Ryberg, PT. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2), 222-235.
- Dickinson, WR; Lawton, TF; Inman, KF. 1985. Sandstone detrital modes, central Utah foreland region: stratigraphic record of Cretaceous-Paleogene tectonic evolution. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56(2), 276-293.
- Dickinson, WR; Suczek, CA. 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *The American Association of Petroleum Geologists*, 63(12), 2164-2182.
- Dott, RH. 1964. Wacke, graywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification?. *Journal of Sedimentary Research* September 1, 1964.
- Dunkl, I; Frisch, W; Kuhleemann, J; Brügel, A. 2009. Pebble population dating as an additional tool for provenance studies - examples from the Eastern Alps. *Geological Society London Special Publications*, 324, 125-140.
- Flores, A; Sempere, T; Fornari, M. 2004. *Síntesis actualizada de la estratigrafía del Cenozoico en el extremo sur del Perú*. Paper presented at the XII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Flores, A; Sempere, T. 2002. Avances sobre la historia geológica del valle de Tacna. XI Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú, 22.
- Graham, SA; Ingersoll, RV; Dickinson, WR. 1976. Common provenance for lithic grains in Carboniferous sandstones from Quachita Mountains and Black Warrior basin: *Jour. Sed. Petrology*, v. 46, p. 620-632.
- Gressly, A. 1838. Observations géologiques sur le Jura soleurois: Nouveaux mémoires de la Société Helvetique des Sciences Naturelles, Neuchâtel, v. 2, 349 p.
- Hubert, J.F. 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*, 32(3), 440-450.
- Ingersoll, RV; Suczek, CA. 1979. Petrology and provenance of Neogene sand from Nicobar and Bengal fans, DSDP sites 211 and 218: *Jour. Sed. Petrology*, v. 49, p. 1217-1228.
- Ingersoll, RV; Bullard, TF; Ford, RI; Grimm, JP; Pickle, JD; Sares, SW. 1984. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(1), 103-116.
- Jaén, H., Ortiz, G. 1963. Geología de los Cuadrángulos de La Yarada y Tacna (Hojas 37-u y 37-v). *Serie A: Comisión Carta Geológica Nacional* (Vol. Boletín No. 6, pp. 54). Lima, Perú: Dirección de Geología Regional, INGEMMET.
- Johnson, MJ. 1993. The system controlling the composition of clastic sediments, en Johnson, M.J., Basu, A. (eds.), *Processes controlling the composition of Clastic Sediments: Geological Society of America Special Paper*, 284, 1-19.
- Mamani, M; Wörner, G; Sempere, T. 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America*, 122, 162-182.
- Mange, MA; Maurer, HF. 1992. *Heavy Minerals in Colour* (First Edition ed.). Hong Kong: Chapman & Hall, London.
- Mange, MA; Dewey, JF; Wright, DT. 2003. Heavy minerals solve structural and stratigraphic problems in Ordovician strata of the western Irish Caledonides. *Geol. Mag.* 140, pp. 25-30. Cambridge University Press.

- Marocco, R; Delfaud, J; Lavenu, A. 1985. Ambiente deposicional de una cuenca continental intramontañosa andina: el Grupo Moquegua (sur de Perú) primeros resultados. *Sociedad Geológica del Perú*, 75, 73-90.
- Marocco, R; Noblet, C. 1990. Sedimentation, tectonism and volcanism relationships in two Andean basins of southern Peru. *Geologische Rundschau*, 79/1, 111-120.
- McBride, EF. 1963. A Classification of Common Sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33(3), 664-669.
- McLennan, SM; Hemming, S; McDaniel, DK; Hanson, GN. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of America Special Paper*, 284, 21-40.
- Miall, AD. 1985. Architectural-Element Analysis: A new Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth-Science Reviews*, 22, 261-308.
- Miall, AD. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. Berlin, Germany: Springer Verlag.
- Middleton, G. 1973. Johannes Walther's Law of Correlation of Facies: Geological Society of America Bulletin, 38: 979-988.
- Monge, R; Cervantes, J. 2000. Memoria explicativa de la Geología del Cuadrángulo de Pachía y Palca (36-v). In INGEMMET (Ed.), (pp. 11). Lima, Perú: INGEMMET.
- Morton, AC. 1986. Dissolution of apatite in North Sea Jurassic sandstones: implications for the generation of secondary porosity. *Clay Miner.* 21, 711-733.
- Morton, AC. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. *Geological Society London Special Publications*, 57(1), 31.
- Morton, AC; Johnsson, MJ. 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., Spec. Pap. 284, 171-185.
- Morton, AC; Hallsworth, CR. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90, 241-256.
- Morton, AC; Hallsworth, CR. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 3-29.
- Oncken, O; Hindle, D; Kley, J; Elger, K; Victor, P; Schemmann, K. 2006. Chapter 1: Deformation of the Central Andean Upper Plate System-Facts, Fiction, and constrains for the Plateau Models. In O. Oncken, Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V. A., Strecker, M. R. & Wigger, P. (Ed.), *The Andes, Active Subduction Orogeny*. (pp. 1-27). Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pettijohn, FJ. 1941. Persistence of heavy minerals and geologic age. *J. Geol.* 49, 610-625.
- Pettijohn, FJ; Potter, PE; Siever, R. 1987. *Sand and sandstone*. Springer-Verlag New York.
- Pino, A. 2003. *Estratigrafía y Paleogeografía del intervalo Paleozoico superior-Cretáceo inferior en el extremo Sur del Perú (Area Mal Paso-Palca)*. (Ingeniero Geólogo), Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Pino, A; Sempere, T; Jacay, J; Fornari, M. 2004. Estratigrafía, paleogeografía y paleotectónica del intervalo Paleozoico superior - Cretáceo inferior en el Area de Mal Paso - Palca (Tacna). *Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial No. 5*, 15-44.
- Salinas, E. 1985. Evolución paleogeográfica del Sur del Peru a la luz de los métodos de análisis sedimentológicos del departamento de Tacna. (Ingeniero Geólogo), Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Peru, Arequipa, Peru.
- Sánchez, A; Rosell, W; Raymundo, T. 2000. Memoria explicativa de la revisión geológica en los cuadrángulos de Punta del Bombón (35s), La Cledesí (35t), Ilo (36t),

- Locumba (36u), La Yarada (37u), Tacna (37v), Huaylillas (37x), Juli (33y), Pizacoma (34y) e Isla Anápia (33z). Franja 1. *Memoria Descriptiva* (pp. 40). Lima, Perú: Dirección de Geología Regional, INGEMMET.
- Schumm, SA. 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.* 31: 19-29.
- Sempere, T; Fornari, M; Acosta, J; Flores, A; Jacay, J; Pena, D; Roperch, P; Taipe, E. 2004. *Estratigrafía, geocronología y paleotectónica de los depósitos de antearco del sur del Perú*. Paper presented at the XII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Steinmann, G. 1930. Geologie von Peru. *Winter, Heidelberg*, 448.
- Trinidad, I. 2017. Evolución geodinámica del Mesozoico al sur de la cuenca Arequipa en el sur del Perú (17°-18° latitud sur) basado en análisis de minerales pesados. Tesis. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Perú.
- von Eynatten, H; Dunkl, I. 2012. Assessing the Sediment Factory: The Role of Single Grain Analysis. *Earth-Science Reviews*, 115, 97-120.
- Weltje, GJ; von Eynatten, H. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171, 1-11.
- Weltje, GJ; Prins, MA. 2003. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics. *Sedimentary Geology* 162. pp. 33-62.
- Wilson, J; García, W. 1962. Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x). *Serie A: Comisión de la Carta Geológica Nacional*. Vol. Boletín No. 4. Lima, Perú: Dirección de Geología Regional, INGEMMET. pp. 82.
- Wotzlaw, JF; Decou, A; von Eynatten, H; Wörner, G; Frei, D. 2011. Jurassic to Paleogene tectono-magmatic evolution of northern Chile and adjacent Bolivia from detrital zircon U-Pb geochronology and heavy mineral provenance. *Terra Nova*, 00, 1-8.
- Zuffa, GG. 1985. Optical Analyses of Arenites: Influence of Methodology on Compositional Results. *Provenance of Arenites, Reidel Publishing Company*, 165-189.

ANEXOS

1. Tabla resumen de espectros de minerales pesados de potenciales rocas fuente, formaciones Moquegua (Secuencia C1 y Secuencia C2), Huaylillas (nivel clástico), Millo. Los símbolos xxxx = cuantioso (>75%), xxx =abundante (25-75%), xx= común (15-25%), x= presente (1-15%), o=ausente (0-1%). (*)Muestras analizadas por Trinidad (2017).
2. Plano de ubicación.
3. Plano geomorfológico altitudinal.
4. Plano topográfico hidrológico.
5. Plano geológico (tomado de Sánchez et al., 2000 y Monge &Cervantes, 2000).
6. Plano estructural (referencial, tomado de Alván, et al. 2017).