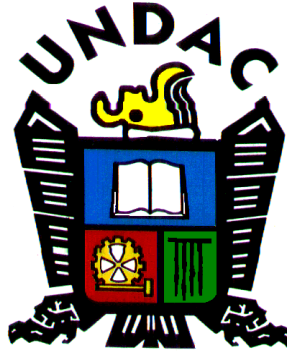


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**Caracterización de la geoquímica magmática y su relación a la
mineralización de Cu – Au (10°38´ – 10 °48´ Latitud Sur),
Cerro de Pasco**

Para optar el título profesional de:

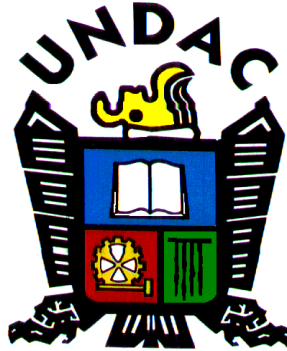
Ingeniero Geólogo

Autor: Bach. Gerardo Fausto COTRINA SANTIAGO

Asesor: Mg. Vidal Víctor CALSINA COLQUI

Cerro de Pasco – Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**Caracterización de la geoquímica magmática y su relación a la
mineralización de Cu – Au (10°38´ – 10°48´ Latitud Sur),
Cerro de Pasco**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Favio Máximo MENA OSORIO
PRESIDENTE

Mg. Javier LÓPEZ ALVARADO
MIEMBRO

Mg. Eder Guido ROBLES MORALES
MIEMBRO

DEDICATORIA

A la memoria de Don Faustino mi padre, quién pudo mostrarme la fuerza de la superación.

A Doña Domitila mi madre, por su amor, trabajo, sacrificio y sus sabios consejos que día en día me brinda.

A Carlos, Rosa y Edgar mis hermanos, por su cariño y apoyo incondicional.

A Jhovana y Luciana por ser el motivo de mi superación diaria.

RECONOCIMIENTO

El trabajo de investigación titulado “CARACTERIZACIÓN DE LA GEOQUÍMICA MAGMÁTICA Y SU RELACIÓN A LA MINERALIZACIÓN DE Cu – Au (10°38´ - 10°48´ LATITUD SUR), CERRO DE PASCO”, no habría sido posible sin el apoyo de las siguientes personas e instituciones a las cuales les seré eternamente agradecido:

A mí padre, Don Faustino por darme la vida y la fortaleza, así como a los ingenieros geólogos Severino Incahuanaco Yucra y Jhony López Cabello, quienes me brindaron sus sabios consejos y su ejemplo en vida; pero partieron a la eternidad, mi reconocimiento eterno.

A los docentes de Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión – Pasco, quienes contribuyeron en mi formación profesional; en especial al Dr. Favio Mena Osorio, Mg. Eder Robles Morales, Mg. Javier López Alvarado. A mis compañeros de promoción de la misma casa de estudios, así mismo al Ing. Jorge Miguel Maldonado e Ing. Paúl Tapia Ortega por el apoyo incondicional en el ámbito laboral, y a la Dr. Miriam Mamani Huisa por los comentarios realizados y un ejemplo a seguir.

Y, finalmente a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron de alguna manera para que este trabajo pudiera ser realizado.

RESUMEN

El área de estudio se ubica dentro de la Cordillera Occidental del Centro del Perú, políticamente ocupa parte del territorio de la región de Pasco. En esta zona se han reconocido varias estructuras sub-volcánicas, algunas con evidencia de mineralización económica de tipo epitermal de Alta Sulfuración con tendencia a tipo pórfido de Cu-Au; conllevando a que numerosas compañías mineras, realizarán exploraciones geológicas a diferentes escalas.

El presente trabajo pretende clarificar la evolución magmática-volcánica, con la finalidad de relacionar a la mineralización de Cu-Au ($10^{\circ}38'$ - $10^{\circ}48'$ Latitud Sur), Cerro de Pasco, y redirigir la prospección geo-económica; mediante la caracterización y tipificación de la geoquímica; por ello sobre la base del análisis geoquímico incluyendo elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras de 15 análisis de muestra roca sub-volcánica, se caracteriza el magmatismo y el ambiente tectónico. Las rocas analizadas son mayormente andesitas, típicas de la cadena montañosa de los Andes.

Palabra clave. Geoquímica magmática, mineralización de Cu-Au.

ABSTRACT

The study area is located within the Western Cordillera of Central Peru, politically occupies part of the territory of the Pasco region. In this area several sub-volcanic structures have been recognized, some with evidence of economic mineralization of epidermal type of High Sulphuration with a tendency to porphyry type of Cu-Au; leading to numerous mining companies, perform geological explorations at different scales.

The present work aims to clarify the magmatic-volcanic evolution, with the purpose of relating to the mineralization of Cu-Au (10 ° 38´-10 ° 48´ Latitude South), Cerro de Pasco, and redirect geo-economic prospecting; through the characterization and typing of geochemistry; Therefore, on the basis of geochemical analysis including major elements, trace elements and rare earth elements of 15 sub-volcanic rock sample analysis, magmatism and tectonic environment are characterized. The rocks analyzed are mostly andesites, typical of the Andes mountain range.

Keyword. Magmatic geochemistry, Cu-Au mineralization.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis es una investigación que tiene por objetivo, utilizar las técnicas de la geoquímica magmática para caracterizar las rocas sub – volcánicas, utilizando para ello, diversos diagramas geoquímicos, con la finalidad de relacionarlo a un ambiente tectono magmático, así como también relacionar con mineralizaciones económicas de Cu-Au. Las estructuras geológicas, afloran al noroeste de la ciudad de Cerro de Pasco, a manera de stock, siendo en total nueve cuerpos de naturaleza sub-volcánicos de composición andesítico - dacítico.

Los análisis geoquímicos fueron efectuados en diferentes estudios geológicos, los datos de los análisis geoquímicos se encuentra custodiada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, a su vez esta información se encuentra a libre acceso a través de su plataforma virtual.

En la última década, la minería tuvo un rol significativo para el crecimiento socio – económico, del Perú, por ello surge la necesidad de aplicar nuevas técnicas para localizar zonas altamente factibles para iniciar exploraciones geológicas avanzadas con proyección a explotar utilizando métodos de la minería moderna, por ello este trabajo se centra en la importancia de estudiar los elementos mayoritarios, elementos traza y elementos de tierras raras, siendo este último el más sensible e importante, debido a que lo fenómenos exógenos muy rara vez logran destruir toda información contenida en estos elementos geoquímicos.

La secuencia del trabajo fue realizar: (1) Caracterizar la geoquímica magmática de los elementos mayoritarios, para ello se normalizaron los elementos

mayoritarios en base anhidra (a partir de los datos geoquímicos publicados en diferentes artículos por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-Ingemmet), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, se utilizaron los diagramas geoquímicos como: TAS, De la Roche (diagrama de milcaciones), Variación de tipo Harker. (2) Caracterizar la geoquímica de los elementos traza y tierras raras, en la cual se realizó el Diagrama de Variación de Harker para elementos traza, se realizó el diagrama de Rb como Índice de diferenciación, se interpretaron los diagramas de Normalización de Elementos de Tierras Raras y el diagrama de Spider de Multielementos de los elementos Traza. (3) Discriminación de Ambiente Tectónico, realizándose interpretaciones apoyados por los diagramas de Shand, diagramas para inferir la profundidad de la fuente magmática así como el engrosamiento Cortical y la antigüedad de los magmas, y por último no menos importante (4) Geoquímica de Fluidos Hidrotermales, con la ayuda de los diagramas se puede caracterizar las circulación de fluidos hidrotermales, tipos de magmas secos y magmas húmedos, estado de oxidación y contenido de agua; apoyados por todas estas herramientas se pretende caracterizar la geoquímica magmática y su relación con la mineralización de Cu-Au (10°38'-10°48' latitud sur), Cerro de Pasco.

El estudio de caracterización geoquímica constituye una herramienta más en la exploración geológica para ser usada como criterio en la selección de áreas a escala regional.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RECONOCIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I 1

PROBLEMA DE INVESTIGACION 1

1.1 Identificación y determinación del problema 1

1.2 Delimitación de la Investigación 3

1.3 Formulación del Problema 3

1.3.1 Problema General 4

1.3.2 Problema específico: 4

1.4 Formulación del Objetivos 4

1.4.1 Objetivo General 4

1.4.2 Objetivos Específicos 4

1.5 Justificación de la Investigación 5

1.6 Limitaciones de la Investigación 6

CAPÍTULO II 7

MARCO TEORICO 7

2.1 Antecedentes de estudio 7

2.1.1 Antecedentes internacionales 8

2.1.2 Antecedentes nacionales y locales 10

2.2 Bases teóricas – científicas 13

2.2.1 Geoquímica 13

2.2.2 Átomo, tabla periódica elementos y enlaces químicos 16

2.2.3 Estructura geoquímica de la Tierra 18

2.2.4 Distribución y abundancia de los elementos en la Corteza Terrestre 22

2.2.5 Geoquímica de los procesos magmáticos 27

2.2.6 Ambiente de generación de magmas (geoquímica aplicada) 31

2.2.7 Tectónica de placas y Ambientes Tectono-Magmáticos 32

2.2.7.1 Tectónica de placas 32

2.2.7.2 Ambientes Tectono-Magmáticos 37

2.2.8 Composición química de las rocas 37

2.2.9 Procedimientos Analíticos 44

2.2.10 Aplicaciones de los elementos mayoritarios 47

2.2.11 Aplicaciones de los elementos trazas 47

2.2.12 Diagramas y Clasificación de Elementos Mayoritarios 48

2.2.13 Diagrama de Clasificación Geoquímica de elementos traza y elementos de tierras raras 50

2.2.14 Diagramas discriminantes de Ambiente Tectónico 51

2.2.15 Cálculo de diagramas de fluidos hidrotermales y mineralización 51

2.3	Definición de términos básicos	52
2.4	Formulación de hipótesis	55
2.4.1	Hipótesis General	55
2.4.2	Hipótesis Específicos	55
2.5	Identificación de las Variables.....	55
2.5.1	Variables Independientes.	55
2.5.2	Variables Dependientes.....	55
2.5.3	Variables Intervinientes.....	56
2.6	Definición operacional de variables e indicadores.....	56
CAPÍTULO III		57
METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN		57
3.1	Tipo de Investigación.....	57
3.2	Métodos de Investigación.....	58
3.3	Diseño de Investigación.....	59
3.4	Población y Muestra.....	60
3.4.1	Población	60
3.4.2	Muestra	60
3.5	Técnicas e instrumentación de recolección de datos.....	61
3.5.1	Técnicas.....	61
3.5.2	Instrumentos	62
3.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	62
3.7	Tratamiento Estadístico	63
3.8	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación ..	63
3.9	Orientación ética.....	64
CAPÍTULO IV		65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		65
4.1	Descripción del trabajo de campo.....	65
4.1.1	Ubicación y Accesibilidad	65
4.1.2	Geomorfología y clima	66
4.1.3	Estratigrafía regional.....	70
4.1.3.1	Grupo Cabanillas (Excélsior): Devónico	70
4.1.3.2	Grupo Mitu: Pérmico superior	71
4.1.3.3	Grupo Pucará: Triásico superior-Jurásico inferior	71
4.1.3.4	Grupo Goyllarisquizga: Jurásico superior-Cretácico inferior	73
4.1.3.5	Formación Pocobamba: Eoceno inferior	74
4.1.3.6	Formación Calera: Eoceno superior – Oligoceno.....	74
4.1.3.7	Depósitos Cuaternarios	74
4.1.4	Geología Estructural	76
4.1.4.1	Falla Huayllay.....	77
4.1.4.2	Corrimientos de la Faja Fallada del Marañón.....	81
4.1.5	Dominios Estructurales	82
4.1.5.1	Dominio Occidental.....	82
4.1.5.2	Dominio Suroccidental	83
4.1.5.3	Dominio Central	84
4.1.5.4	Dominio Nororiental	85
4.1.5.5	Dominio Oriental	86
4.2	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	87
4.2.1	Geoquímica de Elementos Mayoritarios.....	87
4.2.1.1	Normalización en base Anhidra	87

4.2.1.2	Grado de Oxidación	88
4.2.1.3	Coeficiente de correlación de Pearson	90
4.2.1.4	Diagramas Sílice vs. Alcalis Total (T.A.S.)	92
4.2.1.5	Diagrama de Variación tipo Harker para elementos mayoritarios	93
4.2.1.6	Diagrama De la Roche (R1 vs R2)	94
4.2.1.7	Diagrama de Ringwood (SiO ₂) vs (K ₂ O)	96
4.2.1.8	Saturación de Alúmina o diagrama de Shand	97
4.2.2	Geoquímica de Elementos Traza y de Tierras Raras	99
4.2.2.1	Diagrama de variación tipo Haker para elementos traza	100
4.2.2.2	Diagrama de Rb como índice de diferenciación	101
4.2.2.3	Diagrama de Tierras Raras Normalizados	104
4.2.2.4	Diagrama multielementales tipo Spider	106
4.2.3	Discriminantes de Ambiente Tectónico	109
4.2.3.1	Profundidad de la Fuente magmática (Ce/Y) vs. (SiO ₂)	109
4.2.3.2	Profundidad de la Fuente magmática (Eu/Eu*) vs. (Ce/Y)	109
4.2.3.3	Engrosamiento Cortical/Razones entre cocientes	110
4.2.3.4	Antigüedad de los Magmas (SiO ₂) vs. (Sm/Yb)	111
4.2.4	Geoquímica de Fluidos Hidrotermales y Mineralización	112
4.2.4.1	Circulación de Fluidos Hidrotermales (U) vs. (Th)	112
4.2.4.2	Tipos de Magmas Secos o Hidratados ((Al)/(Ca+Na+K) vs. (Eu/Eu*)	114
4.2.4.3	Estado de Oxidación y Contenido de Agua (Eu/Eu*) vs. FeO _{total}	115
4.3	Prueba de Hipótesis	117
4.4	Discusión de Resultados	118

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Distribución de los constituyentes mayoritarios de la Corteza Terrestre (Rivera Mantilla, 2007)</i>	24
<i>Tabla 2. Abundancia de los elementos en la Corteza Terrestre, según datos de Goldschmidt, 1937; Rankama y Sagama, 1950; Masón, 1958; Vinogradov. Los elementos “muy comunes” están con asterisco, Aubouin, J. (Rivera Mantilla, 2007)</i> .	26
<i>Tabla 3. Valores Normalizado por diferentes autores, (Rollinson, 1993)</i>	54
<i>Tabla 4. Operatividad de variables</i>	56
<i>Tabla 5. Datos de Elementos Mayoritarios Normalizados en Base Anhidra (Elaboración propia)</i>	88
<i>Tabla 6. Valores de los elementos mayoritarios normalizados en base anhidra SiO₂, FeO y Fe₂O₃ (Elaboración propia)</i>	89
<i>Tabla 7. Datos de Elementos Mayoritarios normalizado a base anhidra (elaboración propia)</i>	92
<i>Tabla 8. Datos de elementos mayoritarios en diagrama de Harker (elaboración propia)</i>	93
<i>Tabla 9. Valores en milicaciones de las muestras (elaboración propia)</i>	95
<i>Tabla 10. Datos de elementos mayoritarios de SiO₂ vs K₂O (elaboración propia)</i>	96
<i>Tabla 11. Datos de elementos mayoritarios llevados a equivalencias molares, para discriminar la aluminosidad (índice de saturación de alúmina), elaboración propia</i>	98
<i>Tabla 12. Datos para la construcción de diagramas de SiO₂ vs. de elementos menores, (elaboración propia)</i>	100
<i>Tabla 13. Valores para la determinación del Diagrama de Harker, SiO₂ vs elementos menores, (elaboración propia)</i>	102
<i>Tabla 14. Composición de las concentraciones relativas para los elementos de tierras raras (Sun & McDonough, 1989)</i>	105
<i>Tabla 15. Datos de U vs. Th (Elaboración propia)</i>	113
<i>Tabla 16. Datos de Magmas hidratados y secos, (Elaboración propia)</i>	114
<i>Tabla 17. Diagrama Eu/Eu* vs. Feo_(total), (Elaboración propia)</i>	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación de la Geoquímica con sus ramas especialidades (Rivera Mantilla, 2007)	16
Figura 2. Evolución del concepto del Átomo a través de tiempo (Tarbuck & Lutgens, 2005)	16
Figura 3. Tabla Periódica de Elementos Químicos (Tarbuck & Lutgens, 2005)	17
Figura 4. Diagramas esquemáticos que ilustran la disposición de los iones cloro y sodio en la sal de mesa. A) Se ha abierto la estructura para mostrar la disposición de los iones. B) Los iones reales están estrechamente empaquetados (Tarbuck & Lutgens, 2005)	18
Figura 5. Perspectivas de la estructura de la Tierra (Tarbuck & Lutgens, 2005)	21
Figura 6. La composición de la Tierra a muy grandes rasgos corresponde a elementos densos y pesados que se ubican en el centro y que, a medida que se asciende a la superficie, son reemplazados por elementos cada vez menos densos. En el núcleo domina el hierro, y en el manto el silicio y el magnesio, (Folguera & Spagnuolo, 2010)	21
Figura 7. Porcentajes estimados (por volumen) de los minerales más comunes en la corteza terrestre, (Tarbuck & Lutgens, 2005)	25
Figura 8. Muestra la relación entre la abundancia y el número atómico de los elementos en la corteza terrestre, comprendido entre 1 y 93, (Tarbuck & Lutgens, 2005)	26
Figura 9. Principales procesos magmáticos que ocurren en la generación y diferenciación de magmas, (Arcos Alarcón, 2016).	27
Figura 10. Clasificación de las rocas volcánicas en relación a las series magmáticas, alcalina y subalcalina, (Arcos Alarcón, 2016)	28
Figura 11. Tipos de magma de acuerdo a su composición, referente al contenido de sílice, modificado de Winter 2000, (Arcos Alarcón, 2016).	30
Figura 12. Zona de Subducción asociado al desarrollo de extensión por detrás del arco, (Folguera & Spagnuolo, 2010).	32
Figura 13. Expansión del fondo oceánico. Harry Hess propuso que la ascensión del material del manto a lo largo del sistema de dorsales centro-oceánicas creaba nuevos fondos oceánicos, (Tarbuck & Lutgens, 2005)	34
Figura 14. Las principales placas litosféricas con sus respectivas mega-estructuras geológicas (Gill, 2010)	36
Figura 15. Ambientes tectono-magmático, tomado Dickinson, 1971, (Arcos Alarcón, 2016).	37
Figura 16. La anomalía (en "espiga") del europio se debe a su alta compatibilidad en las plagioclasas. Las HREE son más compatibles que las LREE en un amplio rango de silicatos, (Rollinson, 1993)	42
Figura 17. Elementos traza y REE tomados como indicadores petrogenéticos, Tomado de Toselli, 2010; citando a Green, 1980, (Arcos Alarcón, 2016)	44
Figura 18. Tipo y diseño de Investigación, (Valderrama Mendoza, 2018)	59
Figura 19. Proceso para la investigación, (Valderrama Mendoza, 2018)	63
Figura 20. Fotografía tomada mirando al Sur, se puede distinguir las geoformas de la zona alto-andina.	67
Figura 21. Ubicación Nacional de la Zona de Estudio.	68
Figura 22. Mapa de Ubicación local	69
Figura 23. Mapa de Ubicación local	69
Figura 24. División del Grupo Pucará en Cerro De Pasco: Pucará Oriental y Pucará Occidental, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011)	73

Figura 25. Columna Estratigráfica local de la zona de Estudio (Cobeñas Benites, 2008)	76
Figura 26. Fallas Regionales del Cuadrángulo de Cerro de Pasco, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011))	77
Figura 27. Eventos Tectónicos de la Falla Huayllay, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011)	80
Figura 28. Eventos tectónicos de Corrimientos del Marañón (tomado Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco)	82
Figura 29. Diagrama de SiO_2 vs $\text{Fe}_{(\text{total})}$, donde se muestra el grado de oxidación, (elaboración propia)	90
Figura 30. Coeficiente de Correlación de Pearson, para elementos mayoritarios, (elaboración propia)	91
Figura 31. Correlación de Pearson para Elementos Trazas, (elaboración propia)	91
Figura 32. Diagrama de TAS, se puede apreciar la variabilidad de la muestras (elaboración propia)	92
Figura 33. Diagrama de Harker, mostrando las tendencias para los elementos mayoritarios, cuyos valores no varían al azar sino que son interdependientes, mostrando la evolución fraccionada del magma inicial (elaboración propia)	94
Figura 34. Diagrama De la Roche et al., 1980, mostrando el tipo de roca en la zona de estudio (elaboración propia)	96
Figura 35. Diagrama de Ringwood (elaboración propia)	97
Figura 36. Clasificación del Índice de Saturación de Alúmina según Shand (Rivera Mantilla, 2007)	98
Figura 37. Diagrama para la determinación el Índice de saturación en alúmina en la zona de estudio (elaboración propia)	99
Figura 38. Diagramas de Harker para elementos Traza, (elaboración propia)	101
Figura 39. Diagrama en que se toma al Rb como índice de diferenciación, la dispersión de las proporciones Rb/Ba muestra un marco de subducción, (elaboración propia)	103
Figura 40. Valores Normalizados para Silicatos de la Tierra "pyrolite" (McDonough & Sun, 1995)	106
Figura 41. Diagrama de Elementos de Tierras Raras (REE) normalizado al condrito (Sun & McDonough, 1989), se indican las características más resaltantes tales como incremento de LREE con la diferenciación, patrón lístrico (forma de cuchara) e incremento de fraccionamiento de feldespatos con la diferenciación, (Elaboración propia)	107
Figura 42. Diagrama Multielementos de Elementos Traza, normalizados a las concentraciones relativas de Silicatos de la Tierra "pyrolite", (Elaboración propia)	108
Figura 43. Estimación de la profundidad de la fuente magmática Ce/Y vs. SiO_2 , (Elaboración propia)	109
Figura 44. Razones ente cocientes de Sr/Y, La/Sm, Sm/Yb y Dy/Yb vs. SiO_2 , (Elaboración propia)	111
Figura 45. Antigüedad de magmas SiO_2 vs. Sm/Yb, (Elaboración propia)	112
Figura 46. Diagrama de fluidos hidrotermales U vs. Th, (Elaboración propia)	113
Figura 47. Anomalías de Eu/Eu* vs. Al/(Ca+Na+K), (Elaboración propia)	115
Figura 48. Diagrama de Eu/Eu* vs $\text{FeO}_{(\text{total})}$, (Elaboración propia)	116

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1 Identificación y determinación del problema

En un mundo caracterizado por cambios rápidos, paradójicos y complejos; surge la necesidad de aplicar diversos métodos de exploraciones geológicas, esto debido a que la minería viene teniendo un rol significativo en el crecimiento socio-económico del país. Las inversiones mineras constituyen una pieza fundamental, ya que a través de la exploración de recursos minerales y la construcción de nuevos proyectos se fomenta la continuidad del aporte de la minería al desarrollo del Perú.

La Dirección General de la Promoción y Sostenibilidad Minera, presenta en su edición 2018 “Perú Cartera de Proyectos de Construcción de mina 2018”. En el año 2017, la minería tuvo un rol significativo, por lo que representó el 9.9% del PBI nacional, 8.6% de los Ingresos Recaudados por la Sunat y el 61.8% del valor total de las Exportaciones Nacionales.

Es importante destacar que el avance geo-científico en la Geoquímica, tiene mucha utilidad, debido a ello, el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), junto con otras instituciones nacionales e internacionales vienen desarrollando diferentes estudios a lo largo de la cadena montañosa de los Andes, con la finalidad de realizar diversos estudios como la caracterización geoquímica en espacio-tiempo los diversos procesos ocurridos así como la relación con la mineralización de Cu-Au y otros minerales.

Sin embargo herramientas actuales en las exploraciones geoquímicas confiables son escasas así como el uso de dichas metodologías está restringido a un escenario geológico determinado, se sabe que un buen porcentaje del total de la estimación de depósitos de oro, plata y cobre (yacimientos epitermal y pórfido) para los Andes Centrales están concentradas en rocas ígneas del Neógeno, el espesamiento cortical durante el espacio – tiempo fue de 40 a 70 km, y las firmas geoquímicas de las rocas de este episodio muestran que el anfíbol jugó un importante rol durante la evolución geoquímica (M. Mamani).

Debido a esto y a los pocos estudios realizados en los Andes centrales peruanos más específicamente al lado NW de la ciudad de Cerro de Pasco, se presenta la necesidad de realizar una “Caracterización de la Geoquímica Magmática y su relación a la Mineralización de Cu-Au (10°38´ - 10°40´ Latitud Sur), Cerro de Pasco”. En la búsqueda solventar dicho problema, se propone realizar un estudio a partir de los análisis de las muestras por elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras, con el fin de conocer el comportamiento en espacio-tiempo de los procesos que actuaron en la evolución de las rocas Ígneas y su posible relación con la mineralización de Cu-Au en los Andes Centrales peruanos.

1.2 Delimitación de la Investigación

La presente investigación está enfocado a la caracterización de la geoquímica magmática y su relación a la mineralización de Cu – Au (10°38´-10°48´Latitud Sur), Cerro de Pasco; a través de ello se determinará si existe relación con la mineralización de Cu – Au en la región de Cerro de Pasco, perteneciente a los Andes centrales peruanos.

1.3 Formulación del Problema.

Utilizando los elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras, se realizará la caracterización de la geoquímica magmática, con lo cual permitirá relacionarlo a la mineralización de Cu-Au, en tal sentido se plantean algunas interrogantes que se resolverán en el transcurso de la investigación:

1.3.1 Problema General

- ¿Cómo la caracterización de la geoquímica magmática tiene relación a la mineralización de Cu-Au (10°38´-10°48´ Latitud Sur), Cerro de Pasco?

1.3.2 Problema específico:

- ¿Determinar que naturaleza geoquímica inicial tiene la fuente magmática en la Latitud Sur (10°38´-10°48´), Cerro de Pasco?
- ¿Cuál fue la evolución geoquímica magmática en la Latitud Sur (10°38´ - 10°48´), Cerro de Pasco?
- ¿Existirá relación de la geoquímica de las rocas productoras con la mineralización de Cu – Au en la Latitud Sur (10°38´- 10°48´), Cerro de Pasco?

1.4 Formulación del Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

- Caracterizar la geoquímica magmática de las rocas y su relación con la mineralización de Cu-Au (10°38´ - 10°48´ Latitud Sur), Cerro de Pasco.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Establecer la naturaleza geoquímica inicial de la fuente magmática en la Latitud Sur (10°38´ - 10°48´), Cerro de Pasco.
- Definir la evolución geoquímica de la fuente magmática, en la Latitud Sur (10°38´ - 10°48´), Cerro de Pasco.

- Identificar las geoquímicas de las rocas productoras, asociadas con la mineralización de Cu – Au, en la Latitud Sur ($10^{\circ}38'$ - $10^{\circ}48'$), Cerro de Pasco.
- Presentar el estudio y sus resultados como tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Con todo lo anterior, se espera contribuir a un mejor conocimiento de los procesos de formación y distribución de los procesos ígneos y su relación a la mineralización de Cu-Au, en toda la zona centro del territorio peruano.

1.5 Justificación de la Investigación

La presente investigación, permite caracterizar la distribución geoquímica a partir de los análisis de las muestras obtenidos en los laboratorios, a través de valores agrupados en tres tipos: Elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras, facilitando para establecer la naturaleza inicial y la evolución de la fuente magmática, a partir de estas interpretaciones se puede identificar las rocas productoras asociadas a la mineralización económica. Estos resultados admitirá a su vez tener una propuesta de análisis geoquímico en todo el territorio peruano y entender la evolución geológica y geoquímica, que hacen de nuestro país uno de los más deseados del mundo.

La investigación es viable, pues se dispone de los recursos necesarios para llevarlos a cabo. Los resultados de la presente investigación pueden contribuir al conocimiento geoquímico de los

estudiantes de pregrado y posgrado, dedicados a la geología económica e investigativa, de la misma manera a las instituciones públicas, privadas, empresas mineras nacionales e internacionales dedicadas a la investigación científica y búsqueda de depósitos minerales económicamente explotables, de esta forma contribuir en la mejora de la economía del país.

1.6 Limitaciones de la Investigación.

- Los análisis para obtener los datos geoquímicos tienen alto costo económico.
- No se cuenta con suficiente puntos de muestreo, con ello para tener una mayor confiabilidad del área de estudio (representatividad).
- De acuerdo a la base de datos de la Ingemmet, solo se obtuvo datos geoquímicos de muestras de superficie.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de estudio

El área de Geología Regional del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), realiza diferentes proyectos de investigaciones en todo el territorio peruano, utilizando diferentes métodos.

Los resultados de estas investigaciones conllevan al conocimiento de la composición, evolución y variabilidad geoquímica, en la evolución y la abundancia de metales traza petrogenéticos y de interés económico (Rollinson, 1993).

Se revisó de forma detallada algunos trabajos de investigación de grado, maestrías y doctorados, encontrándose algunas relaciones con las siguientes tesis:

2.1.1 Antecedentes internacionales

Realizando una búsqueda minuciosa en los sitios digitales de las diversas universidades e instituciones internacionales, se han encontrado trabajos que se relacionen con la presente tesis, como:

“EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA, PETROGENÉTICA Y DE CONDICIONES GEODINÁMICAS DE LOS MAGMATISMOS PÉRMICOS EN LOS SECTORES CENTRAL Y OCCIDENTAL DEL PIRINEO”, presentado por los profesores Dr. Marceliano Lago San José y Dr. Enrique Arranz Yagüe, Universidad de Zaragoza, Dpto de Ciencias de la Tierra, España 2005.

- El estudio en geoquímica elemental permite, basándose en sus contenidos de elementos mayores y traza, establecer que estas rocas, con pautas de afinidad alcalina, representan líquidos relativamente diferenciados. El ambiente geodinámica inferido a partir de criterios de geoquímica de elementos traza corresponde con una situación post – colisional, con participación de un manto enriquecido. El estudio de la composición en determinados elementos, de las relaciones interelementales y sus pautas en diagramas multielementales y de REE permiten identificar un protolito mantélico enriquecido del tipo EM I probablemente afectado, a su vez, por el desarrollo de procesos de metasomatización.

- Así, mediante criterios geoquímicos, se seleccionan rocas representativas de sus correspondientes litotipos, con la composición menos diferenciada, que serán consideradas, en la modelización petrogenética.

“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS LAVAS DEL ESTRATOVOLCÁN TELAPÓN, SIERRA NEVADA, MÉXICO”, presentado por Gloria Patricia García Tovar, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, México Junio 2009.

El comportamiento de los elementos mayores y algunos elementos traza de los productos volcánicos del EVT indican que pertenecen a la serie calcoalcalina con potasio medio. Se determinó en las lavas, la existencia de un enriquecimiento de elementos litófilos de radio iónico grande (LILE: Cs, Rb, Sr, Ba, K) y el Pb, con respecto a los elementos de alto potencial de ionización (HFS: Nb, Ta). Este comportamiento es característico de magmas asociados a procesos de subducción en arcos volcánicos, en los que los elementos LIL son aportados por la deshidratación de la placa en subducción, hacia un manto empobrecido que sufrió fusión parcial y generó magmas primarios. Los patrones de los elementos de tierras raras para todas las lavas son muy similares y poco variables indicando la existencia de una fuente del manto homogénea. Así, existe un enriquecimiento de las tierras raras ligeras con respecto a las tierras raras pesadas confirmando el ambiente tectónico convergente.

2.1.2 Antecedentes nacionales y locales

Se revisó de forma detallada, encontrándose lo siguientes trabajos de investigación. **“CINTURONES METALOGÉNICOS CENOZOICOS EN PASCO Y HUÁNUCO: TIPOS DE YACIMIENTOS Y NATURALEZA GEOQUÍMICA DE LOS MAGMAS ASOCIADOS”**, presentado por la bachiller Coveñas G. (2008), cuyas conclusiones relevantes son las siguientes (Coveñas Benites, 2008):

- Los yacimientos de la región alto andina (Pasco y Huánuco), son parte de tres cinturones metalogenéticos cada uno asociado a un episodio magmático distinto. Los datos geo-cronológicos publicados, tanto de la actividad hidrotermal como magmática, indican que los cinturones metalogenéticos se habrían desarrollado durante: (1) el Eoceno, entre 37 y 34 Ma, cinturón Quicay-Pacoyán, (2) el Oligoceno entre 29 y 26 Ma, cinturón Milpo-Atacocha-Vinchus y (3) el Mioceno, entre 15 y 11 Ma, cinturón de Cerro de Pasco-Colquijirca.
- La geoquímica de las rocas ígneas obtenida, indica que la mineralización de los tres cinturones metalogenéticos pertenecen a la gran familia de los yacimientos hidrotermales asociados a magmatismo calcoalcalino con altos contenidos en K “High K calc-alkaline magmatism”.

Por su parte la Bachiller Quispe M. (2013), en su estudio sobre la **“CORRELACIÓN GEOQUÍMICA DE EVENTOS ÍGNEOS EN EL PROYECTO ESPERANZA, DISTRITO BOLOGNESI, DEPARTAMENTO ÁNCASH”**, concluye que:

- En el proyecto Esperanza, en base de la caracterización geoquímica de los eventos ígneos representados por el stock monzodiorítico, diques y lavas andesítico, stock y diques dacíticos se concluyen que son de ambiente geotectónico de arco volcánico en zonas de subducción. La monzodiorita es la de más antigüedad, la que presenta mayor grado de oxidación y provenientes de magmas húmedos y la que más presenta alteraciones hidrotermales, por lo que se asume que este intrusivo es el responsable de la generación y liberación de fluidos relacionados a la mineralización de la zona de estudio.

Soler P. (1982), describe la **“DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS MENORES Y TRAZA (Ag, Bi, Hg, Se, Cd, In, Ga, Sn) EN LOS YACIMIENTOS DE Pb – Zn DEL CENTRO DEL PERÚ”**, donde determina:

- Analizado la distribución de algunos elementos traza según los diferentes yacimientos polimetalicos del Perú central, caracterizando su génesis y fuente de enriquecimiento.

Por último Mamani M. (2011) en el boletín N° 144 Serie A, carta geológica nacional – Ingemmet **“GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO DE CERRO DE PASCO (HOJA 22-k)”**, presenta un estudio detallado de los eventos geoquímicos ocurridos durante la evolución magmática.

- Las rocas intrusivas se manifiestan a través de batolitos, stock, domos y diatremas, todos los cuerpos intrusivos se han emplazado

en diferentes edades, pero se pueden agrupar en seis eventos: Carbonífero, Pérmico superior-Triásico inferior, Eoceno, Oligoceno, Mioceno inferior y Mioceno superior. Cada uno de los eventos se han emplazado a manera de franjas, formando arcos magmáticos.

- La actividad magmática del Eoceno, se presenta en la zona noroeste del Cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k), abarcando desde el Cerro Racco en el sur, hasta Chichorraquina por el norte. Los cuerpos magmáticos se presentan a manera de domos que sobresalen dentro de la Pampa de la Meseta del Bombón. Las características petrográficas de estas rocas generalmente corresponden a cuerpos subvolcánicos con textura porfirítica variando desde una composición dacítica a andesítica.

2.2 Bases teóricas – científicas

2.2.1 Geoquímica

El término “geoquímica” fue usado por primera vez por el químico suizo Shönbein en 1838, (William M. White, 2003). Etimológicamente la Geoquímica es la ciencia que estudia la química de los materiales que se encuentran en la Tierra (Geo, “tierra”; Químicos, “química”. Química de la Tierra), Víctor M. Goldschmidt 1937, mineralogista-geoquímico suizo, en sus obras *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente* (1923-1937), y *Grundlagen der Quantitativen Geochemische* (1933-1935), señala tres tareas fundamentales de la geoquímica.

- Determinación de las relaciones cuantitativas de los elementos y átomos en las esferas geoquímicas de la Tierra.
- Explicación de la distribución de los elementos en las esferas geoquímicas de la Tierra, es decir, en los minerales y las rocas de la litosfera y en los productos naturales de toda clase.
- Descubrir las leyes que rigen las relaciones cuantitativas y la distribución de los elementos.

Según Goldschmidt, la geoquímica se puede definir como la “Medición de la abundancia relativa y absoluta de los elementos de las distintas partes de la Tierra, con el objeto de descubrir los principios que gobiernan su distribución y migración por todo el ciclo geológico”. (Rivera Mantilla, 2007)

La Geoquímica ha florecido en el acercamiento cuantitativo que ha dominado la ciencia de la tierra en la segunda mitad del siglo veinte. Este acercamiento cuantitativo ha producido mayores adelantos en la comprensión de nuestro planeta en los últimos 50 años que en todos los anteriores de la historia de la humanidad. Las contribuciones de la geoquímica a este adelanto han sido absolutamente enormes. Mucho de lo que sabemos sobre cómo se formaron la Tierra y el Sistema Solar ha venido de la investigación en la química de los meteoritos. A través de la geoquímica, podemos cuantificar la escala de tiempo geológico. A través de la geoquímica podemos determinar las profundidades y temperaturas de las cámaras magmáticas. A través de la geoquímica, se reconocieron las plumas del manto. A través de la geoquímica, sabemos las temperaturas y presiones a las cámaras magmáticas. A través de la geoquímica, sabemos que los sedimentos pueden ser subducidos en el manto, a través de la geoquímica, sabemos cuánto y cómo de rápidos han ascendido los cinturones de montañas. La geoquímica está ligado con el corazón de la ciencia mediambiental y las preocupaciones mediambientales. Problemas tales como la lluvia ácida, el agujero de ozono, el efecto invernadero, la polución de la tierra y el suelo con problemas geoquímicos; de igual forma la geoquímica, como muchas ciencias, está conducida sobre todo por la tecnología, dando modernas herramientas que les permiten estudiar la Tierra de manera tales que los pioneros del campo no pudieron soñar que fuesen posibles, como: la microsonda electrónica nos permite analizar granos minerales

escala de micras en minutos; el microscopio electrónico nos permite ver los mismos minerales a casi la escala atómica. Técnicas tales como los rayos difracción de rayos X, resonancia magnética nuclear, y la espectroscopia Raman e infrarroja nos permiten examinar la ordenación atómica y el enlace en materiales naturales. Los espectrómetros de masa nos permiten determinar la edad de las rocas y la temperatura de los mares antiguos. Las sondas iónicas nos permiten hacer estas cosas en muestras a escala de micras. Técnicas analíticas como la fluorescencia de rayos X y la espectrometría de plasma acoplado inductivamente nos permiten realizar en minutos análisis en los que las técnicas “clásicas” habrían empleado días. Todo esto se hace con una mayor precisión y exactitud de lo que era posible sólo hace unas décadas, (William M. White, 2003).

Los mega-ordenadores con megahertzios de poder y megabytes de memoria nos permiten realizar en segundos cálculos termodinámicos que habrían tomado años o vidas hace medio siglo; los giga-ordenadores sólo a la vuelta de la esquina nos ofrecerán aún más poder. Los nuevos instrumentos y técnicas analíticas que se están ahora desarrollando prometen aún mayor sensibilidad, velocidad, exactitud y precisión. Todos juntos, estos avances nos permitirán estar más cerca a nuestra meta que es el entendimiento de la Tierra y su entorno cósmico.

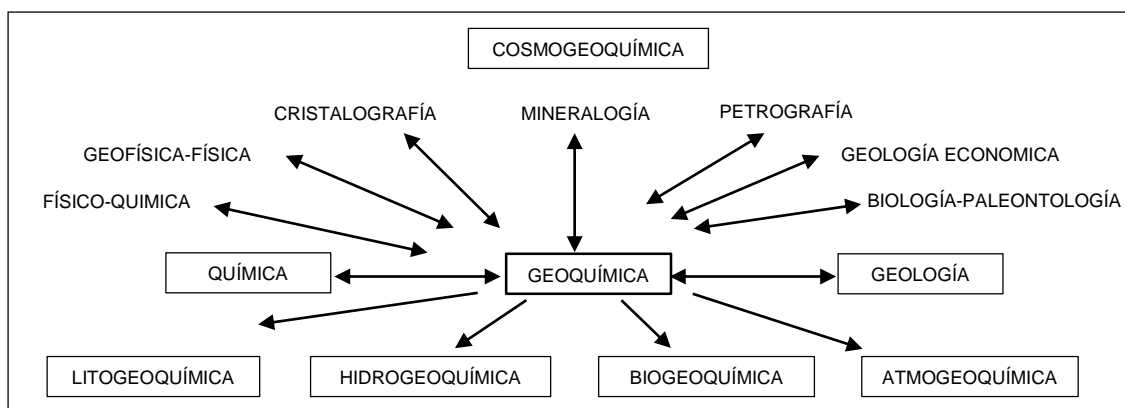


Figura 1. Relación de la Geoquímica con sus ramas especialidades (Rivera Mantilla, 2007)

2.2.2 Átomo, tabla periódica elementos y enlaces químicos

El átomo es la subdivisión más pequeña de la materia que retiene las características del elemento que puede intervenir en una combinación química, la estructura atómica de un elemento, consiste de un núcleo masivo, denso y muy pequeño, compuesto por protones y neutrones, cargado positivamente de más o menos 10-12 mm de diámetro rodeado por una región poblada de orbitas de electrones que, cuando todos están presentes, dan neutralidad electrostática al átomo.

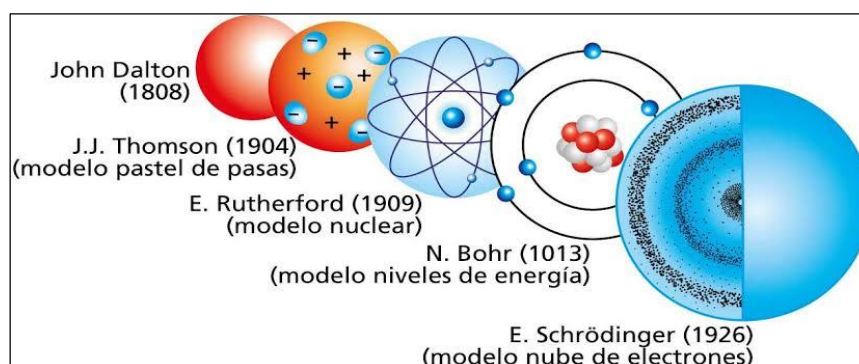


Figura 2. Evolución del concepto del Átomo a través de tiempo (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Tabla periódica, es una disposición tabular de los elementos químicos, ordenados por su número atómico, por sus configuraciones electrónicas y propiedades químicas recurrentes, este ordenamiento

muestra tendencias periódicas, como elementos con comportamiento similar en la misma columna, (Wikipedia, Tabla periódica de los elementos, 2018).

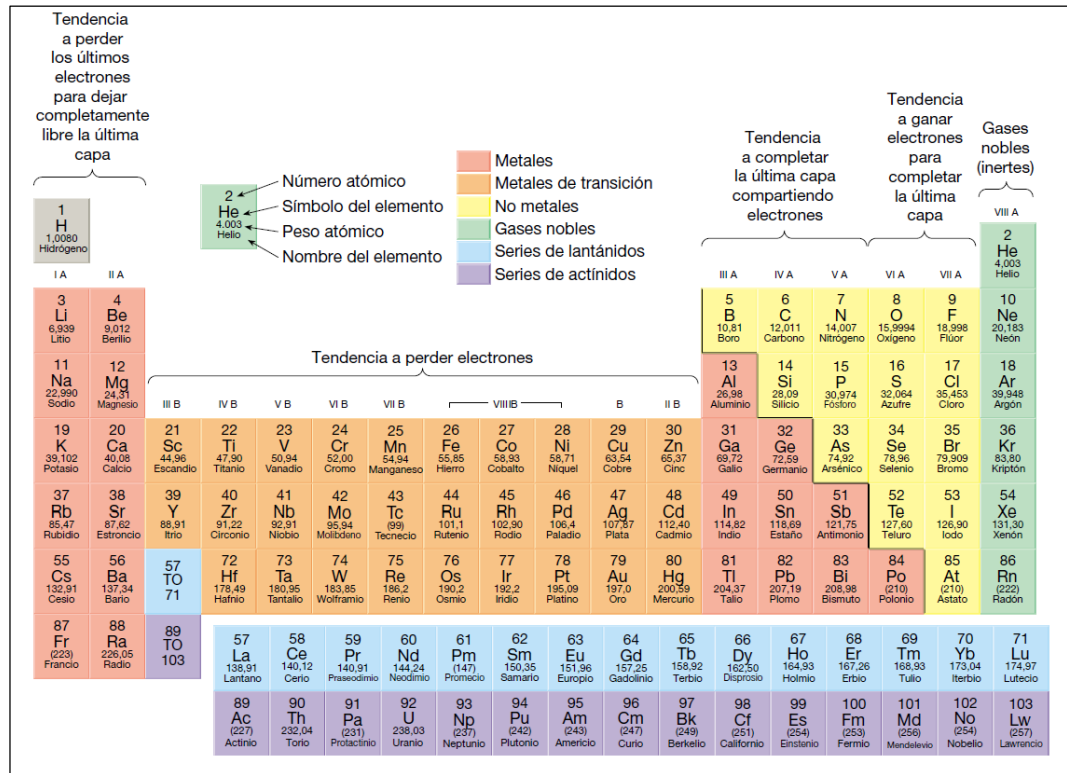


Figura 3. Tabla Periódica de Elementos Químicos (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Enlaces químicos, los elementos se combinan entre sí para formar una amplia variedad de sustancias más complejas. La gran fuerza de atracción que une los átomos se denomina enlace químico. Cuando un enlace químico une dos o más elementos en proporciones definidas, la sustancia se denomina compuesto. La mayoría de los minerales son compuestos químicos.

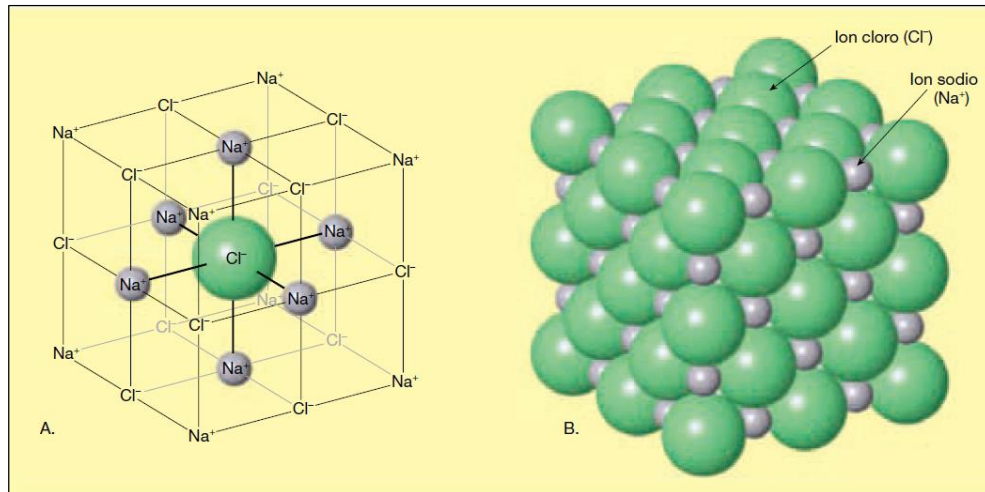


Figura 4. Diagramas esquemáticos que ilustran la disposición de los iones cloro y sodio en la sal de mesa. A) Se ha abierto la estructura para mostrar la disposición de los iones. B) Los iones reales están estrechamente empaquetados (Tarbuck & Lutgens, 2005)

2.2.3 Estructura geoquímica de la Tierra

Nuestro escenario empieza hace unos 12.000 a 15.000 millones de años con el Big Bang, una explosión incomprensiblemente grande que lanzo hacia el exterior toda la materia del universo a velocidades increíbles. La Tierra unos de los 8 planetas que, junto con otros cuerpos más pequeños giran alrededor del Sol, la naturaleza ordenada de nuestro Sistema Solar lleva a la mayoría de los investigadores a deducir que la Tierra y los otros planetas se formaron esencialmente al mismo tiempo, y de la misma materia primordial, que el Sol.

A medida que se acumulaba el material para formar la Tierra (y poco después), el impacto a gran velocidad de los restos de la nebulosa y la desintegración de los elementos radiactivos provocó un aumento constante de la temperatura en nuestro planeta, alcanzando temperaturas suficientes para que el hierro y el níquel empezaran a

fundirse. La fusión produjo gotas de metal pesado que penetraron hacia el centro del planeta, provocando el proceso de diferenciación química. Este primer período de segregación química estableció las tres divisiones básicas del interior de la Tierra: el núcleo rico en hierro; la corteza primitiva, muy delgada; y la capa más gruesa de la tierra, denominada manto, que se encuentra entre el núcleo y la corteza.

Corteza. La corteza, capa rocosa externa, comparativamente fina de la Tierra, se divide generalmente en corteza oceánica y corteza continental. La corteza oceánica tiene alrededor de 7 kilómetros de grosor y está compuesta por rocas ígneas oscuras denominadas basaltos. Por el contrario, la corteza continental tiene un grosor medio de entre 35 y 40 kilómetros, pero puede superar los 70 kilómetros en algunas regiones montañosas. A diferencia de la corteza oceánica, que tiene una composición química relativamente homogénea, la corteza continental consta de muchos tipos de rocas. El nivel superior de la corteza continental tiene la composición media de una roca granítica denominada granodiorita, mientras que la composición de la parte inferior de la corteza continental es más parecida al basalto. Las rocas continentales tienen una densidad media de unos 2,7 g/cm³ y se han descubierto algunas cuya edad supera los 4.000 millones de años. Las rocas de la corteza oceánica son más jóvenes (180 millones de años o menos) y más densas (aproximadamente 3,0 g/cm³) que las rocas continentales.

Manto. Más del 82 por ciento del volumen de la Tierra está contenido en el manto, una envoltura rocosa sólida que se extiende hasta una profundidad de 2.900 kilómetros.

El límite entre la corteza y el manto representa un cambio de composición química. El tipo de roca dominante en la parte superior del manto es la peridotita, que tiene una densidad de 3,3 g/cm³. A una mayor profundidad, la peridotita cambia y adopta una estructura cristalina más compacta y, por tanto, una mayor densidad.

Núcleo. Se cree que la composición del núcleo es una aleación de hierro y níquel con cantidades menores de oxígeno, silicio y azufre, elementos que forman fácilmente compuestos con el hierro. A la presión extrema del núcleo, este material rico en hierro tiene una densidad media de cerca de 11 g/cm³ y se aproxima a 14 veces la densidad del agua en el centro de la Tierra, (Tarbuck & Lutgens, 2005).

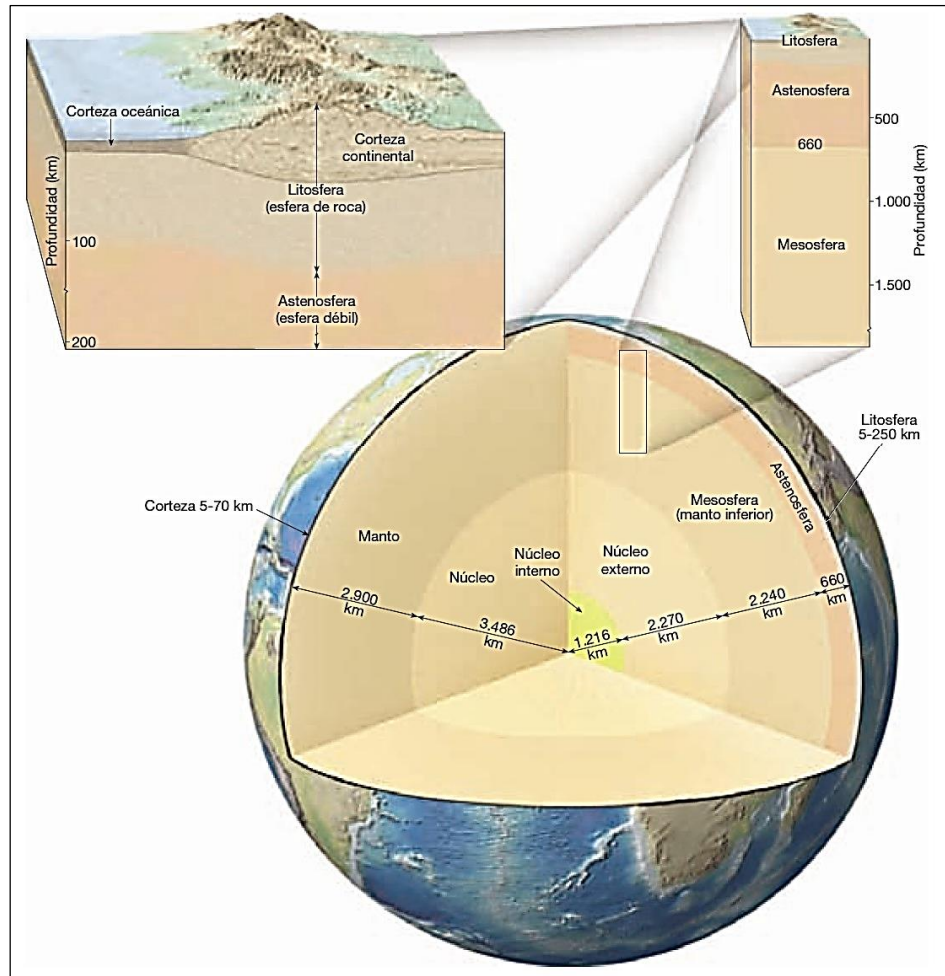


Figura 5. Perspectivas de la estructura de la Tierra (Tarbuck & Lutgens, 2005)

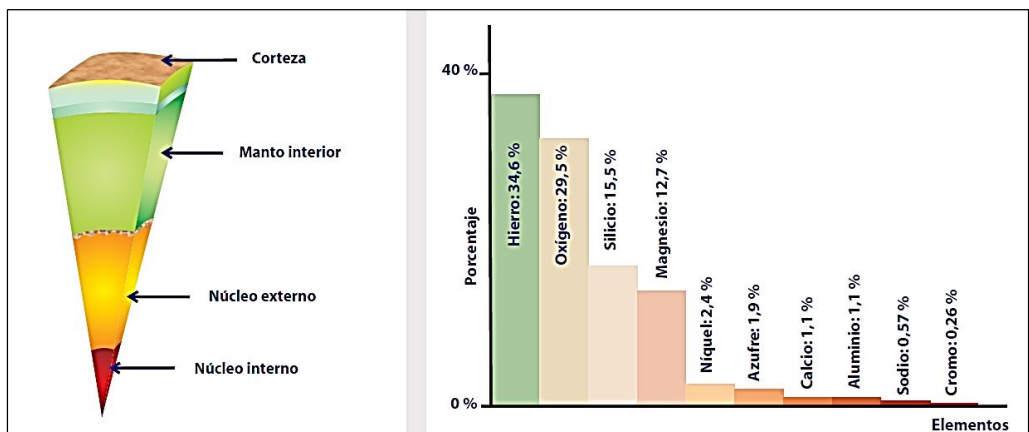


Figura 6. La composición de la Tierra a muy grandes rasgos corresponde a elementos densos y pesados que se ubican en el centro y que, a medida que se asciende a la superficie, son reemplazados por elementos cada vez menos densos. En el núcleo domina el hierro, y en el manto el silicio y el magnesio, (Folguera & Spagnuolo, 2010)

2.2.4 Distribución y abundancia de los elementos en la Corteza

Terrestre

La corteza es la capa más externa y delgada, el conocimiento de la composición química de la corteza viene del estudio de rocas y de las evidencias geofísicas.

La composición química promedio de la corteza, dada por Ronov et al, 1969, (tabla 1) muestra efectivamente la importancia del O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, que forman aproximadamente el 99% del total.

Se han considerado solamente los elementos mayoritarios que son los que se determinan comúnmente en los análisis de las rocas y se han omitido los otros elementos que son pocos abundantes pero que entran en la estructura de muchos silicatos, y entre ellos los feldespatos plagioclasas juegan un papel importante. En líneas generales, la corteza terrestre está formada por completo de compuestos oxigenados, en especial de silicatos de aluminio, calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro.

Siguiendo a Vernadsky (1924) que denomina, "Clarke" de concentración (en honor a Clarke, F., W.), «al porcentaje de un elemento en la corteza», se constató un hecho sorprendente en lo que se refiere a los elementos poco abundantes (Rivera, H; 2007). Los metales cuyos yacimientos son conocidos están, en efecto, menos repartidos que los elementos poco comunes tales como las Tierras Raras. Este hecho significa que ciertos elementos se hallan dispersos en minerales y rocas y se encuentran raramente

concentrados, mientras que los metales están concentrados pero no dispersos en las rocas.

Los procesos que dieron lugar a la formación de la corteza separaron ciertos elementos químicos del cuerpo principal de la Tierra y los concentraron en esta capa. Aun cuando muchos de estos elementos no son abundantes en la corteza, tienen una concentración más alta en esta zona que en el resto de la Tierra. Si se compara la abundancia de varios elementos en siderolitos (meteoritos semejante al manto), en la corteza encontramos los siguientes elementos fuertemente enriquecidos: H, Li, B, F, Na, Al, K, T, Rb, Y, Zr, Nb, In, I, Cs, Ba, La, Tierras Raras, Hf, Ta, W, Te, Pb, Bi, Th, V. Muchos de estos elementos son encontrados en concentraciones más grandes que su promedio cortical en ciertos tipos de rocas ígneas (tal como las pegmatitas). La abundancia de los elementos de la corteza terrestre se da en función de su porcentaje, dado en micrón/gramo o como unidad de concentración en ppm (Partes por millón).

Grupo I comprende 12 elementos cuyos contenidos sobrepasan los 1000 ppm o micrón/gramo y representan el 99,39% de la composición media de la corteza terrestre.

Grupo II engloba 46 elementos de composición entre 1 a 1000 ppm y representan el 0,37%.

Grupo III comprende los 22 elementos restantes cuyos contenidos son inferiores a 1 ppm y representan el 0,0004%.

A EN ÓXIDOS		B EN IONES		C EN MINERALES		
% Peso		% Peso	% Volumen	% Volumen		
SiO ₂	55.2	O	46.60	92.0	Plagioclasa	39
Al ₂ O ₃	15.3	Si	27.72	0.8	Feld. Alcalino	12
Fe ₂ O ₃	2.8	Al	8.13	0.8	Cuarzo	12
FeO	5.8	Fe	5.00	0.7	Piroxeno	11
K ₂ O	1.9	Ca	3.63	1.4	Micas	5
MgO	5.2	Na	2.83	1.6	Anfíboles	5
CaO	8.8	K	2.59	2.1	Olvino	3
Na ₂ O	2.9	Mg	<u>2.09</u>	<u>0.6</u>	Arcillas	4.6
TiO ₂	1.6		∑ 98.59	∑ 100.0	Dolomita	0.5
P ₂ O ₅	0.3				Magnetita	1.5
MnO	0.2				Otros	4.9

Tabla 1. Distribución de los constituyentes mayoritarios de la Corteza Terrestre (Rivera Mantilla, 2007)

Los dos últimos grupos son los que encierran a los «elementos traza» de las rocas, entre los cuales aún es posible distinguir: los elementos menores, elementos dispersos y elementos raros.

- a. **Los elementos menores**, cuyo contenido en las rocas es apreciable, forman normalmente minerales aislados (Zr, Ti, Cr, Ba...)
- b. **Los elementos dispersos**, cuyo contenido es bastante significativo pero que no se encuentran jamás expresados como minerales (Rb, Ga, Hf...).
- c. **Los elementos raros**, se encuentran en cantidades ínfimas en sustitución isomorfa en los minerales y en las rocas, pero que sólo raramente están expresados como minerales (Tb, Lu, Y, Bi...). A estos elementos en las ciencias biológicas se denomina oligoelementos por su doble sentido, por ser un elemento poco abundante y por su función enzimática.

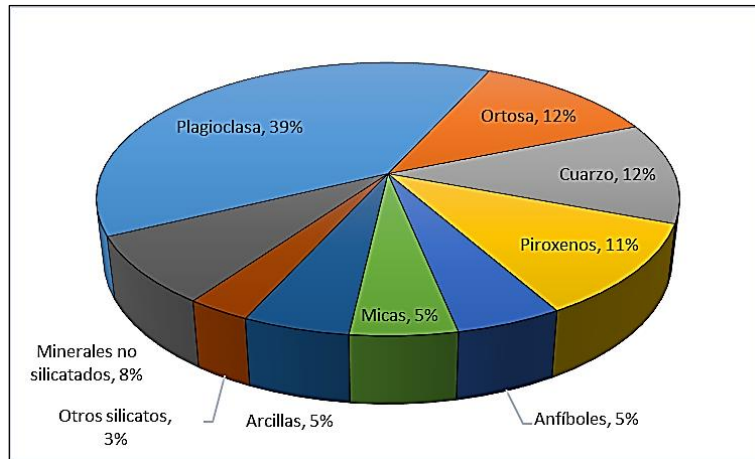


Figura 7. Porcentajes estimados (por volumen) de los minerales más comunes en la corteza terrestre, (Tarbuck & Lutgens, 2005)

La Tabla 2 muestra que muchos elementos muy importantes económicamente son bastante raros, por ejemplo, el cobre es menos abundante que el zirconio, el mercurio es menos abundante que las tierras raras, el vanadio es más abundante que el estaño, el níquel es menor que el rubidio, etc. Es evidente que se debe establecer una distinción entre la abundancia de un elemento y su geodisponibilidad.

Grupo I (> 1000 ppm)		Grupo II (>1 ppm)		Grupo III (<1 ppm)			
O	466.000	F	700	Sm	7	Tb	0.9
Si	277.200	S	520	Gd	6	Lu	0.8
Al	81.300	Sr	450	Pr	6	Hg*	0.5
Fe	50.000	Ba	400	Sc	5	I	0.3
Ca	36.300	C	320	Hf	5	Sb*	0.2
Na	28.300	Cl	200	Dy	5	Bi*	0.2
K	25.900	Cr	200	Sn*	3	Tm	0.2
Mg	20.900	Zr	160	B*	3	Cd	0.2
8 elementos = 98.59%		Rb	120	Yb	3	Ag*	0.1
		V	110	Er	3	In	0.1
Ti	4.400	10 elementos = 0.318%		Br	3	Se	0.09
H	1.400	Ni*	80	Ge	2	Ar	0.04
P	1.180	Zn*	65	Be*	2	Pd	0.01
Mn	1.000	Zn	N	As*	2	Pt*	0.005
4 elementos = 0.798%		N	Ce	U*	2	Au*	0.005
		Cu*	45	Ta*	2	He	0.003
		Y	40	W*	1	Te	0.002
		Li	30	Mo*	1	Rh	0.001
		Nd	24	Cs	1	Re	0.001
		Nb	24	Ho	1	Ir	0.001
		Co	23	Eu	1	Os	0.001
		La	18	Tl	1	Ru	0.001
		Pb*	15	22 elementos =0.0065%		22 elementos =0.0004%	
		Ga	15	Total 46 Elementos = 0.3725%			
		Th	10				
		14 elementos = 0.048%					

Tabla 2. Abundancia de los elementos en la Corteza Terrestre, según datos de Goldschmidt, 1937; Rankama y Sagama, 1950; Masón, 1958; Vinogradov. Los elementos "muy comunes" están con asterisco, Aubouin, J. (Rivera Mantilla, 2007)

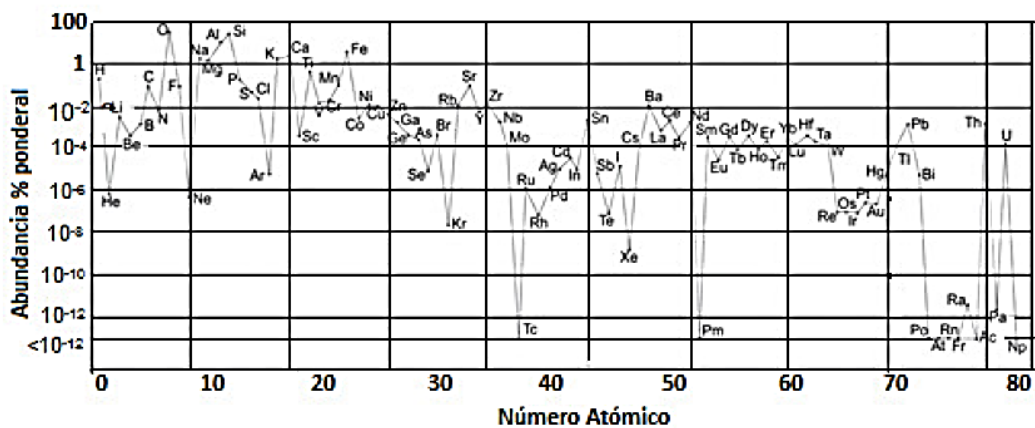


Figura 8. Muestra la relación entre la abundancia y el número atómico de los elementos en la corteza terrestre, comprendido entre 1 y 93, (Tarbuck & Lutgens, 2005)

2.2.5 Geoquímica de los procesos magmáticos

El concepto de magmatismo se refiere a todos los procesos en los que intervienen los materiales de la Tierra cuando encuentran fundidos o en forma de magma. Un magma es una mezcla generalmente silicatada que incluye normalmente una fase fluida y una fase sólida. Esta última formada por minerales heredados de la fuente del magma o formados durante el proceso de enfriamiento. Cuando un magma alcanza la superficie se producen fenómenos volcánicos en los que el magma original puede ser arrojado en diferentes formas sobre la superficie (Volcanismo).

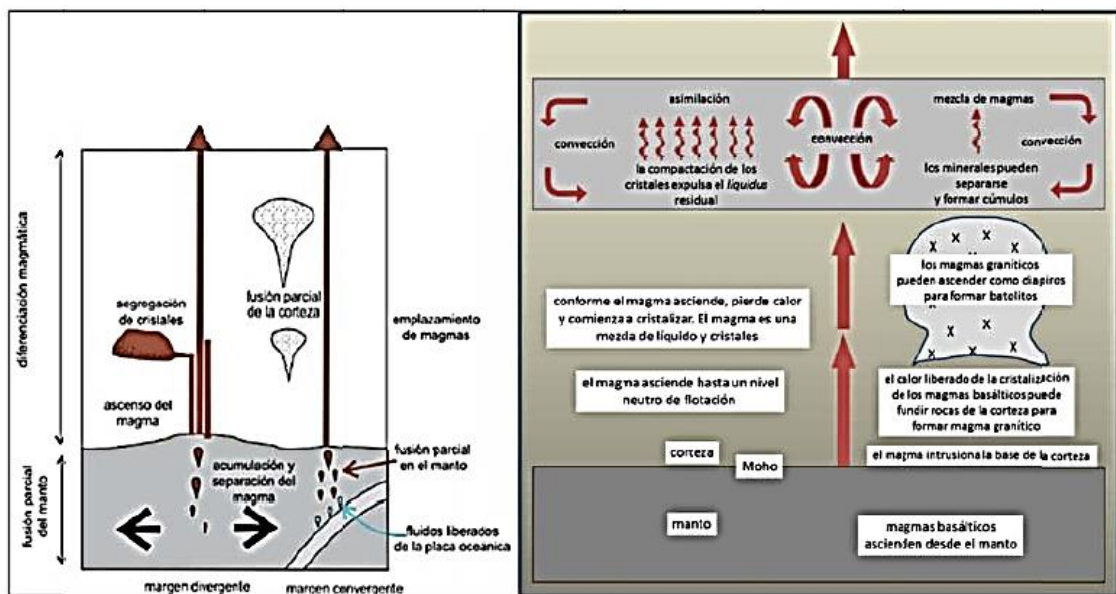


Figura 9. Principales procesos magmáticos que ocurren en la generación y diferenciación de magmas, (Arcos Alarcón, 2016).

Los procesos de fusión que dan origen a los magmas pueden desarrollarse en diferentes zonas del interior de la Tierra. Los magmas que se emplazan en la corteza de la Tierra se pueden originar dentro del manto, ya sea en el manto litosférico o en el manto

astenosférico (interior de la Tierra); también se pueden originar por fusión de la parte inferior de la misma corteza. En realidad el desencadenamiento de un proceso de fusión depende de que se reúnan ciertas condiciones físicas y químicas que lo permitan. Por ejemplo, para una misma temperatura, el punto en el que se inicia la fusión de los minerales que forman una roca puede variar debido a la presión. A presiones mayores, se requerirá normalmente una mayor temperatura para alcanzar el punto de fusión inicial de un mineral. Otro factor que puede variar las condiciones de presión y temperatura a la que se inicia la fusión es el contenido de agua u otros volátiles como el CO₂ en las rocas. Normalmente los procesos de fusión son parciales, es decir, la roca no se funde totalmente y solo lo hacen ciertos grupo de minerales.

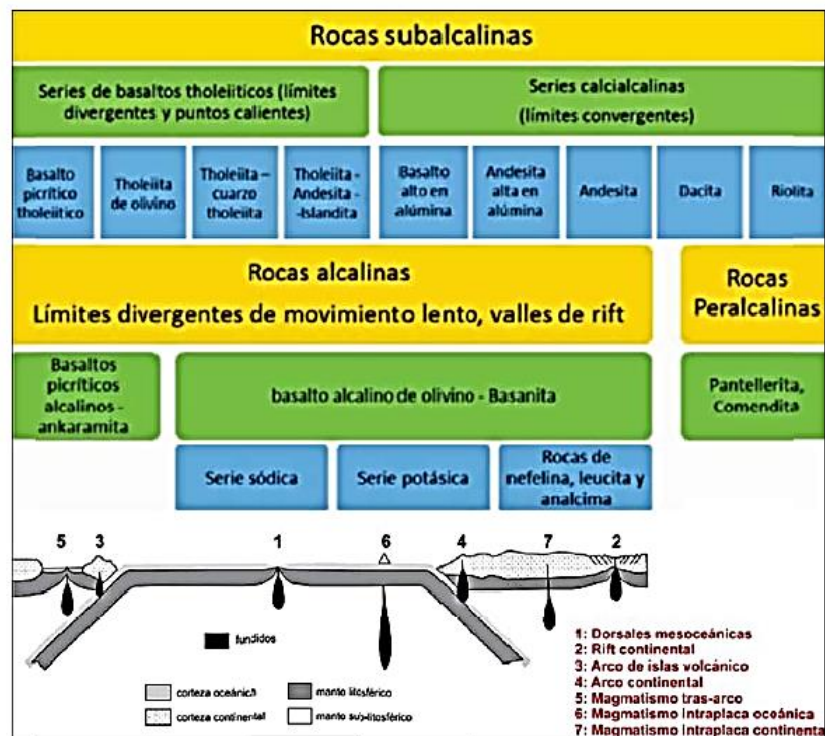


Figura 10. Clasificación de las rocas volcánicas en relación a las series magmáticas, alcalina y subalcalina, (Arcos Alarcón, 2016)

A partir de la formación de magma por fusión en diferentes puntos del interior de la Tierra se pueden originar, con ayuda de la distorsión de las rocas en el interior de la Tierra, cuerpos más grandes de magmas que, por diferencia de densidad con la roca caja, comienzan a ascender. El estilo y rapidez del ascenso pueden variar dependiendo de la fluidez del magma y del estado físico y el fracturamiento de la roca caja. En su camino de ascenso, los magmas pueden estacionarse en cierto niveles en donde en ocasiones forman cámaras magmáticas de tamaño variable. Las cámaras magmática que se encuentran cerca de la superficie son normalmente las que alimentan a los grandes volcanes, cuando el magma asciende rápidamente por una corteza frágil y fracturada, se forman numerosos conductos de ascenso que pueden originar pequeños volcanes o actividad volcánica a lo largo de fisuras.

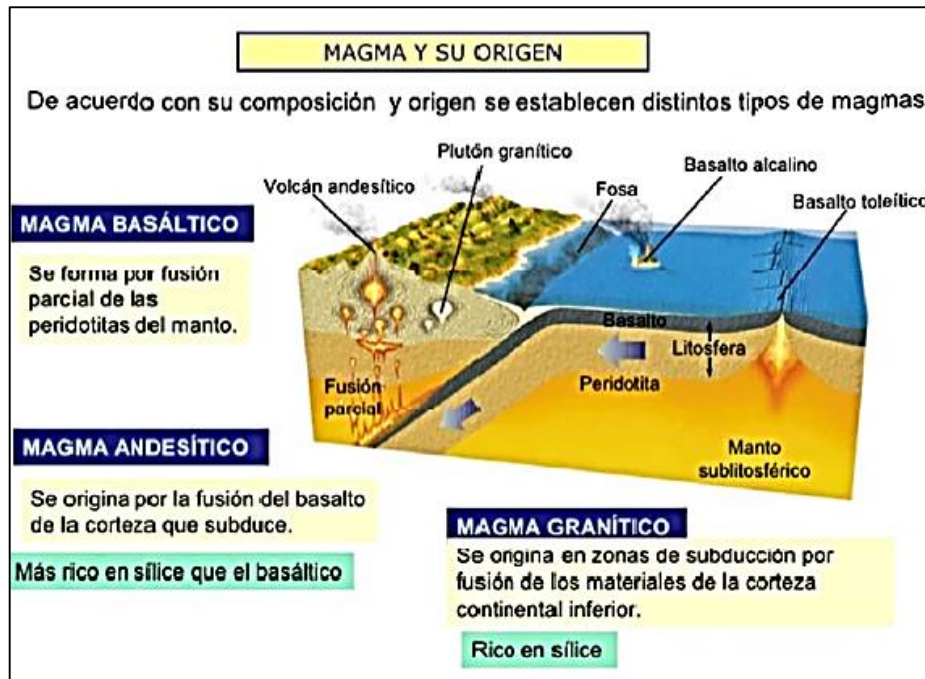


Figura 11. Tipos de magma de acuerdo a su composición, referente al contenido de sílice, modificado de Winter 2000, (Arcos Alarcón, 2016).

En su camino de ascenso los magmas cambian muy frecuentemente de composición química, de tal manera que es relativamente raro encontrar en superficie cuerpos magmáticos que tengan la misma composición que cuando se formaron a profundidad por fusión parcial.

Los procesos más comunes que producen cambios en la composición del magma se relacionan con la separación de minerales que se van formando a partir del fluido magmático (cristalización fraccionada) y por la incorporación y asimilación de fragmentos arrancados de las paredes de la roca caja. También puede ocurrir que un magma se mezcle en su camino de ascenso con magmas de diferente composición.

El cambio en la composición de un magma por la separación de grupos de minerales cristalizados a partir de él, se debe a que no todos los minerales se forman al mismo tiempo no tienen la misma composición. Así, los primeros que se forman, como el olivino, se pueden separar y empobrecer al magma en los elementos dominantes del olivino como el magnesio.

El concepto de las series de reacción de Bowen expresa, aunque en forma muy simplificada, el orden común en el que se formarían los minerales más abundantes de un magma a partir de la cristalización de su fase fluida y de la transformación de los primeros minerales formados.

2.2.6 Ambiente de generación de magmas (geoquímica aplicada)

Una de las contribuciones más importantes de la teoría de la tectónica de placas a la geología actual ha sido proporcionar un marco unitario de interpretación para el conjunto de las rocas ígneas. La contribución relativa de cada ambiente geológico al magmatismo terrestre:

- a. Observación a realizar es que casi dos tercios de los magmas producidos jamás alcanzan la superficie, sino que vuelven a convertirse en rocas en el interior de la Tierra.
- b. Más del 80% del magmatismo se produce en los márgenes constructivos de las placas.

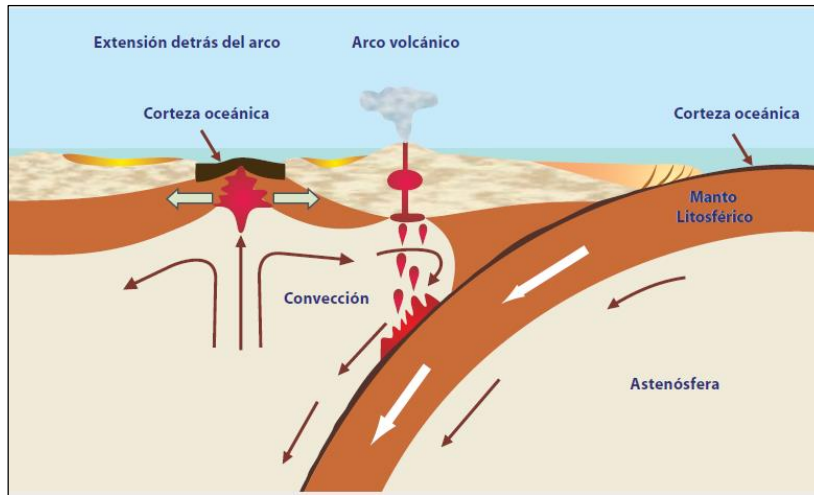


Figura 12. Zona de Subducción asociado al desarrollo de extensión por detrás del arco, (Folguera & Spagnuolo, 2010).

2.2.7 Tectónica de placas y Ambientes Tectono-Magmáticos

2.2.7.1 Tectónica de placas

La tectónica de placas (del griego τεκτονικός, tektonicós, "el que construye") es una teoría geológica que explica la forma en que está estructurada la litosfera. La teoría da una explicación a las placas tectónicas que forman la superficie de la Tierra y a los desplazamientos que se observan entre ellas en su movimiento sobre el manto terrestre fluido, sus direcciones e interacciones. También explica la formación de las cadenas montañosas (orogénesis). Asimismo, da una explicación satisfactoria de por qué los terremotos y los volcanes se concentran en regiones concretas del planeta (como el cinturón de fuego del Pacífico) o de por qué las grandes fosas submarinas están junto a islas y continentes y no en el centro del océano.

Las placas tectónicas se componen de dos tipos distintos de litosfera: la corteza continental, más gruesa, y la corteza oceánica, la cual es

relativamente delgada. La parte superior de la litosfera se le conoce como Corteza terrestre, nuevamente de dos tipos (continental y oceánica). Esto significa que una placa litosférica puede ser una placa continental, una oceánica, o bien de ambos, si fuese así se le denomina placa mixta.

Uno de los principales puntos de la teoría propone que la cantidad de superficie de las placas (tanto continental como oceánica) que desaparecen en el manto a lo largo de los bordes convergentes de subducción está más o menos en equilibrio con la corteza oceánica nueva que se está formando a lo largo de los bordes divergentes (dorsales oceánicas) a través del proceso conocido como expansión del fondo oceánico. También se suele hablar de este proceso como el principio de la "cinta transportadora". En este sentido, el total de la superficie en el globo se mantiene constante, siguiendo la analogía de la cinta transportadora, siendo la corteza la cinta que se desplaza gracias a las fuertes corrientes convectivas de la astenósfera, que hacen las veces de las ruedas que transportan esta cinta, hundiéndose la corteza en las zonas de convergencia, y generándose nuevo piso oceánico en las dorsales.

La teoría también explica de forma bastante satisfactoria la forma como las inmensas masas que componen las placas tectónicas se pueden "desplazar", algo que quedaba sin explicar cuando Alfred Wegener propuso la teoría de la Deriva Continental, aunque existen varios modelos que coexisten: Las placas tectónicas se pueden desplazar porque la litósfera tiene una menor densidad que

la astenósfera, que es la capa que se encuentra inmediatamente inferior a la corteza. Las variaciones de densidad laterales resultan en las corrientes de convección del manto, mencionadas anteriormente. Se cree que las placas son impulsadas por una combinación del movimiento que se genera en el fondo oceánico fuera de la dorsal (debido a variaciones en la topografía y densidad de la corteza.

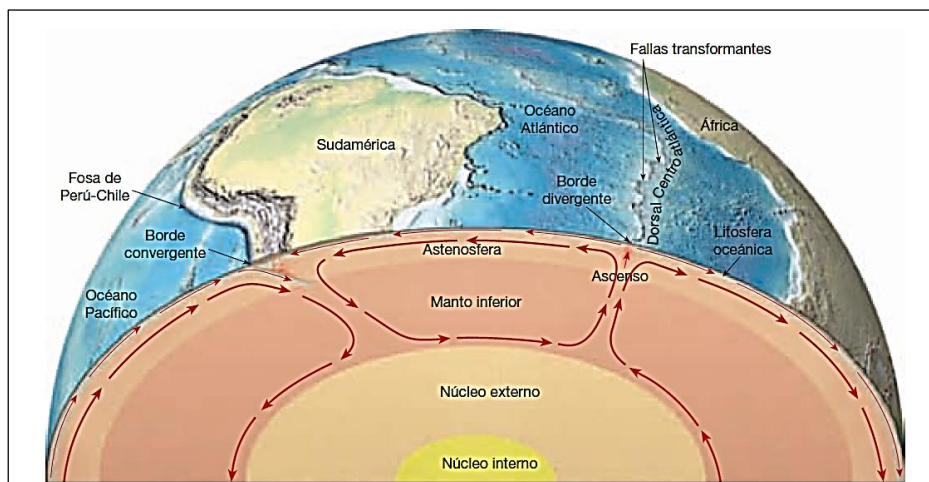


Figura 13. Expansión del fondo oceánico. Harry Hess propuso que la ascensión del material del manto a lo largo del sistema de dorsales centro-oceánicas creaba nuevos fondos oceánicos, (Tarbuck & Lutgens, 2005)

Que resulten en diferencias en la fuerza gravitacional, arrastre, succión vertical y zonas de subducción). Una explicación diferente consiste en las diferentes fuerzas que se generan con la rotación del globo terrestre y las fuerzas de marea del Sol y de la Luna. La importancia relativa de cada uno de esos factores queda muy poco clara, y es todavía objeto de debate.

- **Límites de placas.**- Son los bordes de una placa y es aquí donde se presenta la mayor actividad tectónica (sismos, formación de montañas, actividad volcánica), ya que es

donde se produce la interacción entre placas. Hay tres clases de límite:

- **Divergentes:** son límites en los que las placas se separan unas de otras y, por lo tanto, emerge magma desde regiones más profundas (por ejemplo, la dorsal meso – atlántica formada por la separación de las placas de Eurasia y Norteamérica y las de África y Sudamérica).
- **Convergentes:** son límites en los que una placa choca contra otra, formando una zona de subducción (la placa oceánica se hunde bajo de la placa continental) o un cinturón orogénico (si las placas chocan y se comprimen). Son también conocidos como "bordes activos".
- **Transformantes:** son límites donde los bordes de las placas se deslizan una con respecto a la otra a lo largo de una falla de transformación. En determinadas circunstancias, se forman zonas de límite o borde, donde se unen tres o más placas formando una combinación de los tres tipos de límites.

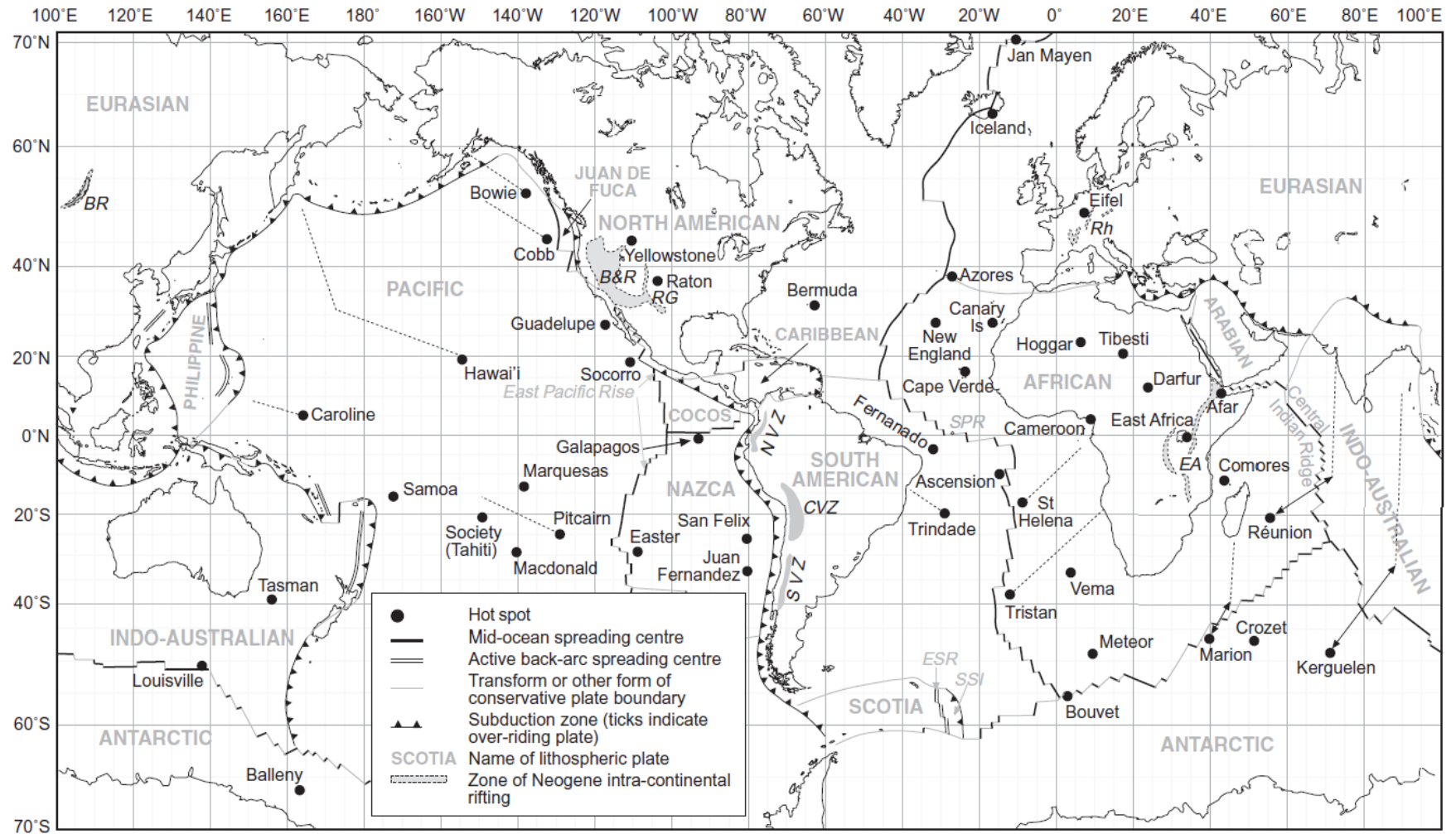


Figura 14. Las principales placas litosféricas con sus respectivas mega-estructuras geológicas (Gill, 2010)

2.2.7.2 Ambientes Tectono-Magmáticos

Es un conjunto o serie de rocas formados en un ambiente tectónico determinado (Dickinson, 1971).

- Los magmas son creados por la fusión de la corteza y/o manto, ya que no existe reservorios permanentes.
- La fusión es respuesta a un episodio dinámico (tectónico) dado que el calor localizado por concentración radiactiva es solo localmente suficiente.

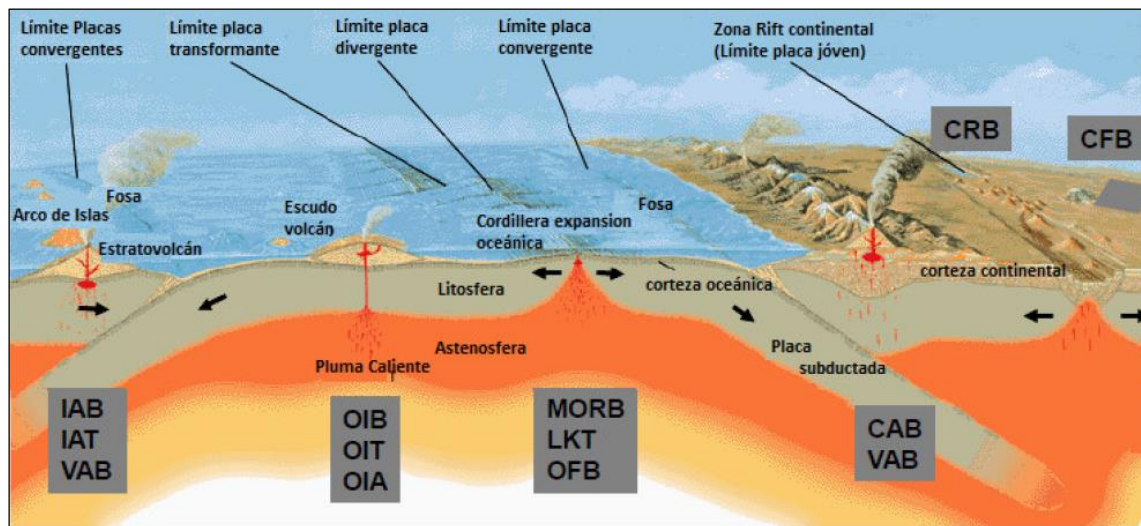


Figura 15. Ambientes tectono-magmático, tomado Dickinson, 1971, (Arcos Alarcón, 2016).

2.2.8 Composición química de las rocas

El objetivo principal de la geoquímica es la caracterización e identificación de los procesos geológicos que actúan en ambientes geotectónicos distintos a través del comportamiento de los elementos químicos, los cuales pueden ser elementos mayores, elementos menores y elementos trazas. Las composiciones químicas y mineralógicas de las áreas fuentes ejercen fuerte control sobre las rocas magmáticas derivadas. La composición del área fuente es

función del ambiente tectónico envuelto. Los elementos mayores y trazas monitorean la evolución del área, mientras que la proporción (ratio) isotópica inicial no se modifica durante los procesos de fusión o la cristalización fraccionaria.

Los procesos de mezcla son comunes, sobre todo aquellos que se originaron en el manto (ejemplo, los basaltos oceánicos, continental, arcos de islas, etc.).

Muchas rocas magmáticas son productos de la segregación durante el proceso de la intrusión. En las cámaras magmáticas, los procesos geológicos diferentes modifican la composición química del magma primario. Así actúan la cristalización fraccionada, mezcla magmática, o la acción concomitante de un grupo de procesos. Para reconocer estos grupos de datos geoquímicos son necesarios: los elementos mayoritarios, traza, isótopos estables y radiactivos.

Después del proceso de la intrusión la composición química de las rocas puede alterarse por la desgasificación, o interactúa con fluidos post-magmáticos o meteóricos.

Elementos Mayoritarios

Los elementos mayoritarios son aquellos componentes químicos de una roca cuya proporción en la misma normalmente supera el 1%. Su concentración se expresa en tanto por ciento en peso (% wt) de los óxidos correspondientes, y su suma debe ser próxima a 100. Los elementos mayores tradicionalmente considerados son diez: Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, Mn y P, aunque los cuatro últimos están en discusión y son usados principalmente en la clasificación de rocas, en

la construcción de diagramas de variación y como comparación con las composiciones de rocas determinadas experimentalmente, en donde las condiciones de formación son conocidas. Además, los elementos mayores son usados a veces acompañados de los elementos traza, en la identificación del ambiente tectónico. Debido a que el movimiento de placas y la actividad tectónica asociada pueden alterar o destruir gran parte de la información acerca de los ambientes de depósito originales, la procedencia de los remanentes puede deducirse de la evidencia química contenida en el registro de la roca. La movilidad de los elementos mayores está controlada principalmente por tres factores: estabilidad y composición de los minerales de la roca inalterada, de los minerales en el producto de alteración y composición, temperatura y volumen de la fase fluida.

Elementos menores

Son aquellos que están en un rango de 0.1 a 1%, estos son el TiO_2 , MnO , P_2O_5 y CO_2 , pero aquí se les trata como elementos mayores por la diferencia marcada en porcentaje frente a los elementos traza.

Elementos trazas

Reciben el nombre de Elementos Trazas cualquiera de los elementos de la tabla periódica, que podemos encontrar en concentraciones más o menos alta en una roca, exclusión hecha de los elementos mayores y elementos menores. Su concentración se expresa en partes por millón (ppm) o, excepcionalmente (si su contenido en una roca concreta es muy alto) en tanto por ciento del óxido correspondiente. Los elementos que desde el punto de vista de la Petrología ígnea son

considerados como traza (Rb, Ba, Pb, Sr, La-Lu, Th, U, Y, Zr, Hf, Ta, Cu, Co, Ni, Sc, V y Cr), no forman minerales en los que ellos son constituyentes principales. Cuando el manto terrestre es fundido, los elementos traza muestran una preferencia en cuanto a permanecer en el residuo sólido (elementos compatibles) o en el líquido obtenido (elementos incompatibles). Esto se debe a que los elementos compatibles tienen radio iónico y valencia aproximadamente iguales a los elementos mayores y menores que les sustituyen en la estructura cristalina. De manera general, corresponden al grupo de minerales de transición. Ocurre lo inverso con los elementos incompatibles.

Elementos de Tierras Raras

Las denominadas “tierras raras” (o REE, por Rare Earth Elements) son un grupo de 17 elementos químicos indispensables para la tecnología moderna. Se los emplea en campos tan dispares como la elaboración de imanes para los discos duros, en las lámparas halógenas o en la construcción de equipos de diagnóstico por resonancia magnética nuclear. A pesar de lo que su nombre indica, no son más escasos que el plomo o el oro, pero a menudo resultan difíciles de separar de los minerales que los acompañan. La denominación “tierra” proviene de la antigua denominación que se daba a los óxidos, y en cuanto a lo de “raras”, no se refiere a la poca o mucha cantidad que existe de ellos, sino a lo complicado que resulta en algunos casos separar el elemento de los minerales que lo acompañan. Las Tierras Raras generalmente son divididos en dos grupos, las Tierras Raras Livianas o “Light Rare Earth Elements”

(lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio y samario) y las Tierras Raras Pesadas “Heavy Rare Earth Oxides” (europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio), con E incluido dentro de este último grupo debido a su similitud con Ho, pues aunque el Y no posee ningún electrón f, en muchos procesos geoquímicos este se comporta similarmente al Ho, pues aunque el y no posee ningún electrón F, en muchos procesos geoquímicos este se comporta similarmente al Ho por su estados de oxidación trivalente y casi idéntico al radio iónico. Las Tierras Raras son incompatibles, es decir que tienden a concentrarse en la fase fundida que resulta de la fusión parcial del manto, permaneciendo durante la cristalización fraccionada de un magma.

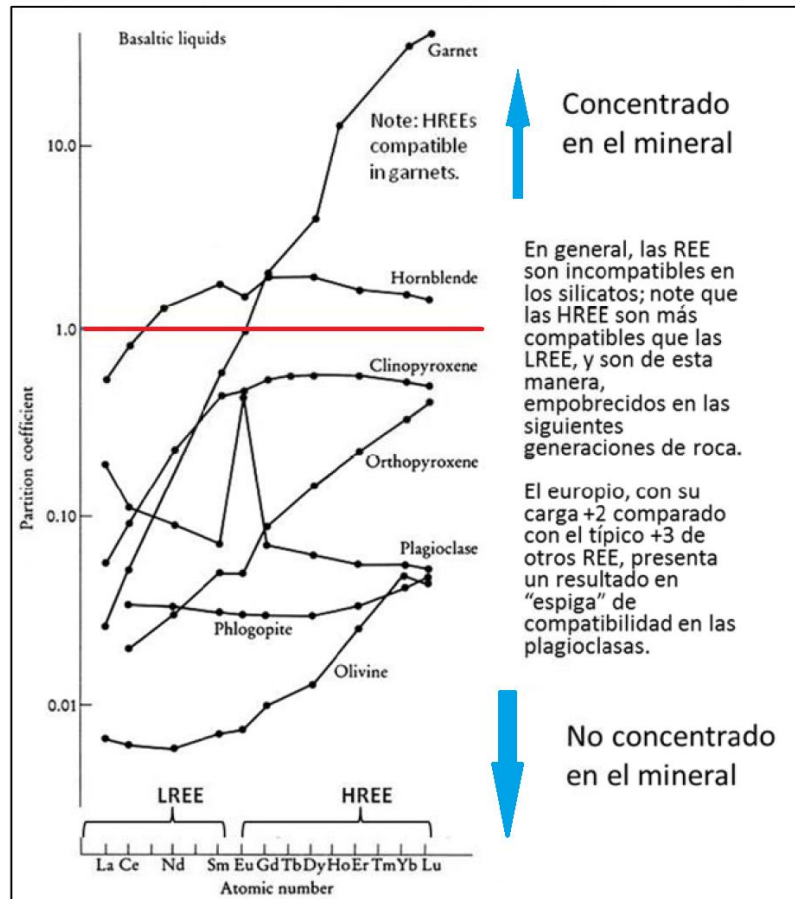


Figura 16. La anomalía (en "espiga") del europio se debe a su alta compatibilidad en las plagioclasas. Las HREE son más compatibles que las LREE en un amplio rango de silicatos, (Rollinson, 1993)

Una de las causas que condiciona el valor D (Mineral/Fundido), es decir la entrada de Tierras raras en las redes minerales, es su radio iónico (R.I.) las Tierras Raras Livianas que tiene mayor radio iónico se introducen en los feldespatos y el apatito, así como la esfena donde hay una fuerte concentración porque fracciona fuertemente las Tierras raras Pesadas. Además del apatito y la esfena, también el circón puede fraccionar fuertemente a las tierras raras en los líquidos evolucionados. El granate admite en su red las Tierras Raras Pesadas que tienen un radio iónico relativamente menor, pero no

admite las Tierras Raras Ligeras que quedan relativamente concentrados en el fundido.

Durante los procesos secundarios que pueden afectar a las rocas después de su cristalización (alteraciones, metamorfismo), las Tierras Raras Pesadas se comportan como inmóviles, por lo que su estudio es especialmente interesante en las series volcánicas antiguas para tratar de identificar su posición paleo-tectónica. En cambio las Tierras Raras Livianas probablemente son móviles. Las REE proveen datos adicionales en la formulación de modelos petrogenéticos (tablas).

Químicamente asociado por diferentes proporciones, estos elementos son los componentes de muchísimos minerales: más de 250 minerales diferentes contienen Tierras Raras como impurezas, cuyas aleaciones puede lograr distintos porcentajes. Alrededor de 55, son típicos portadores de minerales de tierras raras con aleaciones mayores de 10%.

ELEMENTO	USO COMO INDICADOR PETROGENÉTICO
Ni, Co, Cr	Elementos altamente compatibles. El Ni y Co se concentraran en el olivino, el Cr en la espinela y clinopiroxenos. Altas concentraciones indican fuente mantélico, fraccionamiento ilimitado o acumulación de cristales
V, Ti	Ambos muestran fuerte fraccionamiento en los óxidos de Fe-Ti. Si ellos se comportan de manera diferente, el Ti fracciona en una fase accesoria, tal como titanita o rutilo.
Zr, Hf	Elementos muy incompatibles que no sustituyen fases en los silicatos mayores (aunque pueden reemplazar al Ti en la titanita o rutilo). Altas concentraciones implican un enriquecimiento en la fuente o una vasta evolución líquida.
Ba, Rb	Elementos incompatibles que sustituyen al K en las micas, feld-K u hornblenda. El Rb sustituye menos en la hornblenda que en las micas y el feld-K, así que la relación K/Ba permitiría distinguir estas fases.
Sr	Sustituye al Ca en las plagioclasas (pero no en los piroxenos) y en menor extensión al K en los feld-K. Se comporta como elemento compatible a baja presión donde la plagioclasa se forma tempranamente, pero actúa como elemento incompatible a alta presión donde la plagioclasa es poco estable.
REE	Tienen muchos usos para modelar la evolución de un líquido. El granate acomoda más a las HREE que a las LREE, y en ortopiroxenos y hornblenda tienen menos desarrollo. La titanita y plagioclasa acomodan más LREE, Eu+2 es fuertemente particionado en la plagioclasa.
Y	Comúnmente incompatible. Fuertemente particionado en granate y anfíbol. Titanita y apatito también lo concentran. Así que su presencia puede ser significativa.

Figura 17. Elementos traza y REE tomados como indicadores petrogenéticos, Tomado de Toselli, 2010; citando a Green, 1980, (Arcos Alarcón, 2016)

2.2.9 Procedimientos Analíticos

Para los elementos mayores, la selección está entre la XRF y el ICP.

Para la XRF la muestra se prepara como una perla fundida, mientras para el ICP es preciso llevarla a disolución. Sin embargo, el método del ICP es extremadamente rápido, aunque la XRF es más precisa.

Para los elementos traza, hay mucha más capacidad de elección, ya que los siguientes métodos serían apropiados: XRF, ICP, INAA, RNAA, AAS, IDMS, SSMS e ICP-MS. Teniendo en cuenta la cuestión

de qué elementos van a ser analizados, la XRF y el ICP son los más versátiles, ya que combinan un amplio rango de elementos con buena precisión y bajos límites de detección. Los elementos más ligeros que el Na no se pueden determinar por XRF, y debe utilizarse la AAS o el ICP. Para elementos presentes en bajas concentraciones (REE, Th, Ta, U, Hf, etc.) se requieren técnicas analíticas con bajos límites de detección, tales como INAA, RNAA, IDMS, SSMS e ICP-MS. No obstante, con el ICP (e incluso con la XRF) se pueden obtener buenos resultados en REE mediante métodos de separación y pre concentración con columnas de resina de intercambio iónico.

El material fue analizado por el laboratorio GeoLabs, el cual cumple con los requerimientos para analizar las muestras en un Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer (ICP – MS), así como X-ray fluorescence (XRF).

Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS)

La espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente ICP-MS es altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt). Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas).

La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es

transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 8000 K. En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, allí son separados según su relación carga/masa. Cada una de las masas sintonizadas llega al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra (Corral, 2006).

Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (XRF).

Es un método clásico para determinar los elementos principales y menores, así como algunos elementos de trazas. Las ventajas de usar la XRF son su precisión, exactitud, brevedad del tiempo de análisis, la capacidad de presentar la muestra como sólido, no como líquido, y su naturaleza multielemento. La fusión con metaborato de litio y los pelets comprimidos son las dos técnicas de preparación de muestras estándar de la industria para los análisis de fluorescencia de rayos X. La fusión con metaborato de litio se usa para elementos con un número atómico bajo; los pelets comprimidos se usan para los elementos con un número atómico más alto. La fusión implica fundir la muestra con castina y verterla en un disco de cristal; es apropiada para el análisis de elementos principales. Cuando las determinaciones de elementos de trazas son necesarias o las

muestras presentan una alta concentración de minerales sulfurados, bien se requieren fusiones especializadas o se puede utilizar la técnica de pelets comprimido.

2.2.10 Aplicaciones de los elementos mayoritarios

En el estudio de rocas ígneas, los elementos mayoritarios se usan con los siguientes fines:

- Clasificar rocas ígneas.
- Mostrar mediante diagramas de variación (diagramas de Harker) relaciones interelementales que permitan inferir procesos magmáticos.
- Modelar las condiciones fisicoquímicas en las que se llevan a cabo los procesos de fusión y cristalización.
- Identificar el posible ambiente tectónico original del sistema ígneo.

2.2.11 Aplicaciones de los elementos trazas

En el estudio de rocas ígneas, los elementos traza se usan con los siguientes fines:

- Clasificación geoquímica y comportamiento de los elementos químicos.
- Elementos trazas litófilos (ETL).
- Potencial iónico y elementos de alto, bajo potencial iónico.
- Comportamiento de los ETL en procesos de génesis y evolución magmática.
- Grados de movilidad e inmovilidad de los ETL.

- Sustituciones importantes de ETL.

2.2.12 Diagramas y Clasificación de Elementos Mayoritarios

Los diagramas de variación se utilizan en los estudios de complejos ígneos y sirven para estudiar la evolución de los mismos, si constituyen o no asociaciones co-genéticas (originados a partir de un mismo magma) y también con fines clasificatorios.

Los geoquímicos representan de dos maneras las composiciones químicas de rocas y minerales.

- Tablas de óxidos y/o elementos expresados en concentraciones.
- Gráficos donde se representa las muestras como puntos mediante las concentraciones de los óxidos o elementos.

Estos últimos, se los llama gráficos de variaciones o diagramas de variaciones. Los datos modales también pueden ser expresados en diagramas de variación. Comúnmente se usan tres tipos de diagramas:

- Cartesiano, de dos variables: "x" e "y".
- Triangular.
- Diagramas normalizados.

Los diagramas cartesianos son los que mejor representan las concentraciones absolutas de cualquier parámetro composicional y es ameno para realizar interpretaciones cuantitativas. Pueden

condensar y racionalizar un gran volumen de información y mostrar cualitativamente la correlación, positiva o negativa, que puede existir entre los distintos óxidos mayoritarios y la sílice.

Los diagramas triangulares no pueden mostrar concentraciones absolutas de las tres variables representadas, solo sus proporciones. Pero es muy útil para representar trenes de variación en suites de rocas, pero no puede ser usado para extraer información cuantitativa.

En cualquier diagrama, dos o más constituyentes pueden ser combinados en una variable o relaciones de elementos pueden ser representados por una variable.

El análisis químico de las rocas está expresado en porcentaje en peso de los óxidos de los elementos mayoritarios que constituyen los minerales que las integran. Por ejemplo, una roca constituida por 50 % de SiO_2 , la sumatoria del resto de los óxidos constituirá el otro 50% restante. Es decir que si hacemos la sumatoria del porcentaje del TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O , P_2O_5 y CO_2 , nos debe dar igual a 50%. Los óxidos de fósforo y carbono pueden no estar en el análisis.

A medida que las rocas del complejo en estudio evolucionan hacia términos más ácidos, aumenta el contenido en sílice y disminuye el de los otros óxidos, pero no lo hace para todos ellos en forma semejante. El FeO , MgO , MnO y CaO , que ingresan en los primeros minerales que cristalizan, olivinas, piroxenos, anfíboles, disminuirán rápidamente al aumentar la acidez (o sílice). En tanto los alcalinos,

Na₂O y K₂O, que formarán minerales con mayor contenido en sílice (más ácidos), tales como las plagioclasas más sódicas, feldespatos alcalinos y micas, se incrementará su contenido conjuntamente con la sílice.

Los diagramas discriminantes NUNCA deben usarse como una prueba, solo sirven para “sugerir” una asociación tectónica, a continuación se presentan.

- Normalización en Base Anhidra de los elementos mayores
- Grado de Oxidación
- Coeficiente de Correlación de Pearson
- Diagramas de Harker para elementos mayoritarios
- Diagrama Sílice vs. Álcalis Total – TAS
- Diagrama de Irvine-Baragar: Si₂O vs. K₂O + Na₂O
- Diagrama R1 vs. R2 – De la Roche
- Diagrama de Ringwood: Si₂O/K₂O
- Saturación de Alúmina

2.2.13 Diagrama de Clasificación Geoquímica de elementos traza y elementos de tierras raras

Los elementos traza son aquellos elementos que no forman parte de la fórmula de los minerales que los contienen por ser considerados extraños, cuya concentración se encuentra por debajo del 0.1%.

- Diagrama de Harker para elementos traza
- Diagrama de Rb como índice de diferenciación

- Diagrama de Spider Normalizados
- Diagrama de Tierras Raras Normalizadas
- Diagrama de Elementos de Transición
- Diagramas multielementales (spider-diagrams)

2.2.14 Diagramas discriminantes de Ambiente Tectónico

- Diagrama de Shand
- Diagrama de Whalen
- Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs. Rb
- Diagrama de Pearce: (Y+Nb) vs. Nb
- Diagrama de Pearce: (Y vs. Nb
- Diagrama de Pearce: (Yb+Ta) vs. Rb
- Profundidad de la Fuente Magmática: Ce/Y vs. SiO₂
- Profundidad de la Fuente Magmática: Eu/Eu* vs. Ce/Y
- Antigüedad de los Magmas: SiO₂ vs. Sm/Yb

2.2.15 Cálculo de diagramas de fluidos hidrotermales y mineralización.

- Diagrama de circulación de fluidos hidrotermales: U vs. Th
- Diagramas tipos de magmas secos o hidratados: Al/(Ca+Na+K) vs. Eu/Eu*
- Diagramas estado de oxidación vs. El contenido de agua: Eu/Eu* vs. Fe total
- Diagrama de Zr/Hf vs. Y/Ho

2.3 Definición de términos básicos

- Elementos mayores

Son los elementos que predominan en cualquier análisis de roca, las concentraciones son expresadas en peso por ciento (wt%) del óxido, se utilizan por tres principales motivos: (1) clasificación de una roca, (2) construcción de diagramas de variación y (3) promedio de comparación con determinadas rocas previamente analizadas. Son usualmente utilizado para identificar el origen del ambiente tectónico de rocas ígneas (Rollison, 1993).

Los elementos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O y CaO) normalmente superan el 1% en peso y los menores como el TiO_2 , MnO y P_2O_5 tienen concentraciones entre 1 y 0.1% en peso. Todos ellos son los principales componentes de una roca.

- Elementos traza

Definido como el elemento que se presenta en una roca en concentraciones menores a 0.1 wt%, el cual es menor a 1000 partes por millón (ppm). La geoquímica cuántica de elementos traza asume que se encuentran presentes en un mineral en solución hasta la sustitución y que sus concentraciones pueden ser descritas en términos de equilibrio de la termodinámica. Las escasas concentraciones permiten establecer relaciones simples entre la composición y actividad (Rollison 1993).

- **Elementos de tierras raras (REE)**

También conocidos como los lantánidos o rare earth elements (REE) pertenecen al grupo de los lantánidos en la tabla periódica. Los elementos que más abundan en la corteza terrestre son el Cerio, Ytrio y Neodimio, el Prometio no ocurre en la naturaleza.

Las tierras raras (REE) se subdividen en dos grupos: las tierras raras ligeras o low rare earth elements, conocidos por sus siglas en inglés (LREE), compuesto por los elementos La, Ce, Pr, Nd, Sm; y las tierras raras pesadas o high rare earth elements (HREE) compuesto por los elementos Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu y Y.

- **Normalización al Condrito.-**

Los elementos de tierras raras que se concentran en las rocas son usualmente normalizados a una referencia estándar, el cual abarca comúnmente los valores del condrito que son meteoritos que no han sufrido fusión ni diferenciación en los asteroides que los proceden. Estas normalizaciones tienen dos importantes funciones: (1) Elimina la abundante variación entre los números atómicos pares e impares de los elementos. (2) Permite cualquier fraccionamiento del grupo de los elementos de tierras raras relativo a los meteoritos condrita a ser identificados.

Método de Análisis Análisis de Condrito (Ref.)	Wakita NAA Composite (1)	Haskin NAA Composite (2)	Masuda IDMS Leedey (3)	Nakamura IDMS Composite (4)	Evensen IDMS Avg. CI (5)	Boynton IDMS Avg. CI (6)	T & M IDMS Avg. CI (7)	Primitive Mantle Value
La	0.3400	0.3300	0.3780	0.3290	0.24460	0.3100	0.3670	0.7080
Ce	0.9100	0.8800	0.9760	0.8650	0.63790	0.8080	0.9570	1.8330
Pr	0.1210	0.1120	-	-	0.09637	0.1220	0.1370	0.2780
Nd	0.6400	0.6000	0.7160	0.6300	0.47380	0.6000	0.7110	1.3660
Sm	0.1950	0.1810	0.2300	0.2030	0.15400	0.1950	0.2310	0.4440
Eu	0.0730	0.0690	0.0866	0.0770	0.05802	0.0735	0.0870	0.1680
Gd	0.2600	0.2490	0.3110	0.2760	0.20430	0.2590	0.3060	0.5950
Tb	0.0470	0.0470	-	-	0.03745	0.0474	0.0580	0.1080
Dy	0.3000	-	0.3900	0.3430	0.25410	0.3220	0.3810	0.7370
Ho	0.0780	0.0700	-	-	0.05670	0.0718	0.0851	0.1630
Er	0.2000	0.2000	0.2550	0.2250	0.16600	0.2100	0.2490	0.4790
Tm	0.0320	0.0300	-	-	0.02561	0.0324	0.0356	0.0740
Yb	0.2200	0.2000	0.2490	0.2200	0.16510	0.2090	0.2480	0.4800
Lu	0.0340	0.0340	0.0387	0.0339	0.02539	0.0322	0.0381	0.0737
Y	-	-	-	-	-	-	2.1000	-

Tabla 3. Valores Normalizado por diferentes autores, (Rollinson, 1993)

2.4 Formulación de hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

- En base a los resultados obtenidos, la caracterización de la geoquímica magmática, en la Latitud Sur ($10^{\circ}38'$ - $10^{\circ}48'$), Cerro de Pasco, se define la relación con la mineralización económica de Cu-Au, en ambiente tectónico de convergencia.

2.4.2 Hipótesis Específicos

- Establecer que el análisis composicional de las rocas ígneas para determinar una caracterización geoquímica de diferentes variedades químicas de las rocas ígneas debido al comportamiento diferencial de los elementos químicos durante la fusión y cristalización de los magmas y su relación con la mineralización de Cu-Au en base a la geoquímica de los fluidos hidrotermales.

2.5 Identificación de las Variables.

2.5.1 Variables Independientes.

- Análisis geoquímico de roca.

2.5.2 Variables Dependientes.

- Mineralización de Cu-Au
- Diagramas geoquímicos.

2.5.3 Variables Intervinientes.

- Utilización de software.
- Uso de herramientas de internet.

2.6 Definición operacional de variables e indicadores

Variables	Operacionalización	
	Definición Operacional	Indicadores
<u>Independiente</u> Análisis geoquímico de roca	Caracterización geoquímica de las muestras de roca analizada	- %wt - Comportamiento geoquímico de elementos mayoritarios, elementos traza y elementos de tierras raras
<u>Dependiente</u> Mineralización de Cu-Au	Relación con zonas de mineralización,	(ppm), valores de Cu-Au

Tabla 4. Operatividad de variables

CAPÍTULO III

METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Para la elaboración del presente trabajo, se optó una metodología basada en fases secuenciales, que permitieron llevar un metódico y coherente tratamiento en la información colectada, permitiendo a la vez, realizar correlaciones y caracterizaciones de manera adecuada.

3.1 Tipo de Investigación.

De acuerdo a los objetivos de la investigación, la naturaleza del problema y las variables propuestas, para el desarrollo de nuestra investigación en el presente estudio se ubicará en la Investigación Básica, porque auscultaremos las diferentes teorías científicas existentes en relación al problema de estudio.

De acuerdo con la profundidad de investigación se situará en el nivel descriptivo – correlacional.

Es descriptivo porque vamos a medir y describir la variable independiente y la variable dependiente, es correlacional, porque se establecerá el nivel de correlación entre las variables para luego llevar a cabo la interpretación respectiva.

3.2 Métodos de Investigación.

El método utilizado en la presente investigación es el método descriptivo – correlacional, porque se observarán los datos obtenidos para explicar la relación entre las variables, es decir, para saber en qué medida la variación de una de ellas afecta a la otra, con la finalidad de conocer su magnitud, dirección y naturaleza. Asimismo, no se descarta el empleo del método analítico-sintético. A través de este método, se descompondrán todas las variables para observar sus relaciones, similitudes, diferencias, causas, naturaleza y efectos hacia otras variables, para luego reconstruirlas a partir de los elementos distinguidos por el análisis.

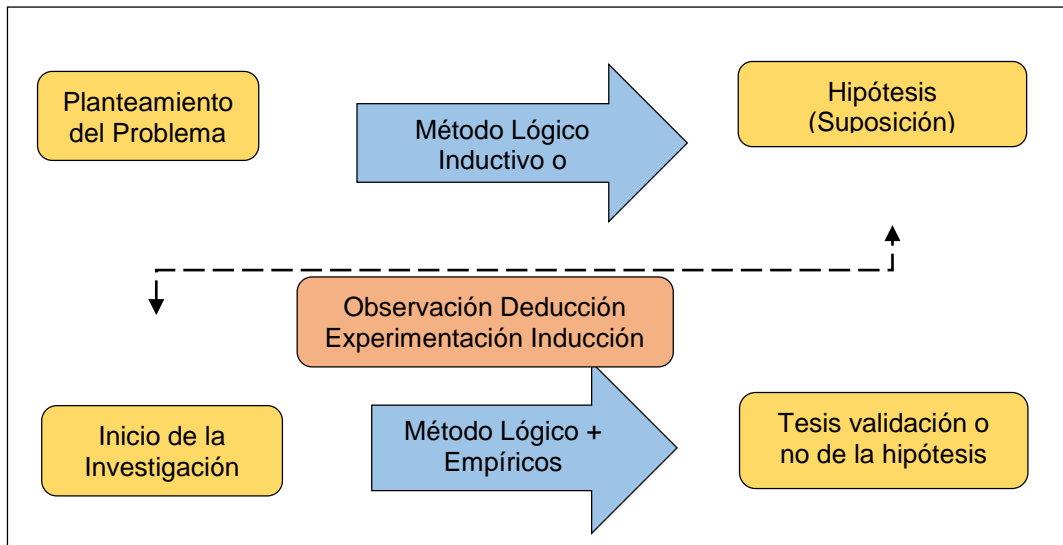


Figura 18. Tipo y diseño de Investigación, (Valderrama Mendoza, 2018)

3.3 Diseño de Investigación.

“El diseño de investigación constituye el plan general del investigador para obtener respuestas a sus interrogantes o corroborar la hipótesis de investigación. El diseño de investigación desglosa las estrategias básicas que el investigador adopta para generar información exacta e interpretable”. (Martínez, sf).

La presente investigación se adecuó a los propósitos de la investigación no experimental, debido a que no se manipulará la variable independiente, además, la investigación será transeccional correlacional-causal, porque se recolectará los datos en un momento, en un tiempo único, y el propósito será describir las variables y analizar su incidencia e interrelacionar en un momento dado en función a los objetivos definidos.

3.4 Población y Muestra.

3.4.1 Población

Como universo de estudio, se considerado la base de datos del departamento de geoquímica del Instituto geológico minero y metalúrgico (Ingemmet).

Para la aplicación de este trabajo se realizó en las rocas subvolcánicas comprendidas entre los paralelos 10°38' y 10°48' latitud sur, zona comprendida hacia el lado noroeste de la ciudad de Cerro de Pasco.

3.4.2 Muestra

Las muestras obtenidas son representativas, porque una de ellas puede representar a toda la unidad formacional, debido a ello el muestreo no es probabilístico, siendo este de manera conveniente (mejor exposición, sin alteraciones), siendo determinado, por la ubicación espacial en función al área seleccionada para la presente investigación, siendo agrupados en cuatro zonas de estudio, elegido para la presente investigación:

- 15 muestras (11 muestras para la zona de Cauquish, 2 muestras correspondientes a la zona de Racco, 1 muestra para la zona de Quicay y 1 muestra para la zona de Huangor). Por la técnica de XRF, para elementos mayoritarios, se obtuvieron 12 datos; mientras que, por la técnica de ICP-MS, para elementos traza, se obtuvieron 38 datos, lo que hace la suma de 750 datos, la misma que constituye la base de datos geoquímicos (ver anexo).

- Con una población muestral de 15 muestras de roca divididas en cuatro zonas de estudio:
 - 11 muestras de la zona de Cauquish.
 - 2 muestras de la zona de Racco.
 - 1 muestras de la zona de Quicay.
 - 1 de la zona de Huangor.

3.5 Técnicas e instrumentación de recolección de datos.

La metodología aplicada está ligada a la investigación misma. Estos incluyen la compilación bibliográfica, tecnología disponible, aspectos económicos, así como la situación, localización y tiempo, todos los cuales influyen en la calidad de la investigación.

Lo cual implica elaborar un plan detallado de procedimientos que conduzcan a reunir los datos que permitan comprobar el grado de validez de la hipótesis. Los datos se recolectan de la muestra seleccionada, la cual contiene, teóricamente, las mismas características que se desean investigar en la población de interés.

3.5.1 Técnicas

Se entiende por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener los datos o información.

- **Fuentes primarias**, que consiste en obtener datos o registros sistemáticos válidos y confiables en el mismo lugar de la aplicación de la investigación mediante la observación de los objetos o fenómenos que se estudian a través de un conjunto de dimensiones e indicadores.

- **Fuentes documentales**, relacionado con los documentos que se revisan para obtener los datos necesarios para la investigación,

3.5.2 Instrumentos

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información.

- **Ficha de observación**, instrumento que permite recoger los datos en el mismo lugar de los hechos mediante una escala en función a ítems establecidos.
- **Registros de evaluación**, instrumento de recojo de datos numéricos que utilizan los docentes para registrar los avances académicos de los estudiantes.

3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

En este apartado se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos o respuestas que se obtengan: clasificación, registro, tabulación y codificación si fuere el caso. En cuanto al Análisis se definirán las Técnicas Lógicas o Estadísticas, que se emplearán para descifrar lo que revelan los datos recolectados.

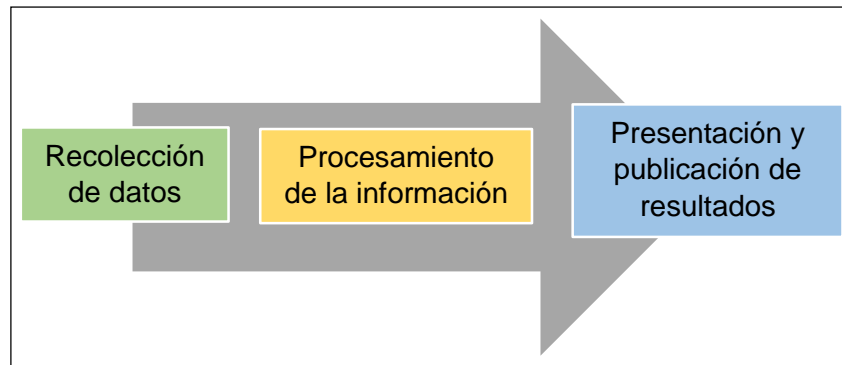


Figura 19. Proceso para la investigación, (Valderrama Mendoza, 2018).

3.7 Tratamiento Estadístico

Los diagramas de variación son usados con diferentes propósitos en petrología y geoquímica. Tienen la ventaja de ser más sencillos de interpretar que los números globales en las tablas de geoquímica, que a primera vista pueden ser difíciles de interpretar.

Gracias a estos diagramas se pueden observar con facilidad comportamientos y tendencias petrológicas que aporten información relevante en procesos geoquímicos como: la cristalización fraccionada, fusión parcial o líneas de mezcla. En este trabajo se utilizan los diversos diagramas de uso geoquímico, tanto de elementos mayoritarios y elementos traza.

3.8 Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Todo instrumento de recolección de datos debe resumir dos requisitos esenciales: validez y confiabilidad.

Con la validez se determina la revisión de la presentación del contenido, el contraste de los indicadores con los ítems (preguntas) que miden las variables correspondientes. Se estima la validez como

el hecho de que una prueba sea de tal manera concebida, elaborada y aplicada y que mida lo que se propone medir.

La realización de la presente investigación de tesis, es efectuada basada al lineamiento establecido, se aplicó la metodología propuesta por la Dra. Miriam Mamani Huisa, en sus diversos trabajos de investigación.

3.9 Orientación ética

El presente trabajo de investigación, para obtención de grado profesional de Ingeniero Geólogo, se realizó con el objetivo de poder obtener lineamientos y las técnicas para caracterizar la geoquímica magmática y poder relacionarlos con áreas de interés geo – económico; con ello mejorar notablemente la calidad de vida de todas las personas dentro del radio de influencia, así como la región y el país.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción del trabajo de campo

4.1.1 Ubicación y Accesibilidad

La zona de estudio, políticamente se encuentra ubicado dentro de la región de Pasco, en la jurisdicción del distrito de Simón Bolívar, con ubicación geográfica dentro de la Cordillera Occidental Andina, siendo sus coordenadas geográficas.

Latitud: 10°45'0'' S

Longitud: 76°21'0'' W

Y sus coordenadas UTM-WGS 84, las siguientes:

VÉRTICE	ESTE	NORTE
V1	340,000	8'826,000
V2	356,000	8'826,000
V3	356,000	8'804,000
V4	340,000	8'804,000

La zona de estudio forma parte del cuadrángulo de Cerro de Pasco, Hoja 22-k-III y Hoja 22-k-IV.

Existen dos principales vías de acceso hacia la zona de estudio:

1. Ruta Lima – Oroya – Cerro de Pasco – Cauquish
2. Ruta Lima – Canta – Huayllay – Cerro de Pasco – Cauquish

4.1.2 Geomorfología y clima

La geomorfología consiste en una superficie pobremente desarrollada, que no ha logrado ser peneplanizada por completo, la superficie se establece truncando los pliegues de la Tectónica Incaica que afecta a los estratos observándose un paisaje de superficie puna. El clima es frígido con estaciones lluviosas de diciembre a marzo y estación seca entre los meses de mayo a octubre. Las laderas están cubiertas con vegetación andina de pradera (ichu) típico de un estadio puna.



Figura 20. Fotografía tomada mirando al Sur, se puede distinguir las geoformas de la zona alto-andina.



Figura 21. Ubicación Nacional de la Zona de Estudio.

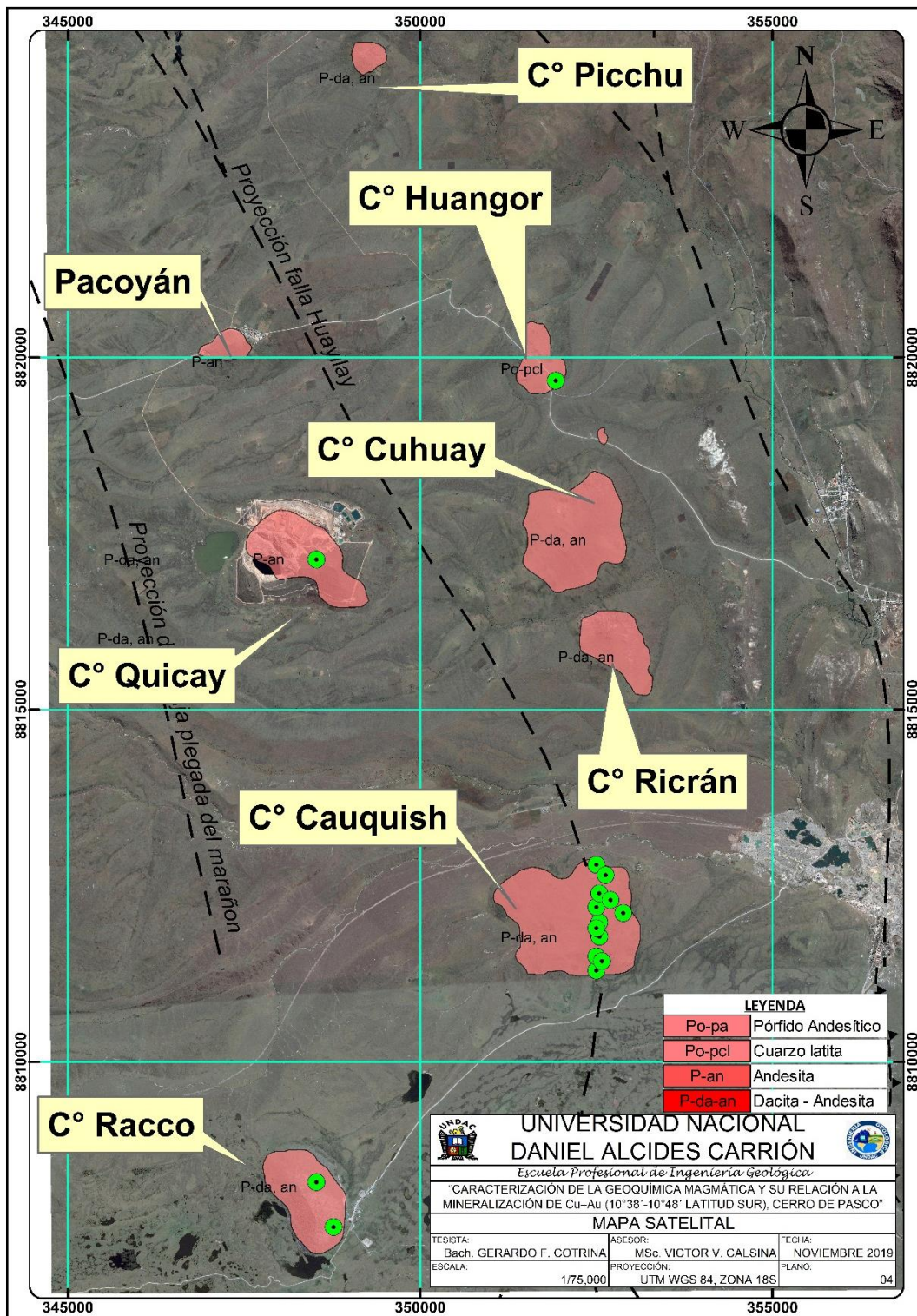


Figura 22. Mapa de Ubicación local

4.1.3 Estratigrafía regional

La columna estratigráfica de la franja de la zona de estudio consiste de una secuencia de rocas de edad Paleozoico inferior a Terciario. La base de la secuencia consiste básicamente en rocas detríticas del Devónico y Pérmico de los Grupos Cabanillas (Excélsior) y Mitu respectivamente los cuales infrayacen en el Este y Norte a la secuencia carbonatada del Triásico Superior-Jurásico del Grupo Pucará. Suprayaciendo a esta secuencia de rocas, al este, aparecen areniscas y cuarcitas del grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior, culminando con sedimentos de la formación Pocobamba y depósitos de Tobas y carbonatos impuros de la formación Calera, ambos de edad Eoceno Superior.

4.1.3.1 Grupo Cabanillas (Excélsior): Devónico

Las rocas del Grupo Cabanillas (Excélsior) constituyen las rocas más antiguas de la zona de estudio y descrito inicialmente McLaughlin (1925). Se trata predominantemente de lutitas pizarrosas negras (en ocasiones micáceas) con intercalaciones de arenisca cuarzosa en estratos menores de 10 cm, afloran al norte de la zona de estudio.

Edad y correlación. Dentro de la región no se han encontrado fósiles, pero al sur de la zona de estudio, entre Tarma y Concepción, la Formación Concepción contiene braquiópodos de Devónico (Harrison, 1940 y 1943) y huellas de trilobites (Paredes, 1972), que en conjunto corresponde al Devónico Inferior a Medio. Por su similitud litológica atribuimos que el Grupo Excélsior, corresponde a la secuencia de la Formación Concepción.

4.1.3.2 Grupo Mitu: Pérmico superior

McLaughlin (1924) dio este nombre a una serie detrítica de color rojo en la localidad de Mitu, próxima a la localidad de Chacayán. Se trata de rocas continentales tipo capas rojas, que se habrían depositado entre el Pérmico superior y Triásico Inferior (Mégard, 1978), estas rocas afloran al norte de la zona de estudio.

Edad. Al Grupo Mitu, por sobreyacer al Grupo Tarma del Pérmico Inferior (norte de la hacienda Huanca) e infrayacer al Grupo Pucará del Triásico superior al Jurásico inferior, se le puede asignar una edad comprendida entre el Pérmico superior y el Triásico inferior; sin embargo, la parte inferior puede alcanzar el Pérmico medio.

4.1.3.3 Grupo Pucará: Triásico superior-Jurásico inferior

Descrito inicialmente por McLaughlin (1924) a las rocas aflorantes en las cercanías de la localidad de Goyllarisquizga. Luego varios estudios realizados por otros autores, Megárd (1968) subdividió al Grupo Pucará en las formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga. Se tratan mayoritariamente de calizas, dolomías y calizas dolomíticas con intercalaciones de tobas, lutitas y nódulos de chert.

El grupo Pucará es una de las unidades estratigráficas más importantes en el centro del Perú, ya sea como metalotecto litológico para el emplazamiento de mineralización polimetálica en yacimientos metasomáticos de contacto o de tipo Mississippi Valley.

El Grupo Pucará indiviso (Noriano – Rehatiano), definido Jenks (1951) definió como facies occidentales del Grupo Pucará a las calizas que se encuentran en el Dominio Central, entre la falla de Cerro de Pasco y el sistema de corrimiento del Marañón. Luego, Ángeles (1999) las denominó con el nombre informal de Pucará Occidental, con una potencia de 300 m (Ángeles, 1999); cerca a la falla Cerro de Pasco, sobreyace al grupo Mitu en leve discordancia angular, y más al noroeste, al Complejo Metamórfico del Marañón; la base del Grupo Pucará indiviso comienza con una brecha basal (20m) con clastos de filita y cuarzo, seguido por dolomías con niveles de chert negro (reemplazadas por sílice), cineritas y niveles rojos que pueden representar superficies endurecidas. Las facies sugieren un ambiente somero, de baja energía, correspondiente a una plataforma carbonatada, ubicada en una zona con poca o sin subsidencia comparada con los dominios Nororiental y Suroccidental.

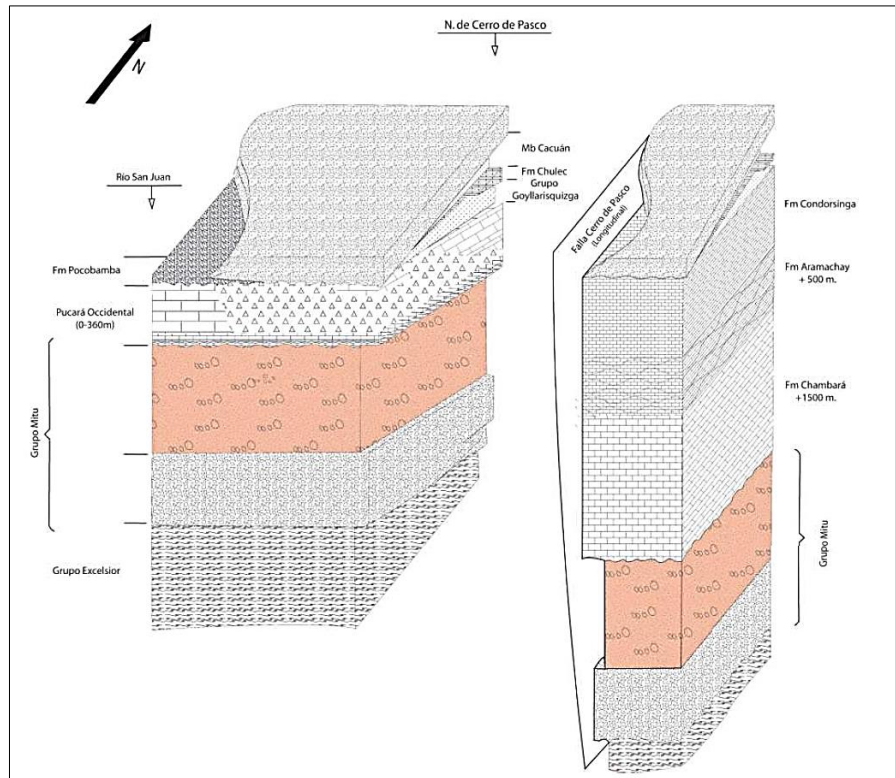


Figura 24. División del Grupo Pucará en Cerro De Pasco: Pucará Oriental y Pucará Occidental, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011)

4.1.3.4 Grupo Goyllarisquizga: Jurásico superior-Cretácico inferior

Descrito inicialmente por McLaughlin en 1924, como “areniscas Goyllarisquizga – Jatunhuasi”, quien llamo de esta manera a una serie clástica en la localidad de Goyllarisquizga que se habría depositado durante el Cretáceo Inferior. Posteriormente Jenks (1951) le dio el nombre de Formación Goyllarisquizga, Wilsón (1963) lo elevó a categoría de Grupo Goyllarisquizga, abarcando toda la serie clástica y calcárea que aflora en la cuenca occidental del centro y norte del Perú (Formación Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat).

4.1.3.5 Formación Pocobamba: Eoceno inferior

Esta unidad sedimentaria fue descrito por McLaughlin (1924), tiempo después Ángeles (1999) redefine la estratigrafía cenozoica de Cerro de Pasco, dividiéndolo en dos miembros: Miembro Cacuán y Miembro Shuco, son de origen detrítico continental los cuales se depositaron durante el eoceno superior, ambos de acuerdo a INGEMMET, estarían presentes bajo la cubierta cuaternaria en gran parte de la zona de estudio.

4.1.3.6 Formación Calera: Eoceno superior – Oligoceno

Las rocas carbonatadas del Eoceno Superior pertenecientes a la formación Calera fueron descritos por McLaughlin (1924), pero Noble (1992) y Ángeles (1999) le asignan la categoría de Formación. En la zona de estudio son escasos y aparentemente se encuentran cubiertos por material cuaternario.

4.1.3.7 Depósitos Cuaternarios

Depósitos morrénicos: Estos depósitos son productos de la última glaciación y se ubican sobre los 4,100 msnm, a manera de lomas con cresta morrénica bien definida. Están constituidos por bloques y gravas en una matriz areno – limosa, pobremente clasificada, a veces leve pseudoestratificación como testigo de fusiones estacionales durante el período glacial.

Depósitos aluviales: Son depósitos inconsolidados que han sido acumulados por la combinación de procesos aluviales y fluviales.

Están ubicados principalmente en las desembocaduras de las quebradas, especialmente de las que forman la red hidrográfica del Lago Junín. Litológicamente, están compuestos por gravas, arenas y limos, siendo los clastos sub-redondeados a redondeados, como los que se observan en los ríos Andacancha, Mantaro y Blanco.

Depósitos lacustre-aluviales: Son depósitos que se encuentran en las orillas de las lagunas de la zona de estudio y se inter-digitan con los depósitos aluviales. Están compuestos por limos y material orgánico con intercalaciones de gravas.

Depósitos coluviales: Se encuentran en la base de las laderas de los cerros, son depósitos mal clasificados con clastos angulosos con bastante matriz areno – limosa y no presenta estratificación. Estos depósitos fueron originados por desprendimiento de rocas que han originado deslizamientos o derrumbes.

Depósitos antrópicos: Son depósitos ocasionados por el hombre, principalmente referido a zonas de relaves y botaderos de las minas de la región.

Columna Estratigráfica Local

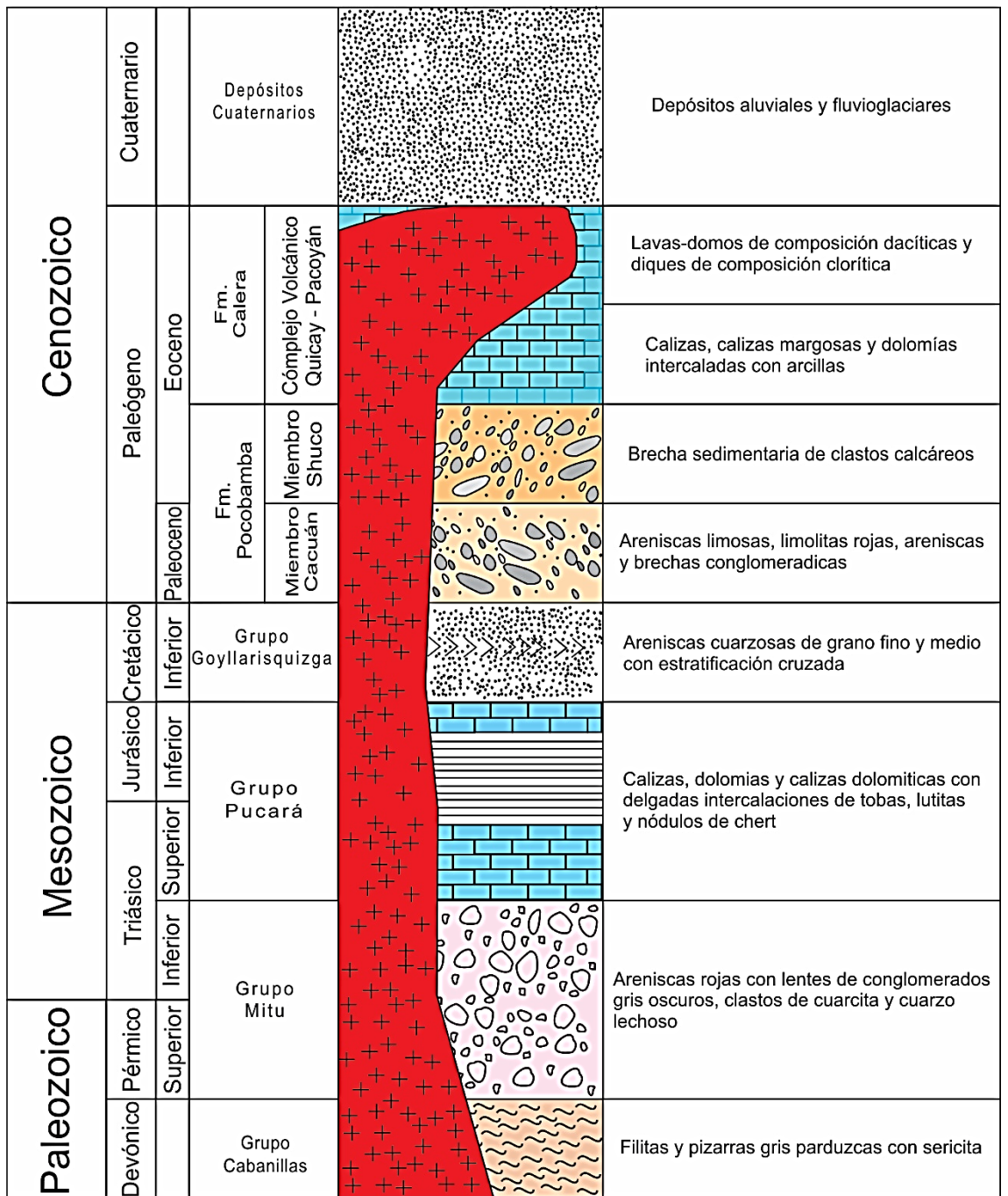


Figura 25. Columna Estratigráfica local de la zona de Estudio (Cobeñas Benites, 2008)

4.1.4 Geología Estructural

Las fallas relacionadas a la zona de estudios, forman parte las fallas regionales que se encuentran en el cuadrángulo de Cerro de Pasco, formando el sistema de fallas que controlan la evolución geodinámica

de cuencas sedimentarias, el emplazamiento de magmatismo y la mineralización.

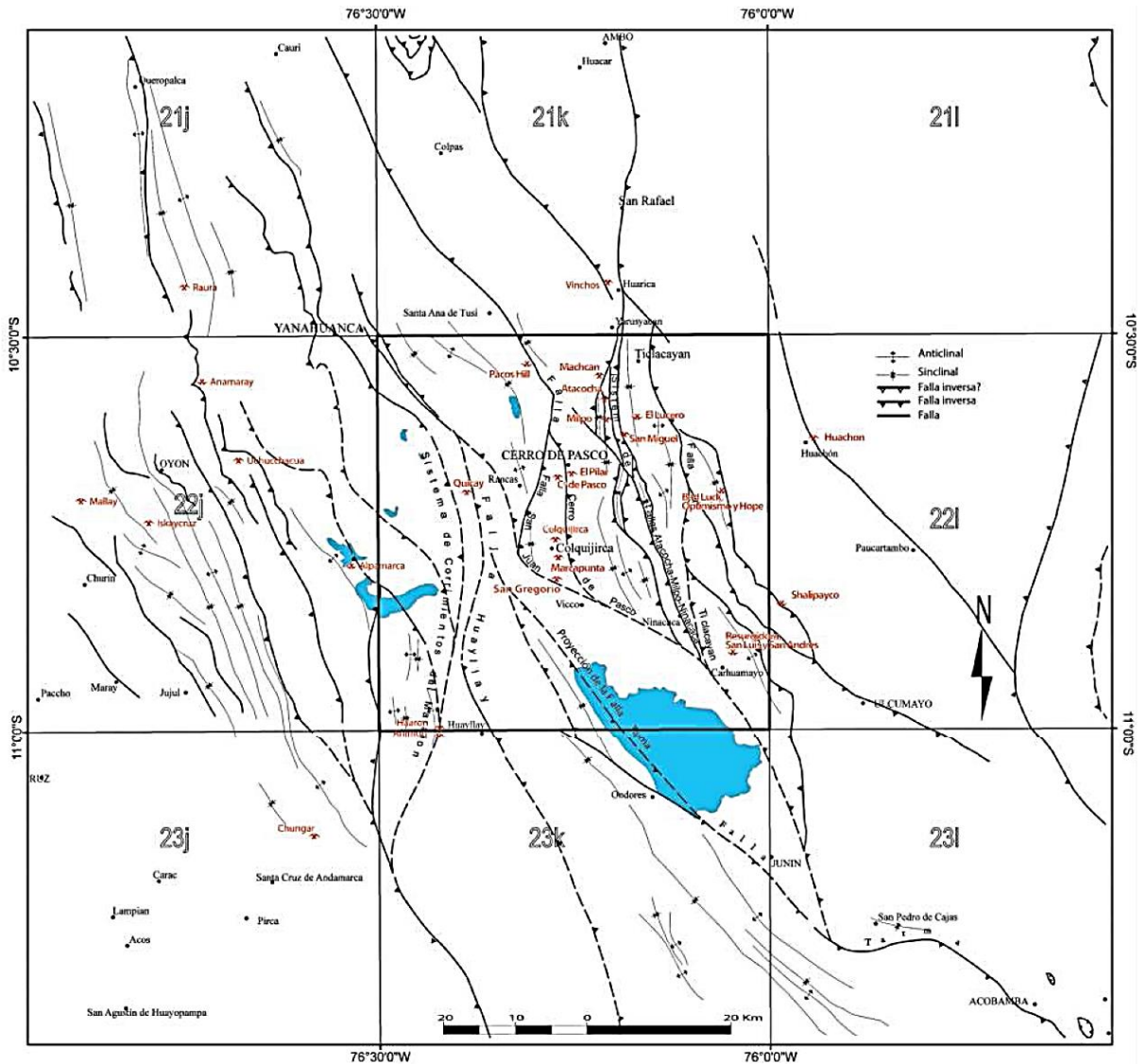


Figura 26. Fallas Regionales del Cuadrángulo de Cerro de Pasco, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011))

4.1.4.1 Falla Huayllay

La falla ha sido interpretada y trazada tentativamente en el esquema estructural, en base a datos de campo en el área de Huayllay, relaciones estratigráficas con el cuadrángulo de Odores (23-k) e información estructural de la mina Quicay (Flores, 2002).

La Falla Huayllay en el sector norte tiene dirección N 145°; en el sector central, a la altura de la mina Quicay, cambia a N-S y es el principal control estructural de la mineralización. En el sector sur, entre Quicay y Huayllay, cambia ligeramente a N 15°, y hacia el sur de Huayllay cambia bruscamente a N155°, con buzamiento general mayor a 70° al Este.

Comportamiento Tectónico. La actividad de la falla Huayllay está determinado a partir del Permo – Triásico. Se han evidenciado 3 ciclos tectónicos

Pérmico Superior al Jurásico Inferior. Corresponde a la sedimentación de los grupos Mitu y Pucará. En el extremo noreste del cuadrángulo de Cerro de Pasco, entre Ventilla y Huarapata, al noreste de la falla (bloque techo), el Grupo Mitu está sobre el complejo Metamórfico del Marañón y solo alcanza algunas decenas de metros, incluso puede estar ausente, y es cuando el Grupo Pucará se encuentra directamente sobre el Complejo metamórfico Marañón. En cambio, al suroeste de la falla (bloque piso), el grupo Mitu y Pucará están ausentes, y el grupo Goyllarisquizga del Cretácico inferior se encuentra directamente sobre el Complejo Metamórfico del Marañón. Esto indica que, para el Permiso superior-Jurásico inferior, la falla Huayllay tuvo movimiento normal y conformaba el límite oriental del Alto del Marañón, el cual se encontraba al noroeste.

Albiano. Corresponde a la sedimentación y emplazamiento del volcanismo de la formación Chayllacatana, que aflora al este de Huayllay, en el paraje Shogyacucho, en donde sobreyace al Grupo Goyllarisquizga e infrayace a la formación Chúlec. La composición de las lavas de la Formación Chayllacatana es andesítica a andesítica – basáltica, y se han emplazado en un régimen de distensión (Soler, 1989). En consecuencia, en el Albiano, la actividad de la Falla Huayllay fue normal convergente al noreste.

Cretácico superior? – Eoceno. Corresponde a la sedimentación de la Formación Pocobamba. La falla Huayllay separa los afloramientos de la formación Pocobamba de la zona Colquijirca – Cerro de Pasco, de las zonas de Huayllay – laguna Punrún. En la parte sur, al este de Huayllay, dentro del bloque noreste (bloque techo) de la falla, la Formación Pocobamba está ausente; mientras que al suroeste (bloque piso) sí se encuentra. De acuerdo a la medida de paleocorrientes, la zona de aportes estuvo al noreste (Cueva, 2008), en el bloque techo de la falla Huayllay.

En consecuencia, se asume que la falla Huayllay tuvo movimiento inverso convergente al suroeste durante el Cretácico superior-Eoceno. Durante todo el Eoceno y posiblemente Oligoceno, esta falla ha actuado como un alto estructural dentro de la misma cuenca continental de la Formación Pocobamba, lo cual ha originado que los sedimentos de Cenozoicos de Huayllay – laguna Punrún y Colquijirca – Cerro de Pasco tenga un cambio brusco de facies y espesor.

En el Eoceno Superior, la falla Huayllay, con movimiento inverso, ha permitido que se originen zonas de debilidad para el emplazamiento de domos y stock sub volcánicos a stock relativamente profundos, como el de la mina Quicay.

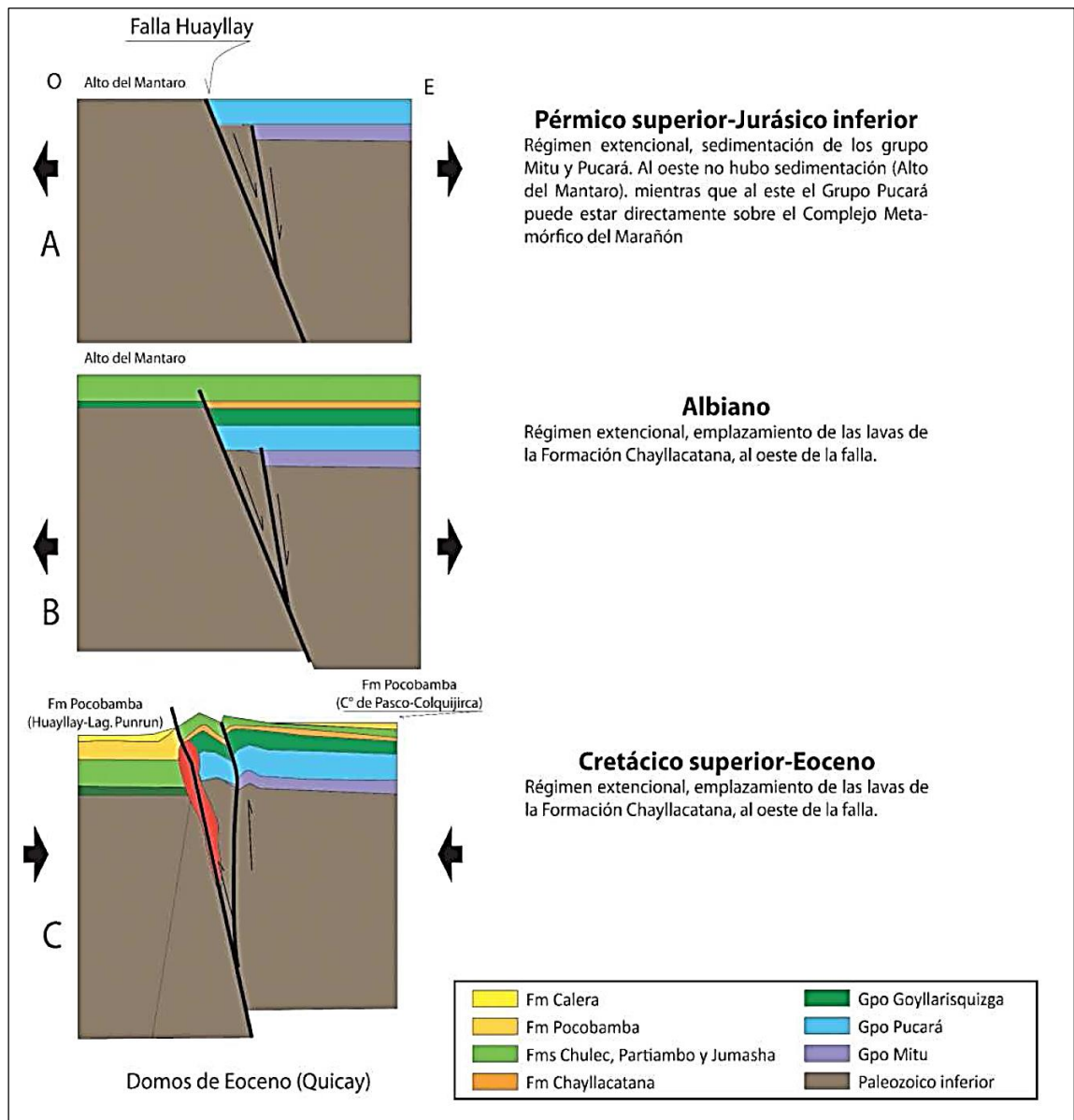


Figura 27. Eventos Tectónicos de la Falla Huayllay, (Rodríguez M., Cueva Tintaya, Carlotto C., & Mamani Huisa, 2011)

4.1.4.2 Corrimientos de la Faja Fallada del Marañón.

Se tratan de la proyección al sureste de tres fallas del cuadrángulo de Oyón (22-j). Estas fallas en la parte norte tienen dirección N 130°, y al sur forman una sola falla de dirección N – S al N 20°, con ángulo de buzamiento aparentemente menor a 45° al oeste.

Los corrimientos de la faja fallada del Marañón afectan a rocas del Cretácico inferior o más jóvenes, y aparentemente el nivel de despegue es la base del Grupo Goyllarisquizga.

Comportamiento tectónico. No se ha realizado un análisis estratigráfico o estructural para determinar si estos corrimientos han controlado la sedimentación de las unidades cretácicas. La actividad tectónica se inició en el Terciario.

Eoceno. Aparentemente, sobre el Alto del Mantaro, solo existía la cuenca de la Formación Pocobamba (sector Huayllay – laguna Punrún), que era controlada por la actividad inversa de la falla Huayllay. Como los corrimientos del Marañón afectan a la Formación Pocobamba, se deduce que son del pos – Eoceno, y se originaron sobre el Alto del Mantaro. La Mayor actividad aparentemente fue en el Plioceno, ya que se conforman el límite occidental de la cuenca de la formación Jeroc, la misma que cubre a la falla Huayllay.

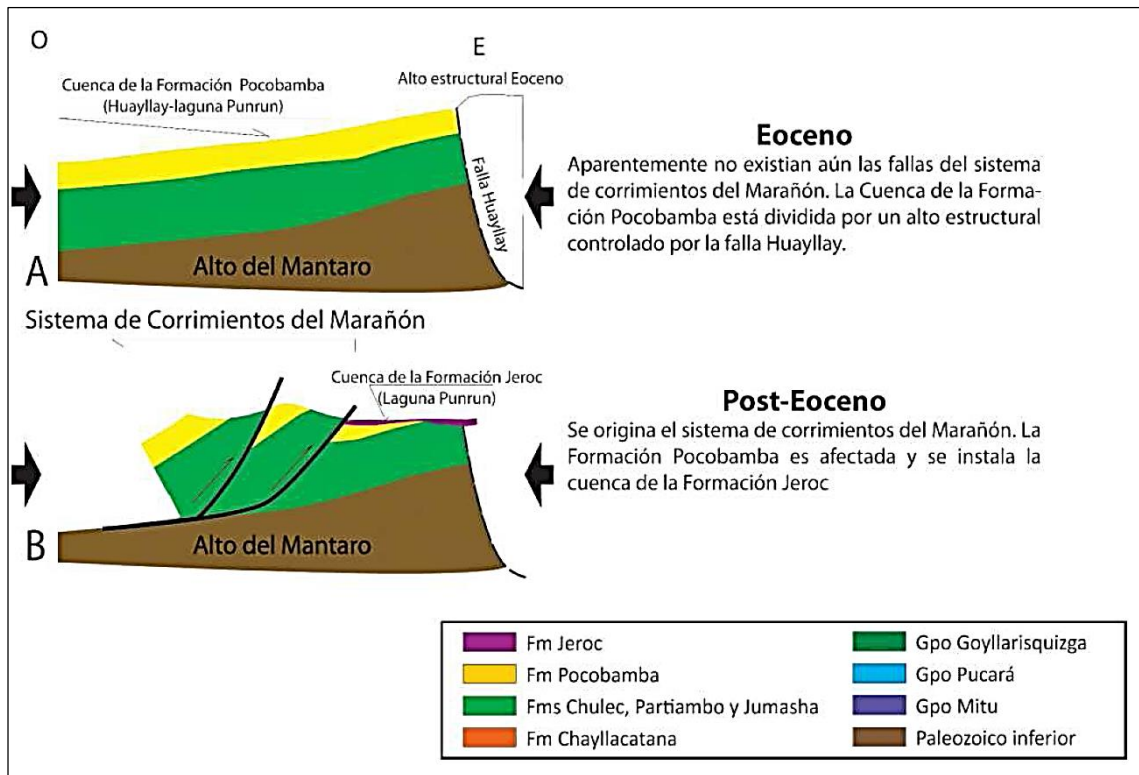


Figura 28. Eventos tectónicos de Corrimientos del Marañón (tomado Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco)

4.1.5 Dominios Estructurales

Las principales fallas descritas en ítems 2.2.2 delimitan Dominios Estructurales que forman parte de los bloques estructurales regionales, los cuales continúan tanto al norte y sur del zona de estudio, dentro del cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k), Ingemmet diferenció cinco dominios estructurales.

4.1.5.1 Dominio Occidental

El dominio Occidental está ubicado al oeste de la Falla de Huayllay. La mayor parte de este dominio en la zona de estudio se encuentra cubierta por depósitos aluviales de la formación Jeroc (Plioceno).

Las fallas que se encuentran en este dominio se ha interpretado teniendo en cuenta la geología de los cuadrángulos vecinos y son

convergentes al este; presentan una dirección NO-SE en la parte norte, y cambian al Ne-So en la parte sur. Este cambio de dirección aparentemente se debe a la presencia de una rampa lateral. Los niveles de despegue corresponden a la base de Grupo Goyllarisquizga que se encuentra directamente sobre el Paleozoico inferior, tal como se observa al noroeste (Champacruz). La actividad de estas fallas ha originado una faja corrida y plegada con pliegues de arrastre.

La estratigrafía se caracteriza por presentar areniscas, lutitas y calizas del Grupo Goyllarisquizga, que puede ser dividido en las formaciones Oyón, Chimú, Santa-Carhuaz y Farrat; sobre estas se encuentra las secuencias carbonatadas del Cretácico inferior-superior de las formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha, sobreyaciendo por la formación Pocobamba, la cual es conformada, en este sector, por más secuencias finas que conglomeráticas.

El magmatismo está presente en la parte occidental (límite con el Cuadrángulo de Oyón), y está compuesto por dacitas del Mioceno superior, y al sur (límite con el Cuadrángulo de Ondores), por monzonitas de Huarón (~15 Ma) y por las tobas de la formación Huayllay del Mioceno (6 a 5 Ma).

4.1.5.2 Dominio Suroccidental

Tal como su nombre lo indica, se encuentra en el sector suroccidental del Cuadrángulo de Cerro de Pasco, entre las fallas Huayllay y la

proyección de la falla Tarma. Tiene forma rectangular con su lado más estrecho al norte.

La estratigrafía está compuesta por calizas del Grupo Pucará seguidas por las areniscas del grupo Goyllarisquizga, areniscas y lavas de la Formación Chayllacatana, y las calizas de la Formación Chúlec. Sobre todas las secuencias se encuentran las tobas de la Formación Huallay y las gravas de la Formación Jeroc.

El magmatismo está conformado por los niveles volcánicos de la Formación Chayllacata, las cuales se han emplazado aprovechando fallas profundas en un régimen distensivo (Soler, 1989).

4.1.5.3 Dominio Central

El dominio Central se encuentra entre las fallas Huayllay y Cerro de Pasco, y la proyección de la falla Tarma. La mayor parte de este dominio corresponde a la planicie del lago Junín. Las fallas fueron interpretadas en base a la geología de los cuadrángulos vecinos. Tienen dirección NO-SE, buzamiento casi vertical; y son principalmente convergentes al suroeste. Los niveles de despegue aparentemente son bastante profundos, ya que hacen aflorar a rocas del Paleozoico inferior. Los pliegues son alargados y paralelos a la dirección de las fallas.

La estratigrafía está compuesta por areniscas y conglomerados del Grupo Mitu, sobreyacidos por calizas del Grupo Pucará indiviso (Pucará Occidental de Jenks, 1952; Ángeles, 1999). Luego siguen areniscas, lutitas y niveles carbonatados del Grupo Goyllarisquizga, y

calizas de la Formación Chúlec. Finalmente, las areniscas, conglomerados y calizas de las formaciones Pocobamba y Calera, y las tobas de la Formación Huayllay.

El magmatismo en este sector fue en dos eventos. El primero es del Eoceno. Está compuesto por los stocks de Quicay, Cerro Racco, Cauquish, entre otros (28 a 35 Ma), y las tobas de la Formación Calera (36 Ma). El segundo evento es del Mioceno medio, ubicado en la parte oriental y se conforma de los complejos volcánicos de Cerro de Pasco, Colquijirca y Yanamate (15 a 13 Ma).

4.1.5.4 Dominio Nororiental

El dominio Nororiental está ubicado entre las fallas de Cerro de Pasco y Ticlacayán. En este sector, las fallas tienen dirección principal N-S, buzamiento casi vertical con sus niveles de despegue en las rocas del Paleozoico inferior. Los pliegues tienen dirección N-S, paralela a la dirección de las fallas principales.

La estratigrafía está compuesto por los grupos Mitu y Pucará, que en este dominio tienen mayores espesores, seguidos del Grupo Goyllarisquizga, que puede ser dividido en tres formaciones (Chimú, Santa-Carhuaz y Farrat). Luego se tienen las secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Chayllacatana, que son sobreyacidos por las calizas de la Formación Pariatambo; y calizas de la Formación Jumasha. Finalmente, se tienen las areniscas y conglomerados de la Formación Pocobamba.

El magmatismo se encuentra en dos episodios: el primero es del Cretácico inferior, es efusivo y está conformado por las andesitas y andesitas – basálticas de las formaciones Chayllacatana y Pariatambo; el segundo es del Oligoceno, es sub – volcánico y está compuesto por stock de composición dacítica y andesítica de Milpo, Atacocha, Mariac, San Miguel y los que se encuentran al este de La Quinoa (31 a 27 Ma).

4.1.5.5 Dominio Oriental

El dominio Oriental se encuentra al este de la falla Ticlacayán. En la parte sur de este dominio se presentan fallas de dirección NO-SE, convergentes al noreste, cuyos niveles de despegue pueden ser en las rocas del Paleozoico inferior. Los pliegues son paralelos a la dirección de las fallas y fueron originados por la actividad de estas.

La estratigrafía es la más antigua de la zona de estudio. Se tiene el Complejo Metamórfico del Marañón, y sobre este se encuentran areniscas y volcánicos del Grupo Ambo, areniscas del Grupo Mitu y las calizas del Grupo Pucará

El magmatismo se presenta en tres eventos. El primero, del Carbonífero, está ubicado en la parte norte, es efusivo y plutónico. Está compuesto por la riolitas del Grupo Ambo e intrusivos deformados de San Rafael. El segundo evento es del Permo-Triásico también plutónico y efusivo. Se encuentran en el extremo nororiental de la zona de estudio, y está compuesto por rocas plutónicas graníticas del macizo de Paucartambo (260 a 227 Ma) y las lavas

andesíticas intercaladas dentro del Grupo Mitu. Finalmente, el tercer evento se atribuye del Oligoceno; está compuesto por stocks y diques de composición diorítica, ubicados al este de Carhuamayo.

4.2 Presentación, análisis e interpretación de resultados

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad, conocer el comportamiento cuantitativos de los elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras, para realizar la caracterización e interpretación de datos de cada uno de las muestras.

4.2.1 Geoquímica de Elementos Mayoritarios

Para este estudio se analizaron, 11 rocas (Ver anexo), con valores de L.O.I. variables de 1.09% a 7.18%, suponen una selección de rocas, con la menor alteración posible, lo cual implica que se cumplieron ciertos protocolos establecidos en la recolección de muestras.

A continuación se presentan las diferentes metodologías aplicados para el ploteo de los diversos diagramas geoquímicos, que fueron propuestos en diferentes estudios.

4.2.1.1 Normalización en base Anhidra

Para el desarrollo de la investigación se analizaron los datos provenientes del análisis de roca total de cada una de las muestras, previamente analizados en el laboratorio, por lo que es imprescindible normalizarlo, esto es, convertirla en nueva data sin H₂O, CO₂, LOI (pérdida por ignición) y otros volátiles, recalculando los valores analíticos al 100%.

$$\frac{\Sigma[(\text{Óxidos}) - (\text{Volátiles})]}{(\text{Óxidos})} = \frac{100\%}{Xi\%}$$

MUESTRA	ZONA	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TOTAL (wt %)
QU-01	Cauquish	58.933	1.113	16.374	7.893	-	0.158	2.813	7.028	2.741	2.669	0.278	100
QU-02	Cauquish	57.187	0.927	17.738	8.165	-	0.185	2.896	7.331	2.554	2.675	0.342	100
QU-03	Cauquish	59.705	0.978	16.609	7.355	-	0.154	2.819	6.323	3.034	2.717	0.306	100
RA-011071	Cauquish	60.107	0.858	17.537	7.060	-	0.197	2.491	6.767	2.274	2.339	0.370	100
RA-011075	Cauquish	60.989	1.011	16.481	7.873	-	0.134	1.935	5.959	2.680	2.607	0.331	100
RA-011078	Cauquish	55.860	1.161	18.536	8.192	-	0.129	2.393	6.541	2.738	4.065	0.387	100
RA-011084	Cauquish	51.577	1.515	17.820	11.263	-	0.167	4.503	7.648	2.257	2.931	0.321	100
CP59	Huangor	60.855	0.774	16.802	2.872	3.523	0.132	2.943	6.365	3.167	2.342	0.224	100
3PPB710	Quicay	61.808	0.704	16.720	6.057	-	0.155	2.847	5.560	3.406	2.485	0.259	100
CP58	Racco	59.105	0.944	16.322	3.603	3.745	0.142	3.350	6.831	3.076	2.629	0.254	100
2PPB562	Racco	60.499	0.745	16.829	6.516	-	0.134	2.979	6.320	3.258	2.431	0.290	100

Tabla 5. Datos de Elementos Mayoritarios Normalizados en Base Anhidra (Elaboración propia)

4.2.1.2 Grado de Oxidación

En los estudios de caracterización de la geoquímica magmática interesa conocer en Hierro total de las rocas, expresado algunas veces como FeO y otras como Fe₂O₃, esto con la intención de conocer el grado de Oxidación.

El resultado de las transformaciones del Fe⁺³ y Fe⁺² arrojan un notorio incremento del Fe_(total).

Para realizar la transformación de uno u otro óxido nos basamos en el hecho de que los equivalentes son números proporcionales al número de cationes de cada óxido, es decir, se pueden considerar como el valor molecular de un óxido que solamente tuviera un átomo metálico:

Obtención del factor de conversión:
 $1 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3 = 159.70 \text{ g de Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 111.70 = \text{Fe}$
 $1 \text{ mol FeO} = 71.85 \text{ g de FeO} \rightarrow 55.85 = \text{Fe}$

\therefore Si con 55.85g de Fe \rightarrow 71.85g FeO
 $111.70 \text{ Fe} \rightarrow 143.70 \text{ g FeO}$

\therefore Si con 111.70g de Fe \rightarrow 159.70g Fe_2O_3
y 143.70g de FeO

$\therefore 159.70 \text{ g} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 = 143.70 \text{ g} \times \text{FeO}$
 $1 \text{ g Fe}_2\text{O}_3 = 0.8998 \text{ g} \times \text{FeO}$
 $\rightarrow \text{FeO} = (0.8998) \times \text{Fe}_2\text{O}_3$

MUESTRA	ZONA	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO _(total)
QU-01	Cauquish	58.933	7.893		7.102
QU-02	Cauquish	57.187	8.165		7.347
QU-03	Cauquish	59.705	7.355		6.618
RA-011071	Cauquish	60.107	7.060		6.353
RA-011075	Cauquish	60.989	7.873		7.084
RA-011078	Cauquish	55.860	8.192		7.371
RA-011084	Cauquish	51.577	11.263		10.134
CP59	Huangor	60.855	2.872	3.523	6.107
3PPB710	Quicay	61.808	6.057		5.450
CP58	Racco	59.105	3.603	3.745	6.988
2PPB562	Racco	60.499	6.516		5.863

Tabla 6. Valores de los elementos mayoritarios normalizados en base anhidra SiO₂, FeO y Fe₂O₃ (Elaboración propia)

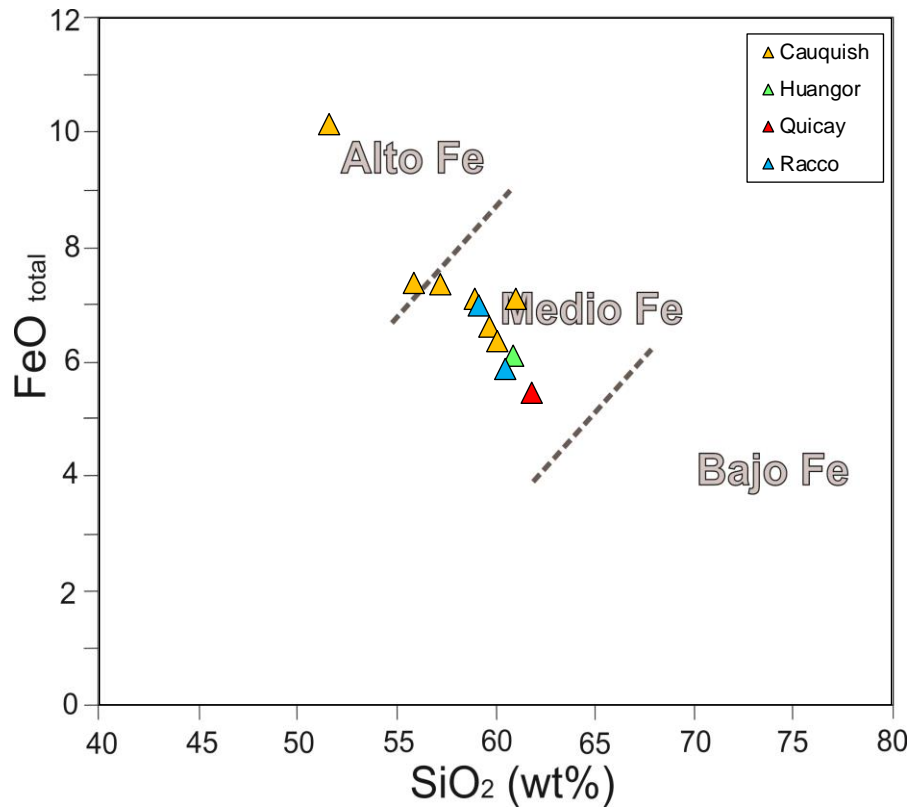


Figura 29. Diagrama de SiO₂ vs Fe_(total), donde se muestra el grado de oxidación, (elaboración propia)

Nótese que las muestras perteneciente al Cerro Cauquish, presentan mayor incremento de FeO(total) a menor diferenciación.

4.2.1.3 Coeficiente de correlación de Pearson

De acuerdo a la teoría del Coeficiente de correlación de Pearson, es una herramienta de mucha importancia pues permite realizar dichas correlaciones entre elementos mayoritarios.

Para el presente estudio, los datos fueron procesados por el paquete estadístico SPSS 22, mostrando lo siguiente datos:

C. P.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1								
TiO ₂	-0.877	1							
Al ₂ O ₃	-0.669	0.483	1						
MnO	-0.224	0.217	0.101	1					
MgO	-0.679	0.457	0.145	0.283	1				
CaO	-0.778	0.626	0.411	0.332	0.621	1			
Na ₂ O	0.634	-0.719	-0.559	-0.389	-0.141	-0.703	1		
K ₂ O	-0.562	0.573	0.674	-0.175	-0.053	0.136	-0.262	1	
P ₂ O ₅	-0.233	0.261	0.561	0.161	-0.256	0.097	-0.510	0.519	1

Muy Mala	Mala	Regular	Buena	Muy Buena
0 – 0.200	0.200 - 0.400	0.400 – 0.600	0.600 – 0.800	0.800 – 1.000

Figura 30. Coeficiente de Correlación de Pearson, para elementos mayoritarios, (elaboración propia).

Las correlaciones de óxidos mayoritarios en el presente estudio, confirman que hay una buena correlación negativa (disminuye a medida que el magmatismo se vuelve más diferenciado), entre el SiO₂ con TiO₂, Al₂O₃, MnO, MgO, CaO y P₂O₅, así como la correlación positiva con el entre el SiO₂ con el NaO₂.

Coeficiente de correlación para elementos traza

CP	V	Co	Ni	Cu	Rb	Sr	Y	Zr	Ba	La	Pb	Th	U
V	1.000												
Co	0.118	1.000											
Ni	-0.626	0.051	1.000										
Cu	0.615	0.403	-0.141	1.000									
Rb	0.300	0.447	-0.487	0.242	1.000								
Sr	-0.395	0.041	0.386	-0.393	-0.307	1.000							
Y	0.738	-0.195	-0.840	0.002	0.307	-0.329	1.000						
Zr	-0.163	-0.207	-0.078	-0.173	0.342	0.159	0.041	1.000					
Ba	-0.082	0.238	0.345	0.208	0.204	0.383	-0.419	0.296	1.000				
La	0.094	-0.323	-0.417	-0.291	0.420	0.077	0.411	0.682	0.195	1.000			
Pb	0.397	0.172	-0.393	0.595	0.324	-0.054	0.113	0.285	0.347	0.290	1.000		
Th	-0.275	0.008	-0.091	-0.109	0.542	0.162	-0.115	0.778	0.457	0.684	0.495	1.000	
U	-0.366	-0.029	0.223	-0.287	-0.002	0.686	-0.351	0.466	0.731	0.423	0.291	0.550	1.000

Muy Mala	Mala	Regular	Buena	Muy Buena
0 – 0.200	0.200 - 0.400	0.400 – 0.600	0.600 – 0.800	0.800 – 1.000

Figura 31. Correlación de Pearson para Elementos Trazas, (elaboración propia)

4.2.1.4 Diagramas Sílice vs. Álcalis Total (T.A.S.)

El Diagrama en el sistema Sílice-Álcalis Total o T.A.S. (SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), es uno de los esquemas más usados para clasificar las rocas volcánicas y plutónicas, propuesto por Le Maitre et al., 1989.

MUESTRA	ZONA	SiO_2	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
QU-01	Cauquish	58.933	5.410
QU-02	Cauquish	57.187	5.229
QU-03	Cauquish	59.705	5.751
RA-011071	Cauquish	60.107	4.613
RA-011075	Cauquish	60.989	5.287
RA-011078	Cauquish	55.860	6.802
RA-011084	Cauquish	51.577	5.188
CP59	Huangor	60.855	5.509
3PPB710	Quicay	61.808	5.891
CP58	Racco	59.105	5.704
2PPB562	Racco	60.499	5.689

Tabla 7. Datos de Elementos Mayoritarios normalizado a base anhidra (elaboración propia)

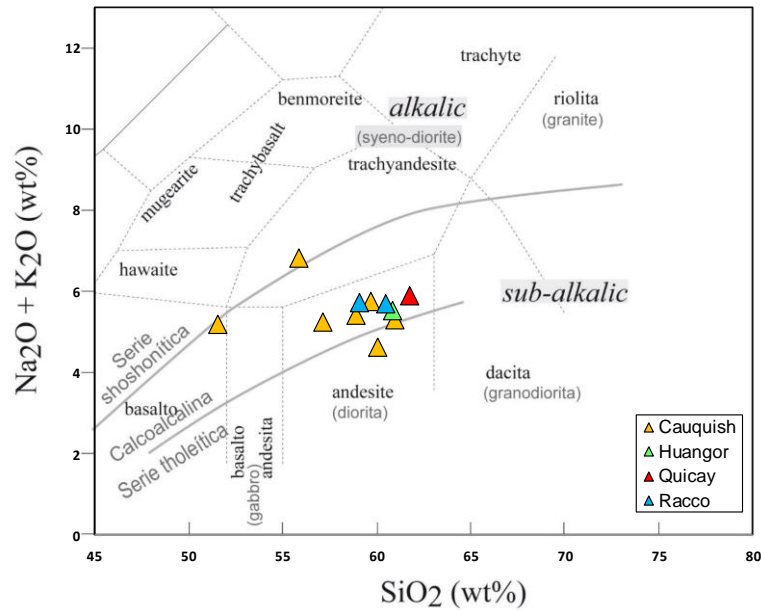


Figura 32. Diagrama de TAS, se puede apreciar la variabilidad de la muestras (elaboración propia)

4.2.1.5 Diagrama de Variación tipo Harker para elementos mayoritarios

Los diagramas donde se grafican el SiO₂ vs. Óxidos mayoritarios, los rangos de variación entre ellos sugieren un grado de evolución por cristalización fraccionada de minerales ferromagnesianos y plagioclasas cálcicas; propuesto por Harker (1909). En la figura 27, se puede apreciar que existe una correlación negativa entre el SiO₂ y los óxidos TiO₂, Al₂O₃, MnO, MgO y CaO y una correlación positiva entre el SiO₂ y el óxido Na₂O.

MUESTRA	ZONA	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
QU-01	Cauquish	58.933	1.113	16.374	0.158	2.813	7.028	2.741
QU-02	Cauquish	57.187	0.927	17.738	0.185	2.896	7.331	2.554
QU-03	Cauquish	59.705	0.978	16.609	0.154	2.819	6.323	3.034
RA-011071	Cauquish	60.107	0.858	17.537	0.197	2.491	6.767	2.274
RA-011075	Cauquish	60.989	1.011	16.481	0.134	1.935	5.959	2.680
RA-011078	Cauquish	55.860	1.161	18.536	0.129	2.393	6.541	2.738
RA-011084	Cauquish	51.577	1.515	17.820	0.167	4.503	7.648	2.257
CP59	Huangor	60.855	0.774	16.802	0.132	2.943	6.365	3.167
3PPB710	Quicay	61.808	0.704	16.720	0.155	2.847	5.560	3.406
CP58	Racco	59.105	0.944	16.322	0.142	3.350	6.831	3.076
2PPB562	Racco	60.499	0.745	16.829	0.134	2.979	6.320	3.258

Tabla 8. Datos de elementos mayoritarios en diagrama de Harker (elaboración propia)

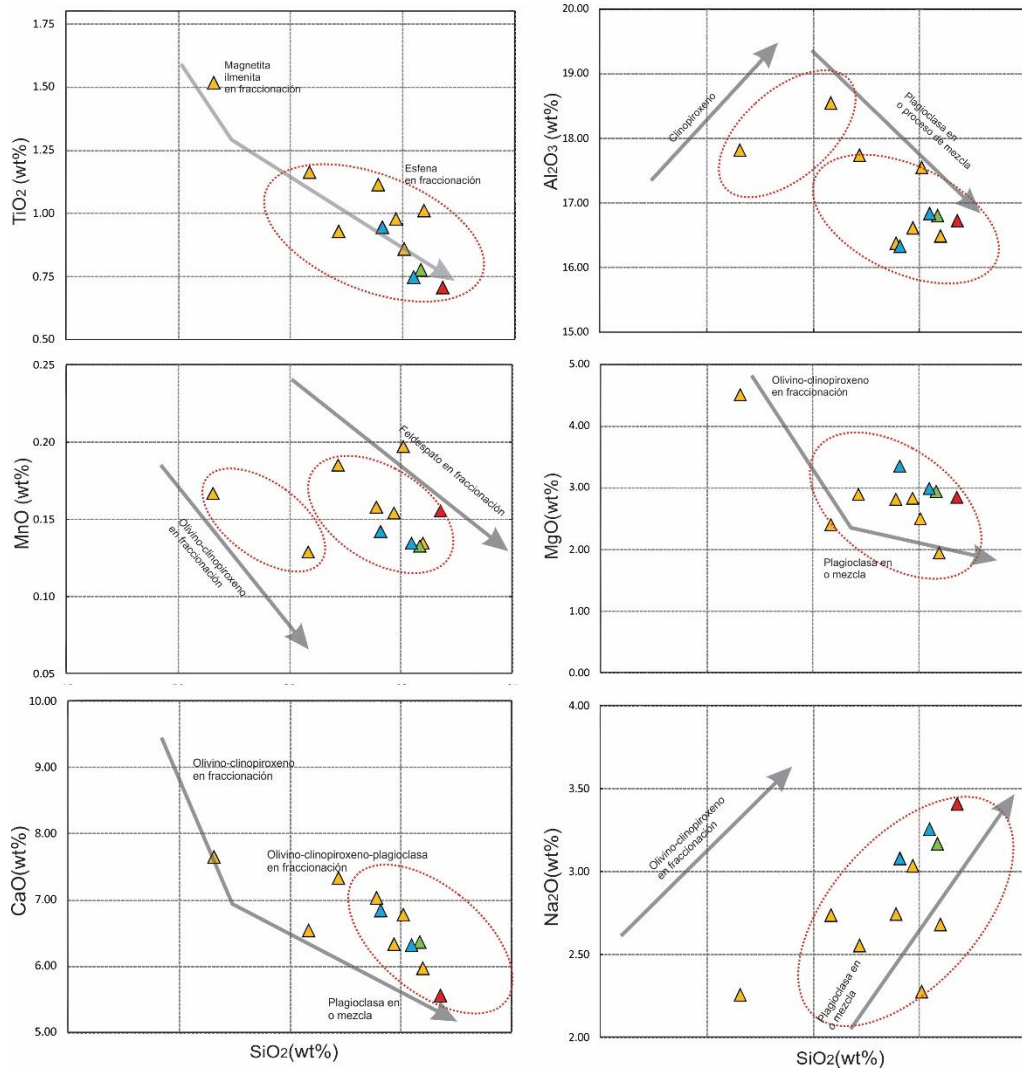


Figura 33. Diagrama de Harker, mostrando las tendencias para los elementos mayoritarios, cuyos valores no varían al azar sino que son interdependientes, mostrando la evolución fraccionada del magma inicial (elaboración propia).

4.2.1.6 Diagrama De la Roche (R1 vs R2)

El diagrama De la Roche et al. (1990), propone un esquema de clasificación para rocas plutónicas y sus equivalentes volcánicos, basado en la proporción en milicaciones, lo cual consta de ocho variables (elementos mayoritarios) como parámetro. Esto es importante, ya que involucra varios elementos, por lo tanto la clasificación es más precisa.

Para generar la gráfica, en primer lugar se tendrá que realizar las transformaciones de los óxidos mayoritarios normalizados en base anhidra a porcentaje de milicaciones, se utilizará la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Milicaciones (Óxido)} = \frac{\text{Óxido Normalizado}}{\text{Peso Atómico}} \times 1000$$

Realizada la transformación a milicaciones de cada uno de los elementos mayoritarios, se procede a usar la fórmula propuesta por De la Roche:

R1	4Si – 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)
R2	6Ca – 2Mg + Al

MUESTRA	ZONA	R1	R2
QU-01	Cauquish	2,120.93	1,212.71
QU-02	Cauquish	2,068.21	1,275.97
QU-03	Cauquish	2,072.72	1,142.20
RA-011071	Cauquish	2,467.16	1,191.61
RA-011075	Cauquish	2,297.07	1,056.87
RA-011078	Cauquish	1,583.72	1,182.17
RA-011084	Cauquish	1,655.98	1,391.25
CP59	Huangor	2,207.46	1,156.59
3PPB710	Quicay	2,170.89	1,064.09
CP58	Racco	2,030.12	1,217.25
2PPB562	Racco	2,137.51	1,154.10

Tabla 9. Valores en milicaciones de las muestras (elaboración propia).

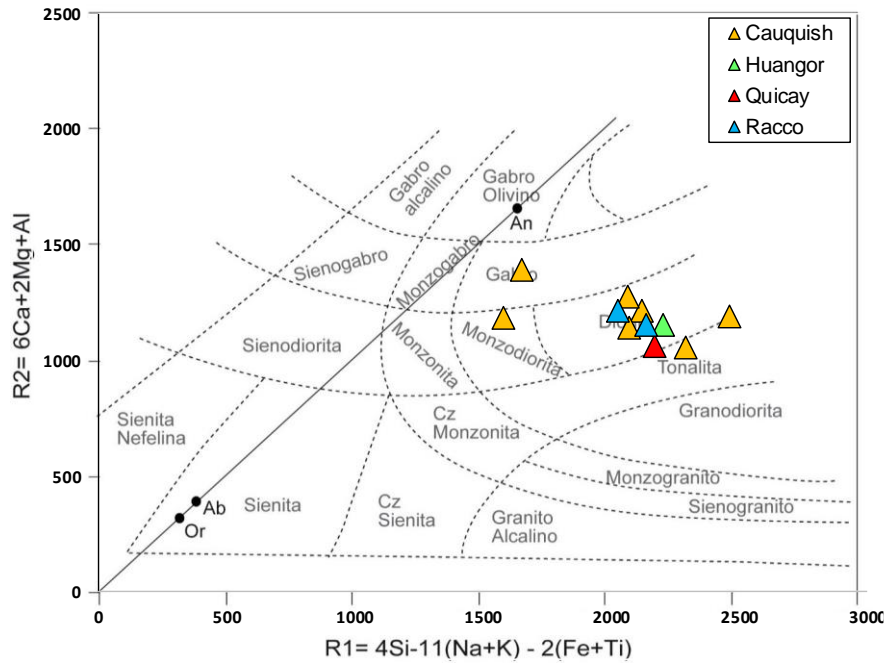


Figura 34. Diagrama De la Roche et al., 1980, mostrando el tipo de roca en la zona de estudio (elaboración propia).

4.2.1.7 Diagrama de Ringwood (SiO₂) vs (K₂O)

La subdivisión de las rocas alcalinas y subalcalinas se realiza usando el diagrama SiO₂ vs. K₂O en rocas de baja, media y alto contenido de alcalinidad.

MUESTRA	ZONA	SiO ₂	K ₂ O
QU-01	Cauquish	58.933	2.669
QU-02	Cauquish	57.187	2.675
QU-03	Cauquish	59.705	2.717
RA-011071	Cauquish	60.107	2.339
RA-011075	Cauquish	60.989	2.607
RA-011078	Cauquish	55.860	4.065
RA-011084	Cauquish	51.577	2.931
CP59	Huangor	60.855	2.342
3PPB710	Quicay	61.808	2.485
CP58	Racco	59.105	2.629
2PPB562	Racco	60.499	2.431

Tabla 10. Datos de elementos mayoritarios de SiO₂ vs K₂O (elaboración propia)

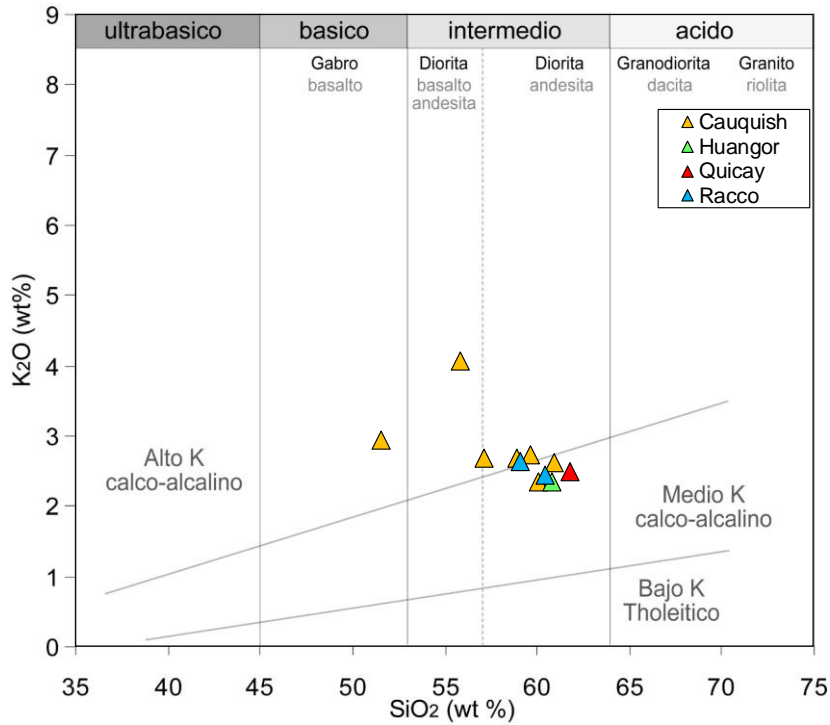


Figura 35. Diagrama de Ringwood (elaboración propia).

4.2.1.8 Saturación de Alúmina o diagrama de Shand

Diagrama propuesto por Shand (1927), mostrando la aluminosidad (índice de saturación de alúmina), los parámetros de clasificación se basan en los óxidos mayoritarios de Al₂O₃, CaO, K₂O y Na₂O, normalizados en concentraciones molares.

Las rocas intrusivas y volcánicas, se clasifican en:

- Peraluminosa: $Al_2O_3 > CaO + Na_2O + K_2O$
- Metaluminoso: $Na_2O + K_2O < Al_2O_3 < CaO + Na_2O + K_2O$
- Peralcalina: $CaO + Na_2O + K_2O > Al_2O_3 < Na_2O + K_2O$

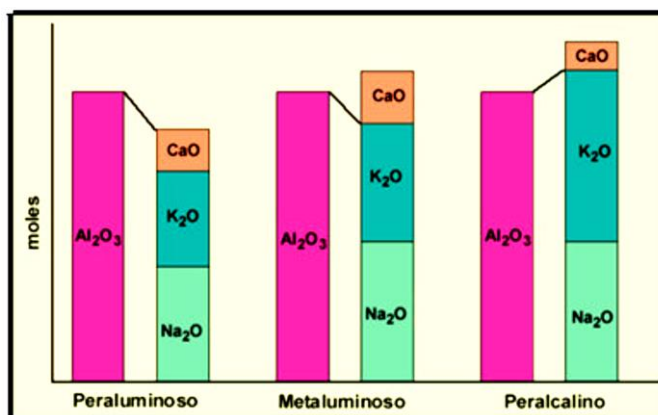


Figura 36. Clasificación del Índice de Saturación de Alúmina según Shand (Rivera Mantilla, 2007)

MUESTRA	ZONA	Al/(Ca+Na+K)	Al/(Na+K)
QU-01	Cauquish	0.81	2.21
QU-02	Cauquish	0.87	2.50
QU-03	Cauquish	0.85	2.09
RA-011071	Cauquish	0.94	2.80
RA-011075	Cauquish	0.91	2.28
RA-011078	Cauquish	0.89	2.08
RA-011084	Cauquish	0.86	2.59
CP59	Huangor	0.87	2.17
3PPB710	Quicay	0.91	2.02
CP58	Racco	0.80	2.06
2PPB562	Racco	0.86	2.11

Tabla 11. Datos de elementos mayoritarios llevados a equivalencias molares, para discriminar la aluminosidad (índice de saturación de alúmina), elaboración propia.

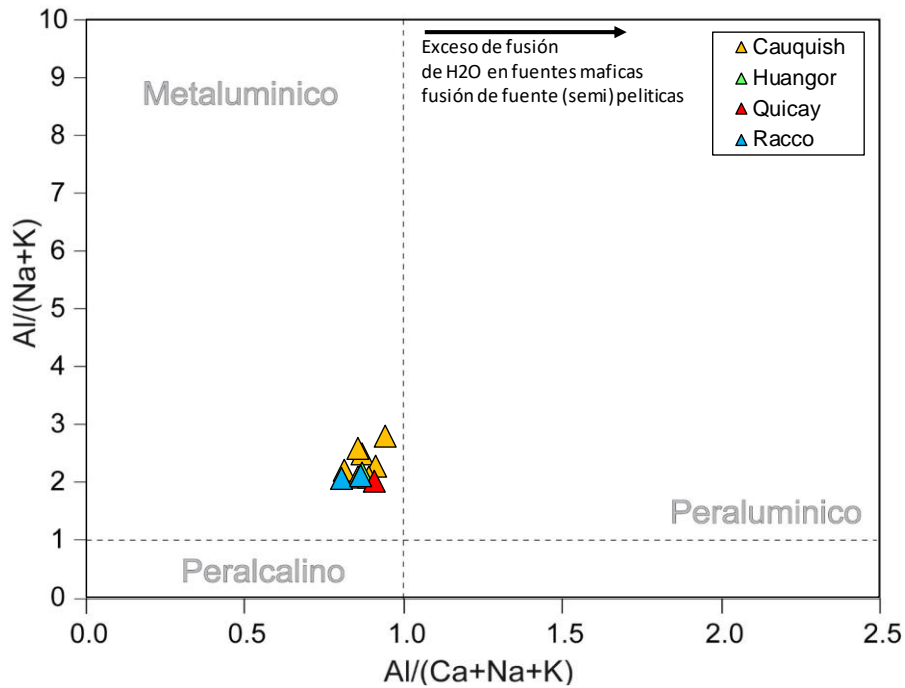


Figura 37. Diagrama para la determinación el Índice de saturación en alúmina en la zona de estudio (elaboración propia)

4.2.2 Geoquímica de Elementos Traza y de Tierras Raras

El contenido de elementos traza permite estimar la composición de la roca parental, los minerales residuales, la secuencia de minerales involucrados en la diferenciación. Específicamente para este estudio se analizaron los patrones y las proporciones (ratios) entre elementos traza utilizando parámetros de diferenciación como la SiO_2 y el Rb, así como las tierras raras ligeras (LREE) en relación a las tierras raras pesadas (HREE) normalizadas al Manto Primitivo (McDonough and Sun, 1995) para los elementos traza y para los elementos de tierras raras se normalizados al Condrito (Sun and McDonough, 1989).

4.2.2.1 Diagrama de variación tipo Haker para elementos traza

De forma similar al comportamiento visto de los elementos mayoritarios, estas tienen una tendencia al aumento en SiO₂.

ZONA	MUESTRA	SiO ₂ (wt%)	Ba (ppm)	Nb (ppm)	V (ppm)	Co (ppm)	Zr (ppm)	Y (ppm)	Sr (ppm)	Rb (ppm)
Cauquish	QU-01	58.933	670.000	10.800	216.000	19.000	112.000	27.400	493.000	102.000
Cauquish	QU-02	57.187	602.000	10.600	168.000	16.000	119.000	27.000	585.000	109.000
Cauquish	QU-03	59.705	559.000	11.400	181.000	15.000	134.000	25.800	504.000	102.000
Cauquish	RA-011071	60.107	596.000	10.100	111.000	10.000	139.000	31.800	507.000	97.000
Cauquish	RA-011075	60.989	554.000	10.500	136.000	14.000	121.000	26.400	507.000	99.000
Cauquish	RA-011078	55.860	679.000	9.500	234.000	18.000	120.000	31.500	507.000	137.000
Cauquish	RA-011084	51.577	401.000	8.400	275.000	13.000	101.000	38.600	466.000	78.000
Huangor	CP59	60.855	564.000	-	-	15.300	113.000	13.900	518.000	86.000
Quicay	3PPB710	61.808	665.361	18.000	127.000	14.400	131.415	16.004	511.000	88.500
Racco	CP58	59.105	551.000	-	-	17.200	130.000	18.900	588.000	94.000
Racco	2PPB562	60.499	714.734	16.680	135.000	16.000	132.326	15.832	551.000	91.600

Tabla 12. Datos para la construcción de diagramas de SiO₂ vs. de elementos menores, (elaboración

propia).

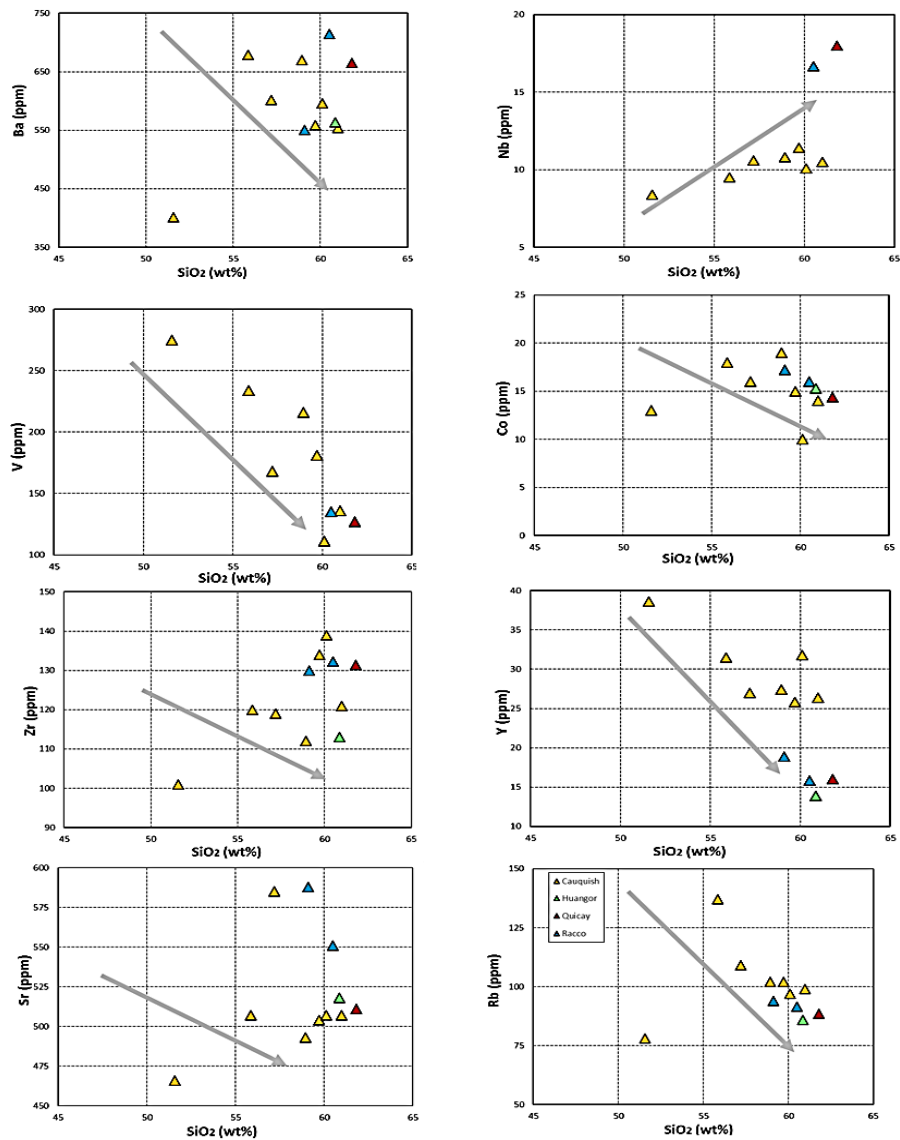


Figura 38. Diagramas de Harker para elementos Traza, (elaboración propia).

4.2.2.2 Diagrama de Rb como índice de diferenciación

El rubidio por su fuerte incompatibilidad durante la diferenciación es escogido como índice de diferenciación, para discutir los porcentajes de los elementos incompatibles (Arcos Alarcón, 2016).

Según Dupuy y Lefevre (1974), en las andesitas de arcos, los elementos Ba-Rb presentan una correlación positiva, mientras que las andesitas de márgenes (Perú-Chile) la correlación Ba-Rb tiene gran dispersión, pudiendo deberse a que las rocas proviene de un

mismo evento volcánico. Esta dispersión es un parámetro que distingue las andesitas de márgenes de las andesitas de arcos, (Arcos Alarcón, 2016).

ZONA	MUESTRA	Rb (ppm)	Y (ppm)	V (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	Ni (ppm)
Cauquish	QU-01	102.000	27.400	216.000	493.000	670.000	-
Cauquish	QU-02	109.000	27.000	168.000	585.000	602.000	-
Cauquish	QU-03	102.000	25.800	181.000	504.000	559.000	-
Cauquish	RA-011069	108.000	32.400	156.000	491.000	583.000	-
Cauquish	RA-011071	97.000	31.800	111.000	507.000	596.000	-
Cauquish	RA-011075	99.000	26.400	136.000	507.000	554.000	-
Cauquish	RA-011078	137.000	31.500	234.000	507.000	679.000	-
Cauquish	RA-011084	78.000	38.600	275.000	466.000	401.000	-
Cauquish	RA-011089	111.000	33.100	187.000	544.000	562.000	-
Cauquish	RA-011134	131.000	26.000	159.000	396.000	488.000	-
Cauquish	RA-011142	132.000	28.900	165.000	486.000	619.000	-
Huangor	CP59	86.000	13.900	-	518.000	564.000	7.900
Quicay	3PPB710	88.500	16.004	127.000	511.000	665.361	5.000
Racco	CP58	94.000	18.900	-	588.000	551.000	4.600
Racco	2PPB562	91.600	15.832	135.000	551.000	714.734	10.000

Tabla 13. Valores para la determinación del Diagrama de Harker, SiO₂ vs elementos menores, (elaboración propia).

La dispersión de las proporciones Rb/Ba muestra un marco tectónico de tipo “margen”, no necesariamente cada muestra pertenece a la misma cámara magmática, de donde se puede inferir la representatividad de las mismas características de origen en un ambiente tectono-magmático válido para cada sistema. Lo más resaltante es el incremento de Rb para las rocas de la zona de Cauquish, lo que conlleva a pensar que este magmático sugiere una ligera diferenciación más alcalina; de forma más selectiva se puede apreciar para los gráficos de Y y V en donde se muestra que las rocas pertenecientes a la zona de Cauquish, presentan un incremento notorio en estos dos elementos sugiriendo una vez más que el magma de la zona de Cauquish difiere ligeramente a las demás zonas.

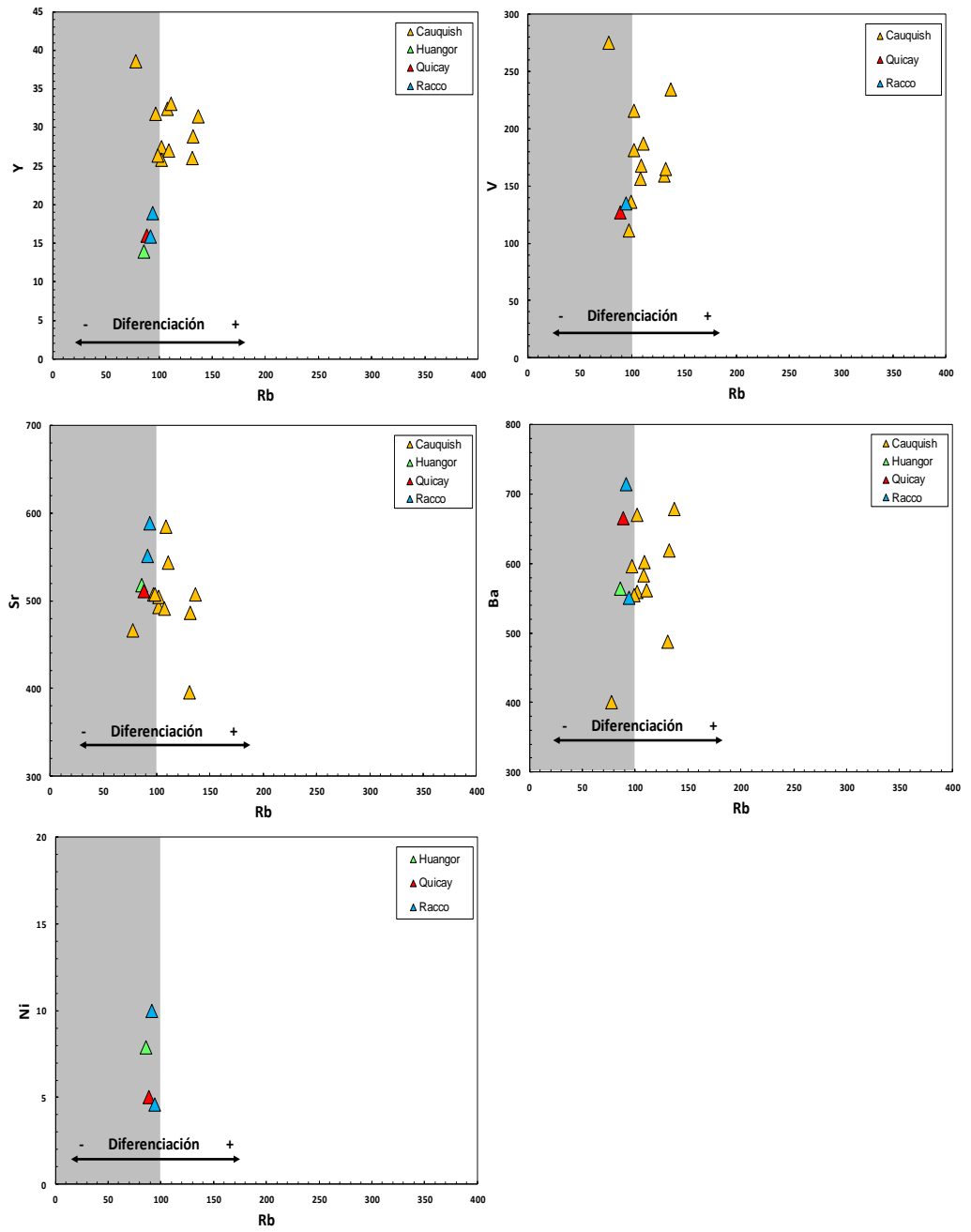


Figura 39. Diagrama en que se toma al Rb como índice de diferenciación, la dispersión de las proporciones Rb/Ba muestra un marco de subducción, (elaboración propia).

4.2.2.3 Diagrama de Tierras Raras Normalizados

El grupo de los Elemento de Tierras Raras (REE), son en general incompatibles (elementos que debido a su gran radio iónico o a su alta valencia no entran fácilmente en las fases sólidas cristalinas del manto o en el magma) y con características químicas muy similares. Las tierras raras se presentan en diagramas multielementales normalizados al condrito. Los valores normalizados se ordenan por orden creciente de números atómicos. Esto equivale a una ordenación por grado decreciente de incompatibilidad para los fundidos generados en el manto (los elementos más incompatibles se encuentran del lado izquierdo y los menos incompatibles del lado derecho).

Los aspectos que hay que tener en cuenta son, la pendiente general de los espectros, los valores absolutos de los contenidos normalizados y la presencia de anomalías, que pueden presentarse en el Eu y el Ce. En procesos magmáticos, el Eu puede ser bivalente o trivalente. Por lo tanto, dado que el resto de las tierras raras son trivalentes, el Eu bivalente presenta un comportamiento diferencial, pudiendo desarrollar anomalías.

Para el presente estudio se utilizaron los valores normalizados Condrito Sun and McDonough (1989):

Element	CI chondrite	Primitive Mantle	N-type MORB	E-type MORB	OIB
Cs	0.118	0.032	0.0070	0.063	0.387
Tl	0.140	0.005	0.0014	0.013	0.077
Rb	2.320	0.635	0.56	5.04	31.0
Ba	2.410	6.989	6.30	57	350
W	0.095	0.020	0.010	0.092	0.560
Th	0.029	0.085	0.120	0.60	4.00
U	0.008	0.021	0.047	0.18	1.02
Nb	0.246	0.713	2.33	8.30	48.0
Ta	0.014	0.041	0.132	0.47	2.70
K	545	250	600	2100	12000
La	0.237	0.687	2.50	6.30	37.0
Ce	0.612	1.775	7.50	15.0	80.0
Pb	2.470	0.185	0.30	0.60	3.20
Pr	0.095	0.276	1.32	2.05	9.70
Mo	0.920	0.063	0.31	0.47	2.40
Sr	7.260	21.1	90	155	660
P	1220	95	510	620	2700
Nd	0.467	1.354	7.30	9.00	38.5
F	60.70	26	210	250	1150
Sm	0.153	0.444	2.63	2.60	10.0
Zr	3.870	11.2	74	73	280
Hf	0.1066	0.309	2.05	2.03	7.80
Eu	0.058	0.168	1.02	0.91	3.00
Sn	1.72	0.170	1.1	0.8	2.70
Sb	0.160	0.005	0.01	0.01	0.03
Ti	445	1300	7600	6000	17200
Gd	0.2055	0.596	3.680	2.970	7.620
Tb	0.0374	0.108	0.670	0.530	1.050
Dy	0.2540	0.737	4.550	3.550	5.600
Li	1.57	1.600	4.3	3.5	5.6
Y	1.57	4.55	28	22	29
Ho	0.0566	0.164	1.01	0.790	1.06
Er	0.1655	0.480	2.97	2.31	2.62
Tm	0.0255	0.074	0.456	0.356	0.350
Yb	0.170	0.493	3.05	2.37	2.16
Lu	0.0254	0.074	0.455	0.354	0.300

Tabla 14. Composición de las concentraciones relativas para los elementos de tierras raras (Sun & McDonough, 1989)

4.2.2.4 Diagrama multielementales tipo Spider

Los diagramas multielementales o diagramas de tela de araña (Spiderdiagrams), normalizados en relación al manto primitivo (MORB), es el más apropiado para los basaltos evolucionados, andesitas y rocas de corteza, en las que el material parental se asemeja más al MORB que al manto primitivo (Rollinson, 1993); nos indica el alto enriquecimiento de K, Rb, Ba, Th (LILE) y bajo contenidos en HFSE (Ta-Yb). El enriquecimiento de estos elementos incompatibles es característico de un manto fuente de tipo enriquecido y/o una contaminación por la corteza continental (Arcos Alarcón, 2016). El relativo enriquecimiento de Sr indica el control de la plagioclasa y es coherente con magmas relacionados a la subducción.

Element	CI	Pyrolite	Pyrolite (normalized to Mg and CI)	+	Element	CI	Pyrolite	Pyrolite (normalized to Mg and CI)	±
Li (ppm)	1.5	1.6	0.45	30	Pd	550	3.9	0.003	80
Be	0.025	0.068	1.16	20	Ag	200	8	0.017	F3
B	0.9	0.30	0.14	F2	Cd	710	40	0.024	30
C	35,000	120	0.0015	F2	In	80	11	0.058	40
N	3,180	2	0.0003	F2	Sn	1,650	130	0.033	30
F	60	25	0.17	F2	Sb	140	5.5	0.017	50
Na	5,100	2,670	0.22	15	Te	2,330	12	0.002	F2
Mg (%)	9.65	22.8	1.00	10	I	450	10	0.009	F3
Al (%)	0.860	2.35	1.16	10	Cs	190	21	0.047	40
Si (%)	10.65	21.0	0.83	10	Ba	2,410	6600	1.16	10
P (ppm)	1,080	90	0.035	15	La	237	648	1.16	10
S	54,000	250	0.002	20	Ce	613	1,675	1.16	10
Cl	680	17	0.011	F2	Pr	92.8	254	1.16	10
K	550	240	0.18	20	Nd	457	1,250	1.16	10
Ca (%)	0.925	2.53	1.16	10	Sm	148	406	1.16	10
Se	5.92	16.2	1.16	10	Eu	56.3	154	1.16	10
Ti	440	1,205	1.16	10	Gd	199	544	1.16	10
V	56	82	0.62	15	Tb	36.1	99	1.16	10
Cr	2,650	2,625	0.42	15	Dy	246	674	1.16	10
Mn	1,920	1,045	0.23	10	Ho	54.6	149	1.16	10
Fe (%)	18.1	6.26	0.15	10	Er	150	438	1.16	10
Co	500	105	0.089	10	Tm	24.7	68	1.16	10
Ni	10,500	1,960	0.079	10	Yb	151	441	1.16	10
Cu	120	30	0.11	15	Lu	24.6	67.5	1.16	10
Zn	310	55	0.075	15	Hf	103	283	1.16	10
Ga	9.2	4.0	0.18	10	Ta	13.6	37	1.16	F5
Ge	31	1.1	0.015	15	W	33	29	0.13	F2
As	1.85	0.05	0.011	F2	Re	40	0.28	0.003	30
Se	21	0.075	0.002	70	Os	490	3.4	0.003	30
Br	3.57	0.050	0.006	F2	Ir	455	3.2	0.003	30
Rb	2.30	0.600	0.11	30	Pt	1,010	7.1	0.003	30
Sr	7.25	19.9	1.16	10	Au	140	1.0	0.003	F2
Y	1.57	4.30	1.16	10	Hg	390	10	0.014	F4
Zr	3.82	10.5	1.16	10	Tl	140	3.5	0.011	40
Nb (ppb)	240	658	1.16	15	Pb	2,470	150	0.026	20
Mo	900	50	0.024	40	Bi	110	2.5	0.010	30
Ru	710	5.0	0.003	30	Th	19	79.5	1.16	15
Rh	130	0.9	0.003	40	U	7.4	20.3	1.16	20

Figura 40. Valores Normalizados para Silicatos de la Tierra "pyrolite" (McDonough & Sun, 1995)

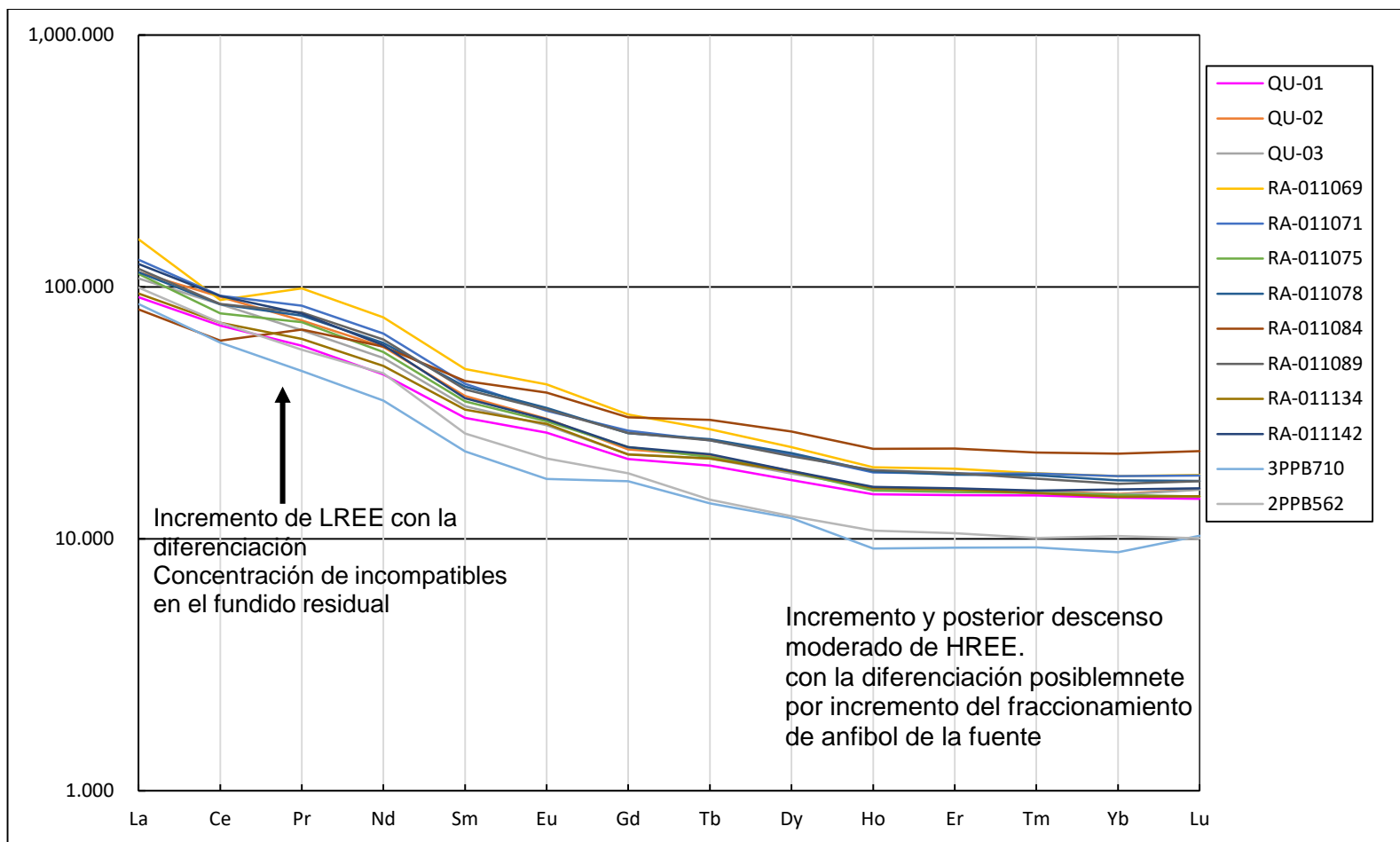


Figura 41. Diagrama de Elementos de Tierras Raras (REE) normalizado al condrito (Sun & McDonough, 1989), se indican las características más resaltantes tales como incremento de LREE con la diferenciación, patrón lítrico (forma de cuchara) e incremento de fraccionamiento de feldespato con la diferenciación, (Elaboración propia)

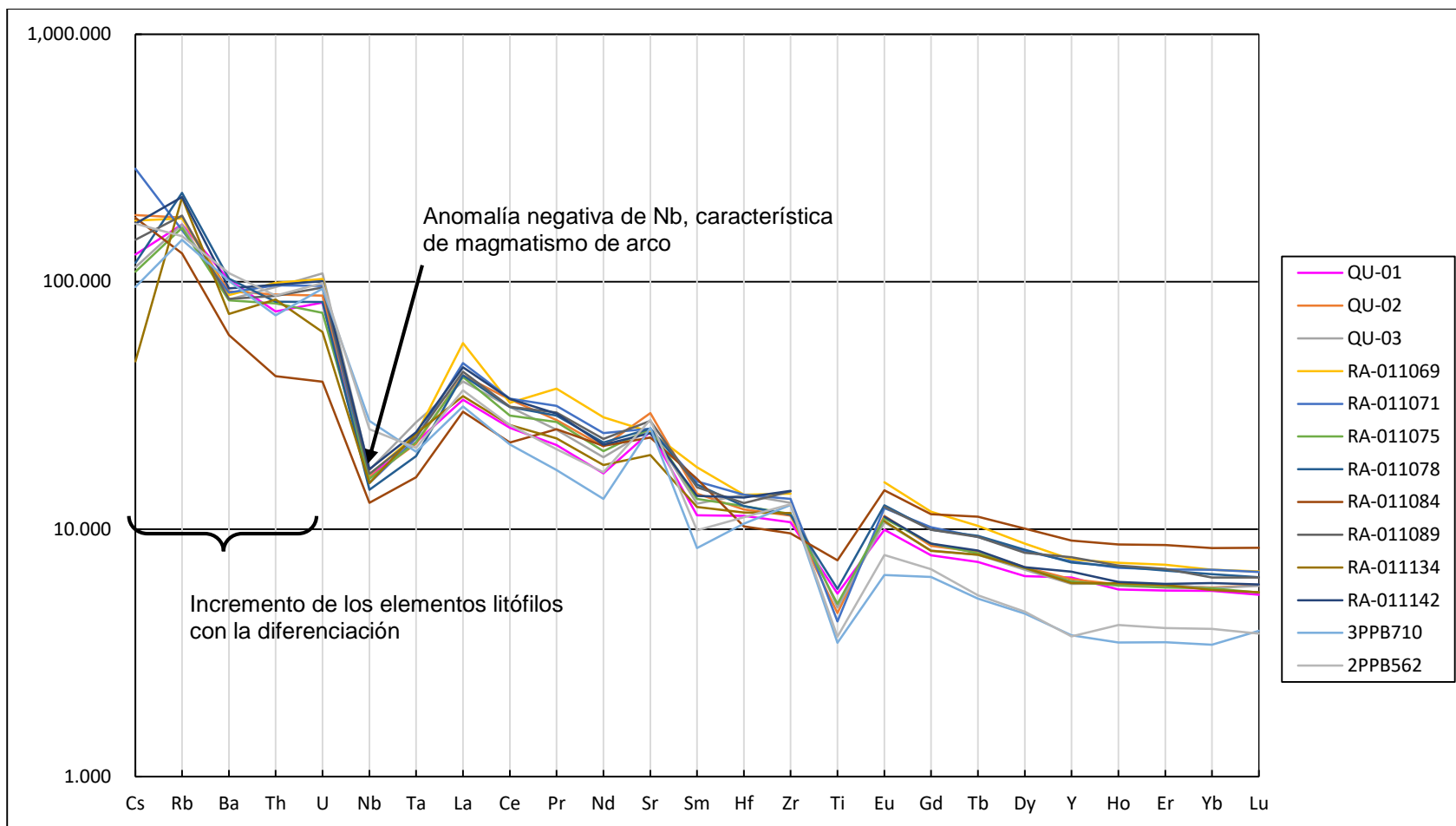


Figura 42. Diagrama Multielementos de Elementos Traza, normalizados a las concentraciones relativas de Silicatos de la Tierra "pyrolite", (Elaboración propia).

4.2.3 Discriminantes de Ambiente Tectónico

4.2.3.1 Profundidad de la Fuente magmática (Ce/Y) vs. (SiO₂)

Este diagrama fue propuesto por Mantle y Collins (2008), lo cual se utiliza para estimar la profundidad de las cámaras magmáticas, donde se generan los magmas, para lo cual se procedió a plotear los datos de (Ce/Y) vs. (SiO₂).

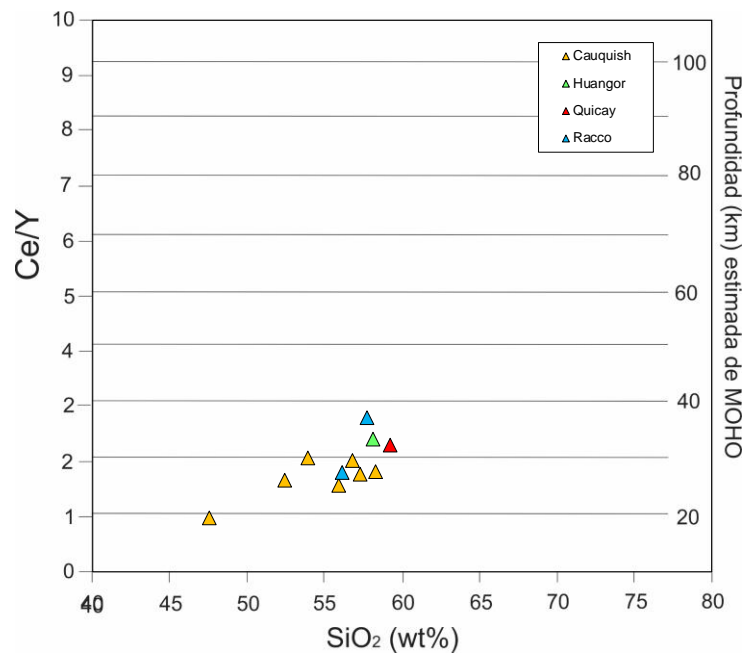


Figura 43. Estimación de la profundidad de la fuente magmática Ce/Y vs. SiO₂, (Elaboración propia)

4.2.3.2 Profundidad de la Fuente magmática (Eu/Eu*) vs. (Ce/Y)

Para estimar la profundidad donde se generaron las cámaras magmáticas, se utilizan valores de (Eu/Eu*) vs. (Ce/Y), tal como lo propusieron Mantle y Collins (2008).

Se usa el Eu/Eu* debido a que la mayoría de los Elementos de Tierras Raras son trivalentes. Por ello el Eu es bivalente, presenta un comportamiento diferencial que produce anomalías que se miden por a razón Eu/Eu*_m definida como:

$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu(n)}{\sqrt{(Sm(n) \times Gd(n))}}$$

4.2.3.3 Engrosamiento Cortical/Razones entre cocientes

Las concentraciones de elementos traza sirven para elaborar diagramas específicos para la petro-génesis. Entre ellos, las concentraciones de Sr y los elementos de tierras raras.

Los diagramas de las razones de los elementos de tierras raras como Sr/Y, La/Sm, Sm/Yb, Dy/Yb y Ce/Y versus el contenido de SiO₂, muestran la diferenciación.

Las variaciones en las razones de Sr/Y, Sm/Yb y Dy/Yb sugieren fraccionamiento y/o cristalización de los minerales residuales como clinopiroxenos, anfíbol y granate, y las variaciones de La/Sm sugieren

fraccionamiento y/o cristalización de plagioclasas (Mamani Huisa, 2009).

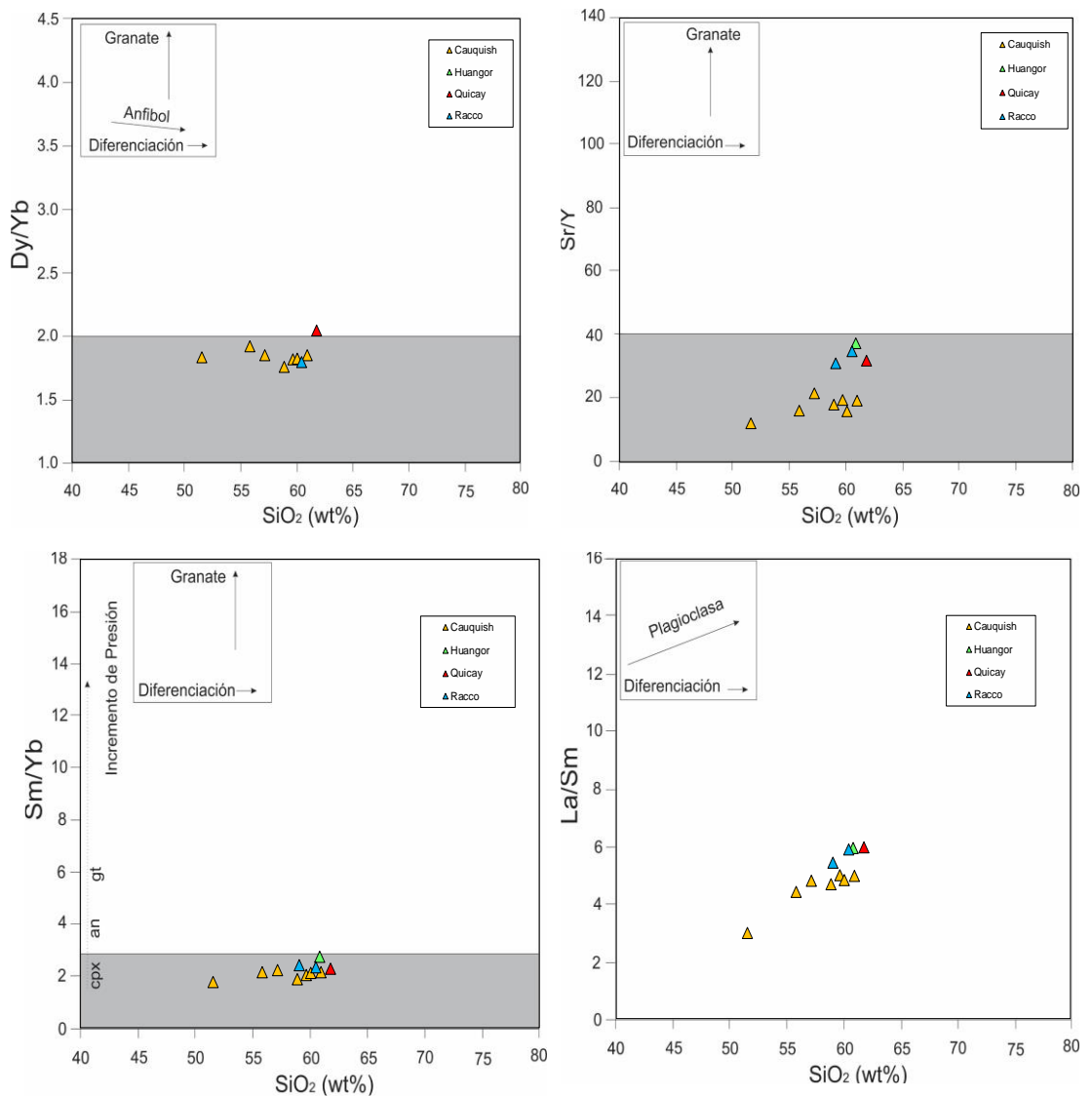


Figura 44. Razones ente cocientes de Sr/Y, La/Sm, Sm/Yb y Dy/Yb vs. SiO₂, (Elaboración propia).

4.2.3.4 Antigüedad de los Magmas (SiO₂) vs. (Sm/Yb)

Este diagrama contrasta la abundancia del SiO₂ vs el ratio o proporción de Sm/Yb, este ratio va a determinar la antigüedad de la roca a nivel de los Andes, es un estándar proporcional, según M. Mamani et al 2010, se determinó que probablemente a mayor valor de Sm/Yb las rocas corresponden a magmas son más recientes,

mientras que a menor valor de Sm/Yb las rocas corresponden a magmas más antiguas.

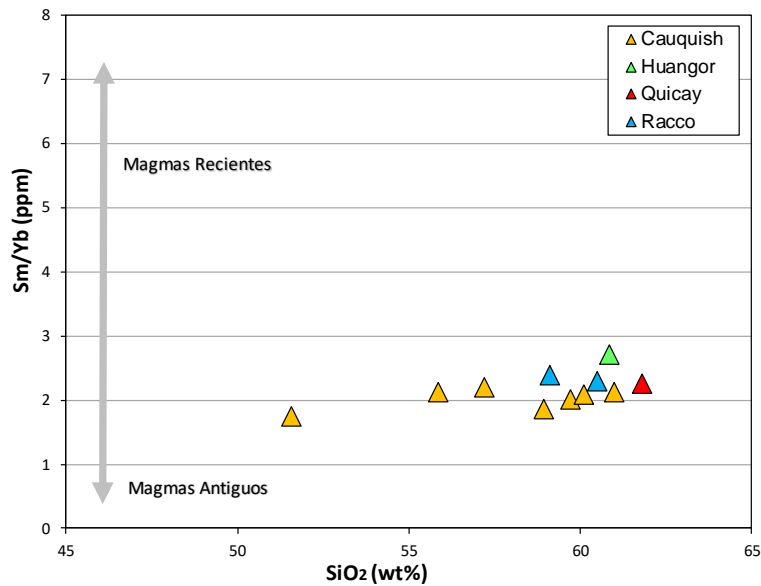


Figura 45. Antigüedad de magmas SiO₂ vs. Sm/Yb, (Elaboración propia)

4.2.4 Geoquímica de Fluidos Hidrotermales y Mineralización

Usando diagramas geoquímicos, se ha estimado las características de los magmas, el grado de oxidación, su contenido de agua y su relación con los fluidos hidrotermales y su asociación a la mineralización.

4.2.4.1 Circulación de Fluidos Hidrotermales (U) vs. (Th)

Los elementos radiactivos U y Th, incrementan sus concentraciones en la corteza superior, lo que a su vez implica que ha habido una mayor contaminación cortical y mayor circulación de fluidos hidrotermales a través de las rocas por lo tanto, este diagrama es importante desde el punto de vista económico.

MUESTRA	ZONA	U	Th
QU-01	Cauquish	1.67	6.03
QU-02	Cauquish	1.78	7.05
QU-03	Cauquish	2.19	7.57
RA-011069	Cauquish	2.08	7.86
RA-011071	Cauquish	1.95	7.69
RA-011075	Cauquish	1.52	6.50
RA-011078	Cauquish	1.68	6.60
RA-011084	Cauquish	0.80	3.30
RA-011089	Cauquish	1.92	6.97
RA-011134	Cauquish	1.27	6.74
RA-011142	Cauquish	2.04	7.73
CP59	Huangor	2.05	6.23
3PPB710	Quicay	1.90	5.82
CP58	Racco	2.25	6.90
2PPB562	Racco	2.00	6.98

Tabla 15. Datos de U vs. Th (Elaboración propia)

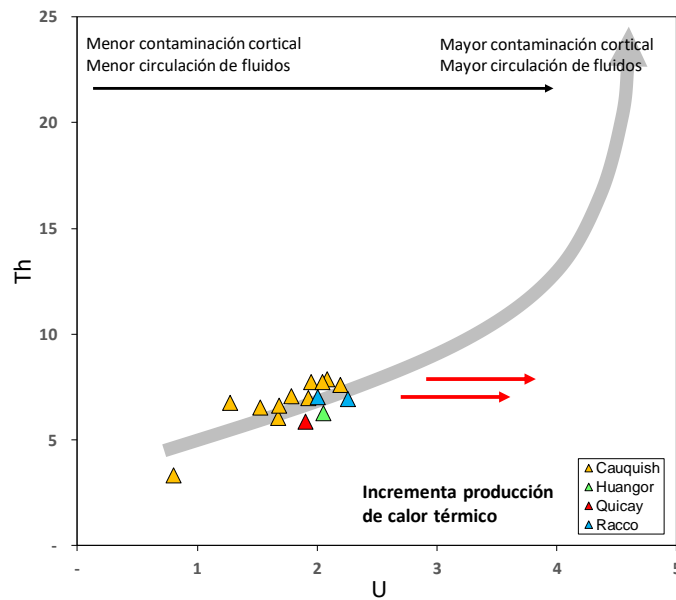


Figura 46. Diagrama de fluidos hidrotermales U vs. Th, (Elaboración propia)

4.2.4.2 Tipos de Magmas Secos o Hidratados ((Al)/(Ca+Na+K) vs. (Eu/Eu*))

Este diagrama permite observar los tipos de magmas con respecto a la saturación de agua, describiendo lo siguiente:

- Los Magmas de composición andesítica pertenecen a zona metaluminosa y se observa un fraccionamiento de plagioclasas.
- Las rocas dacíticas y diques dacíticos se ubican en la etapa de transición con cierta tendencia a ser metalumínicos

MUESTRA	ZONA	Al/(Ca+Na+K)	Eu/Eu*
QU-01	Cauquish	0.812	1.054
QU-02	Cauquish	0.868	1.037
QU-03	Cauquish	0.855	1.048
RA-011069	Cauquish		1.070
RA-011071	Cauquish	0.944	0.967
RA-011075	Cauquish	0.912	1.028
RA-011078	Cauquish	0.891	1.018
RA-011084	Cauquish	0.857	1.061
RA-011089	Cauquish		1.015
RA-011134	Cauquish		1.078
RA-011142	Cauquish		1.032
CP59	Huangor	0.870	
3PPB710	Quicay	0.909	0.891
CP58	Racco	0.803	
2PPB562	Racco	0.864	0.954

Tabla 16. Datos de Magmas hidratados y secos, (Elaboración propia)

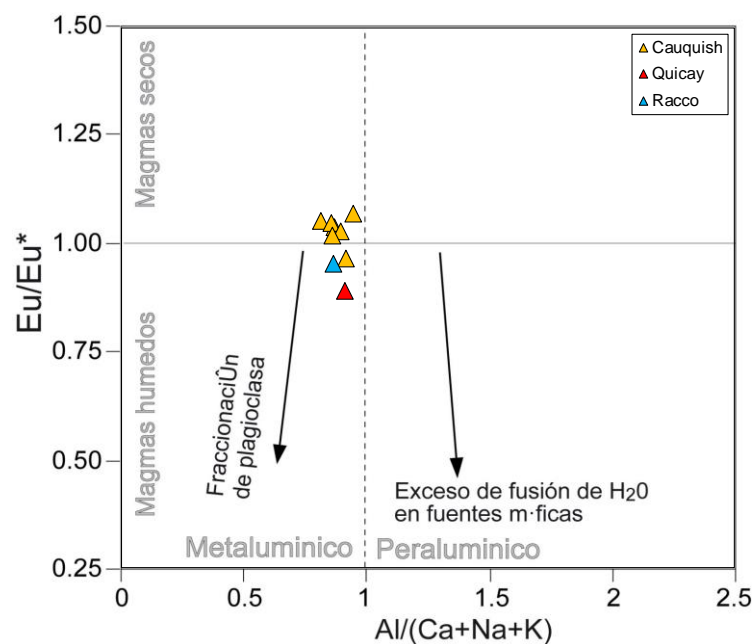


Figura 47. Anomalías de Eu/Eu^* vs. $Al/(Ca+Na+K)$, (Elaboración propia)

4.2.4.3 Estado de Oxidación y Contenido de Agua (Eu/Eu^*) vs. FeO_{total}

Diagrama mostrando el estado de oxidación versus anomalías de Eu/Eu^* , los campos de distribución de las ocurrencias metálicas fueron elaboradas en base a Lang & Baker (2001)

MUESTRA	ZONA	Eu/Eu^*	FeO_{total}
QU-01	Cauquish	1.054	7.102
QU-02	Cauquish	1.037	7.347
QU-03	Cauquish	1.048	6.618
RA-011069	Cauquish	1.070	
RA-011071	Cauquish	0.967	6.353
RA-011075	Cauquish	1.028	7.084
RA-011078	Cauquish	1.018	7.371
RA-011084	Cauquish	1.061	10.134
RA-011089	Cauquish	1.015	
RA-011134	Cauquish	1.078	
RA-011142	Cauquish	1.032	
CP59	Huangor		6.107
3PPB710	Quicay	0.891	5.450
CP58	Racco		6.988
2PPB562	Racco	0.954	5.863

Tabla 17. Diagrama Eu/Eu^* vs. $FeO_{(total)}$, (Elaboración propia).

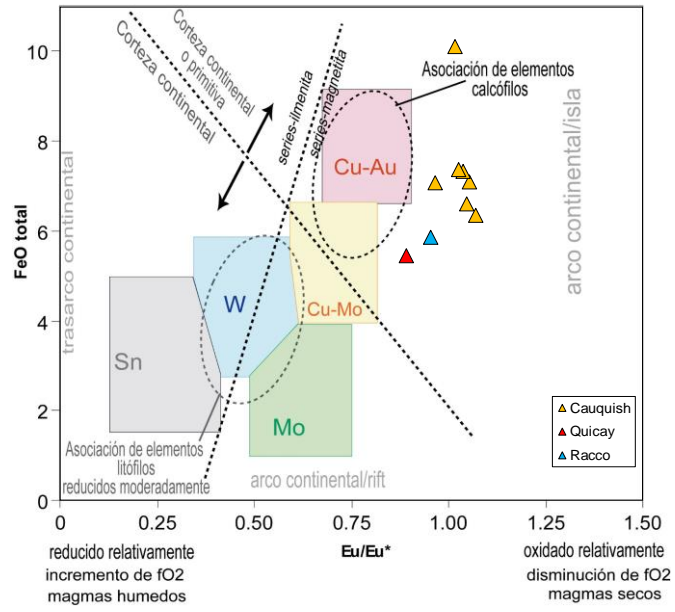


Figura 48. Diagrama de Eu/Eu^* vs $FeO_{(total)}$, (Elaboración propia)

4.3 Prueba de Hipótesis

De acuerdo a los resultados de la caracterización de los diversos diagramas geoquímicos, así como el comportamiento de los diferentes elementos mayoritarios, elementos trazas y elementos de tierras raras, se demuestra que pertenece a un ambiente tectónico de convergencia, además con una relación muy estrecha a los eventos magmáticos de mineralización económica de Cu-Au en la latitud sur ($10^{\circ}38'$ - $10^{\circ}48'$), Cerro de Pasco.

Gracias a los resultados obtenidos lograremos direccionar las posibles tarjets de exploraciones en depósitos ciegos (no descubiertos aún).

4.4 Discusión de Resultados

En términos globales, los resultados obtenidos en este estudio muestran que la composición de los magmas andinos cenozoicos está condicionada principalmente por dos grandes variables: (1) la arquitectura litosférica heredada, y (2) los procesos tectónicos mayores que han moldeado esta litosfera

La ubicación regional de la zona de estudio así como sus características geológicas y geoquímicas y la cercanía al yacimiento minero de Quicay (Au), permitió realizar un intento comparativo con otras estructuras mayores asociadas a yacimientos pórfidos de Cu-Au.

Otro detalle importante es que el contexto geológico para el centro peruano es la presencia de rocas volcánicas de arcos activos que podría ser de gran interés en razón que estas pueden encubrir yacimientos de mayor dimensión (pórfido de Cu-Au).

CONCLUSIONES

1. La geoquímica magmática de los elementos mayoritarios sugiere a través de los diversos diagramas modelados, que las cuatro zonas de estudio, provienen de fuente magmáticas relacionadas a un marco de subducción, con un magmatismo calcoalcalino, esto se confirma con los Diagramas de TAS y De la Roche; los contenidos de K caen en los campos de medio y ligeramente alto, sugiriendo que presentan relativa alcalinidad; respecto a la saturación de Alúmina, todas la muestras caen dentro del campo de Metaluminico.
2. La geoquímica de los elementos trazas tienen un comportamiento similar a los elementos mayoritarios con respecto al diagrama de Harker, presentando una ligera empobrecimiento a medida que el magmatismo se diferencia; respecto al comportamiento del Rb sugiere que el evento magmático de la zona de Cauquish, tiene valores enriquecidos en Y y V, diferenciándose de las demás zonas; en el Diagrama de REE normalizado al Condrito de Sun, se observa un enriquecimiento de las LREE conforme aumenta la diferenciación, el fraccionamiento de feldespato es más notorio en las rocas correspondiente a la zona Cauquish, sugiriendo mayor permanencia en la corteza superior y estabilidad para el fraccionamiento; en el diagrama de Spider multielemental, se observa el incremento en litófilos con la diferenciación.
3. La caracterización de los ambientes tectónico son generalizados para sugiriendo una profundidad media de 20 a 40 km.

4. La circulación de fluidos hidrotermales relacionadas a la mineralización en el centro del Perú, en el ambiente de la subducción de placas, determinada por el diagrama de U vs Th nos muestran que los valores representan una contaminación cortical superior, asimismo el diagrama Eu/Eu^* vs (Ca+Na+K) nos indica que los magmas que dieron origen a estas unidades geológicas son de naturaleza húmeda y estas unidades son de carácter metaluminosa y que puede generar fluidos hidrotermales. La comparación del grado de oxidación dado por la abundancia del Fe_2O_3 total nos indica que ha sufrido mayor oxidación en la etapa de cristalización o por efectos posteriores.
5. La relación geoquímica con respecto a la mineralización fue determinada por el diagrama Eu/Eu^* vs FeO que nos muestra que pertenecen a la serie de la magnetita, es decir son granitos tipo "I" y que mayormente están asociados a los elementos calcófilos (Cu-Au, Au-Zn-Pb-Ag).

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar buenas prácticas de los protocolos de trabajo, en todas las fases del mismo, puesto que una mala práctica influiría negativamente generando interpretaciones erradas.
2. El estudio geoquímico de las rocas es complementario al estudio petrográfico, por lo que es necesario actualizar dichos estudios, con esto tendremos datos más confiables por la precisión y exactitud.
3. Realizar estudios más detallados de la geoquímica de los Elementos Trazas, ya que estos elementos son relativamente inmóviles a ciertos fenómenos exógenos, con lo cual nos brindarán mayor certeza, durante la interpretación.
4. Antes de realizar la caracterización y/o interpretación, validar los datos a través de un control de calidad, para generar interpretaciones muy acertadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arcos Alarcón, F. E. (2016). *Caracterización petrográfica-geoquímica del Grupo Barroso relacionado a la mineralización*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
2. Chirif Rivera, L. H. (2010). *Preparación de Tesis*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
3. Cobbing, J., Quispesivana Q., L., & Paz M., M. (1996). *Geología de los Cuadrángulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
4. Cobeñas Benites, G. R. (2008). *Cinturones Metalogénicos Cenozoicos en Pasco y Huánuco: Tipos de Yacimientos y Naturaleza Geoquímica de los Magmas Asociados*. Lima: Universidad Mayor de San Marcos.
5. Dávila Burga, J. (1999). *Diccionario Geológico*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
6. Dirección General de Promoción y Sostenibilidad , M. (2018). *Perú, Cartera de Proyectos de Construcción de Mina 2018*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
7. Flores R., E. (2002). *Aspectos generales de la Geología del Yacimiento Aurífero de Quicay*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
8. Folguera, Á., & Spagnuolo, M. G. (2010). *De la Tierra y los Planetas Rocosos: Una Introducción a la Tectónica*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
9. García Tovar, G. P. (2009). *Caracterización Geológica, Geoquímica e Isotópica de las Lavas del Estratovolcan Telapón, Sierra Nevada, México*. México: Universidad Autónoma de México.

10. Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes*. London: Wiley-Blackwell.
11. Lago San José, M., & Arranz Yangüe, E. (2005). *Evolución geoquímica, petrogenética y de condiciones geodinámicas de los magmatismos Pérmicos en los Sectores central y Occidental del Pirineo*. Madrid: Ciencias de la Tierra.
12. Mamani Huisa, M. (2009). Variación Geoquímica de las Rocas Ígneas del Neógeno y su relación con los Yacimientos Epitermales en los Andes Centrales. 1-10.
13. McDonough, W. F., & Sun, S. (1995). The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 223 - 253.
14. Minas, S. d. (2018). *Estimación del Potencial Minero Metálico del Perú y su Contribución Económica al Estado, Acumulado al 2050*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
15. Quispe, M. (2013). *Correlación Geoquímica de Eventos Ígneos en el Proyecto Esperanza, Distrito Bolognesi, Departamento Áncash*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
16. Rivera Mantilla, H. (2007). *Introducción a la Geoquímica General y Aplicada*. Lima: UNMSM.
17. Rivera, H., Chira, J., Chacón, N., Suyo, E., & Varillas, C. (2014). Variación Litogeoquímica de los Batolitos de la Cordillera Blanca (Áncach) y Ambo-Oxapampa al sur de Huánuco. *Instituto de Investigación (RIIGEO), GIGMMG-UNMSM*, 81-92.
18. Rodríguez M., R., Cueva Tintaya, E., Carlotto C., V., & Mamani Huisa, M. (2011). *Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet).

19. Rollinson, H. R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Londres, England, England: Pearson Education Limited.
20. Soler, P. (1982). *Distribución de los Elementos Menores y Traza en los Yacimientos de Pb-Zn del centro del Perú*. Lima: Sociedad Geologica del Perú.
21. Sun, S., & McDonough, W. (1989). Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society*, 313 - 345.
22. Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Pearson Educación S. A.
23. Valderrama Mendoza, S. (2018). *Pasos para Elaborar Proyectos de Investigación Científica*. Lima: San Marcos .
24. Wikipedia. (18 de Julio de 2018). *Coeficiente de Correlación de Pearson*.
Obtenido de http://es.m.wikipedia.org/coeficiente_de_Pearson
25. Wikipedia. (30 de Agosto de 2018). *Tabla periódica de los elementos*.
Obtenido de [http://es.m.wikipedia.org/Tabla_periódica_de_los_elementos quimicos](http://es.m.wikipedia.org/Tabla_periódica_de_los_elementos_quimicos)
26. William M. White. (2003). *Geochemistry*. Londres: IMWA, International Mine Water Association.

ANEXOS

Li	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sc	15	16	20	14.4	0	0	11	15	19	27	0	0	0	17.6	0
V	168	181	216	0	127	156	111	136	234	275	165	187	159	0	135
Co	16	15	19	15.3	14.4	13	10	14	18	13	15	17	18	17.2	16
Cr	80	50	110	24.5	10	20	30	60	30	0	40	30	0	20.9	90
Ni	0	0	0	7.9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	4.6	10
Cu	20	30	30	0	30	10	0	10	20	20	20	10	30	0	25
Mo	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4
Zn	120	130	190	0	87	100	80	80	100	100	100	110	90	0	80
W	1.1	3.7	1	0	1	0.9	0.5	0.7	0.7	0.5	0.9	0.9	1.1	0	1
Rb	109	102	102	86	88.5	108	97	99	137	78	132	111	131	94	91.6
Sr	585	504	493	518	511	491	507	507	507	466	486	544	396	588	551
Y	27	25.8	27.4	13.9	16.00404	32.4	31.8	26.4	31.5	38.6	28.9	33.1	26	18.9	15.831925
Nb	10.6	11.4	10.8	0	17.999769	10.9	10.1	10.5	9.5	8.4	11.5	11	10.1	0	16.679887
Zr	119	134	112	113	131.415087	146	139	121	120	101	150	149	122	130	132.325839
Cs	3.9	2.4	2.7	2.97	2	3.7	6	2.3	2.5	3.8	3.6	3.1	1	2.98	3.6
Ba	602	559	670	564	665.361111	583	596	554	679	401	619	562	488	551	714.734105
La	27.1	25.6	21.6	21.4	20.289371	36.6	30.4	26.7	27.1	19.3	29.2	28	22.3	21.7	23.567333
Ce	55.9	52.2	43	33.4	36.80069	54.3	56.4	48.1	52.2	37.5	56.3	52.3	44.1	34	44.116867
Pr	7	6.4	5.55	0	4.401046	9.38	8	6.88	7.31	6.43	7.44	7.52	5.91	0	5.345617
Nd	27	24.4	21	0	16.540785	35.4	30.5	25.8	28	27.1	27.4	28.9	22.7	0	21.216369
Sm	5.65	5.14	4.62	3.6	3.40621	7.22	6.32	5.38	6.15	6.48	5.53	5.99	4.99	4	4.012993
Eu	1.74	1.64	1.53	1.38	1.004296	2.38	1.87	1.7	1.92	2.21	1.73	1.89	1.66	1.37	1.210214
Gd	4.65	4.45	4.26	0	3.483118	6.4	5.53	4.75	5.4	6.25	4.75	5.41	4.44	0	3.744754

Tb	0.8	0.78	0.73	0.49	0.518118	1.02	0.92	0.79	0.93	1.11	0.81	0.92	0.78	0.58	0.534983
Dy	4.73	4.62	4.35	0	3.070658	5.88	5.49	4.69	5.56	6.77	4.72	5.41	4.7	0	3.126886
Ho	0.89	0.9	0.85	0	0.518908	1.09	1.04	0.88	1.05	1.29	0.91	1.06	0.9	0	0.610794
Er	2.59	2.61	2.47	0	1.527197	3.14	3.01	2.54	2.98	3.78	2.63	3.02	2.6	0	1.74432
Tm	0.396	0.391	0.379	0	0.235799	0.465	0.463	0.388	0.456	0.562	0.397	0.442	0.387	0	0.257264
Lu	0.4	0.398	0.366	0	0.261719	0.455	0.453	0.374	0.431	0.567	0.403	0.43	0.375	0	0.255255
Yb	2.56	2.55	2.48	1.33	1.504289	3.02	3.02	2.54	2.9	3.7	2.67	2.81	2.5	1.68	1.743512
Hf	3.4	3.9	3.2	3.02	2.976006	3.9	3.9	3.5	3.5	2.9	3.8	3.6	3.3	3.67	3.158884
Ta	0.82	1	0.83	0.92	0.760991	0.89	0.86	0.83	0.73	0.6	0.91	0.87	0.9	0.91	0.788406
Pb	16	28	19	0	10	10	10	8	9	0	13	11	10	0	10
Th	7.05	7.57	6.03	6.23	5.816016	7.86	7.69	6.5	6.6	3.3	7.73	6.97	6.74	6.9	6.981914
U	1.78	2.19	1.67	2.05	1.9	2.08	1.95	1.52	1.68	0.8	2.04	1.92	1.27	2.25	2
Sn	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1
Ge	1.7	1.6	1.7	0	0	1.6	1.5	1.5	1.7	1.8	1.7	1.6	1.6	0	0
As_	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	6	0	0
Bi	0.5	0.5	0.7	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0	0
Tl	0.96	0.63	0.34	0	0	0.56	0.54	0.18	0.71	0.16	0.6	0.62	0.34	0	0.5
Be	2	2	2	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Ga	22	20	21	0	18	21	20	20	21	20	21	22	19	0	18

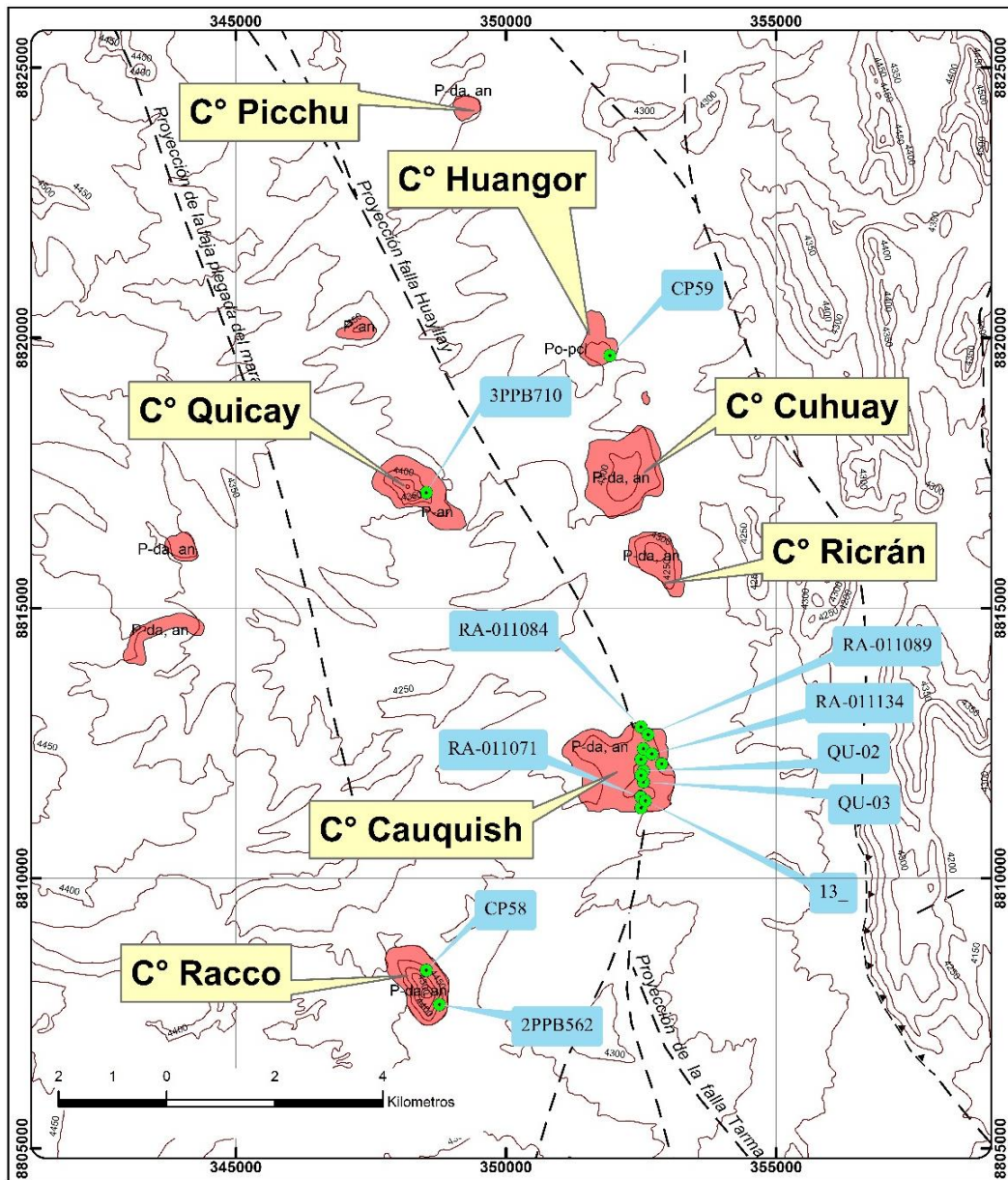
Anexo 2. Elementos químicos con sus números atómicos, (William M. White, 2003)

ATOMIC WEIGHTS OF THE ELEMENTS

<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	<i>Atomic Number</i>	<i>Atomic Weight</i>	<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	<i>Atomic Number</i>	<i>Atomic Weight</i>
Actinium	Ac	89	r	Mercury	Hg	80	200.59
Aluminum	Al	13	26.98	Molybdenum	Mo	42	95.94
Americium	Am	95	r	Neodymium	Nd	60	144.24
Antimony	Sb	51	121.76	Neon	Ne	10	20.18
Argon	Ar	18	39.95	Neptunium	Np	93	r
Arsenic	As	33	74.92	Nickel	Ni	28	58.69
Astatine	At	85	r	Niobium	Nb	41	92.91
Barium	Ba	56	137.33	Nitrogen	N	7	14.01
Berkelium	Bk	97	r	Nobelium	No	102	259.10
Beryllium	Be	4	9.01	Osmium	Os	76	190.23
Bismuth	Bi	83	208.98	Oxygen	O	8	16.00
Boron	B	5	10.81	Palladium	Pd	46	106.40
Bromine	Br	35	79.90	Phosphorus	P	15	30.97
Cadmium	Cd	48	112.4	Platinum	Pt	78	195.08
Calcium	Ca	20	40.08	Plutonium	Pu	94	r
Californium	Cf	98	r	Polonium	Po	84	r
Carbon	C	6	12.01	Potassium	K	19	39.10
Cerium	Ce	58	140.12	Praseodymium	Pr	59	140.91
Cesium	Cs	55	132.91	Promethium	Pm	61	r
Chlorine	Cl	17	35.45	Protactinium	Pa	91	231.04
Chromium	Cr	24	52.00	Radium	Ra	88	r
Cobalt	Co	27	58.93	Radon	Rn	86	r
Copper	Cu	29	63.55	Rhenium	Re	75	186.21
Curium	Cm	96	r	Rhodium	Rh	45	102.90
Dysprosium	Dy	66	162.50	Rubidium	Rb	37	85.47
Einsteinium	Es	99	r	Ruthenium	Ru	44	101.07
Erbium	Er	68	167.26	Samarium	Sm	62	150.36
Europium	Eu	63	151.96	Scandium	Sc	21	44.96
Fermium	Fm	100	r	Selenium	Se	34	78.96
Fluorine	F	9	19.00	Silicon	Si	14	28.09
Francium	Fr	87	r	Silver	Ag	47	107.87
Gadolinium	Gd	64	157.25	Sodium	Na	11	22.99
Gallium	Ga	31	69.72	Strontium	Sr	38	87.62
Germanium	Ge	32	72.61	Sulfur	S	16	32.07
Gold	Au	79	196.97	Tantalum	Ta	73	180.95
Hafnium	Hf	72	178.49	Technetium	Tc	43	r
Helium	He	2	4.00	Tellurium	Te	52	127.60
Holmium	Ho	67	164.93	Terbium	Tb	65	158.93
Hydrogen	H	1	1.01	Thallium	Tl	81	204.38
Indium	In	49	114.82	Thorium	Th	90	232.04
Iodine	I	53	126.90	Thulium	Tm	69	168.93
Iridium	Ir	77	192.22	Tin	Sn	50	118.71
Iron	Fe	26	55.85	Titanium	Ti	22	47.87
Krypton	Kr	36	38.80	Tungsten	W	74	183.84
Lanthanum	La	57	138.91	Uranium	U	92	238.03
Lead	Pb	82	207.2	Vanadium	V	23	50.94
Lithium	Li	3	6.94	Xenon	Xe	54	131.29
Lutetium	Lu	71	174.97	Ytterbium	Yb	70	173.04
Magnesium	Mg	12	24.31	Yttrium	Y	39	88.91
Manganese	Mn	25	54.94	Zinc	Zn	30	65.39
Mendelevium	Md	101	258.10	Zirconium	Zr	40	91.22

r = radioactive, no stable isotopes. Source of data: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 81st ed. (2000)

UBICACIÓN DE MUESTRAS

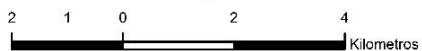
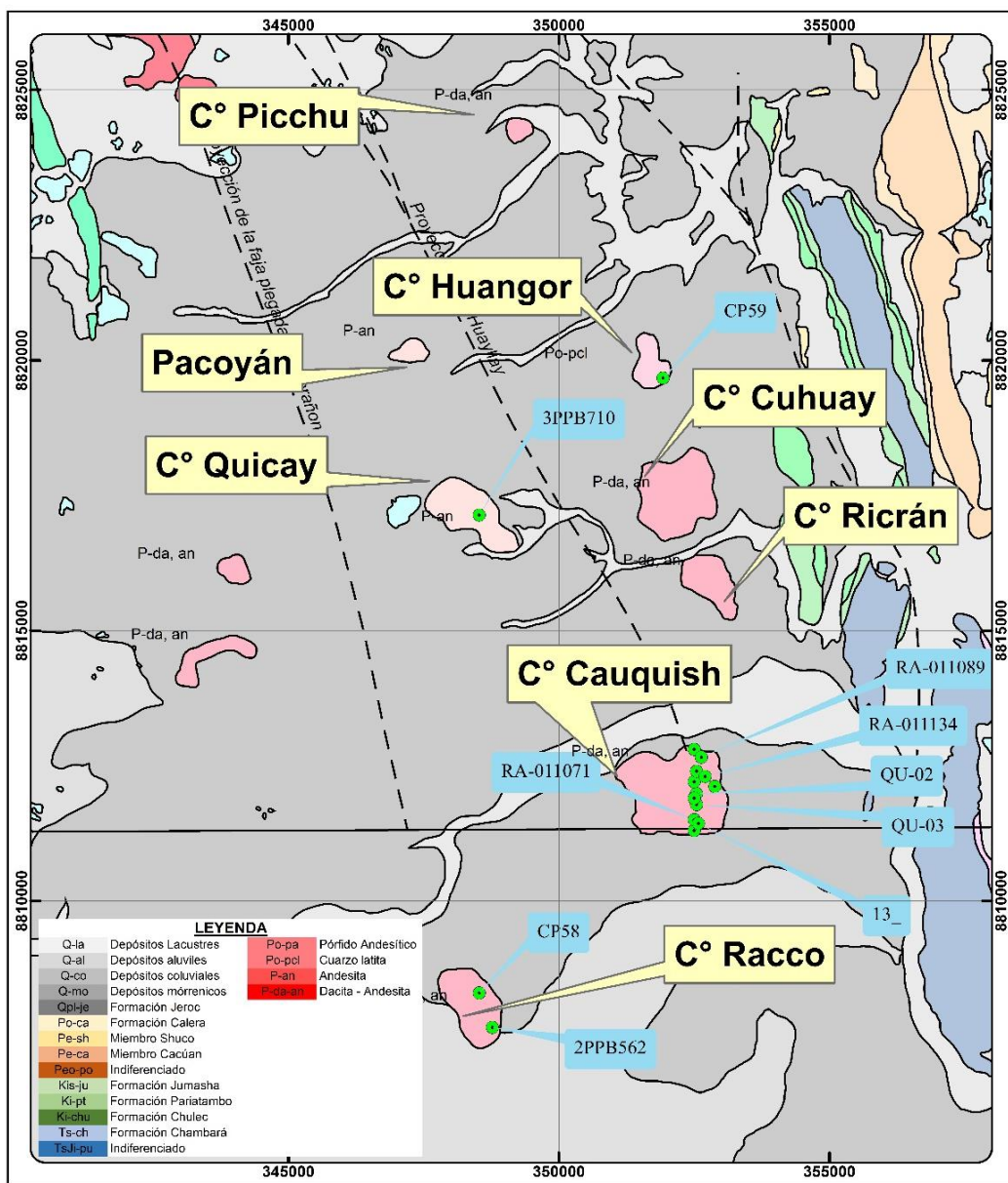


LEYENDA

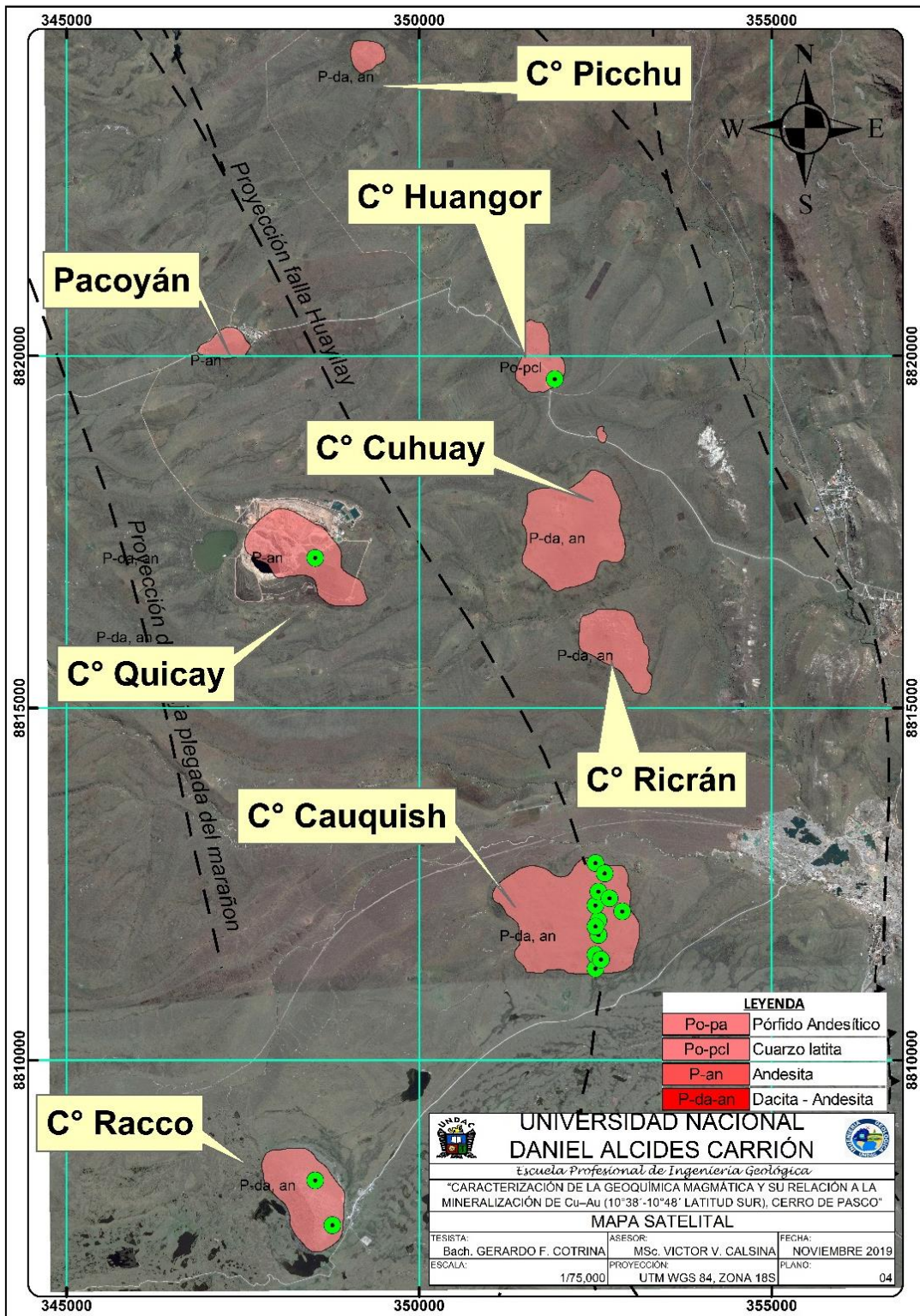
Po-pa	Pórfido Andesítico
Po-pcl	Cuarzo latita
P-an	Andesita
P-da an	Dacita - Andesita
●	Muestras

 UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN <i>Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</i>		
"CARACTERIZACIÓN DE LA GEOQUÍMICA MAGMÁTICA Y SU RELACIÓN A LA MINERALIZACIÓN DE Cu-Au (10°38' -10°48' LATITUD SUR), CERRO DE PASCO"		
UBICACIÓN DE MUESTRAS		
TESISTA: Bach. GERARDO F. COTRINA	ASESOR: MSc. VICTOR V. CALSINA	FECHA: ABRIL 2019
ESCALA: 1/100,000	PROYECCIÓN: UTM WGS 84, ZONA 18S	PLANO: 02

MAPA GEOLÓGICO



 UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN 		
<i>Escuela Profesional de Ingeniería Geológica</i> "CARACTERIZACIÓN DE LA GEOQUÍMICA MAGMÁTICA Y SU RELACIÓN A LA MINERALIZACIÓN DE Cu-Au (10°38'-10°48' LATITUD SUR), CERRO DE PASCO"		
MAPA GEOLÓGICO		
TESISISTA: Bach. GERARDO F. COTRINA	ASESOR: MSc. VICTOR V. CALSINA	FECHA: NOVIEMBRE 2019
ESCALA: 1/100,000	PROYECCIÓN: UTM WGS 84, ZONA 18S	PLANO: 03



C° Pacoyán

C° Picchu

C° Huangor

C° Cuhuay

C° Quicay

C° Ricrán

C° Cauquish

C° Racco

LEYENDA	
Po-pa	Pórfido Andesítico
Po-pcl	Cuarzo latita
P-an	Andesita
P-da-an	Dacita - Andesita


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

"CARACTERIZACIÓN DE LA GEOQUÍMICA MAGMÁTICA Y SU RELACIÓN A LA MINERALIZACIÓN DE Cu-Au (10°38'-10°48' LATITUD SUR), CERRO DE PASCO"

MAPA SATELITAL

TESISTA: Bach. GERARDO F. COTRINA	ASESOR: MSc. VICTOR V. CALSINA	FECHA: NOVIEMBRE 2019
ESCALA: 1/75,000	PROYECCIÓN: UTM WGS 84, ZONA 18S	PLANO: 04