



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Unidad de Posgrado

Modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash y perspectivas de exploración en la costa norte del Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
mención en Recursos Mineros

AUTOR

Orlando BAZÁN SANTA CRUZ

ASESOR

Mg. Jesús Alberto TORRES GUERRA

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Bazán, O. (2022). *Modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash y perspectivas de exploración en la costa norte del Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Orlando Bazán Santa Cruz.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46451463
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7764-9460
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jesús Alberto Torres Guerra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07219691
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8186-5249
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Alfonso Alberto Romero Baylón.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	31625834
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Edgar William Alayo León.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07710165
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Marco Antonio Vásquez Flores.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25607888
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huarmey Distrito: Huarmey Latitud: -10.49902° Longitud: -77.93547°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020 - 2022
URL de disciplinas OCDE	Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geoquímica, Geofísica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los diecisiete días del mes de junio del año 2022, siendo las 11:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000316-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 09 de junio del 2022, con la finalidad de evaluar la sustentación virtual al amparo de la Directiva de la UNMSM aprobada con Resolución Rectoral N°01357-R-20 de la siguiente tesis:

TITULO

«MODELO GENÉTICO DE OCURRENCIAS Fe-Cu-Au EN CERRO COLORADO CHICO, ANCASH Y PERSPECTIVAS DE EXPLORACIÓN EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ»

Que, presenta el Bach. **ORLANDO BAZÁN SANTA CRUZ**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA CON MENCIÓN EN RECURSOS MINEROS**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente digital N° UNMSM-20200013786 del 01 de julio del 2020, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

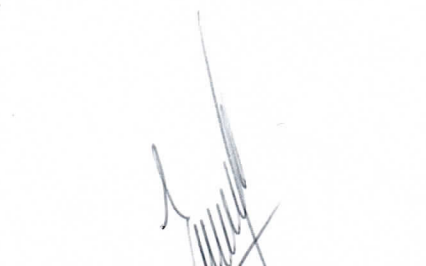
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (17)

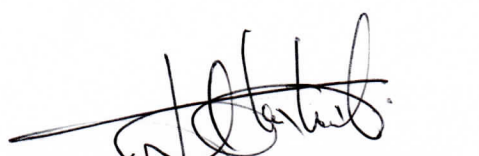
Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA CON MENCIÓN EN RECURSOS MINEROS** al Bach. **ORLANDO BAZÁN SANTA CRUZ**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN
Presidente


MG. EDGAR WILLIAM ALAYO LEÓN
Secretario


MG. MARCO ANTONIO VÁSQUEZ FLORES
Miembro


MG. JESÚS ALBERTO TORRES GUERRA
Asesor

DEDICATORIA

A Agripina, mi compañera de viajes,
quién permaneció junto a mí
y fue mi soporte durante esta travesía.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en especial a los docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica – Unidad de Posgrado, por los conocimientos impartidos durante mi formación profesional.

Un agradecimiento especial al Mg. Jesús Alberto Torres Guerra, mi asesor, quien de manera desinteresada contribuyó con sus conocimientos, y me permitió el acceso a la información recopilada en el marco del proyecto “Estudio del magmatismo Mesozoico y sus implicancias en la determinación de un modelo de exploración geológico estructural relacionado con la ocurrencia de Yacimientos tipo IOCG en la Cordillera de la costa y llanuras pre-andinas de los Andes Peruanos” datos que fueron usados para la presente investigación.

Asimismo, agradezco al Mg. Enrique Guadalupe Gómez por su constante retroalimentación y pertinentes recomendaciones para la eficiente realización de la presente investigación.

También, a los integrantes del SEG Student Chapter UNI por su valioso aporte en la recolección de información de campo, a Miller Fernández por su colaboración en el procesamiento de imágenes satelitales, y a José Cerdán por sus oportunas recomendaciones y comentarios a esta investigación.

Finalmente agradezco de manera personal a mis familiares y amigos por sus consejos y apoyo constante, y al Divino por las muchas bendiciones en mi vida diaria.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
LISTA DE TABLAS:	vii
LISTA DE FIGURAS:.....	viii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema general:	3
1.2.2. Problemas específicos:.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	4
1.4. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	4
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5.1. Objetivo general:	4
1.5.2. Objetivos específicos:.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1.1. Antecedentes Internacionales:.....	6
2.1.2. Antecedentes Nacionales:.....	11
2.1.3. Antecedentes Locales:.....	13
2.2. BASES TEÓRICAS	14
2.2.1. Modelo geológico	14

2.2.1.1. Modelo de depósitos tipo IOCG.....	15
2.2.2. Exploración Geológica de Yacimientos minerales	17
2.2.3. La teledetección como herramienta de exploración geológica.....	17
2.2.4. Exploración Geoquímica	20
2.2.4.1. Tratamiento estadístico de datos geoquímicos	21
2.2.4.2. Análisis composicional de los datos	27
2.2.4.3. Geoquímica de roca total en exploración geológica	28
2.2.5. Petromineraografía como herramienta de exploración	30
2.2.6. Estudio de Inclusiones Fluidas aplicado a la exploración geológica.....	32
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	34
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.2. UNIDAD DE ANÁLISIS.....	34
3.3. POBLACIÓN DE ESTUDIO	34
3.4. MUESTRA.....	35
3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	35
3.6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	35
CAPÍTULO 4: GENERALIDADES.....	37
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ACCESIBILIDAD	37
4.1.1. Propiedad minera.....	37
4.2. GEOMORFOLOGÍA	41
4.2.1. Fisiografía	41
4.2.2. Clima.....	42

4.3. MARCO GEOTECTÓNICO REGIONAL.....	43
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
5.1. ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
5.1.1. Geología local del área de estudio.....	45
5.1.1.1. Litología.....	47
5.1.1.2. Alteraciones hidrotermales.....	51
5.1.1.3. Mineralización.....	56
5.1.1.4. Marco geoestructural.....	59
5.1.2. Signaturas de teledetección.....	63
5.1.2.1. Combinaciones de Bandas.....	63
5.1.2.2. Algebra y ratio de Bandas.....	63
5.1.3. Geoquímica de Suelos.....	71
5.1.3.1. Análisis exploratorio de datos.....	72
5.1.3.2. Parámetros estadísticos.....	74
5.1.3.3. Análisis de componentes principales.....	79
5.1.4. Geoquímica de rocas.....	84
5.1.4.1. Caracterización geoquímica de rocas.....	87
5.1.4.2. Índices de alteración.....	93
5.1.4.3. Caracterización geoquímica de alteraciones.....	100
5.1.4.4. Firmas espectrales de alteraciones.....	106
5.1.5. Características petromineraográficas.....	111
5.1.6. Inclusiones fluidas.....	118
5.1.6.1. Identificación de inclusiones fluidas.....	118
5.1.6.2. Temperatura de homogenización y salinidad de los fluidos.....	124
5.1.6.3. Evolución de fluidos.....	128

5.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS	130
5.2.1. Hipótesis general	130
5.2.2. Hipótesis específicas	130
5.2.3. Variables	131
5.2.4. Contrastación de la hipótesis.	132
5.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	133
5.3.1. Propuesta del modelo genético	133
5.3.2. Perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.....	141
CONCLUSIONES	145
RECOMENDACIONES.....	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

LISTA DE TABLAS:

Tabla 1. Tipo y diseño de la presente investigación	34
Tabla 2. Técnicas e instrumentos usados en la presente investigación	35
Tabla 3. Concesiones mineras dentro del área de estudio	38
Tabla 4. Ratio de bandas ASTER para identificar alteraciones	63
Tabla 5. Índices de Ninomiya para identificar minerales de alteración en imágenes ASTER.....	64
Tabla 6. Elementos reportados mediante la técnica MMI con sus límites de detección y cantidad de datos censurados	73
Tabla 7. Parámetros estadísticos para la población muestral Punta Colorado Chico	75
Tabla 8. Parámetros estadísticos para la población muestral Pampa Canoas.....	76
Tabla 9. Parámetros estadísticos para la población muestral Pampa Bermejo.....	77

Tabla 10. Porcentaje de varianza explicada por cada componente principal.....	80
Tabla 11. Valores escalados de las componentes principales para cada elemento transformado.....	80
Tabla 16. Operacionalización de variables	131

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1. Sección esquemática ilustrando la zonación de alteraciones en depósitos de óxidos de hierro (Cu-U-REE).	6
Figura 2. Subdivisión de la provincia de IOCG en los Andes centrales	7
Figura 3. Diagrama esquemático mostrando el proceso de formación del cuarzo POD.....	8
Figura 4. Modelo de un Sistema bajo en azufre, donde la alteración argílica avanzada está presente en los niveles más someros y envueltos por alteración sericítica formada por HCl derivado de salmueras externas.	9
Figura 5. Modelo de facies de alteración de óxido de hierro-álcali y asociaciones de metales observadas en los sistemas IOCG.....	16
Figura 6. Diagrama del espectro electromagnético.....	18
Figura 7. Reflectancia de algunos materiales de la superficie de la tierra.....	19
Figura 8. Comparación de las bandas espectrales Landsat y Aster.	19
Figura 9. Relación entre anomalía de suelo y mineralización.....	20
Figura 10. Diagrama de cajas de mostrando sus diferentes límites.....	26
Figura 11. Gráfico de relación de elementos molares de $(2Ca + Na + K) / Al$ versus K / Al para rocas volcánicas frescas típicas.....	28
Figura 12. Gráfico de ratios molares Na/Al versus K/Al	29
Figura 13. Gráficos de Sc versus Th , Ti , V y Nb en rocas ígneas.....	30
Figura 14. Tabla de Michel-Lévy mostrando rangos de birrefringencia de los principales minerales.....	31
Figura 15. Clasificación de Inclusiones fluidas según Nash (1976).....	32

Figura 16. Diagrama temperatura de homogeneización vs. salinidad ilustrando los rangos típicos para un conjunto de depósitos.....	33
Figura 17. Plano de ubicación de la zona de estudio.....	39
Figura 18. Plano de catastro minero de la zona de estudio.	40
Figura 19: Plano geomorfológico del área de estudio.....	41
Figura 20. Clima anual según la estación meteorológica del distrito de Paramonga.....	42
Figura 21. Mapa de dominios tectónicos en la región central del Perú.	44
Figura 22. Sección esquemática a través de las unidades del Batolito de la Costa en el flanco norte del valle Fortaleza, localizado entre Huarmey y Barranca..	44
Figura 23. Mapa Geológico del área del prospecto Cerro Colorado Chico, describiendo Litología, Alteración y Estructuras.	46
Figura 24. Correlación entre la columna estratigráfica de Paramonga - Huarmey (a la izquierda) y la columna estratigráfica local en el prospecto Cerro Colorado Chico (derecha).....	48
Figura 25. Tonalita equigranular textura fanerítica del Batolito de la Costa, que aflora hacia el Este de la zona de estudio.	49
Figura 26. Foto panorámica en la zona de Pampa Bermejo, vista hacia el sureste, donde se observa la secuencia volcanoclástica suprayaciendo a un nivel lávico de andesitas.	49
Figura 27. Vista panorámica del enjambre de diques andesíticos cortando a la secuencia volcanoclástica.	50
Figura 28. Foto panorámica en la zona de Cerro Colorado Chico, con vista hacia el norte, donde se observa un stock diorítico argilizado y hematitizado que corta a las rocas volcanoclásticas y es cortados por un stock granodiorítico.....	50
Figura 29. Vista panorámica hacia el suroeste, donde se observa aforamiento de cuerpo de sílice (cuarzo POD) cortando a la secuencia volcano-sedimentaria alterada.	52
Figura 30. Foto panorámica en Pampa Colorada, con vista hacia el este donde se observa un halo con fuerte hematitización rodeando al cuerpo de sílice, y el halo clorítico distalmente.	52

Figura 31. Ferricreta con hematita, goetita y yeso, en la zona de Pampa Colorada.	53
Figura 32. Foto panorámica con vista hacia el noroeste donde se aprecia la continuidad de los cuerpos síliceos asociados a la falla Cerro Colorado hacia el noroeste cortando a la secuencia volcano-sedimentaria.	53
Figura 33. Muestras de mano de alteraciones hidrotermales en Cerro Colorado Chico.	55
Figura 34. Foto panorámica con vista hacia el noreste. Se observa Cuerpos de sílice y veta de sílice – hematita de orientación noreste que cortan a la secuencia de volcanoclastos y andesitas y diques de orientación noroeste.	56
Figura 35. Vista de un cuerpo hematitizado cortando a la secuencia volcanoclásticas y diques andesíticos.	57
Figura 36. Muestras de mano de mineralización en Cerro Colorado Chico.	57
Figura 37. Sección esquemática con vista al SE del sector norte del prospecto Cerro Colorado Chico. Elaboración propia	58
Figura 38. Detalle del mapa geológico de la zona norte del área de estudio	60
Figura 39. Fotografía panorámica con vista hacia el Este, donde se observa un enjambre de diques que se cortan entre sí, y desplazados por fallas posteriores.	60
Figura 40. Interpretación estructural a partir de datos geofísicos, magnetometría y espectroscopía.	61
Figura 41. Secciones geológicas. Arriba: mapa geológico de referencia con las líneas de sección. Abajo: secciones interpretadas: AA', BB', CC' y DD'.	62
Figura 42. Plano de alteraciones usando la combinación de bandas ASTER RGB: 4-6-1.	65
Figura 43. Plano de alteraciones usando la combinación de bandas ASTER RGB: 1-3-5.	66
Figura 44. Plano de alteraciones usando ratio de bandas ASTER de acuerdo a la tabla N°4.	68

Figura 45. Plano de alteraciones usando álgebra de bandas ASTER con los Índices de Ninomiya de la tabla N° 5.	69
Figura 46. Plano de minerales de alteración usando SAM.	70
Figura 47. Plano de distribución de muestras de suelo.	71
Figura 48. Anomalías de Cobre en suelos, los valores de los umbrales por población muestral se especifican en las tablas 6, 7 y 8.	78
Figura 49. Anomalías de Oro en suelos, los valores de los umbrales por población muestral se especifican en las tablas 6, 7 y 8.	78
Figura 50. Gráfica de sedimentación de los valores propios (eigenvalue) para las 17 variables analizadas.	79
Figura 51. Mapa de distribución de PC1 en las zonas muestreadas Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo. La barra de colores muestra los umbrales por percentiles.....	81
Figura 52. Mapa de distribución de PC2 en las zonas muestreadas Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo. La barra de colores muestra los umbrales por percentiles.....	82
Figura 53. Gráfica de cargas y puntuaciones de las componentes principales PC1-PC2.....	83
Figura 54. Plano de distribución de muestras de roca	85
Figura 55. Mapas geoquímicos, mostrando las anomalías de Cu, Au, V y Ti en rocas.	86
Figura 56. Diagrama binario Sc Vs Ti.	87
Figura 57. Diagrama binario Sc Vs V.....	88
Figura 58. Diagrama binario Sc Vs Cr	89
Figura 59. Diagrama binario Sc Vs Al.....	90
Figura 60. Diagrama AFM para discriminar series magmáticas en rocas ígneas.....	91
Figura 61. Diagrama ternario para discriminar el ambiente tectónico de rocas ígneas.....	91
Figura 62. Diagrama ternario de Cationes de Jensen para clasificación de rocas ígneas.....	92
Figura 63. Diagrama de discriminación de alteraciones en función del ratio molar Na/Al Vs K/Al.....	93

Figura 64. Diagrama extendido de discriminación de alteraciones en función del ratio molar Na/Al Vs K/Al.	94
Figura 65. Diagrama de caja de rocas alteradas usando los índices CCPI y Al.	95
Figura 66. Diagrama de discriminación de alteraciones en rocas volcánicas	96
Figura 67. Diagrama ternario Al-K-Mg, mostrando los trends de alteración en sistemas magmático-hidrotermales.	96
Figura 68. Diagrama S Vs Fe, mostrando la línea de Pirita.	97
Figura 69. Diagrama ternario Ca-Fe-S.....	98
Figura 70. Plano de distribución de muestras con alteración hidrotermal.	99
Figura 71. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración en ppm de elementos calcófilos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn para las muestras alteradas.....	101
Figura 72. Diagramas de cajas de la concentración en ppm de elementos calcófilos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn para muestras alteradas.	102
Figura 73. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración de elementos litófilos Al, Ti, Sc, Sr, Ba, V para las muestras alteradas.	103
Figura 74. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración de elementos siderófilos Fe, Co, Ni, Mn para las muestras alteradas.	104
Figura 75. Variación de elementos traza en un sistema magmático-hidrotermal. Mostrando el posible nivel donde se encuentra Cerro Colorado Chico.	105
Figura 76. Firma espectral de muestras de la zona Pampa Bermejo.	107
Figura 77. Firma espectral de muestras de la zona Cerro Colorado Chico.....	108
Figura 78. Firma espectral de muestras de la zona Pampa Colorada.	109
Figura 79. Firma espectral de muestras de la zona al noroeste de Pampa Colorada..	110

Figura 80. Micrografía de muestra con alteración cuarzo-sericita- óxidos de hierro.....	112
Figura 81: Micrografías de tres generaciones de cuarzo, y óxidos de hierro relleno de cavidades y venillas.	113
Figura 82: Micrografías con las diferentes manifestaciones de óxidos de hierro.....	115
Figura 83: Micrografías de sulfuros con óxidos de hierro.	116
Figura 84. Secuencia paragenética de los principales minerales de alteración y opacos en Cerro Colorado Chico.....	116
Figura 85. Difractogramas de cuatro muestras con los respectivos minerales identificados.....	117
Figura 86. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de sílice oquerosa	119
Figura 87. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha de sílice.	121
Figura 88. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha craquel de cuarzo con cemento de óxidos.....	122
Figura 89. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha de hematita.....	123
Figura 90. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la primera muestra para los 3 campos estudiados.....	125
Figura 91. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la segunda muestra para los 3 campos estudiados.....	126
Figura 92. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la tercera muestra para los 3 campos estudiados.....	127
Figura 93. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la cuarta muestra para los 3 campos estudiados.....	128

Figura 94. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización mostrando los procesos de evolución de los fluidos hidrotermales.	129
Figura 95. Modelo teórico del depósito Cerro Colorado Chico. Elaboración propia.	136
Figura 96. Génesis del depósito Cerro Colorado Chico. Elaboración Propia.....	137
Figura 97. Diagramas de estabilidad para minerales de alteración mostrando los campos de los ensambles observados en Cerro Colorado Chico.	139
Figura 98. A la izquierda (A): composición de fundidos inmisible, uno rico en Si y otro rico en Fe que se fraccionan a partir de un fundido toleítico. A la derecha (B): Diagrama de fases de actividad de SiO ₂ Vs T°, mostrando el campo de estabilidad de los ensambles observados en Cerro Colorado Chico.	140
Figura 99. Modelo idealizado para sistemas magmático-hidrotermales relacionados a mineralización IOCG en Perú.	141
Figura 100. Plano geológico de la costa norte del Perú mostrando las unidades geológicas del Cretácico.....	143
Figura 101. Imagen Land Sat de la costa norte del Perú mostrando el ratio de bandas B4/B3, en rojo y magenta se muestra las zonas con presencia de óxidos de fierro.....	144

RESUMEN

La presente tesis investiga las ocurrencias de Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, ubicado al sur de la región Ancash, teniendo como objetivo evaluar el modelo genético de dichas ocurrencias y establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú; para lo cual se ha realizado cartografía geológica, geoquímica de suelo y rocas, análisis de imágenes Landsat 8 y Aster, estudios de petromineraografía, difracción de rayos X, firmas espectrales, e inclusiones fluidas. Las principales características geológicas que se observan en Cerro Colorado Chico son cuerpos silíceos (cuarzo POD) con halos restringidos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita y una extensa alteración sílice-sericita-pirita, brechas y cuerpos de hematita y horizontes hematitizados, que afectan a rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma, y vetas de cuarzo – hematita. Geoquímicamente se observa asociaciones calcófilas y siderófilas en suelos, anomalías de Cu, Au, V y Ti en rocas, rocas alteradas que muestran un enriquecimiento en Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni y empobrecimiento de Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co y Mn. Las inclusiones fluidas muestran temperaturas meso-termales entre 560° y 605° C con salinidades de 44.82% a 47.66% NaCl eq. y epitermales entre 138° y 329° C con salinidades de 0.7% a 9.73 % NaCl-eq con complejos procesos de evolución, enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición. Se concluye que las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, corresponden a un lithocap con alteración sílice-sericita-pirita y hematitización pervasiva, cuerpos silíceos (cuarzo POD) controlados estructuralmente con halos restringidos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita, brechas y cuerpos de hematita y vetas de cuarzo-hematita-óxidos de cobre, probablemente relacionado a un depósito tipo IOCG en profundidad. Este modelo permite establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú siguiendo las consideraciones litológicas, estructurales, geomofológicas, alteración-mineralización y geoquímicas inferidas a partir de las características presentadas en Cerro Colorado Chico.

Palabras Clave:

Cerro Colorado Chico, depósito IOCG, Cuarzo POD, Lithocap.

ABSTRACT

This research is about the occurrences of Fe-Cu-Au in Cerro Colorado Chico, located at south of the Ancash region. The aim is to evaluate the genetic model and to propose new perspectives for exploration on the north coast of Peru; geological mapping, soil and rock geochemistry, analysis of Landsat 8 and Aster images, petromineralogy studies, X-ray diffraction, spectral signatures, and fluid inclusions have been carried out. The main geological features observed at Cerro Colorado Chico are siliceous bodies (quartz POD) with restricted halos of advanced argillic alteration with silica-pyrophyllite-alunite and extensive silica-sericite-pyrite alteration, hematite breccias and bodies, and hematitized horizons in volcano-sedimentary rocks of the Casma Group, and quartz-hematite veins. Geochemically, chalcophilic and siderophilic associations are observed in soils, Cu, Au, V and Ti anomalies in rocks, altered rocks that show an enrichment in Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni and depletion of Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co and Mn. The fluid inclusions show meso-thermal temperatures between 560° and 605° C with salinities from 44.82% to 47.66% NaCl eq. and epithermal between 138° and 329° C with salinities from 0.7% to 9.73% NaCl-eq with complex processes of evolution as cooling, dilution, mixing and boiling. It is concluded that the Fe-Cu-Au occurrences in Cerro Colorado Chico correspond to a lithocap with silica-sericite-pyrite alteration and pervasive hematitisation, siliceous bodies (quartz POD) structurally controlled with restricted halos of advanced argillic alteration silica-pyrophyllite-alunite, hematite breccias and bodies, and quartz-hematite-copper oxide veins, probably related to an IOCG-type deposit at depth. This model allows establishing new prospects for exploration on the north coast of Peru following the lithological, structural, geomorphological, appreciation-mineralization and lower geochemical considerations based on the characteristics presented in Cerro Colorado Chico.

Keywords

Cerro Colorado Chico, IOCG deposit, Quartz POD, Lithocap.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En el mundo entero se ha investigado y documentado las ocurrencias de Fe-Cu-Au asociadas a depósitos minerales tipo pórfido, VMS, Skarn, epitermales, IOCG entre otros, siendo ampliamente conocidos con respecto a sus minerales de mena, ganga, alteraciones, características geoquímicas y geofísicas, peculiaridades petrológicas, geomorfológicas y estructurales, entre otras. Sin embargo y en especial para el caso de depósitos IOCG, desde su definición como un estilo de mineralización (Hitzman, Oreskes, & Einaudi, 1992) han surgido una serie de controversias respecto a su génesis, denominación, ambiente tectónico, asociación con rocas ígneas y características distintivas para su exploración, su asociación y relación con otros depósitos como Skarn e IOA (Iron Oxide – Apatite). Además, Lobo-Guerrero (2004) documentó la ocurrencia de cuerpos de cuarzo, que denominó “Quartz Pods”, probablemente asociados a depósitos tipo IOCG en el arco Lufiliano en las regiones de Zambia y Namibia al sur de África.

En Sudamérica Sillitoe (2003) registró y limitó el cinturón de depósitos IOCG en los Andes Centrales a lo largo de la zona costera de Chile y el Sur del Perú entre Lima y Arequipa, que incluyen a Raúl Condestable, Eliana, Monterrosas, Mina Justa, Marcona, Cobrepampa, Rosa María y Licon, siendo un aporte importante al conocimiento de los depósitos IOCG en los Andes, sin embargo, provocó que se direccionara la exploración de este tipo de depósitos sólo dentro de esa área.

En el Perú, se ha delimitado dos franjas metalogenéticas de IOCG (Acosta et al., 2020), una de edad Jurásica que se extiende hacia el sur entre Ica y Tacna, y la segunda de edad Cretácica inferior, inmediatamente al Este de la primera y se prolonga hacia el Norte por la costa peruana hasta La Libertad. Así mismo, Reyes (2019) documentó las ocurrencias de mineralización de Cu, Au y Fe en diversos lugares entre los paralelos 9° y 12° en la costa norte del Perú, y entre ellas por lo menos 5 ocurrencias de cuarzo PODs que podrían estar relacionadas a depósitos IOCG.

En Cerro Colorado Chico, ubicado al sur de la región Ancash, se presentan ocurrencias de Fe-Cu-Au, asociadas a geoformas positivas con coloraciones rojizas, dentro de rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma que han sido intruídas por cuerpos ígneos del batolito de la Costa, se presentan zonas alteradas con sílice-sericita-pirita, hematización pervasiva, y zonas con clorita-epidota-hematita-calcita distalmente; ocurren brechas de cuarzo, brechas y cuerpos de hematita, y vetas de hasta 3 m de cuarzo con óxidos de Fe, algunas con óxidos de Cu y sulfuros secundarios.

El problema radica en que se desconoce el modelo genético de las ocurrencias de Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, y su implicancia en la exploración de la Costa Norte del Perú.

Existen varias causas de diferente índole, entre ellas consideramos que existe una carencia de exploración en la zona, además existe una limitación direccionada de la exploración por depósitos IOCG hacia el Sur del país, existe, también, poco conocimiento respecto de los cuarzo PODs relacionados a depósitos minerales.

Al conocer el modelo genético de las ocurrencias de Fe-Cu-Au se generará mayores expectativas de exploración en la zona, se despertará el interés de las empresas “*major*” que buscan Cu-Au en el país, y se ampliará el conocimiento de la génesis de depósitos Fe-Cu-Au.

Por lo que consideramos valioso explicar y desarrollar nuevas perspectivas de exploración aplicando nuevas herramientas cualitativas y cuantitativas relacionadas con teledetección, geoquímica, petromineragrafía, e inclusiones fluidas, así como generar nuevo conocimiento sobre depósitos de Fe-Cu-Au tipo IOCG.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema en que se centra la investigación puede ser formulado interrogativamente y se resuelve respondiendo los siguientes cuestionamientos:

1.2.1. Problema general:

¿De qué manera el modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú?

1.2.2. Problemas específicos:

- ¿Cuáles son las características geológicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash?
- ¿De qué manera las firmas de teledetección de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú?
- ¿De qué manera las firmas geoquímicas de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú?
- ¿De qué manera las características petrominerales de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú?
- ¿De qué manera las características de las inclusiones fluidas de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú?

1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Esta investigación cuenta con una justificación teórica porque resume el aporte teórico de los autores más importantes que hacen referencia a los depósitos tipo IOCG y su relación con otros depósitos, además se genera un modelo genético con la aplicación de nuevas perspectivas de exploración, que incluyen nuevas herramientas y procesos, que se puedan aplicar a lo largo de la costa norte del Perú en búsqueda de nuevos depósitos minerales.

1.4. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Esta investigación es necesaria e importante para las empresas dedicadas a la exploración de Fe, Cu y Au en la costa norte peruana, ya que ayudará en la toma eficiente de decisiones con respecto a la búsqueda de blancos exploratorios.

Así mismo, la investigación planteada es provechosa para la comunidad geocientífica, porque los resultados que se obtienen son un aporte al conocimiento científico sobre la aplicación de nuevas perspectivas de exploración y un modelo genético en pro de buscar nuevos depósitos de Fe-Cu-Au. Además, los resultados darán pie a que se continúen los estudios en este campo estudiando otras variables que acá no se han considerado y con otros tipos de depósitos.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general:

Evaluar de qué manera el modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Describir las características geológicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash.
- Analizar de qué manera las firmas de teledetección de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Analizar de qué manera las firmas geoquímicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Analizar de qué manera las características petrominerográficas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Analizar de qué manera las características de las inclusiones fluidas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales:

Hitzman, Oreskes y Einaudi (1992) en su estudio “*Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits*” basados en trabajos en el depósito de Olympic Dam (Cu-U-Au-Ag) al sur de Australia, las brechas de la montaña Wemecke en Yukon, el distrito minero de hierro de Kiruna en Suecia y el distrito minero de hierro del sureste de Missouri y otros; designaron una nueva clase de depósitos como Depósitos de Óxidos de Hierro (Cu-U-Au-REE) Proterozoico, después conocidos como IOCG por sus siglas en inglés (Figura 1).

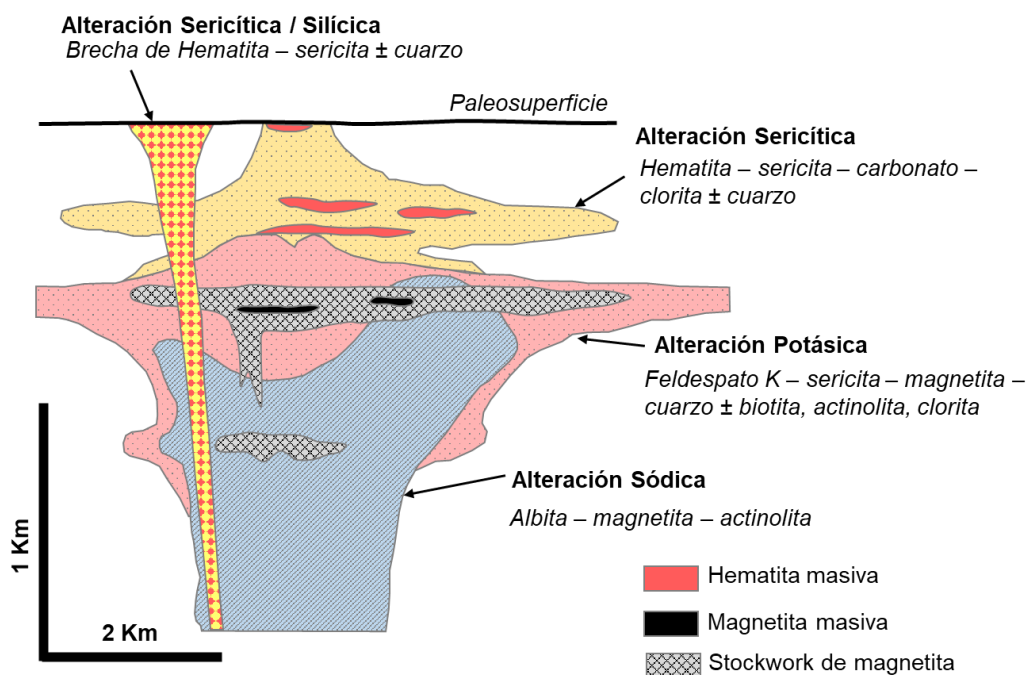


Figura 1. Sección esquemática ilustrando la zonación de alteraciones en depósitos de óxidos de hierro (Cu-U-REE). (Modificado de Hitzman, Oreskes, y Einaudi, 1992)

Sillitoe (2003) en su estudio *“Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view”*. Estudió los depósitos IOCG en los Andes Centrales a lo largo de la zona costera de Chile y el Sur del Perú, donde define que el cinturón IOCG más joven y, por lo tanto, más fácilmente comprensible se encuentra en la Cordillera de la Costa del norte de Chile y el sur de Perú (Figura 2), y sugiere una conexión genética de los depósitos IOCG de los Andes centrales con magmas de gabrodiorita a diorita desde los cuales el fluido mineral puede haber sido canalizado por sistemas de fallas dúctiles a frágiles durante varios kilómetros verticalmente o quizás incluso lateralmente.

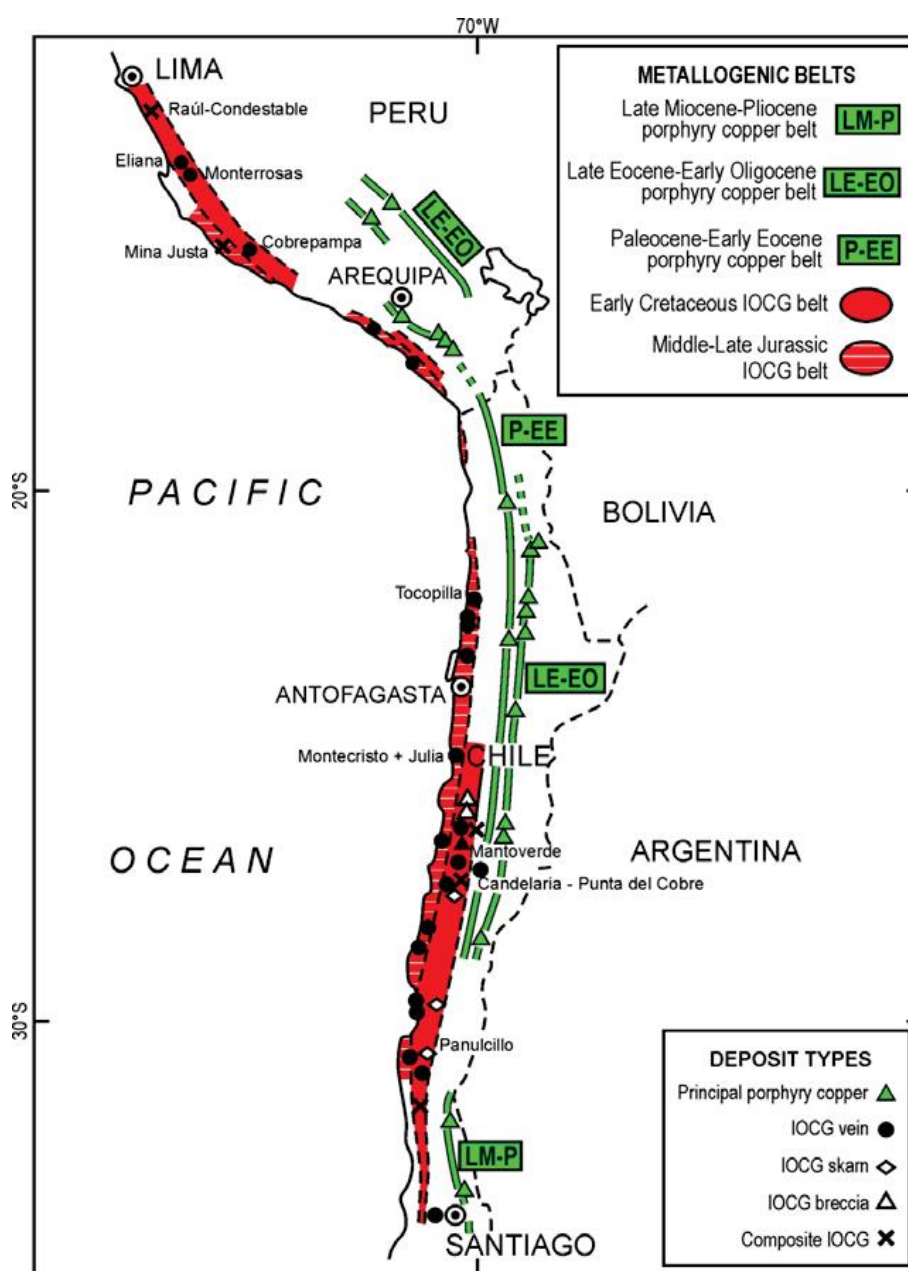


Figura 2. Subdivisión de la provincia de IOCG en los Andes centrales. (Sillitoe, 2003)

Lobo-Guerrero (2005) en su tesis de doctorado “*Pre- and post-Katangan granitoids of the Greater Lufilian arc – geology, geochemistry, geochronology and metallogenic significance*”, presentada a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo, cuyo objetivo principal era definir los diversos granitoides y estudiar su papel en la orogénesis y mineralización de Katangan. Para la cual se recolectaron un total de 1500 muestras en el campo; se analizaron 351 rocas plutónicas, se recopilaron 157 análisis químicos de diversas fuentes bien documentadas, para llegar a un total de 508 muestras analizadas. Se produjeron 38 nuevas dataciones de U-Pb en zircón con SHRIMP II y ICP-MS con ablación láser. El trabajo de campo principal se concentró en el noroeste de Zambia y el norte de Namibia. Como parte de sus resultados reporta un agrupamiento persistente de pequeños cuerpos de granitoides rojos alterados, gabroides, cuerpos masivos de magnetita-hematita y vainas (pods) de cuarzo que están vinculadas a edades alrededor de 550 y 750 Ma. Esta asociación está relacionada con la mineralización de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG), y parece ser una característica de los ambientes anorogénicos de extensión continental. También reportó que las vainas (pods) de cuarzo, los cuerpos de óxido de hierro emplazados hidrotermalmente y las brechas hidrotermales de guijarros redondeados son características que ocurren a menudo dentro y alrededor de los sistemas IOCG en todo el Gran Arco Lufiliano (Figura 3).

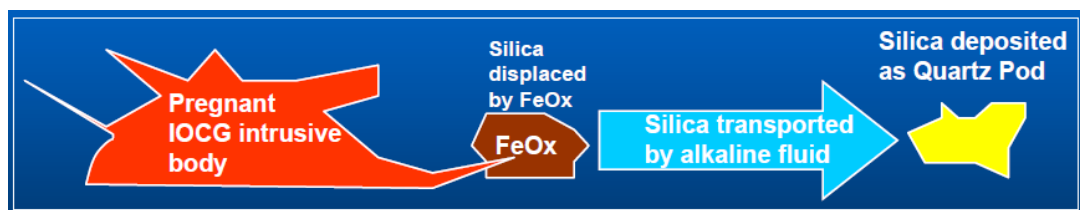


Figura 3. Diagrama esquemático mostrando el proceso de formación del cuarzo POD. (Lobo-Guerrero, 2005)

Kreiner (2011) en su tesis doctoral “*Epithermal style Iron Oxide(-Cu-Au) (=IOCG) vein systems and related alteration*” presentada en el departamento de geociencias de la Universidad de Arizona, cuyo objetivo fue revelar la evolución espacio-temporal de los sistemas de vetas IOCG chilenos, para lo cual utilizó trabajo de campo y muestreo, y técnicas analíticas como:

petrografía, análisis de microsonda de electrones, isótopos estables, isótopos radiogénicos, inclusiones fluidas, y geocronología U-Pb, concluye que los niveles superiores de los sistemas de vetas IOCG del área de Copiapó contienen zonas de alteración argílica avanzada bajas en azufre total (Figura 4). Así mismo sugiere que los sistemas de vetas IOCG tienen muchas similitudes en estilo, extensión, geometría, relación con el magmatismo y zonificación con los sistemas de vetas epitermales ricos en metales preciosos (Au y Ag). Ambos tipos de depósitos se forman en la corteza superior como resultado de la circulación de fluidos no magmáticos impulsados por un plutón que se enfría o una fuente de calor similar. Las brechas son un componente dominante en ambos sistemas que muestran pulsos repetidos y cíclicos de fluidos fértiles de metales. Los sistemas de vetas IOCG representan un análogo de alta salinidad a los sistemas de vetas epitermales de metales preciosos ricos en Ag-Au.

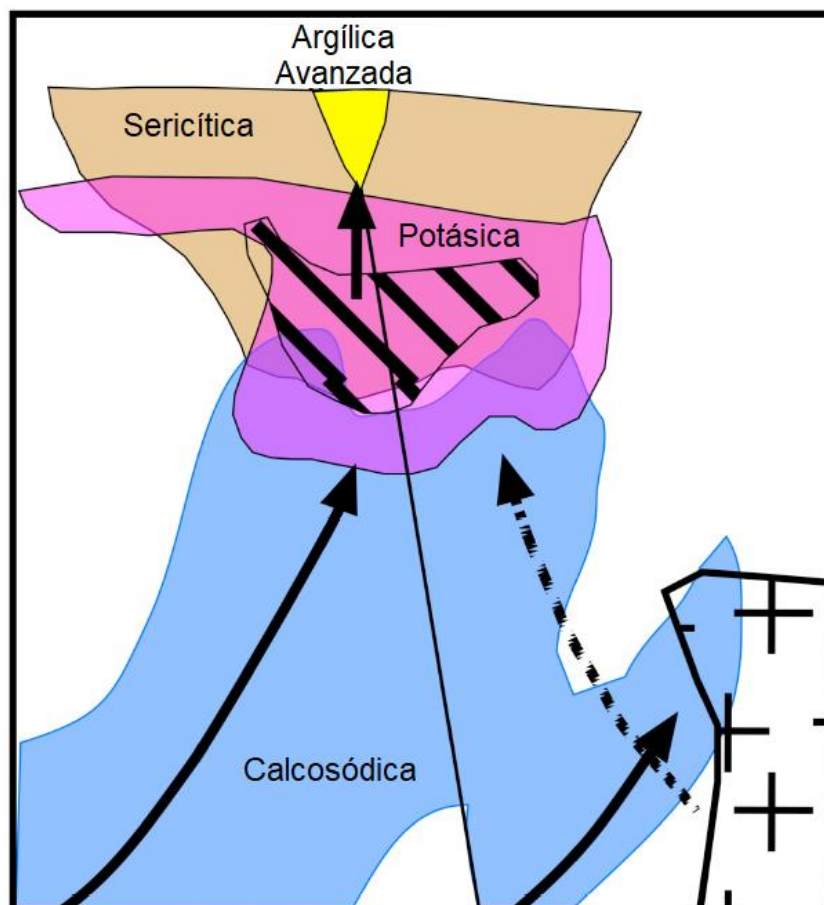


Figura 4. Modelo de un Sistema bajo en azufre, donde la alteración argílica avanzada está presente en los niveles más someros y envuelta por alteración sericítica formada por HCl derivado de salmueras externas Kreiner (2011).

Daniel (2014) en su tesis doctoral "*Comparison of Mesozoic magmatic evolution and iron oxide (-copper-gold) ('IOCG') mineralization, Central Andes and Western North America*" publicada en la Universidad de Arizona, cuyo objetivo fue comprender mejor la naturaleza episódica del magmatismo cordillerano, los controles de las fuentes y composiciones de magma y los controles de la mineralización IOCG, donde utilizó mapeo de campo, geocronología, geoquímica de roca total elementos principales y elementos traza, y métodos isotópicos estables y radiogénicos para rastrear fuentes de magmas o fluidos hidrotermales. Estudió dos regiones de la Cordillera para comprender mejor los factores que han gobernado su evolución magmática y metalogénica, el Batolito Costero Jurásico-Cretácico del norte de Chile y el arco Jurásico en el Desierto de Mojave central, California, Estados Unidos. Los resultados del norte de Chile revelan que el batolito costero se formó en un entorno predominantemente extensional, tuvo flujos de magma episódicos que fueron predominantemente máficos (dioríticos) durante el pico de producción, y tiene isótopos de Nd y Sr similares al manto uniformemente empobrecidos independientemente de la composición del magma. Los resultados del mapeo en las montañas del sur de Palen, California, y la síntesis de exposiciones compuestas en el centro del Desierto de Mojave, California, demuestran que los sistemas IOCG en esta región están divididos verticalmente y tienen intrusiones jurásicas genéticamente relacionadas que van desde diorita / gabro hasta granito.

Del Real, Thompson, y Carriedo (2018) en su investigación "*Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile*" publicada en la revista Elsevier B.V. Con el objetivo de identificar las variaciones en el estilo y los controles para la mineralización IOCG en el distrito Candelaria-Punta del Cobre; presentan nueva información basada en mapeo a escala de distrito, registro de testigos de perforación, petrología y geoquímica de las rocas volcánicas e intrusivas, y geocronología. Como parte de sus resultados reportan que la mineralización tipo IOCG dentro del distrito Candelaria-Punta del Cobre está alojada predominantemente en la parte superior del miembro de Andesita Inferior y los miembros Volcano-sedimentarios y Dacita suprayacentes, todos

dentro de la Formación Punta del Cobre del Cretácico temprano (~135-132 Ma). La mineralización está alojada en zonas de falla, brechas y litologías específicas. Las fallas norte-noroeste son el hospedante dominante de los cuerpos verticales mineralizados. La mineralización controlada estratigráficamente forma extensos cuerpos minerales estratificados (“mantos”). Los datos geocronológicos sugieren que la fase principal de mineralización ocurrió entre ~122 Ma y ~115 Ma (U-Pb en circón), superponiéndose en edad con las dos principales fases tempranas del batolito de Copiapó.

2.1.2. Antecedentes Nacionales:

Cobbing (1973) en el boletín N° 26 de la carta nacional, “Geología de los cuadrángulos Barranca, Ambar, Oyon, Huacho, Huaral y Canta”, trabajo que se llevó a cabo dentro de un programa de cooperación técnica acordado entre el ex Ministerio de Fomento y O. P. del Perú y el Ministerio de Desarrollo de Ultramar de Gran Bretaña. El objeto del proyecto fue estudiar la situación total de la cuenca, tanto física como humana, con el fin de aumentar el área de tierras cultivables en la parte baja del valle y de emplear los recursos acuíferos para fines hidroeléctricos. Para lo cual se realizó un mapeo regional a escala 1:100,000. Como parte de sus resultados el autor identificó como una de las zonas más importantes de alteración de dichos cuadrángulos a un área que se encuentra al norte de Paramonga, denominada Cerros Colorados que está ubicada al oeste de la tonalita de Purmacana y se halla cortada por intrusivos de pórfido cuarcífero considerablemente alterados y vetas de cuarzo.

Myers (1980) en el boletín N°33 de la carta geológica nacional, “Geología de los cuadrángulos Huarmey y Huayllapampa”, trabajo que se ejecutó como parte de un proyecto de investigación de la Universidad de Liverpool, Gran Bretaña; cuyo objeto ha sido el estudio de un amplio sector del Batolito Costanero y de las rocas intrusivas en el Perú central. Como parte de este proyecto el autor mapeó los cuadrángulos de Huarmey y Huayllapampa, los cuales muestran una parte del batolito y de sus rocas circundantes, el mapeo

se realizó sobre aerofotografías a escala 1:50,000. Como parte de sus resultados el autor reporta concentraciones de sulfuros en la unidad Cuyhuay Chico del complejo Santa Rosa en la esquina SO del cuadrángulo Huayllapampa, el principal mineral es la pirita que se halla diseminada en la parte dacítica de grano fino del plutón y concentrada en vetas de cuarzo que lo cortan y a veces en las masas asociadas de cuarzo lechoso.

Biminchumo (2013) en sus tesis de grado “Análisis geológico del cuerpo de cuarzo pod Caseli del IOCG Divimín, usando como herramientas: magnetometría, espectrometría y polarización inducida. Ancash, Lima – Perú” presentada en la Universidad Nacional de Ingeniería, cuyo objetivo principal fue demostrar la importancia de los cuerpos de cuarzo pods como guías para exploración en yacimientos tipo IOCG y también como cuerpos atractivos para una explotación minera. Para lo cual realizó mapeo geológico a detalle y aplicación de herramientas como Espectrometría, Magnetometría y Polarización Inducida. Concluye que los cuerpos de cuarzos pods encontrados en Divimín se ajustan a la textura de los cuarzos pods stockworks; el cuarzo pod Caseli está relacionado con los eventos geológicos y es una parte importante dentro del sistema IOCG debido a que funciona como un receptor en el que precipitan minerales de interés económico.

Sánchez (2018) en su tesis de grado “Geología del sistema de vetas auríferas en la mina Phoenix-5, Huarmey, Ancash – Perú” presentada en la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, cuyo objetivo principal fue realizar el estudio geológico completo y detallado correspondiente al sistema de vetas auríferas en la mina PHOENIX-5. Para lo cual se aplicó una metodología descriptiva e interpretativa, alternando etapas de campo y gabinete incluyendo mapeo superficial y subterráneo. Concluye que la mina PHOENIX-5 se encuentra dentro de un ambiente geotectónico de cuencas cretácicas denominado la cuenca Huarmey con depositación del Grupo Casma, lo cual es una cuenca con gran potencial en albergar probablemente yacimientos tipo IOCG. Está controlada por el Oeste por el alto basamento Outer Shelf High (OSH) y por el Este por el sistema de fallas regionales Tapacocha-Conchao Cocachacra.

Reyes (2019) en su investigación “Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9°-12°”, presentada en el Proexplor 2019, mostró las ocurrencias de mineralización de Cu, Au y Fe en diversos lugares entre los paralelos 9° y 12° en la costa norte del Perú, identificadas en los alrededores de Huarmey al norte de Paramonga hasta Tanguche al sur de Trujillo y entre ellas por lo menos 5 ocurrencias de cuarzo POD que podrían estar relacionadas a depósitos IOCG.

2.1.3. Antecedentes Locales:

Torres, Cerrón, y López (2020) en su investigación “Localización y evidencias geológicas enfocados en la determinación del yacimiento tipo IOCG Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú”. Publicada en la revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, con el objetivo de establecer una matriz de búsqueda y localización dinámica de yacimientos tipo IOCG en la costa peruana, para lo cual aplicaron teledetección usando imágenes Landsat 8, muestreo selectivo de afloramientos (rock chips y canales) y análisis químico por el método ICP-OES, estudios microscópicos de firmas espectrales y de inclusiones fluidas. Como parte de sus resultados, los autores evidenciaron que la zona Cerro Colorado Chico presenta características geológicas, geoquímicas, petromineralógicas, de firmas espectrales e inclusiones fluidas que permite sugerir la idea de estar frente a un depósito tipo IOCG.

Torres y Cerrón (2021) en su artículo “Vetas epitermales y su relación con un posible depósito tipo IOCG en Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú”, Publicada en la revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM, en la que realizan estudios al microscopio y de difracción de rayos X con el propósito de determinar de manera precisa las características litológicas y de alteraciones hidrotermales; también hacen estudios de inclusiones fluidas para aplicar el diagrama de salinidad vs temperatura de homogenización y determinar el tipo de yacimiento. Concluyen que la mineralización presente en estas vetas indica tener múltiples estadios hidrotermales de qz-py±cpy±po

(con 3 generaciones de qz), zonas de alteración argílica con una asociación mineralógica de sílice-arcillas (caolínita/dickita-illita)-sericita, además de trazas de alunita-pirofilita, gradando lateralmente a una zona de alteración hidrotermal compuesto por cuarzo-hematita-goethita-sericita-clorita relacionado con evidencias superficiales de un depósito tipo IOCG oculto.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Modelo geológico

El término “modelo” está asociado comúnmente con grupos diferentes de yacimientos en forma similar que el término “tipos”, que se acerca al concepto de modelo descriptivo (Cox y Singer, 1963; Ariosa y Diaz, 2001)

Ariosa y Diaz (2001) sugieren dos componentes en un modelo de yacimientos minerales:

- El modelo empírico, que consiste en una agrupación de datos que incluyen los obtenidos por la observación y que caracterizan el yacimiento.
- El modelo conceptual, que intenta interpretar los datos a través de una teoría genética unificadora.

Según Henley y Berger (1993) el concepto de modelo es un paradigma mental que actúa como herramienta para asistir al procesamiento humano de información y finalmente lo definen como “redes de información que han sido construidas para un fin específico”, así definen el modelo de yacimiento mineral como “la información sistemáticamente ordenada que describe los atributos esenciales (propiedades) de una clase de yacimiento mineral”. (Ariosa y Diaz, 2001).

Para McLeod (1993) los modelos deben reunir cuatro características básicas:

- Relevancia: cuando la información que proporcionan pertenece, específicamente, al problema que se debe presentar.
- Seguridad y confiabilidad: que significa que la información se puede utilizar con toda certidumbre.
- Temporalidad: la información debe estar disponible para solucionar un problema en el momento necesario.
- Plenitud: la información del modelo debe ser capaz de presentar un cuadro lo más completo posible del problema, asunto o entidad que refleja.

2.2.1.1. Modelo de depósitos tipo IOCG

La mayoría de los investigadores están de acuerdo en que los sistemas hidrotermales relacionados con IOCG comparten ciertas características distintivas que incluyen (1) alteración extensa rica en álcalis, (2) magnetita y / o hematita voluminosa, (3) un conjunto distintivo de elementos menores (REE, Co, Ag, ± U, P) y (4) control estructural prominente (Hitzman, Oreskes y Einaudi, 1992). En contraste con los aspectos del consenso, varios grupos han argumentado que las características clave podrían incluir asociaciones con magmas (Pollard, 2000; Meyer, 1988) o salmueras no magmáticas, por ejemplo, fluidos evaporíticos o salmueras basales (Barton y Johnson, 1996; Haynes, 2000), ambientes tectónicos distintivos (Hitzman, 2000) o edades distintivas de formación (Meyer, 1988).

Características hidrotermales: Todas las regiones con depósitos de IOCG muestran evidencia de alteración voluminosa (comúnmente de 10 a 100 Km²) rica en álcalis de los tipos sódico-cálcico -Na (Ca) y potásico-K (Hitzman, Oreskes y Einaudi, 1992; Barton y Johnson, 1996). La alteración ácida (sericítica o clorítica) con cuarzo hidrotermal accesorio es común, sin embargo, está más restringida en el espacio y típicamente ocurre en la vecindad de la mineralización (es decir, unos pocos kilómetros de extensión). Los ensambles de skarn se forman en algunas rocas calcáreas o máficas. La mineralogía, el desarrollo relativo y la geoquímica de los tipos de alteración

se correlacionan con la composición de las rocas ígneas (Barton y Johnson, 1996).

Mineralización y patrones de tiempo-espacio: La mineralización económica está dominada por calcopirita ± bornita paragenéticamente tardía y ocurre dentro o cerca con acumulaciones de óxido de Fe. La mineralización distal y poco profunda está dominada por hematita, mientras que la magnetita se forma más profunda y más temprano (Figura 5). Los metales no precipitados en estos entornos moderadamente oxidados y pobres en S podrían formar halos distales (p. Ej., Zn-Pb, Mn o Ag-Co-U). Los centros mineralizados rara vez se extienden más de unos pocos kilómetros de ancho; sin embargo, las regiones mineralizadas pueden persistir en regiones de 10 a 100 km² cuando se definen por la distribución intermitente de rocas ricas en magnetita o hematita.

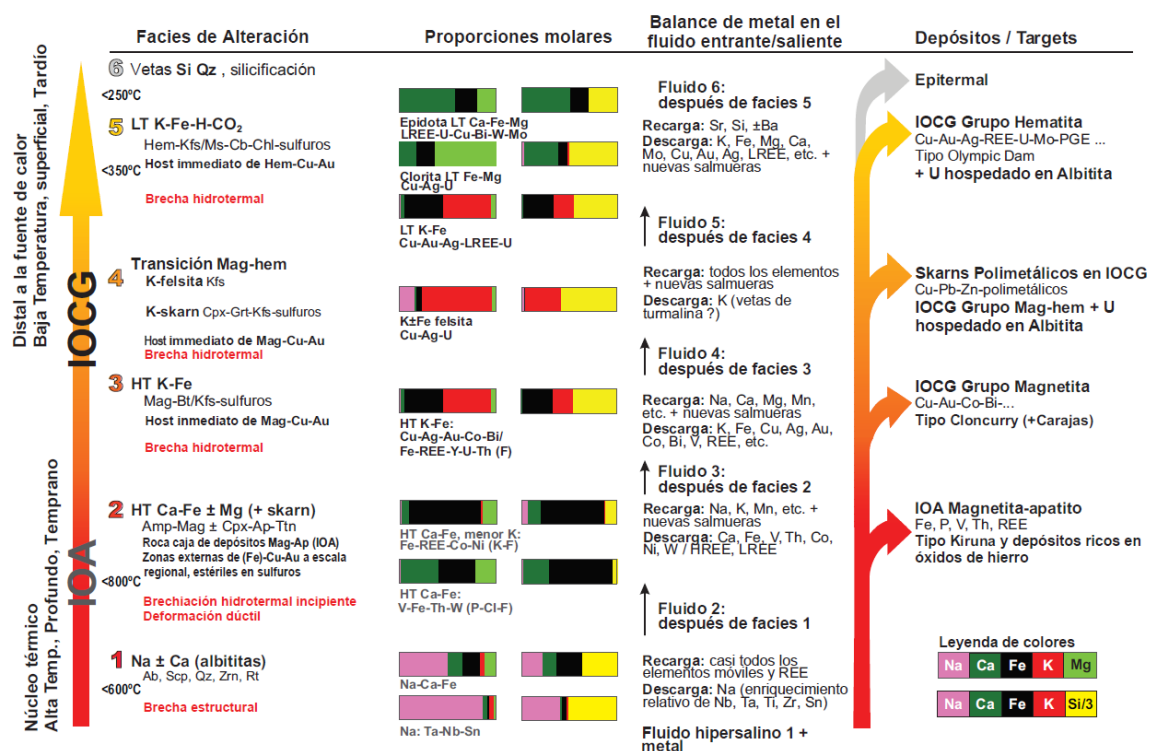


Figura 5. Modelo de facies de alteración de óxido de hierro-álcali y asociaciones de metales observadas en los sistemas IOCG (traducido de Corriveau, Montreuil y Potter, 2016)

Características geofísicas: la abundancia de óxidos de hierro, la presencia irregular de sulfuros y la alteración hidrotermal ampliamente

desarrollada han estimulado la aplicación de herramientas magnéticas, gravimétricas, eléctricas y radiométricas a estos sistemas (Smith, 2002). Especialmente cuando se interpretan en combinación con restricciones geológicas, la gravedad y las firmas magnéticas reflejan la distribución de los cuerpos ricos en óxido de Fe, así como las características estructurales e ígneas a escala regional (Haynes, 2000).

2.2.2. Exploración Geológica de Yacimientos minerales

Oyarzun (2011) se refería a la exploración de yacimientos minerales como una labor ardua y compleja que analizada desde la perspectiva geológica es el geólogo de exploración la pieza insustituible en la renovabilidad de los recursos minerales.

Si bien, la exploración no es tan fácil como correr un programa y apretar botones como bien refiere Oyarzun (2011), la exploración moderna de yacimientos minerales tiene que conjugar un equilibrio entre las nuevas técnicas y los métodos tradicionales, aprovechando la utilidad de la informática en la interpretación y tratamiento de los datos (Gumiel, 1992).

La gran aventura del avance científico y tecnológico es que se abren nuevas expectativas en el conocimiento de los procesos de caracterización, formación y génesis de los yacimientos minerales y que la exploración minera futura se va a beneficiar de esto, programándose con una mayor base científica que satisfaga las necesidades de una sociedad moderna y exigente. (Gumiel, 1992)

2.2.3. La teledetección como herramienta de exploración geológica

Hoy en día, la tecnología y las técnicas de teledetección han evolucionado hasta un punto en el que no solo indican zonas de geología y alteración, sino que también proporcionan datos que no se pueden cartografiar efectivamente de ninguna otra manera. Además, la teledetección puede contribuir directamente a la comprensión de la génesis del mineral. Para que sea eficaz, debe combinarse con la geología de campo y otros métodos geológicos,

incluida la geofísica, la geoquímica y otras técnicas auxiliares, como la espectroscopía de campo o de laboratorio (Bedell et al, 2009).

En las últimas décadas, se ha registrado un gran crecimiento en cuanto a la disponibilidad y calidad de los datos y a los métodos de procesamiento, gracias al rápido avance de la tecnología espacial y la informática (Marchionni y Schalamuk, 2010)

El uso de la teledetección, empleando sofisticadas técnicas de tratamiento de imágenes es muy necesario en toda campaña previa de exploración minera. Hay que resaltar dos importantes aplicaciones; la primera es como apoyo a la geología estructural y a la cartografía de grandes estructuras y la segunda es como herramienta útil en la exploración minera regional. El control de lineamientos y su posterior tratamiento y análisis, aprovechando la información espacial y direccional de los mismos, proporciona criterios de selección de áreas favorables para albergar mineralizaciones. Los datos multiespectrales registrados por los satélites (Figura 6) proporcionan una valiosa información para establecer diferencias espectrales en suelos y rocas que con frecuencia están relacionadas con procesos de alteración típicos de determinados yacimientos minerales (Gumiel, 1992), ver Figura 7.

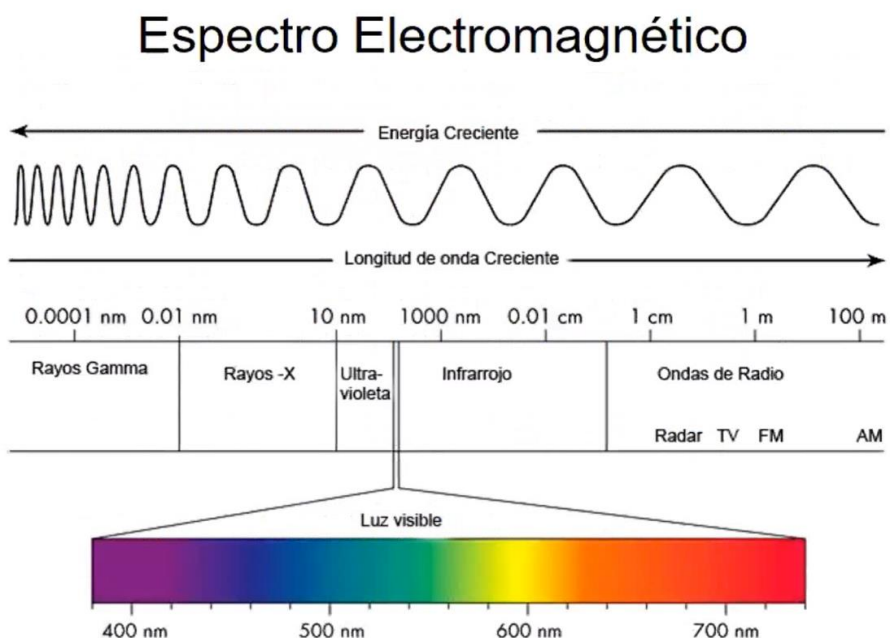


Figura 6. Diagrama del espectro electromagnético.

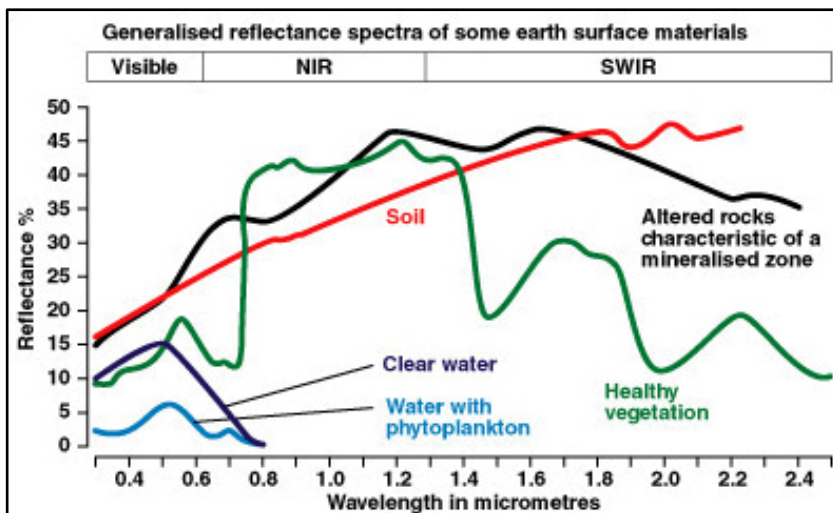
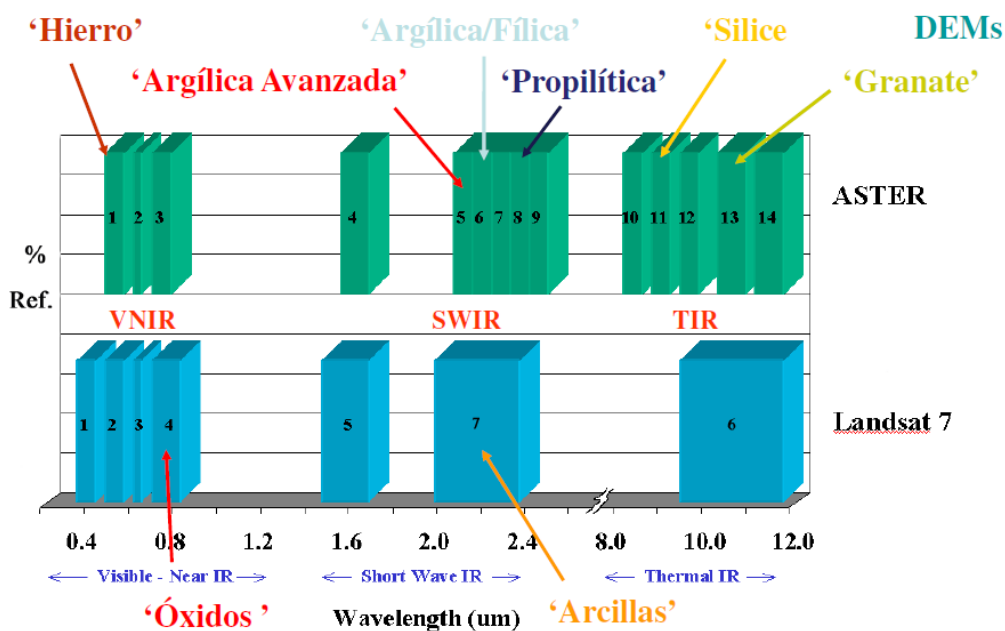


Figura 7. Reflectancia de algunos materiales de la superficie de la tierra.

En la exploración por yacimientos minerales, las imágenes satelitales son muy útiles, ya que los materiales en la superficie terrestre tienen características únicas de reflexión, absorción y emisión de energía en el espectro electromagnético, y es posible reconocerlos e identificarlos usando sensores multispectrales (Figura 8). A estas características únicas para cada material se les denomina firma espectral. Los minerales de alteración hidrotermal y óxidos de hierro tienen firmas espectrales muy distintivas y sus rangos de absorción y reflexión son muy contrastantes.



Source: GRSG Chairman

Figura 8. Comparación de las bandas espectrales Landsat y Aster.

2.2.4. Exploración Geoquímica

Los métodos modernos de exploración geoquímica se pusieron en práctica en la década de 1930 en Rusia y Escandinavia, y después de la Segunda Guerra Mundial en América del Norte. Esto fue facilitado por el desarrollo continuo de técnicas analíticas rápidas y precisas capaces de detectar elementos en concentraciones por debajo de los niveles que generan anomalías visibles. La geoquímica es uno de los principales contribuyentes a los programas de exploración mineral desde el reconocimiento regional hasta la escala de depósito (Cohen y Bowell, 2014).

Oyarzun (2011) refería que, aunque en geoquímica podemos hablar de los viejos y nuevos tiempos, al fin de cuentas, la geoquímica, se diga cómo se diga, consiste básicamente en el hallazgo de anomalías (Figura 9). Sin embargo, a medida que la exploración se centra cada vez más en objetivos más profundos y se mueve inexorablemente hacia áreas de cobertura posterior a la mineralización, el papel de la geoquímica en los programas de exploración está cambiando, por lo que se necesitan urgentemente nuevas técnicas y tecnologías geoquímicas o el papel de la geoquímica en hacer nuevos descubrimientos continuará disminuyendo (Cooke et al, 2020).

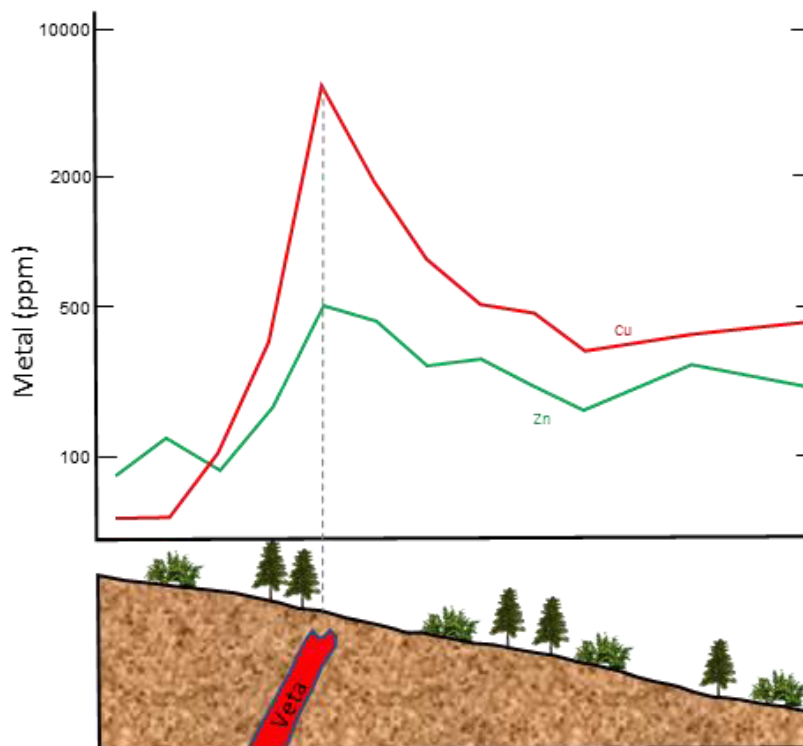


Figura 9. Relación entre anomalía de suelo y mineralización. Modificado de Huff (1952)

2.2.4.1. Tratamiento estadístico de datos geoquímicos

Los datos geoquímicos, como datos estadísticos, tienen tres principales problemas, primero: poseen datos censurados, datos fuera de los límites de detección (Helsel, 2005a, 2005b); segundo: no presentan distribución normal, a menudo presentan distribución log-normal (Arhens, 1954), y tercero: son datos cerrados, contienen información relativa, es decir son partes de un todo (Aitchison, 1986), datos que suman una constante como el 100% (Pawłowsky-Glahn y Egozcue, 2006; Valls, 2008; Grunsky y Caritat, 2019).

DATOS CENSURADOS:

En la estadística se conoce como censura al fenómeno que ocurre cuando el valor de una observación sólo se conoce parcialmente, este fenómeno ha sido estudiado ampliamente en análisis de supervivencia en las ciencias de la Salud y la Biología (Klein y Moeschberger, 2003; Andersen, 2014; Gijbels, 2010) y en análisis de fiabilidad en las ciencias ambientales e ingenieriles (Akritas, 1994; Helsel, 2005a, 2012; Meeker y Escobar, 1998). La censura también puede ocurrir cuando hay observaciones fuera del rango de detección de los instrumentos que se usan para hacer la medición, que frecuentemente ocurre en los análisis químicos de muestras usadas en las geociencias (Sanford, Pierson y Crovelli, 1993).

Cuando trabajamos con datos geoquímicos nos podemos encontrar con dos tipos de censura: Censura por la izquierda (Akritas, 1994; Klein y Moeschberger, 2003; Gijbels, 2010) cuando los valores de las observaciones están por debajo del límite mínimo de detección, es el tipo de censura que ocurre con mayor frecuencia en los datos geoquímicos, estos datos suelen reportarse por el laboratorio como "< LD" (LD, límite mínimo de detección), y Censura por la derecha (Akritas, 1994; Klein y Moeschberger, 2003; Gijbels; 2010) cuando los valores de las observaciones están por encima del límite máximo de detección, este tipo de censura también ocurre en los datos geoquímicos, aunque con menor frecuencia. Existe un tercer tipo, la censura en un intervalo (Klein y Moeschberger, 2003; Gijbels, 2010) cuando los valores observados están entre un intervalo de dos valores extremos, pero se desconoce el valor exacto, este tipo de censura no ocurre como tal en datos

geoquímicos, aunque los datos censurados por la izquierda también podrían considerarse como censura en un intervalo que ya son valores que están entre cero (0) y el valor mínimo de detección.

Existen varios métodos estadísticos para lidiar con datos geoquímicos censurados; Helsel (2012) publicó una excelente compilación de dichos métodos enfocado a las ciencias ambientales pero que pueden utilizarse también con datos geoquímicos en la exploración minera.

La peor práctica cuando se trata de observaciones censuradas es excluirlas o eliminarlas, esto produce un fuerte sesgo en todas las posteriores medidas de posición o pruebas de hipótesis (Helsel, 2012).

Otra práctica común y más aún en la exploración minera, es sustituir los valores censurados por datos arbitrarios, así, para el caso de datos censurados por la izquierda ($< LD$) suele ser sustituidos por $\frac{3}{4} LD$ (Sanford, Pierson y Crovelli, 1993), o por $\frac{1}{2} LD$ (Hornung y Reed, 1990; Sanford, Pierson y Crovelli, 1993; Succop et al. 2004), o por $LD/\sqrt{2}$ (Hornung y Reed, 1990; Croghan y Egeghy, 2003; Succop et al. 2004; Verbovsek, 2011). Esta práctica ha sido duramente criticada por algunos autores como Helsel (2012), ya que la sustitución (fabricación) agrega una señal invasiva a los datos que antes no estaba allí, lo que potencialmente oculta la información presente en las observaciones medidas (Helsel 2012).

Helsel (2012) nos insta a usar otros métodos paramétricos y no paramétricos para determinar parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar de observaciones con valores censurados, sin recurrir a la sustitución o fabricación de datos. Métodos que son nada nuevos, y que merecen mayor atención, tal es el caso de la Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés), método paramétrico usado por Hald (1949) y Cohen (1950, 1959) que emplea los valores no censurados, la proporción de observaciones censuradas y una fórmula matemática de una distribución concreta, fue Miesch (1967) uno de los primeros en usarlo para estimar estadísticas de datos geoquímicos; y los métodos no paramétricos como Mann-Whitney y Kruskal-Wallis (Helsel, 2012), que emplean la posición de cada observación respecto al conjunto de datos en lugar de utilizar parámetros, sin necesidad de asignar una distribución a los datos; y los métodos no paramétricos de análisis de supervivencia como Kaplan-Meier

(1958) que en la mayoría de programas estadísticos están desarrollados para aplicarlos en datos censurados por la derecha, por lo que es necesario transformar los datos censurados por la izquierda a datos censurados por la derecha para poder aplicarlos correctamente, este procedimiento se conoce como “flipping” o “volteamiento” (Quintanilla, 2007), o el método de Turnbull (1976), variante del método Kaplan-Meier para datos censurados en un intervalo.

Los métodos paramétricos y no paramétricos antes expuestos, nos permiten obtener las estadísticas descriptivas sin la necesidad de fabricar datos como se hacía con la sustitución, y claramente sugieren una gran ventaja en su uso para calcular los parámetros geoquímicos univariados como el valor de fondo, umbral y anomalía, sin embargo la tendencia en exploración geoquímica es el uso de estadísticas multivariadas para sacar provecho a los análisis químicos multielementales, basado en las asociaciones geoquímicas de los depósitos minerales, tal es el caso de los coeficientes de correlación, el coeficiente de rango correlacional (Valls, 2008), análisis factorial (Tripathi, 1979; Reimann et al. 2002; Liu et al. 2016), el análisis de componentes principales (Zuo, 2011; Cheng et al. 2011; Zuo, Xia y Wang, 2013; Chen et al. 2019), entre otros; para lo cual es necesario que todas las observaciones sean cuantificadas, entonces, surge la necesidad de imputar valores a los datos censurados, pero estos no deben ser arbitrarios, sino en función de la distribución de los valores no censurados. Helsel (2012) muestra una alternativa de solución usando la Regresión de Orden Estadística Robusta (rROS, por sus siglas en inglés) que asume una distribución log-normal y que permite una imputación de valores para porción censurada de la distribución. Buck (1960) propuso un método de imputación por regresión múltiple en la que se emplea modelos de regresión múltiple para imputar información faltante en la variable Y a partir de covariables (X_1, X_2, \dots, X_n) correlacionadas con Y.

TEST DE NORMALIDAD

Ghasemi y Zahediasl (2012) sugieren que la evaluación del supuesto de normalidad debería tomarse en cuenta para usar pruebas estadísticas

paramétricas y es preferible que la normalidad se evalúe tanto visualmente como mediante pruebas de normalidad.

La distribución de frecuencias (histograma), el diagrama de tallo y hojas, el diagrama de caja, el diagrama P-P (diagrama de probabilidad-capacidad) y el diagrama Q-Q (diagrama de cuantiles-cuantiles) se utilizan para verificar la normalidad visualmente (Field, 2009)

Las pruebas de normalidad son complementarias a la evaluación gráfica de normalidad (Elliott y Woodward, 2008). Las principales pruebas para la evaluación de la normalidad son la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006), la prueba de KS corregida de Lilliefors (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006; Peat y Barton, 2005), la prueba de Shapiro-Wilk (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006, Peat y Barton, 2005), la prueba de Anderson-Darling (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006), la prueba de Cramer-prueba de von Mises (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006), prueba de asimetría de D'Agostino (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006), prueba de curtosis de Anscombe-Glynn (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006), prueba de ómnibus de D'Agostino-Pearson (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006) y prueba de Jarque-Bera (Oztuna, Elhan y Tuccar, 2006).

PARÁMETROS GEOQUÍMICOS

En la exploración geoquímica frecuentemente se usa los términos “Valor de fondo” (*background*), “Umbral” (*threshold*) y “Anomalía” (*anomaly*) que son parámetros geoquímicos cuantificables.

Hawkes y Webb (1962) definieron al valor de fondo como la abundancia normal de un elemento en un material estéril y concluyeron que es más realista ver el valor de fondo como un rango en lugar de un valor absoluto. El concepto de valor de fondo geoquímico se introdujo para diferenciar entre concentraciones normales de elementos y anomalías, que podrían ser indicativas de una ocurrencia de mineral.

Una anomalía es una desviación de la norma. Una anomalía geoquímica, más específicamente, es una desviación de los patrones geoquímicos que son normales para un área o ambiente geoquímico determinados (Hawkes y Webb, 1962).

Para poder diferenciar entre fondo y anomalía, se introdujo el término umbral, el umbral es el límite superior de la fluctuación del valor de fondo normal (Reimann y Garrett, 2005).

Se usan varios métodos para determinar el valor de fondo, el umbral y la anomalía, entre ellos:

- El método primitivo se basa en la discriminación por parte de un experto, lo que implica el conocimiento experimental sin considerar las propiedades estadísticas de los datos en sí (Stanley y Sinclair, 1989). Es un método subjetivo y depende de la experiencia del geólogo.
- En la exploración geoquímica los valores dentro del rango [media \pm 2DS] se definieron a menudo como el valor de fondo geoquímico, reconociendo que el fondo es un rango y no un valor único (Hawkes y Webb, 1962). El enfoque típico y más utilizado para detectar anomalías es establecer un umbral como la media más los múltiplos de la desviación estándar después de eliminar iterativamente los valores atípicos (Hawkes y Webb, 1962; Matschullat, Ottenstein y Reimann, 2000). Las observaciones por encima de este umbral se denominan anomalías, de lo contrario, valor de fondo (Wang y Zuo, 2016). Este método se establece desde una perspectiva estadística, asumiendo que las observaciones extraídas de muestras geológicas tienen una distribución normal (Wang y Zuo, 2016).
- Debido a que los datos geoquímicos son espacialmente dependientes, y en cada sitio de muestreo una multitud de procesos diferentes influyen en el valor analítico medido, Reimann et al. (2005) sugieren que se debe usar métodos que no se basan fuertemente en supuestos estadísticos, por ejemplo, la media aritmética podría reemplazarse por la mediana y la desviación estándar por la mediana de la desviación absoluta (DMA), definida como la mediana de las desviaciones absolutas de la mediana de todos los datos (Tukey, 1977)
- Reimann et al. (2005) también sugieren utilizar la gráfica de caja (Figura 10) debido a que la construcción de la caja se basa en cuartiles, es resistente hasta un 25% de los valores atípicos de los datos en cualquier extremo de la distribución. Además, no se ve seriamente

influenciado por las diferentes distribuciones de los datos (Hoaglin et al., 2000).

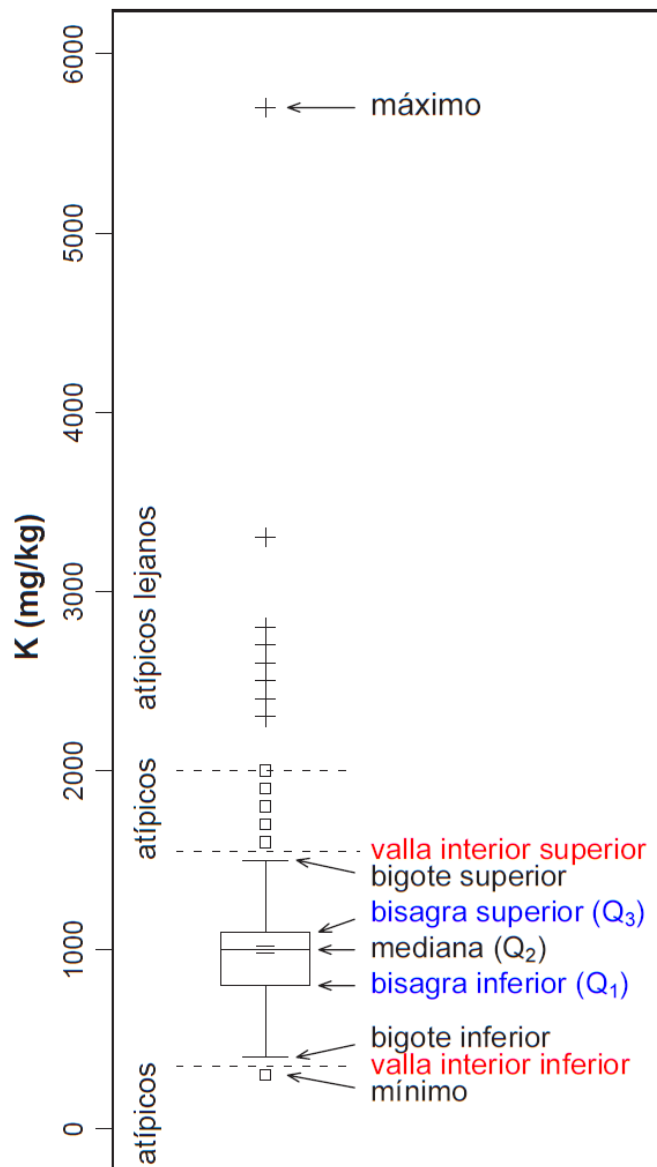


Figura 10. Diagrama de cajas de mostrando sus diferentes límites. Mod. Reimann et al. 2005

Donde:

Valla interior superior (UIF) = bisagra superior + 1.5 HW

Ancho de bisagra (HW) = bisagra superior – bisagra inferior, aproximadamente igual al rango intercuartílico (IQR = Q₃-Q₁)

Con lo cual se puede definir el umbral = Q₃ + 1.5 IQR para separar los valores atípicos, y Q₃ + 3 IQR para separar los valores atípicos lejanos.

2.2.4.2. Análisis composicional de los datos

Las concentraciones de los elementos químicos en una muestra se expresan frecuentemente en partes por millón (ppm), el interés no reside en la masa de la muestra, sino en las proporciones en que se presentan los elementos (Egozcue y Pawlowsky-Glahn, 2016) por lo que los datos geoquímicos pueden considerarse como datos composicionales que además poseen una distribución lognormal.

Los datos composicionales son aquellos que contienen información relativa, es decir son partes de un todo (Aitchison, 1986), en la mayoría de los casos, se registran como datos cerrados, es decir, datos que suman una constante, como el 100% (Pawlowsky-Glahn y Egozcue, 2006).

Como en cualquier estudio estadístico multivariado, uno de los objetivos del análisis de datos composicionales es realizar inferencias sobre poblaciones de las que se observan muestras de características composicionales (Egozcue y Pawlowsky-Glahn, 2016), pero estos datos deben abrirse antes de usar cualquiera de los métodos estadísticos multivariados (Zuo, Xia y Wang, 2013) para evitar correlaciones espurias y deben normalizarse para poder usar las estadísticas paramétricas.

Hay tres métodos comunes de transformaciones logratio uno a uno para la apertura de datos composicionales: transformación logratio aditiva (alr), transformación logratio centrada (clr) (Aitchison, 1986) y la transformación logratio isométrica (ilr) (Egozcue et al., 2003).

Cuya formulación matemática son:

$$alr(x) = \left[\log\left(\frac{x_1}{x_D}\right) \log\left(\frac{x_2}{x_D}\right) \dots \log\left(\frac{x_{D-1}}{x_D}\right) \right]$$

$$clr(x) = \left(\log \frac{x_1}{g(x)}, \log \frac{x_2}{g(x)}, \dots, \log \frac{x_D}{g(x)} \right)$$

$$ilr_i = \sqrt{\frac{r \times s}{r + s}} \log \frac{g(c_+)}{g(c_-)}$$

Donde $g(x)$ denota la media geométrica de las partes de x , $i = 1, 2, \dots, D-1$, $g(c_+)$ y $g(c_-)$ son las medias geométricas de las “ r ” variables indicadas con signo “+” y las “ s ” variables indicadas con signo “-” respectivamente.

2.2.4.3. Geoquímica de roca total en exploración geológica

Los estudios geoquímicos de roca total se han aplicado ampliamente a la exploración de depósitos como: sulfuros masivos volcanogénicos (Gemmell y Large, 1992; Gemmell y Fulton, 2001; Large et al., 2001), depósitos de oro orogénicos (Eilu, Mikucki y Groves, 1997), depósitos epitermales (Warren, Simmons y Mauk, 2007) y depósitos tipo pórfido (Halley 2020), en particular para evaluar los cambios composicionales asociados con la zonación mineral hidrotermal y la identificación de gradientes que proporcionen vectores hacia la mineralización. Las anomalías geoquímicas de roca total se evalúan calculando los cambios de masa asociados con la alteración hidrotermal. Las rocas alteradas hidrotermalmente más afectadas por el metasomatismo de K se caracterizarán por las mayores ganancias de K y, en general, las pérdidas de Na y Ca. Los cambios de masa asociados con el metasomatismo de K también se evalúan gráficamente usando gráficos de $(2Ca + Na + K) / Al$ molar frente a K / Al molar (Warren, Simmons y Mauk, 2007, Figura 11).

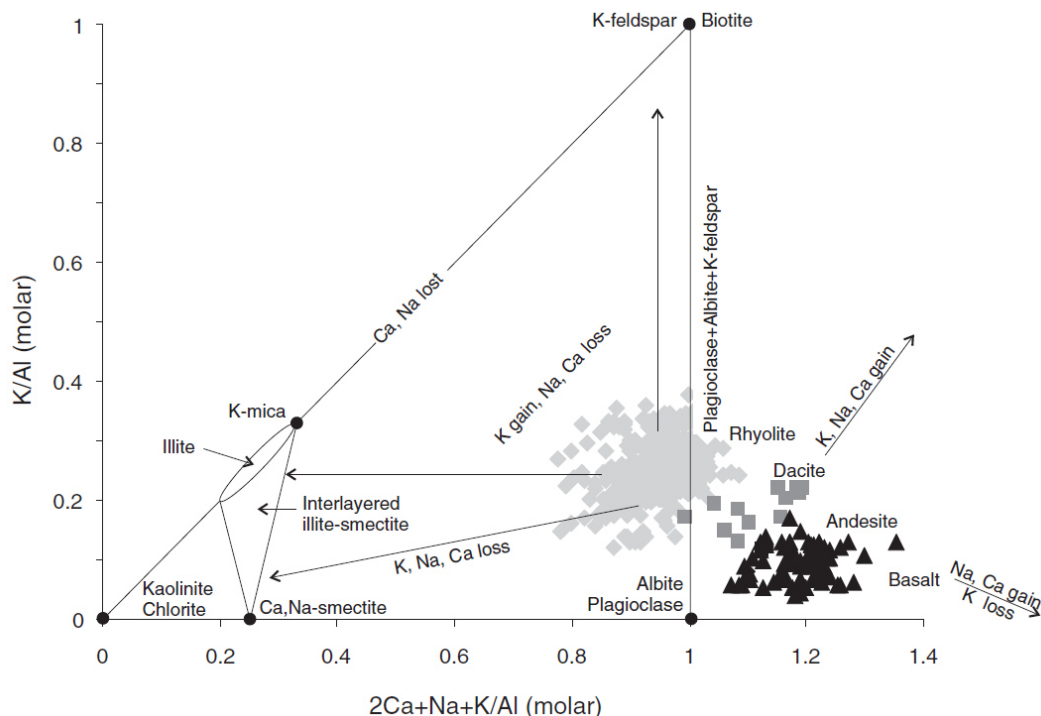


Figura 11. Gráfico de relación de elementos molares de $(2Ca + Na + K) / Al$ versus K / Al para rocas volcánicas frescas típicas. Los procesos de transferencia de masa se muestran con flechas que se dirigen hacia los minerales de alteración asociados (Warren, Simmons y Mauk, 2007).

Otro diagrama útil para la discriminación de rocas alteradas es el diagrama de ratios molares de K_2O / Al_2O_3 y Na_2O / Al_2O_3 (Davies y Whitehead 2006) que se basa en la relación de los álcalis móviles frente a un óxido como el Al_2O_3 , que se considera esencialmente inmóvil (Figura 12)

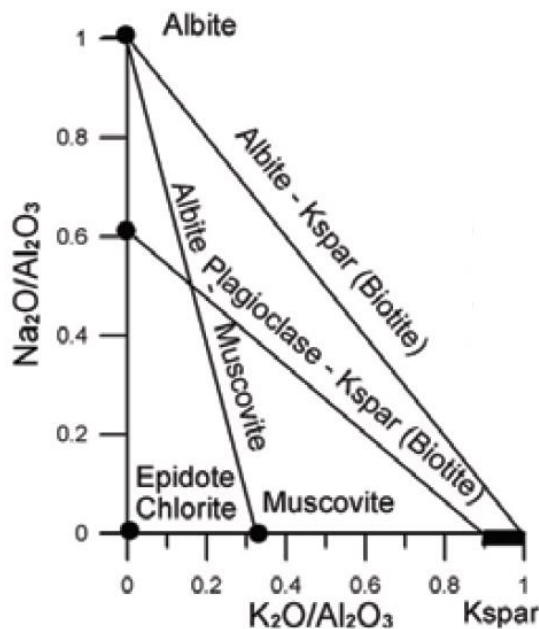


Figura 12. Gráfico de ratios molares Na/Al versus K/Al (Davies y Whitehead 2006)

La geoquímica de roca total también es usada para la caracterización y clasificación geoquímica de las rocas (Rollinson, 1993). La clasificación geoquímica de rocas ígneas suele hacerse en términos del contenido de elementos mayores como el SiO_2 : basalto, andesita, riolita, etc (Rollinson, 1993). Sin embargo, el dióxido de silicio no es reportado a partir de un análisis ICP con digestión de cuatro ácidos, porque forma un complejo volátil de SiF_4 durante la reacción con ácido fluorhídrico en el proceso de digestión (Halley, 2020). Otros elementos mayores como K y Na, utilizados tradicionalmente en petrología para caracterizar rocas, son muy móviles durante la alteración hidrotermal y los procesos de meteorización y, por lo tanto, comúnmente no son útiles para caracterizar la composición de la roca (Halley, 2020). En lugar de plotear los elementos versus Si para realizar una subdivisión de composiciones de primer paso, se recomienda utilizar escandio (Sc) en su lugar (Halley, 2020, Figura 13). Sc está altamente correlacionado con el Fe de los silicatos y está alojado en minerales de Fe-Mg como piroxenos y

anfíboles (Halley, 2020). Siempre tiene una valencia de 3+ y es inmóvil en la mayoría de los ambientes de meteorización y alteración hidrotermal (Williams-Jones y Vasyukova, 2018). Los elementos que son menos móviles en ambientes hidrotermales son elementos de alto potencial iónico (HFSE) que tienen una valencia de 3+ o 4+. De los elementos que se analizan habitualmente con un paquete ICP-MS /-AES con digestión de cuatro ácidos, la suite 3+ y 4+ incluye Sc, Al, P, Ti, V, Cr, Y, Zr, Nb, La y Th (Railsback, 2003).

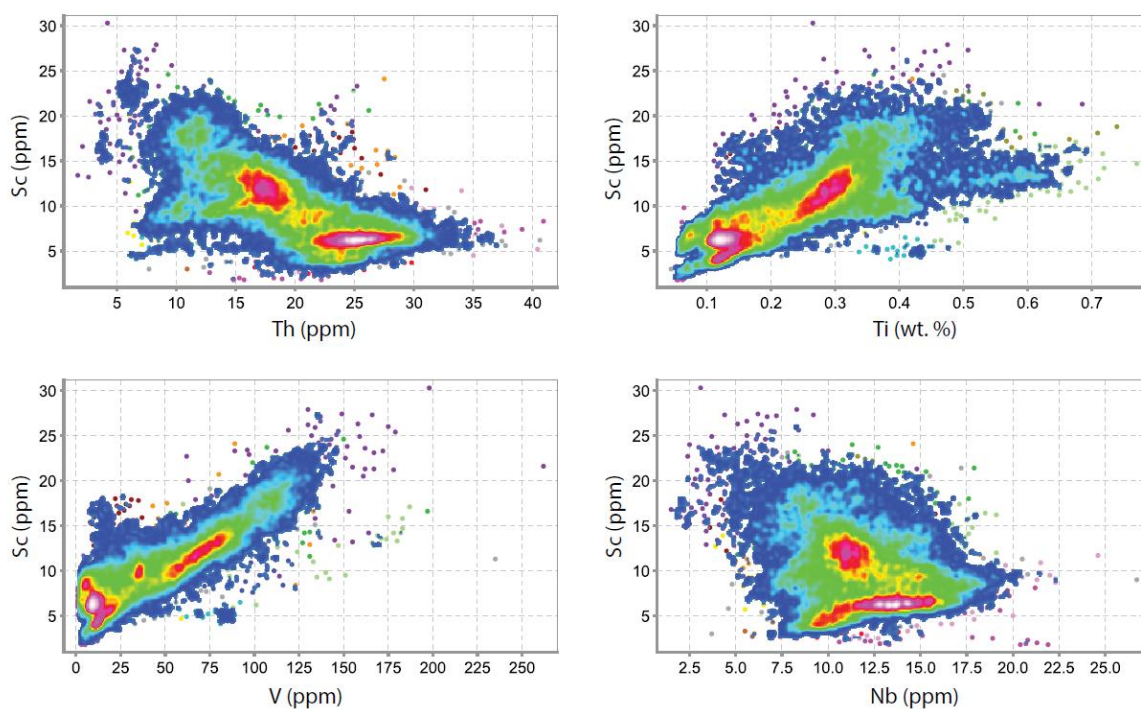


Figura 13. Gráficos de Sc versus Th, Ti, V y Nb en rocas ígneas. La propagación de Sc alto (correspondiente a rocas con alto contenido de Fe) a Sc bajo (correspondiente a rocas con bajo contenido de Fe) indica rangos de composición de máficos a félsicos. Halley, 2020.

2.2.5. Petrominerografía como herramienta de exploración

La petrominerografía es una herramienta que utiliza a la microscopía y las propiedades ópticas de los minerales (Figura 14) para realizar estudios petrográficos, mineragráficos y petromineragráficos.

En los estudios petrográficos se identifican los minerales no metálicos, tamaños, porcentajes de cada uno de ellos, texturas, clasificación de la roca y alteraciones hidrotermales. En los estudios mineragráficos se identifican los minerales metálicos presentes, tamaños, asociaciones mineralógicas,

porcentajes, texturas, la secuencia de formación mineral, así como otras informaciones útiles para el Geólogo en su interpretación de la zona de estudio. Y en los estudios petrominerográficos se identifican los minerales metálicos y no metálicos presentes, tamaños, asociaciones mineralógicas, porcentajes, texturas, alteraciones hidrotermales y reemplazamientos la secuencia de formación mineral, así como otras informaciones útiles para el geólogo en su interpretación de la zona de estudio. Mediante este estudio se podrá también identificar aquellos minerales que puedan ocasionar problemas futuros en el proceso metalúrgico.

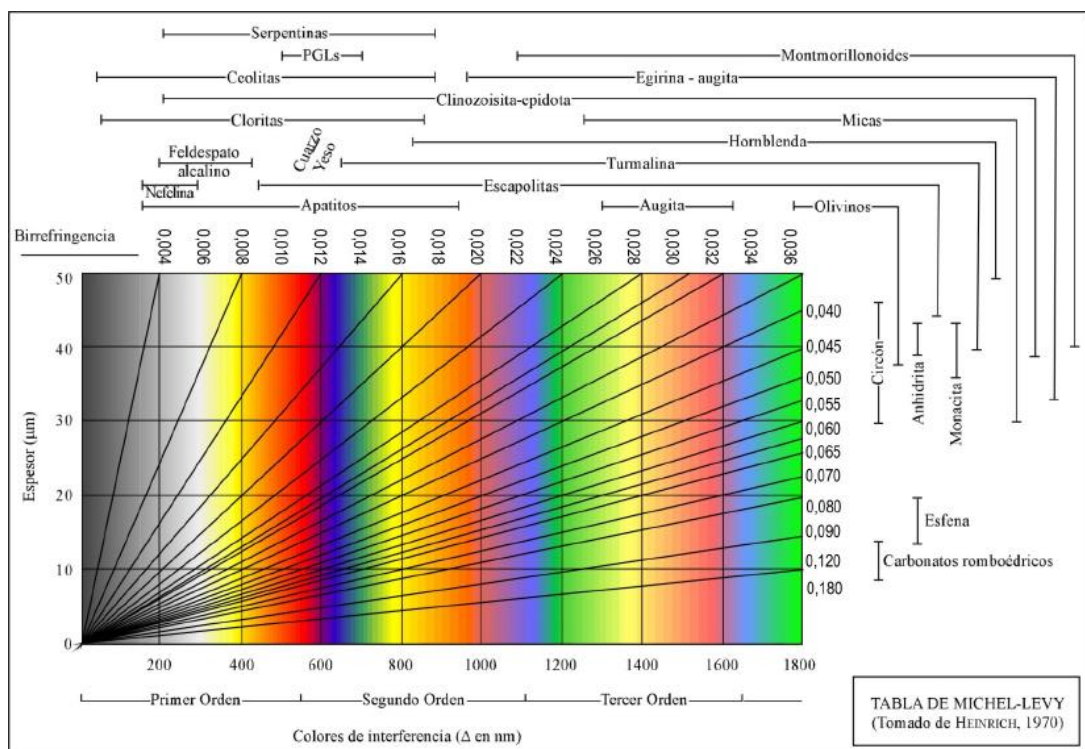


Figura 14. Tabla de Michel-Lévy mostrando rangos de birrefringencia de los principales minerales.

2.2.6. Estudio de Inclusiones Fluidas aplicado a la exploración geológica

Las inclusiones fluidas son interrupciones en la estructura cristalina de un mineral que ha atrapado algún tipo de fluido durante el crecimiento del mismo. Éstas representan porciones atrapadas de los líquidos, gases y fundidos a partir de los cuales se produjo el crecimiento cristalino. Por ello, las inclusiones fluidas (incluyendo las de fundido) pueden ser usadas, previo análisis petrográfico, para reconstruir las condiciones ambientales del crecimiento cristalino, así como para caracterizar químicamente los fluidos a partir de los que se formaron los minerales que las contienen (Camprubí, 2010). Para caracterizar las inclusiones fluidas se puede utilizar la clasificación de Nash (1976) basada en cuatro fases observables a temperatura ambiente (Figura 15).

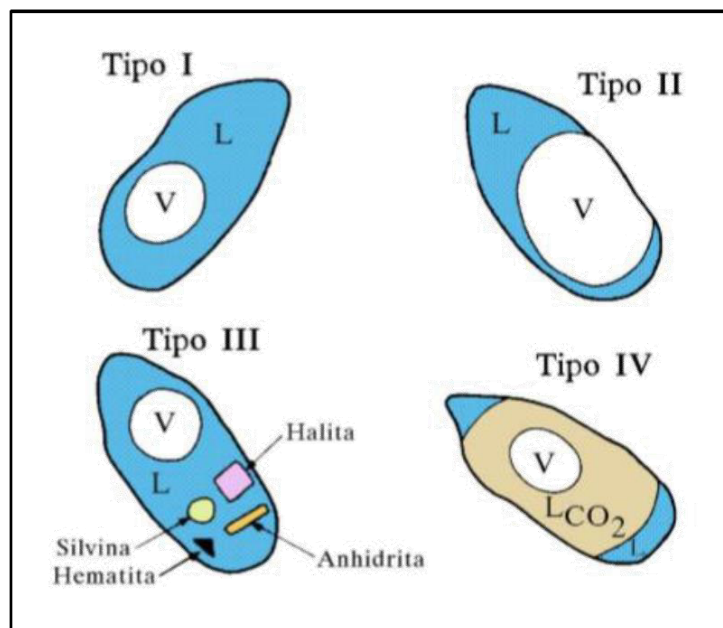


Figura 15. Clasificación de Inclusiones fluidas según Nash (1976). L: Líquido, V: Vapor.

La microtermometría de inclusiones fluidas es una técnica analítica que permite determinar ciertas variables fisicoquímicas básicas, que tiene una aplicación tanto para el campo académico acerca de los fluidos mineralizantes de numerosas tipologías de yacimientos minerales, como para la exploración minera. Esta técnica, sobre una sólida base de estudios petrográficos, permite determinar o estimar (1) las temperaturas de formación de un depósito

mineral, (2) la salinidad y contenido en diversos solutos de los fluidos mineralizantes, (3) la evolución temporal y la zonación espacial de la temperatura y la salinidad, (4) la existencia de diversos mecanismos de precipitación mineral, (5) la existencia de pulsos hidrotermales de diversa índole, (6) la presencia de canales de alimentación en un depósito hidrotermal y relacionar la posición de éstos con la distribución de mineralizaciones económicas, (7) la migración de salmueras a través de una cuenca sedimentaria y su relación con la maduración del petróleo o la formación de ciertos tipos de depósitos minerales, (8) la interacción entre fluidos químicamente contrastantes, (9) la posición de la paleosuperficie o del paleonivel freático bajo presión hidrostática, y (10) la tipología o subtipología a la que puede pertenecer una mineralización concreta (Camprubí, 2010, Figura 16). Wilkinson (2001) hizo énfasis en el estudio de los procesos que forman mineralización en los sistemas hidrotermales y los diferentes procesos de evolución de fluidos que pueden interpretarse a partir de datos de inclusiones fluidas.

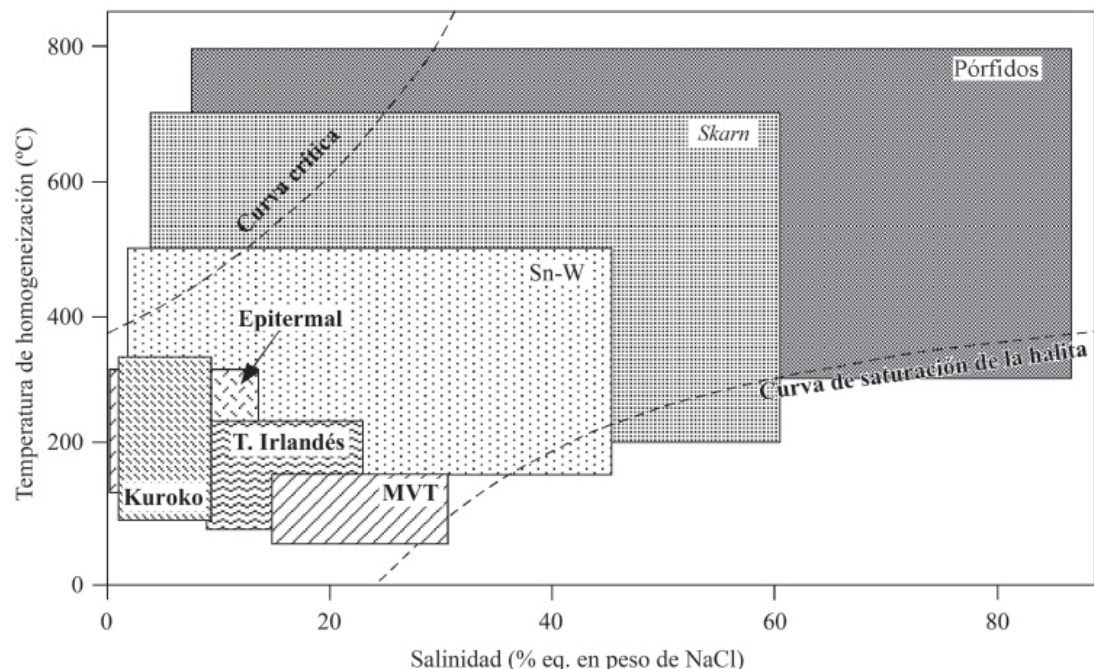


Figura 16. Diagrama temperatura de homogeneización vs. salinidad ilustrando los rangos típicos para un conjunto de depósitos. Wilkinson (2001).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 1
Tipo y diseño de la presente investigación.

TIPO O ENFOQUE	NIVEL O ALCANCE	DISEÑO	MÉTODO
Mixto	Explicativa	No Experimental – Transversal	Inductivo
Predominantemente Cualitativo , pero en tanto sea necesario con precisiones Cuantitativas	La investigación se inicia como descriptiva de las características geológicas, y finaliza como Explicativa del modelo genético de las ocurrencias de Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, haciendo correlaciones con las nuevas perspectivas de exploración.	La investigación se basa en observar los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural en el momento actual para después analizarlos.	Se analiza las características particulares en torno a las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico para luego generar una interpretación generalizada para su extensión a la Costa Norte del Perú.

Fuente: propia

3.2. UNIDAD DE ANÁLISIS

Ocurrencias de Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico

3.3. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio está constituida por las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, donde se tiene 208 muestras de roca, 231 muestras de suelo y 20 muestras para estudios petrominerográficos e inclusiones fluidas.

3.4. MUESTRA

Para esta investigación la muestra está conformada por toda la población de estudio. Se considerará el análisis geoquímico de 208 muestras de roca y 231 muestras de suelo, entorno a las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, además de 20 muestras para estudios petrominerográficos e inclusiones fluidas.

3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 2

Técnicas e instrumentos usados en la presente investigación.

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Análisis documental	Fichas textuales y de resumen, recurriendo a fuentes documentales como: libros especializados, artículos científicos y páginas web.
Cartografiado geológico	Planos topográficos e imagen satelital, GPS, brújula, protáctor, lupa, rayador, picota, tablero, libreta de campo, portaminas, pinturas, entre otros.
Teledetección	Imágenes Satelitales Landsat 8 y ASTER
Petrominerografía	Microscopio óptico, difracción de rayos X
Inclusiones Fluidas	Microscopio electrónico
Geoquímica	ICP-AES
Registro fotográfico	Cámara fotográfica.

Fuente: propia

3.6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

- Con los datos de la cartografía geológica se generaron los planos geológico y estructural utilizando ArcGis 10.5.
- Se generaron secciones geológicas y columnas estratigráficas que permitieron identificar las unidades litoestratigráficas en la zona de estudio, y se digitalizaron utilizando AutoCad 2020.
- Las imágenes Landsat 8 y ASTER se analizaron en el software Envi 5.3
- Los datos geoquímicos se analizaron utilizando el software estadístico Minitab18 y el software geoquímico loGas 7.3.

- Las láminas delgadas y pulidas fueron estudiadas con microscopio óptico en el Laboratorio de Petromineralogía de INGEMMET y el Laboratorio de Caracterización Mineralógica de BISA.
- El estudio de inclusiones fluidas se realizó con apoyo del laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET, se usó un microscopio electrónico para identificar las inclusiones fluidas.
- Los resultados se presentan en planos, tablas, figuras y gráficos con su respectiva interpretación como parte integral de la Tesis.

CAPÍTULO 4: GENERALIDADES

4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ACCESIBILIDAD

El área de estudio se ubica en la región Ancash, provincia de Huarney, distrito de Huarney, a 50 Km al SE de la ciudad de Huarney y 30 Km al NO de la ciudad de Barranca (Figura 17).

El acceso al área de estudio se realiza a través de la Panamericana Norte (vía asfaltada) desde la ciudad de Lima, pasando por Huacho, Barranca hasta el paraje Cerro Colorado Chico, Km 237 de la Panamericana Norte, haciendo un viaje aproximado de 3h 40' en automóvil y/o bus.

4.1.1. Propiedad minera

El área de estudio abarca 8000 Ha de las cuales, la gran parte concesionada por GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C con un total de 6400 Ha, 1400 Ha concesionadas por NEXA RESOURCES PERU S.A.A. (Tabla 3, Figura 18)

Tabla 3
Concesiones mineras dentro del área de estudio.

CÓDIGO	CONCESIÓN	TITULAR	HECTÁREAS
10022714	CORP08	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	100
10022914	CORP06	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	900
10023214	CORP03	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	900
10107516	CEVICHE 2	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	800
10022614	CORP09	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	1000
10022814	CORP07	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	1000
10023014	CORP05	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	400
10023114	CORP04	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	300
10023314	CORP02	GLOBETROTTERS RESOURCES PERU S.A.C.	1000
10221520	PARAMONGA 05	NEXA RESOURCES PERU S.A. A	800
10221420	PARAMONGA 04	NEXA RESOURCES PERU S.A. A	600

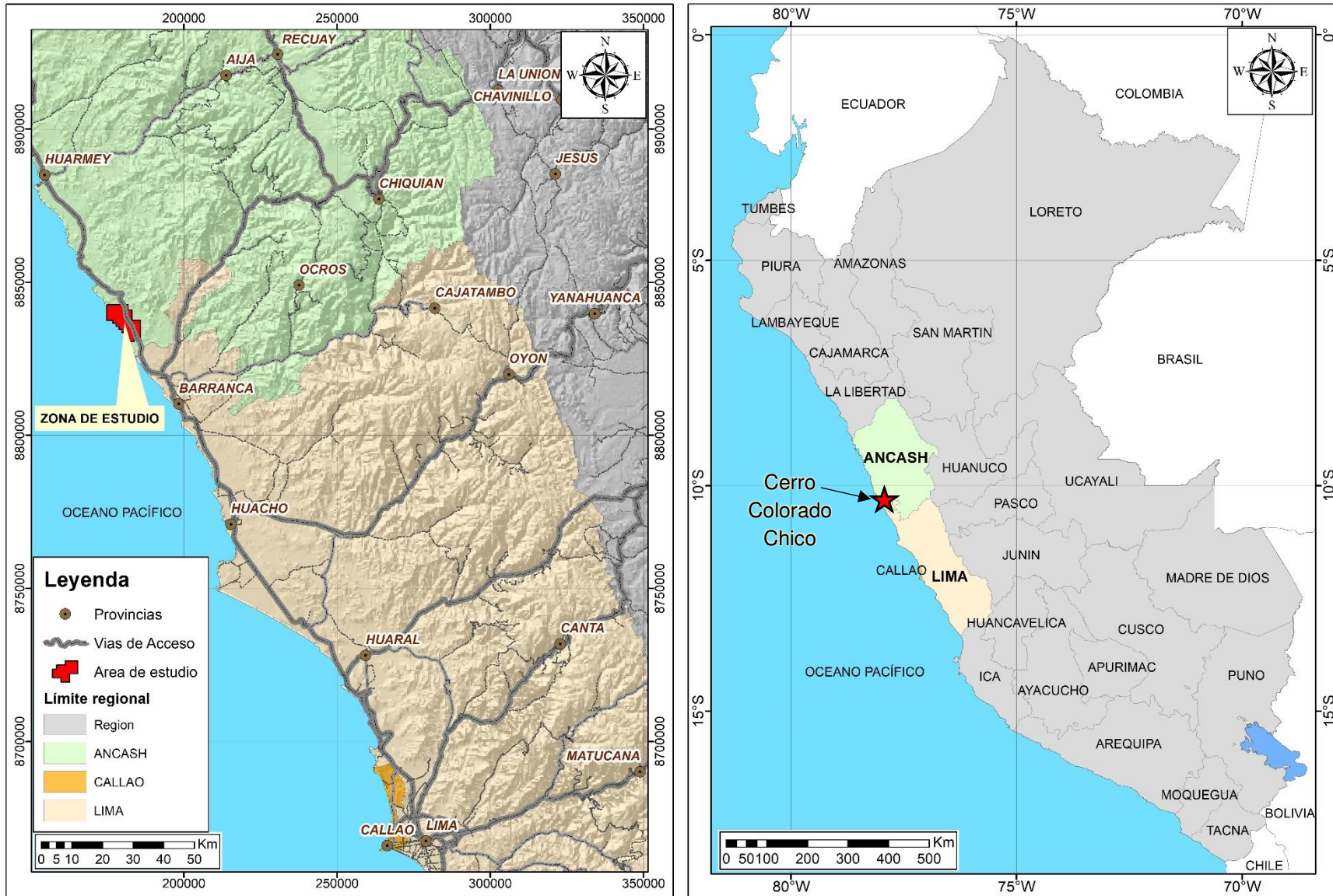


Figura 17. Plano de ubicación de la zona de estudio.

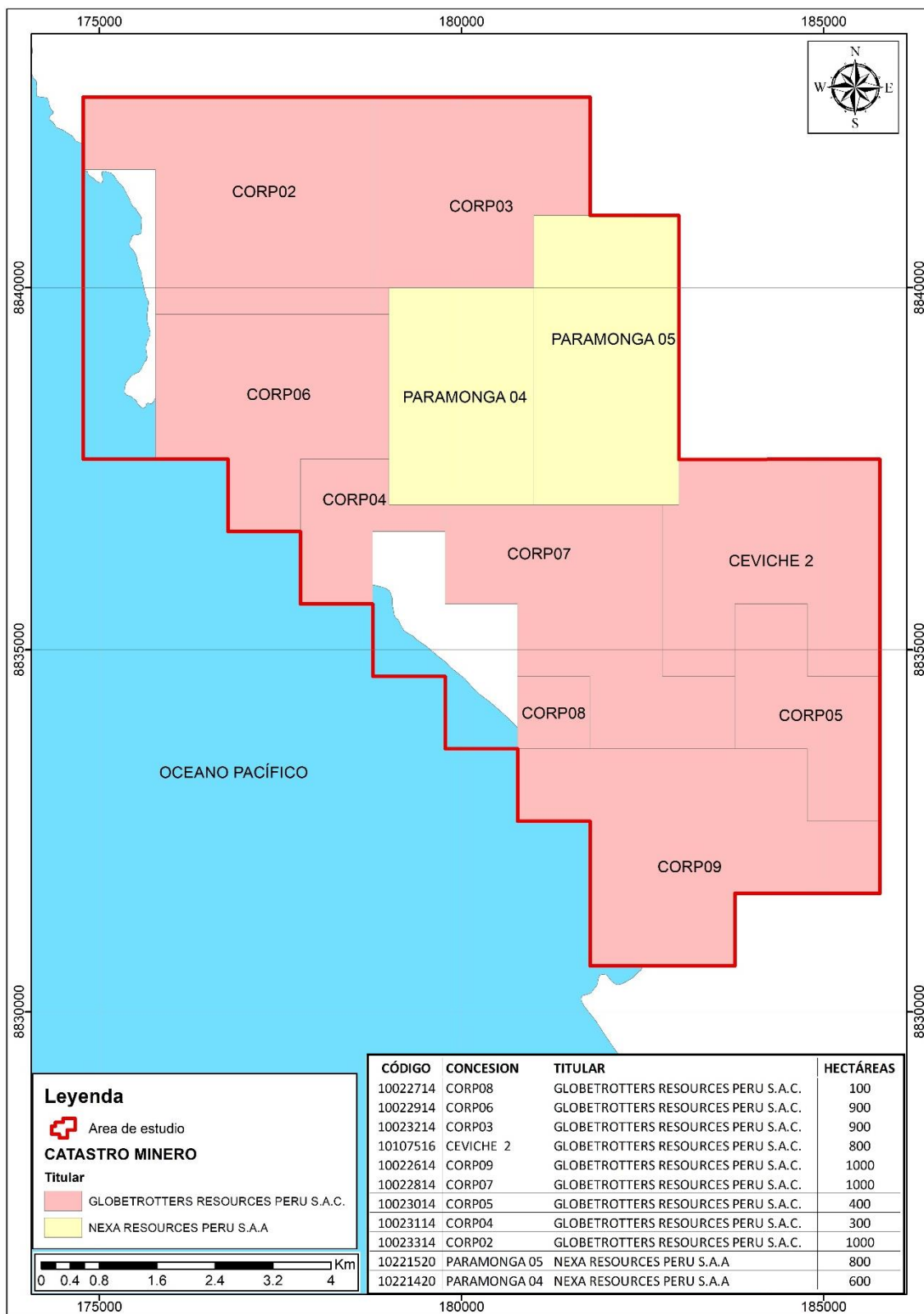


Figura 18. Plano de catastro minero de la zona de estudio.

4.2. GEOMORFOLOGÍA

4.2.1. Fisiografía

Morfoestructuralmente el área de Cerro Colorado Chico se encuentra en la planicie costera, al oeste limita con la línea litoral y por el este con las estribaciones andinas. Localmente se ha subdividido en cinco unidades geomorfológicas (Figura 19): Playa litoral, Canal aluvio-torrencial, Llanura aluvial, Mantos de arena (depósitos eólicos principalmente), Colinas y lomadas, las mismas que se forman por procesos de erosión – deposición que principalmente corresponden a la dinámica marina, fluvio-aluvial y eólica.

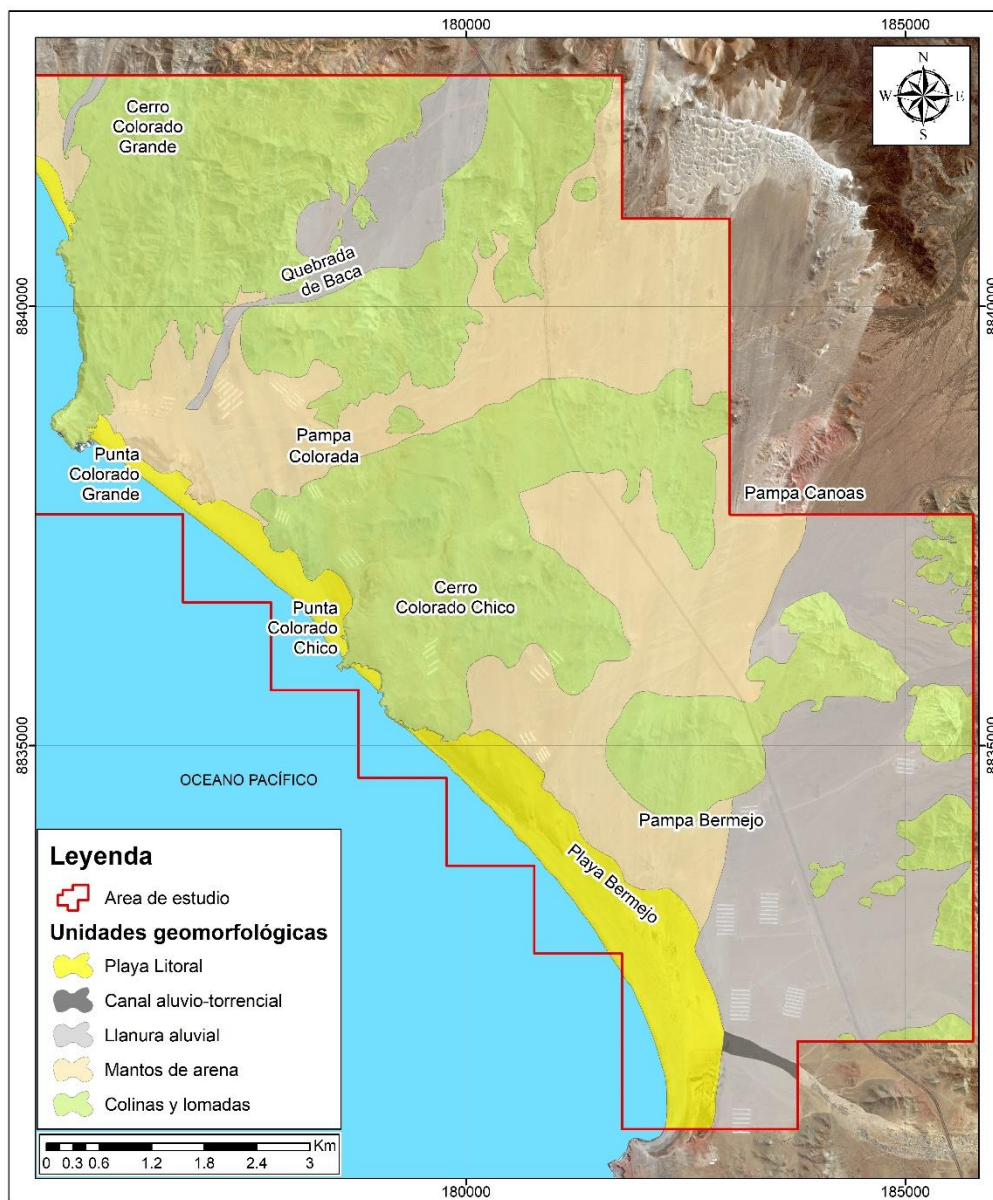


Figura 19: Plano geomorfológico del área de estudio.

4.2.2. Clima

El clima en Cerro Colorado corresponde a un clima árido, con temperaturas que generalmente varían de 19 °C a 28 °C durante el transcurso del año. La estación meteorológica más cercana del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) se encuentra a 20 Km al sureste, en el distrito de Paramonga provincia de Barranca; donde se reporta que los veranos son cortos, caliente, bochornosos y nublados; los inviernos son largos, cómodos, ventosos y parcialmente nublados y está seco durante todo el año (Figura 20).

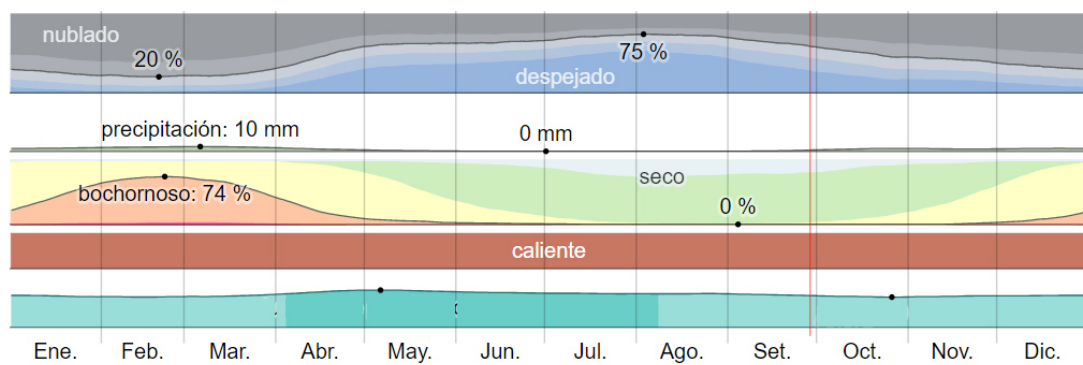


Figura 20. Clima anual según la estación meteorológica del distrito de Paramonga. Fuente: SENAMHI.

4.3. MARCO GEOTECTÓNICO REGIONAL

El área de estudio se ubica en la Franja Costanera del Norte del Perú, en la región Ancash, dentro del Dominio Casma – Batolito de la Costa (Figura 21).

El dominio geotectónico Casma – Batolito de la Costa está constituido por la cuenca extensional Cretácica del Grupo Casma, denominada para este sector como Cuenca Huarmey (Atherton y Webb, 1989) caracterizada por un relleno de lavas almohadilladas, capas de lavas, hialoclastitas, secuencias volcanoclásticas y ocasionales fangos calcáreos (Atherton y Webb, 1989), presenta diferentes estructuras que ponen en manifiesto la complejidad estructural que se asocia al medio de depósito durante la etapa de apertura, extensión y sedimentación de una cuenca extensional que se desarrolló durante el Albiano – Cenomaniano (Mamani y Jacay, 2016), que ha sido luego intruída por el Batolito de la Costa, que en este sector forma parte del segmento Lima (Cobbing et al. 1981), constituido por un número de asociaciones temporalmente diferentes, denominadas como super-unidades, que comprenden cada una un rango de tipo de rocas, el ratio de rocas ácidas/rocas básicas se incrementa progresivamente en el tiempo; los tipos de roca predominantes son: gabro, diorita, tonalita y granodiorita (Cobbing et al. 1981).

El Batolito de la Costa es un conjunto grande y complejo de plutones (Cobbing et al. 1981), las super-unidades más importantes en el Segmento Lima, en orden de edad relativa decreciente, son: los tipos tonalíticos de Paccho y Santa Rosa, los granitos y granodioritas de La Mina, San Jerónimo y Puscao y los monzogranitos de Sayán-Pativilca (Cobbing et al. 1981) (Figuras 21 y 22)

El dominio geotectónico Casma – Batolito de la Costa se limita hacia el Este por la Falla Tapacocha (Atherton y Webb 1989) y presenta características geológicas y geoquímicas relacionadas a depósitos del tipo Cu-Fe-Au (IOCG) y depósitos del tipo Pb-Zn-Cu (VMS) (Cueva, Mamani y Rodríguez, 2010).

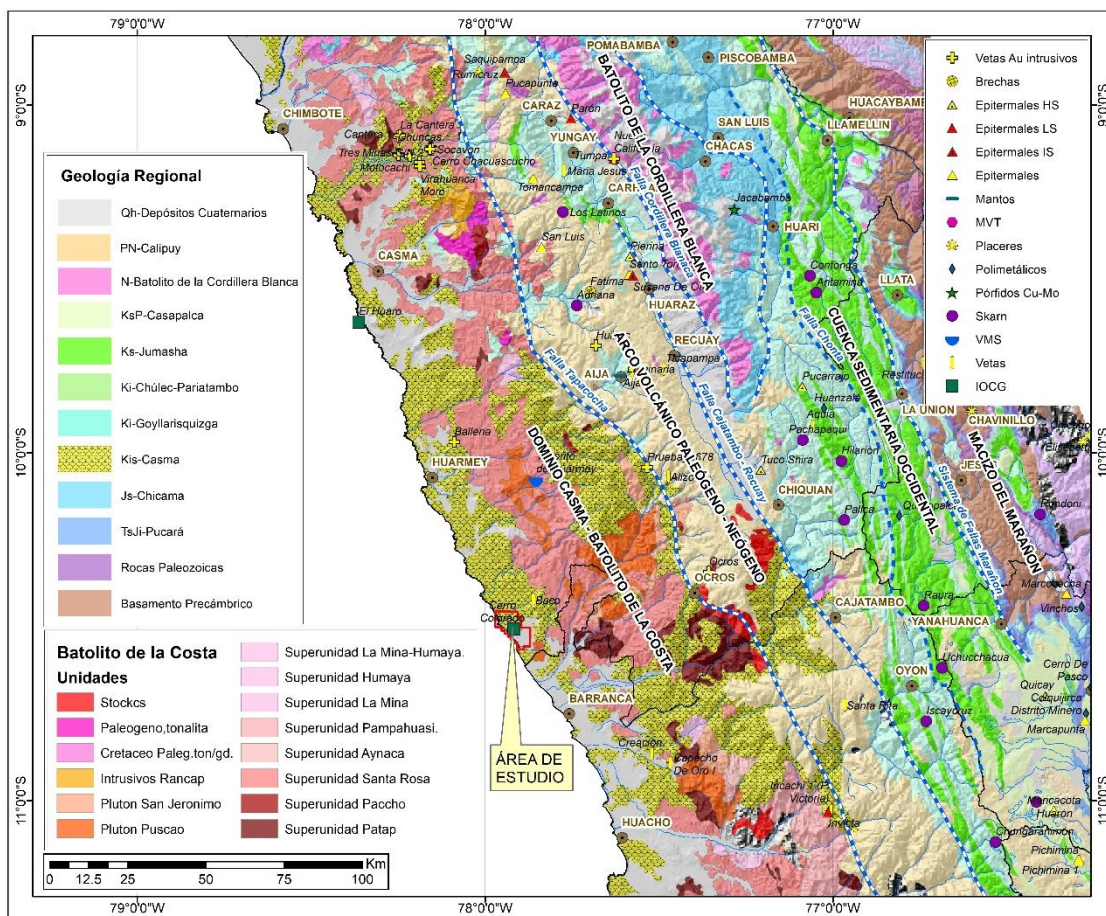


Figura 21. Mapa de dominios tectónicos en la región central del Perú.

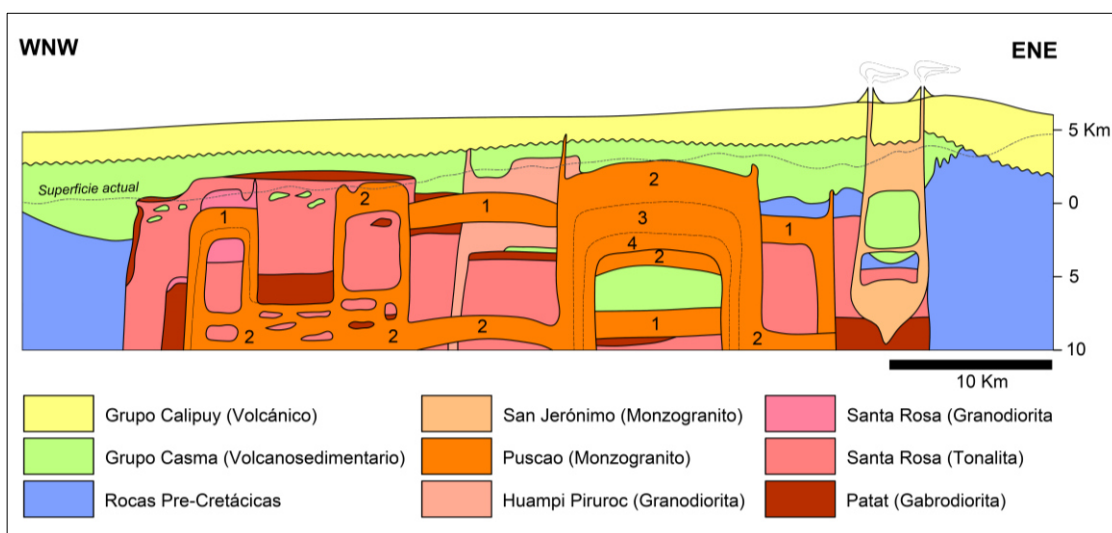


Figura 22. Sección esquemática a través de las unidades del Batolito de la Costa en el flanco norte del valle Fortaleza, localizado entre Huarmey y Barranca. Modificado de Pitcher, 1978.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1.1. Geología local del área de estudio

El área de estudio se conforma por secuencias de rocas volcánicas lávicas bimodales, andesitas y dacitas, intercaladas con secuencias volcanoclásticas, identificadas como Grupo Casma (Cobbing, 1973; Myers, 1980; Guevara 1980) y cuerpos intrusivos del Batolito de la Costa (Cobbing 1973, Pitcher 1977).

Se cartografió un área aproximada de 3250 Ha que comprende los parajes Quebrada de Baca, Pampa Colorada, Punta Colorado Chico, Cerro Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo a escala 1:5000, para lo cual se usó el método Anaconda (Einaudi, 1997) describiendo la litología, alteración, mineralización y estructuras (Figura 23).

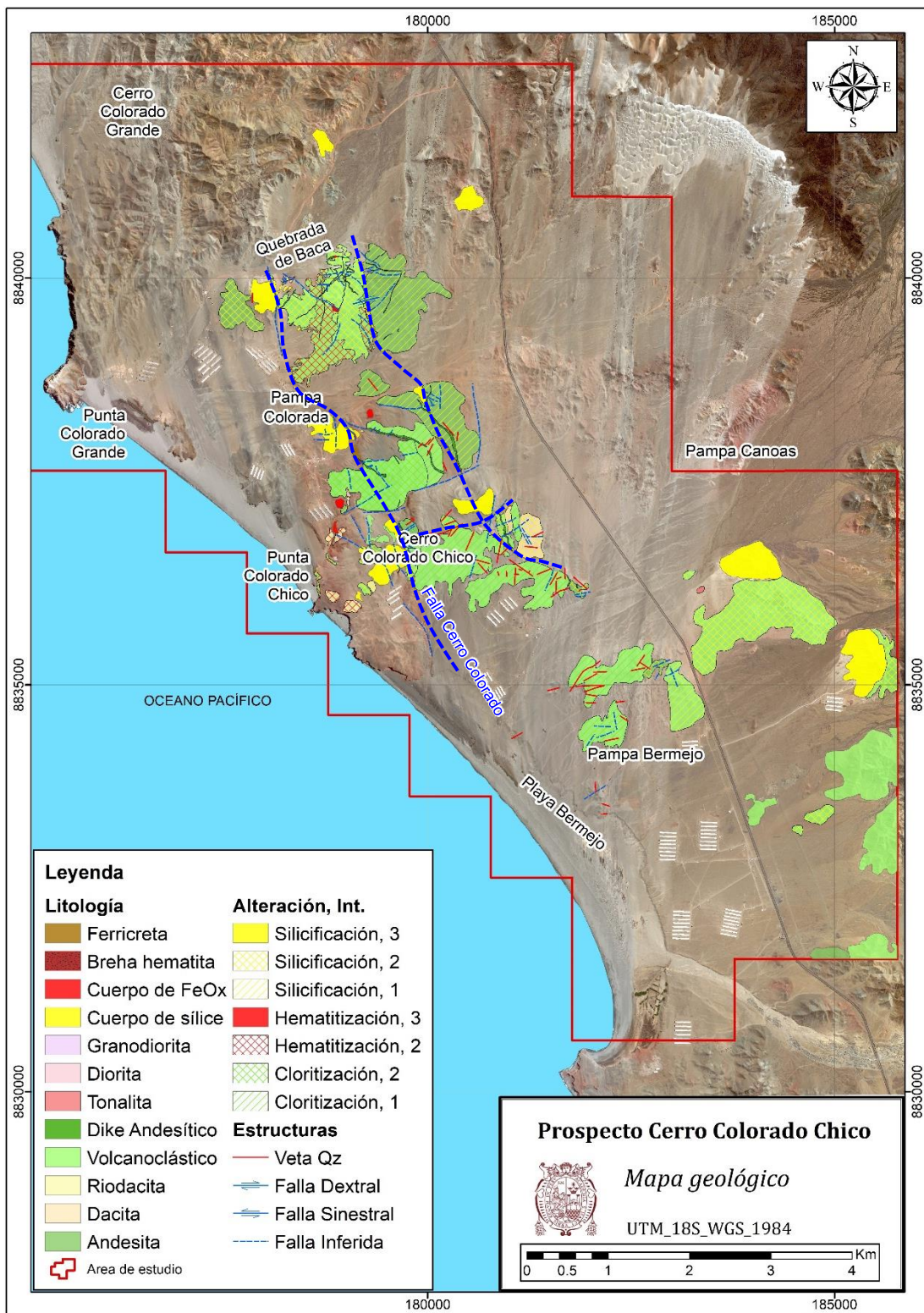


Figura 23. Mapa Geológico del área del prospecto Cerro Colorado Chico, describiendo Litología, Alteración y Estructuras.

5.1.1.1. Litología

En el área de estudio se observan una secuencia volcano-sedimentaria de edad Cretácica con intercalaciones de rocas lávicas y volcanoclásticas que se correlacionan a nivel regional con la Formación La Zorra del Grupo Casma (Figura 24), intruída por rocas de composición diorita/tonalita de textura fanerítica con cristales idiomorfos de plagioclasa, ferromagnesianos y moderado magnetismo, probablemente perteneciente a los cuerpos tempranos del Batolito de la Costa (Figura 25), identificada en Pampa Canoas, hacia el este de la zona estudiada, generando un halo metavolcánico en el contacto con la secuencia volcano-sedimentaria (Figura 24).

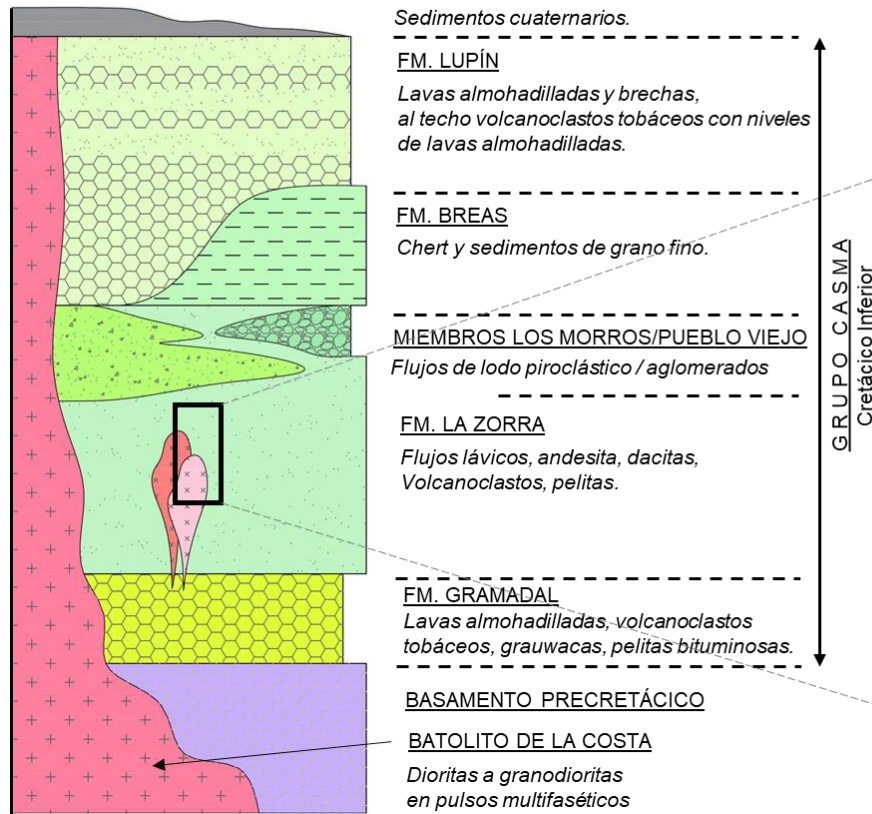
Se ha identificado tres unidades principales (Figura 24): (1) Andesita inferior, constituida por rocas lávicas andesíticas silicificadas con niveles volcanoclásticos, lateralmente se interdigita con lavas riolíticas a dacitas hacia la base, (2) Secuencia volcanoclástica, suprayaciendo a la unidad de andesita inferior, constituida por rocas volcanoclásticas que gradan de textura fina (tobáceos) a gruesa, compuesta por clastos líticos centimétricos y cristales rotos, con intercalaciones de andesita-dacita silicificadas, niveles de brecha volcánica, horizontes sedimentarios de limolitas y areniscas finas, y (3) Andesita superior, suprayaciendo a la secuencia volcanoclástica, constituía por intercalación de lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas (Ver Figura 26)

Esta secuencia volcano-sedimentaria se encuentra cortada por diques andesíticos cloritizados con moderado magnetismo. (Ver Figura 27)

En la zona de Cerro Colorado Chico, hacia el oeste se observa pequeñas apófisis de stocks de diorita y granodiorita, que probablemente corresponden a intrusiones subvolcánicas ligadas al batolito de la costa (Figura 28).

Columna estratigráfica generalizada

Paramonga - Huarmey



Columna estratigráfica local

Cerro Colorado Chico

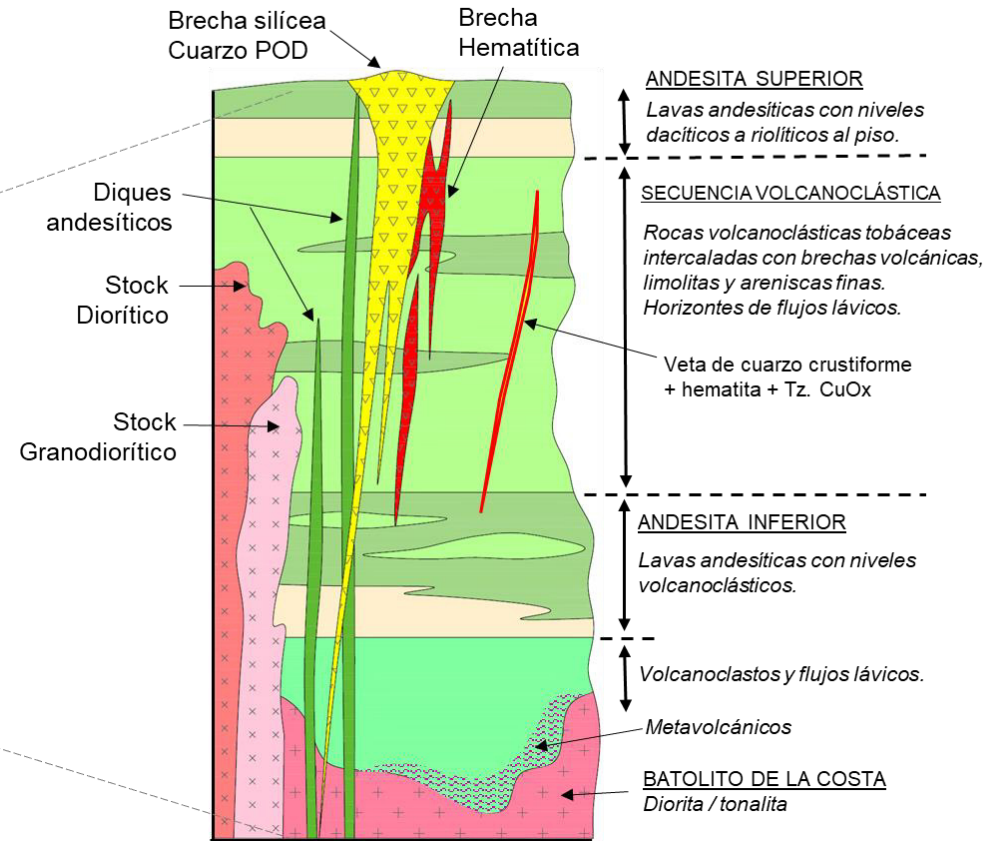


Figura 24. Correlación entre la columna estratigráfica de Paramonga - Huarmey (a la izquierda) y la columna estratigráfica local en el prospecto Cerro Colorado Chico (derecha).

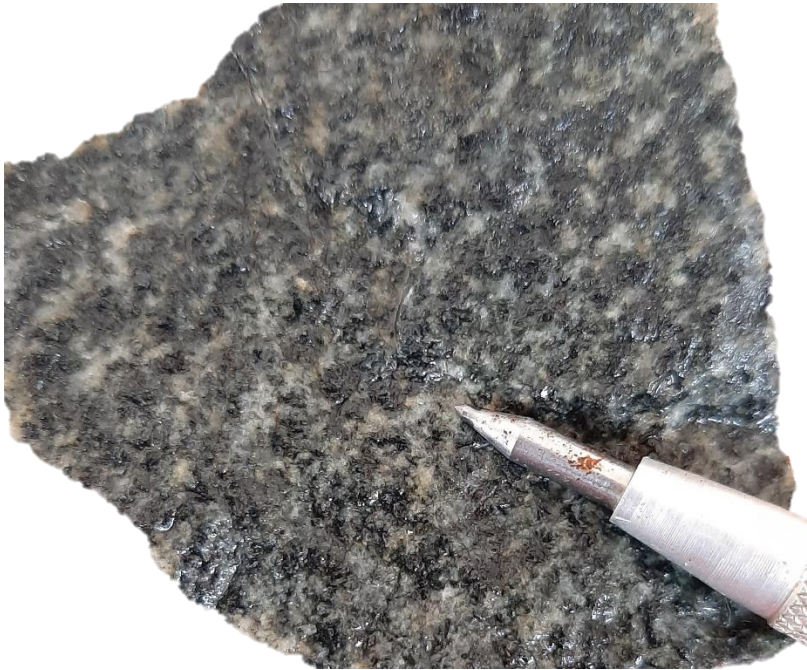


Figura 25. Tonalita equigranular textura fanerítica del Batolito de la Costa, que aflora hacia el Este de la zona de estudio.



Figura 26. Foto panorámica en la zona de Pampa Bermejo, vista hacia el sureste, donde se observa la secuencia volcanoclástica suprayaciendo a un nivel lávico de andesitas.



Figura 27. Vista panorámica del enjambre de diques andesíticos cortando a la secuencia volcanoclástica. Foto: Eber Carbajal.

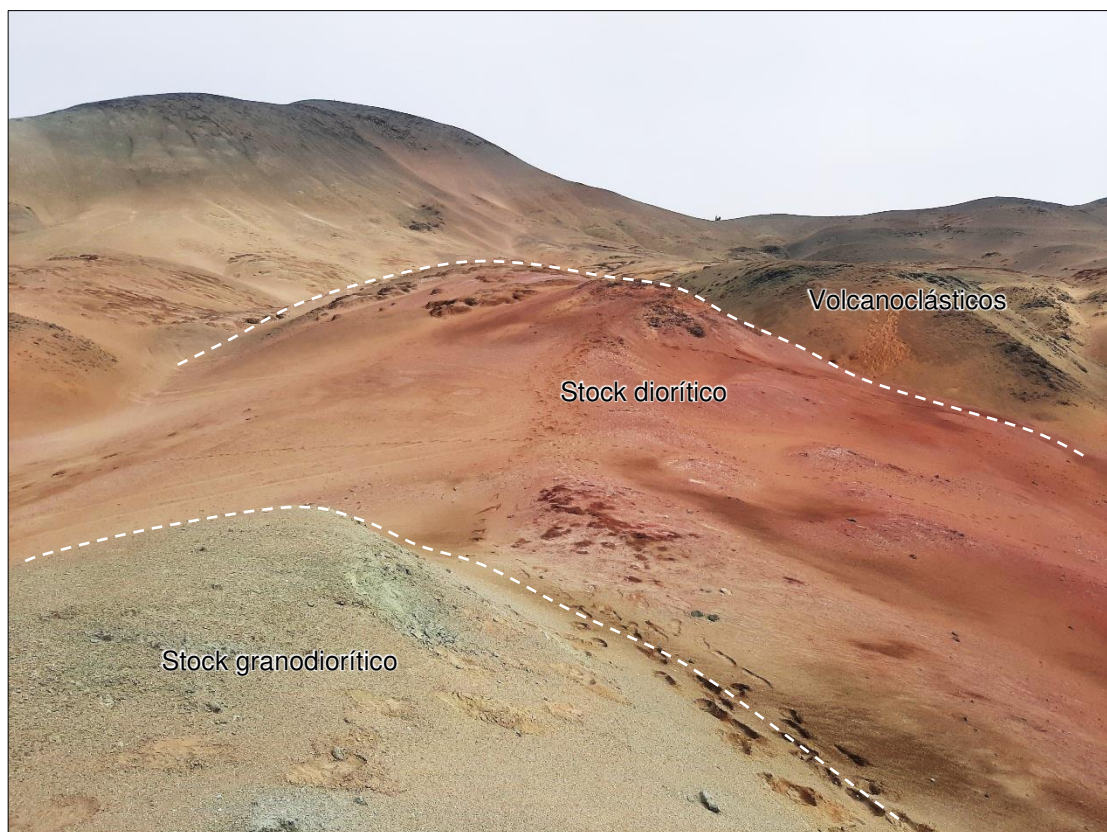


Figura 28. Foto panorámica en la zona de Cerro Colorado Chico, con vista hacia el norte, donde se observa un stock diorítico argilizado y hematitizado que corta a las rocas volcanoclásticas y es cortados por un stock granodiorítico.

5.1.1.2. Alteraciones hidrotermales

En el área predomina una extensa silicificación de moderada a fuerte con sericita y pirita diseminada hasta 3 - 5%, zonas con fuerte y moderada hematización, y débil a moderada cloritización que se extiende distalmente.

En la zona de Cerro Colorado Chico, así como en Pampa Colorada, se observa hematización pervasiva que oblitera completamente la roca original (Figuras 29 y 30), además hay afloramientos de ferricreta o gossan con hematita, yeso y otros óxidos de Fe, en partes se observa la textura de la roca protolito pero completamente hematizada (31).

Alineado a estructuras regionales se presentan cuerpos de sílice (cuarzo POD, Figura 32) que gradan de masivo a granular y luego brechado en la parte central, con un halo de alteración argílica avanzada de textura patchy con sílice-pirofilita-alunita. La característica principal de estos cuerpos silíceos es que presentan múltiples eventos de silicificación, en los núcleos brechados se observa fragmentos de sílice blanquecina cementados por sílice rosácea, esta última debido a su contenido de hematita en su red cristalina. Además, se observa brechas con clastos subagulosos silicificados y cementados por hematita.

Se puede establecer una zonación horizontal con un núcleo de brecha silícea (Figura 33A) que gradan a sílice masiva con contenido de hematita (Figuras 33B y 33C) o sílice granular, y en ocasiones a sílice oquerosa o vesicular (Figura 33D), con halo restringido de sílice-pirofilita-alunita con textura patchy (Figura 33E), luego un halo amplio de sílice-sericita-pirita que afecta tanto a rocas lávicas andesitas-dacitas como a rocas volcanoclásticas (Figuras 33F y 33G) con zonas de fuerte hematización (Figuras 29, 30 y 31), y finalmente un halo distal de cloritización de moderada a débil (Figuras 30 y 33H)

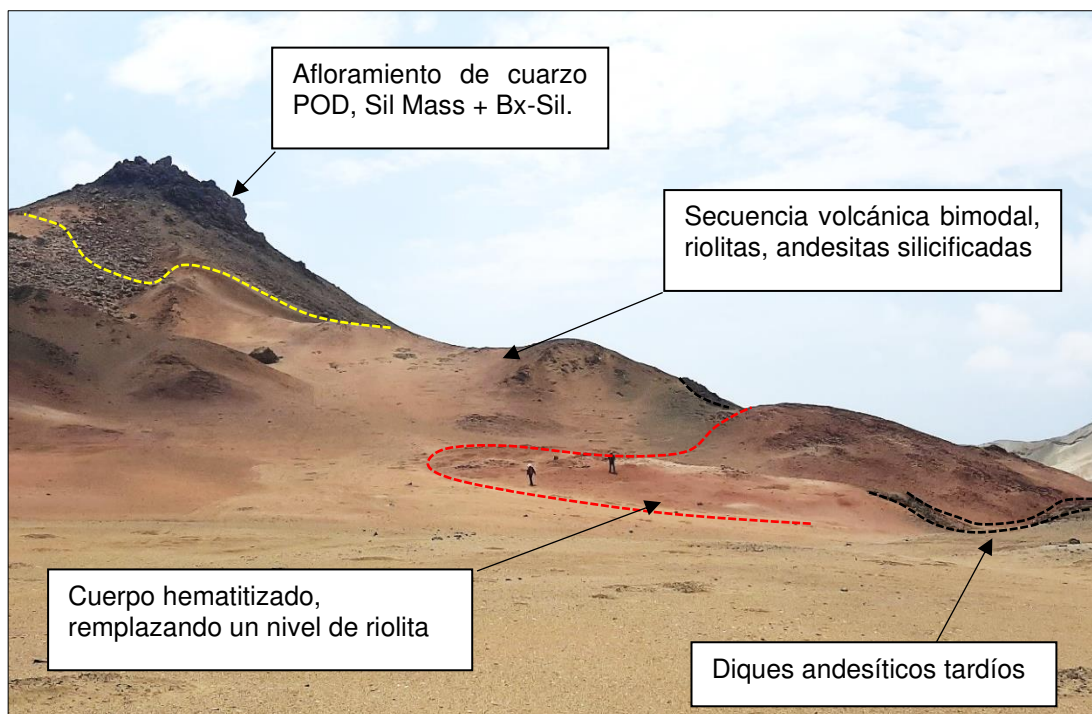


Figura 29. Vista panorámica hacia el suroeste, donde se observa afloramiento de cuerpo de sílice (cuarzo POD) cortando a la secuencia volcano-sedimentaria alterada.



Figura 30. Foto panorámica en Pampa Colorada, con vista hacia el este donde se observa un halo con fuerte hematitización rodeando al cuerpo de sílice, y el halo clorítico distalmente.

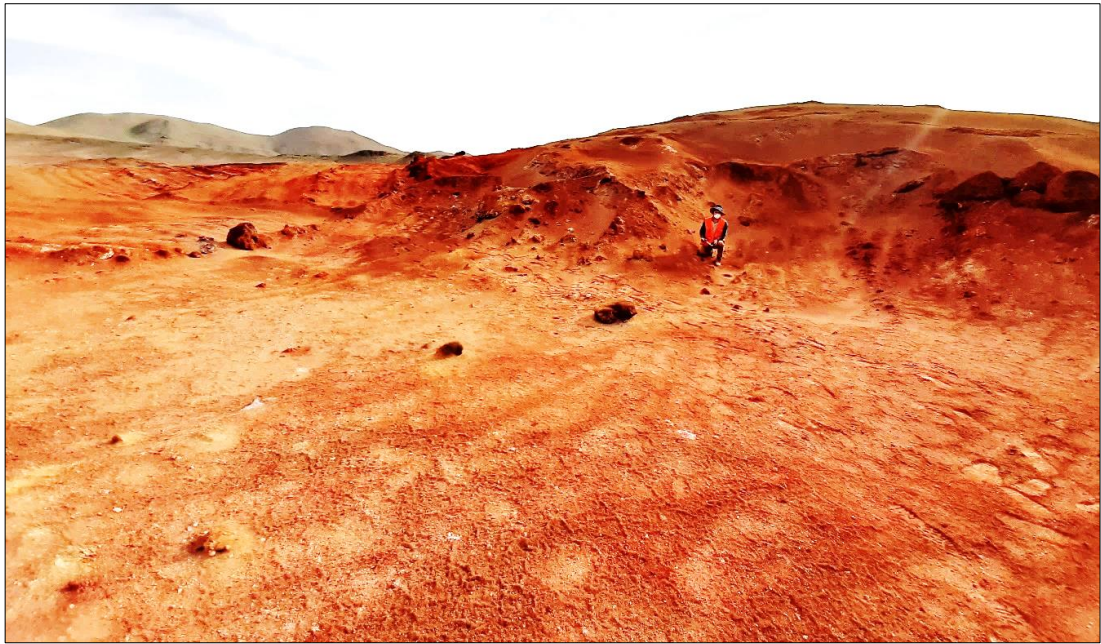


Figura 31. Ferricreta con hematita, goetita y yeso, en la zona de Pampa Colorada.

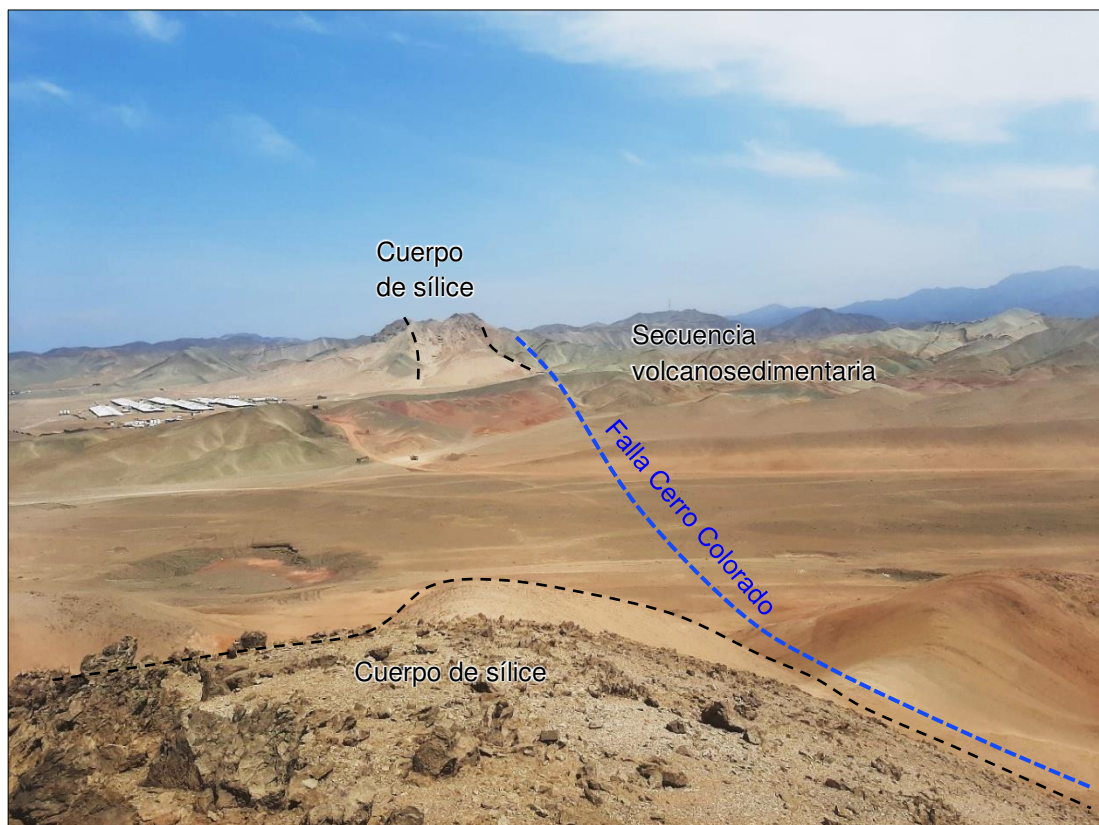


Figura 32. Foto panorámica con vista hacia el noroeste donde se aprecia la continuidad de los cuerpos silíceos asociados a la falla Cerro Colorado hacia el noroeste cortando a la secuencia volcánico-sedimentaria.

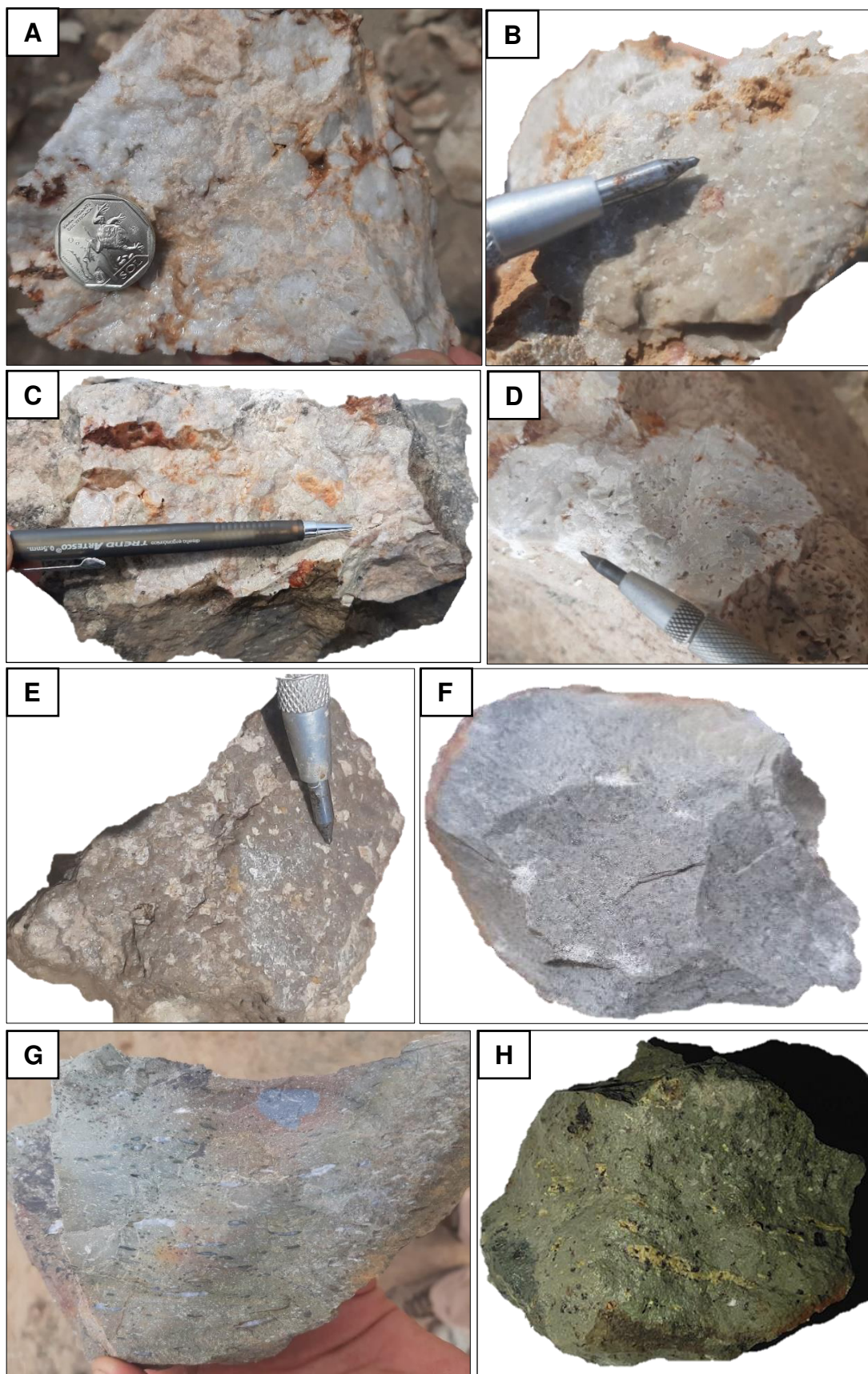


Figura 33. Muestras de mano de alteraciones hidrotermales en Cerro Colorado Chico.

Figura 33. A. Brecha sílicea, clastos de sílice blanquecina cementados por sílice rosácea, probablemente por el contenido de hematita en su red cristalina. B. Muestra de mano de sílice masiva con pátinas de óxidos de Fe. se observa cristales de cuarzo rojizo por su contenido de hematita. C. Muestra de mano de cuerpo de sílice masiva hematitizada. D. Cuarzo masivo vesicular, con pátinas de $OxFe$. La tonalidad rosácea de la sílice puede deberse al contenido de hematita en su red cristalina. E. Muestra de mano con alteración pervasiva con ensamble sílice - pirofilita con textura en parches. La tonalidad rosácea en los parches puede sugerir presencia de alunita. F. Roca dacítica con silicificación moderada y presencia de pirita (3%). G. Roca volcánica amigdaloides, con fuerte silicificación, débil cloritización. H. Roca volcanoclástica con alteración clorítica.

5.1.1.3. Mineralización

Las principales evidencias de mineralización en el prospecto Cerro Colorado Chico son los cuerpos silíceos (cuarzo POD), brechas de hematita, y vetas de cuarzo con hematita que afloran hacia el SE de Cerro Colorado Chico y N de Pampa Bermejo (Figuras 34 y 35), las brechas de hematita se caracterizan por ser clastosoportadas, monomícticas con clastos silicificados subangulosos y cementados por hematita (Figuras 36A y 36B), las vetas tienen orientación preferente N 250° - 270°, N 305° - 315° y N 25° - 35° con espesores que varían de decenas de centímetros hasta 3 m de ancho, presentan textura crustiforme con cristales de cuarzo bien desarrollados hasta centimétricos (Figura 36C), con múltiples generaciones de cuarzo y óxidos de hierro (hematita y jarosita), en algunos casos con presencia de carbonatos y sulfuros secundarios de Cu (malaquita y covelina) que se extienden hacia la roca caja (Figura 36D).

La figura 37 muestra una sección esquemática del sector norte del área de estudio con los detalles de alteración y mineralización.



Figura 34. Foto panorámica con vista hacia el noreste. Se observa Cuerpos de sílice y veta de sílice - hematita de orientación noreste que cortan a la secuencia de volcanoclastos y andesitas y diques de orientación noroeste.

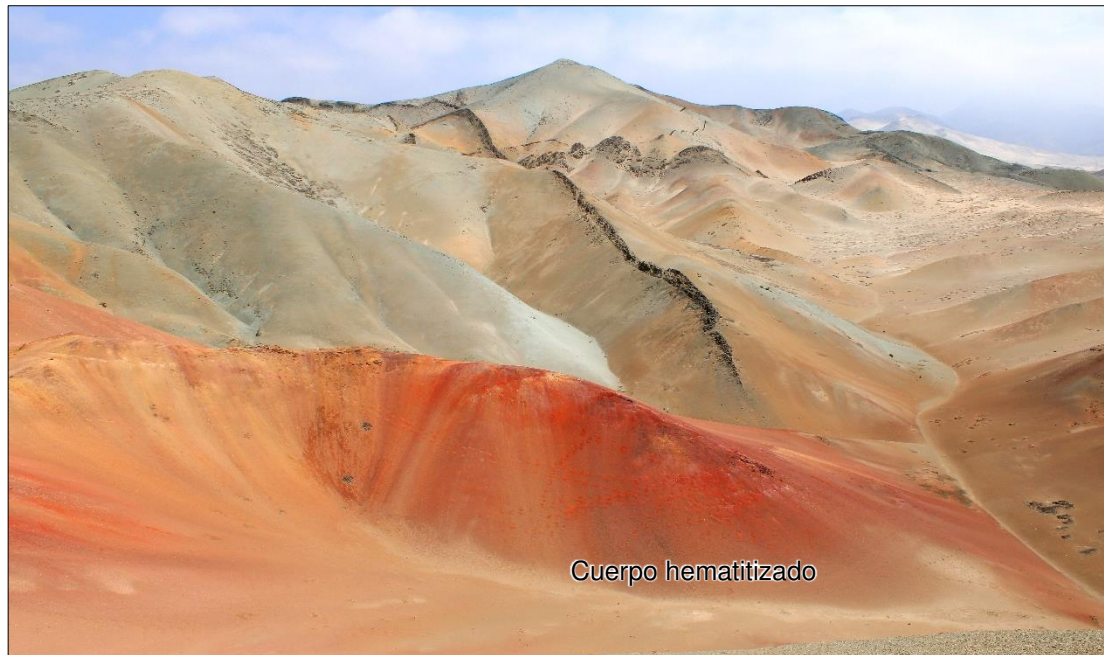


Figura 35. Vista de un cuerpo hematizado cortando a la secuencia volcanoclásticas y diques andesíticos. Foto: Eber Carbajal.

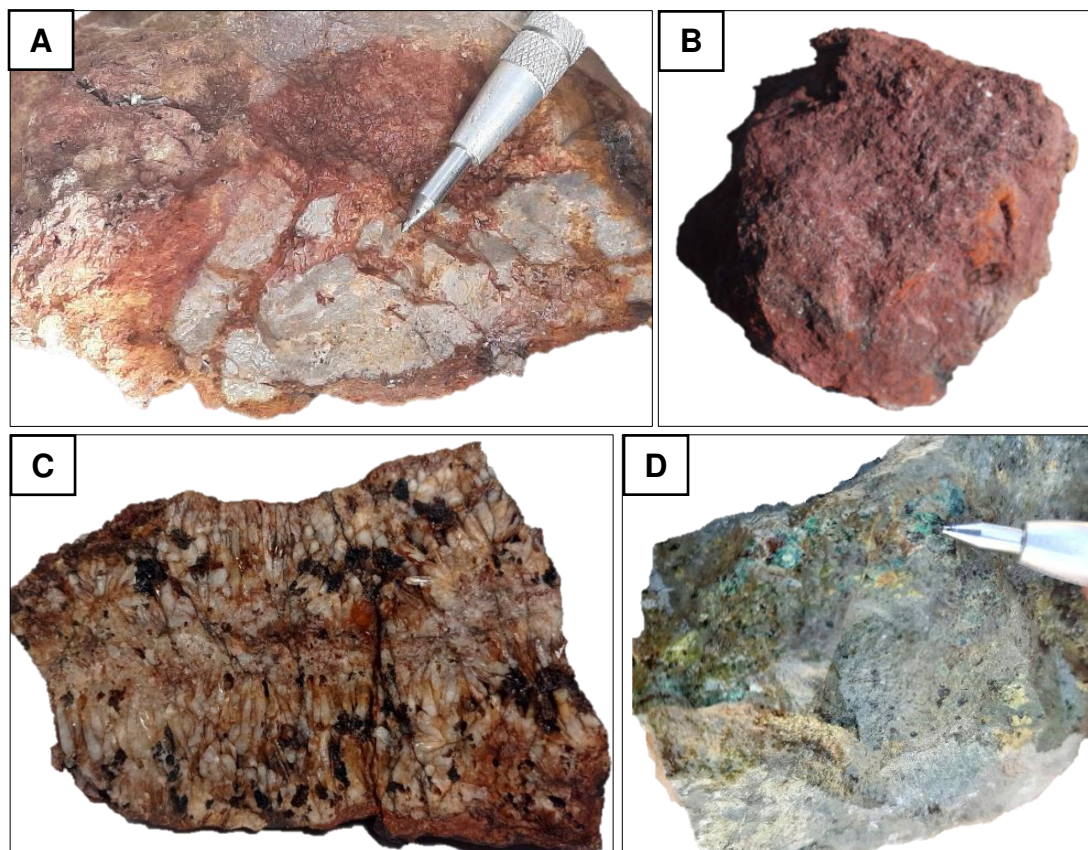


Figura 36. Muestras de mano de mineralización en Cerro Colorado Chico: A. Brecha con clastos subangulosos silicificados cementados por hematita. B. Hematización pervasiva. C. Veta cuarzo – hematita con textura crustiforme. D. Roca volcanoclástica con parches de malaquita y jarosita.

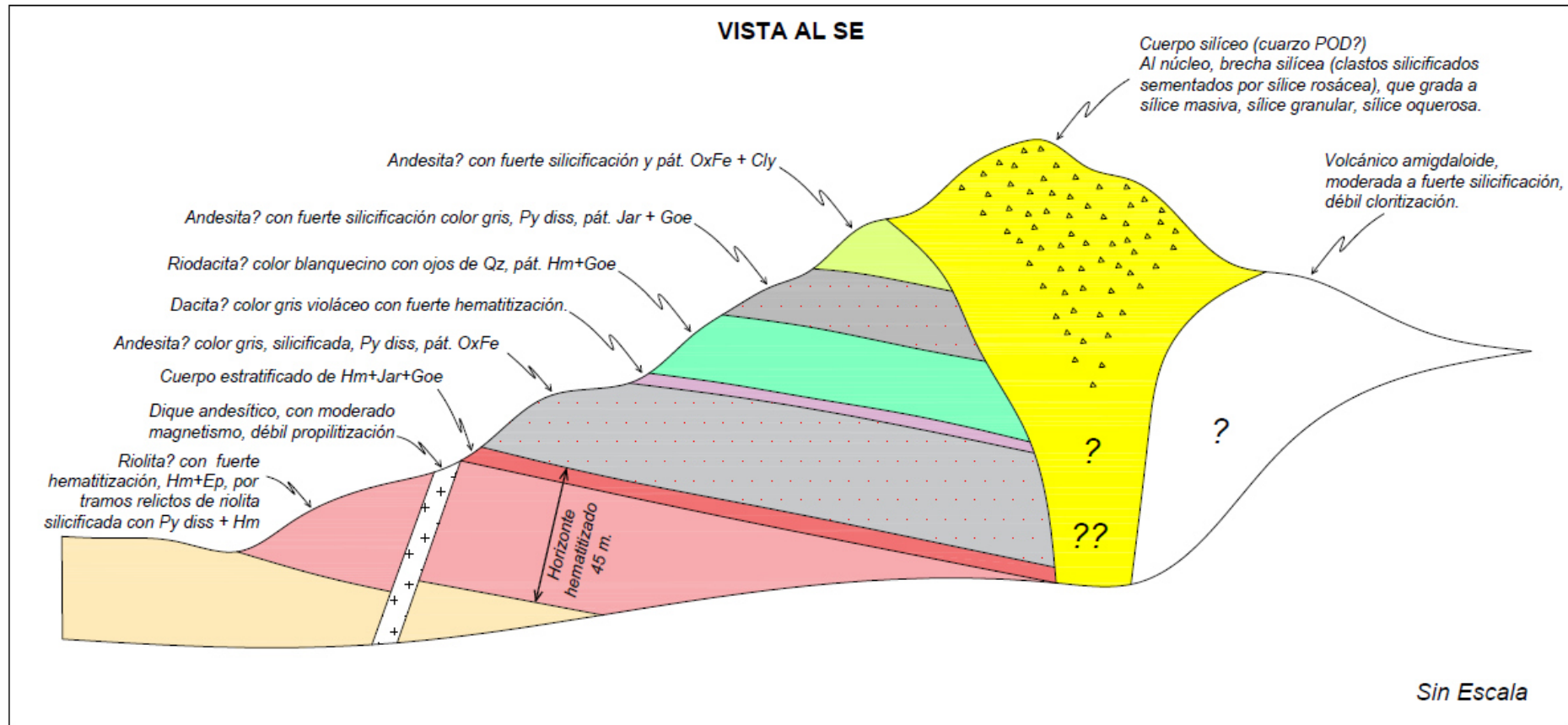


Figura 37. Sección esquemática con vista al SE del sector norte del prospecto Cerro Colorado Chico. Elaboración propia

5.1.1.4. Marco geoestructural

En la zona de estudio se ha identificado dos sets de estructuras principales, tanto a nivel superficial con el cartografiado geológico (Figura 38) cómo a nivel de lineamientos geofísicos en profundidad (Figura 40). Un set NO – SE de primer orden como la falla Cerro Colorado Chico que coincide con la alineación de la secuencia volcano-sedimentaria heredando estructuras sinvolcánicas durante la depositación del Gpo. Casma, que a su vez controla el emplazamiento de cuerpos silíceos (cuarzo POD, Figura 32), así como un set NE – SO de segundo orden que corta al primer set y controla el emplazamiento de estructuras vetiformes y cuerpos silíceos y localmente un tercer set E-O de tercer orden.

En la zona de estudio también se observa cuatro sets principales de diques andesíticos, con orientaciones NO, NE, N-S y E-O (Figura 38), que a su vez se encuentran cortados por fallas transcurrentes posteriores (Figura 39).

La interpretación geofísica de datos magnetométricos ha permitido identificar estructuras profundas de orientación NO y NE, así mismo los datos de espectrometría ha permitido delinear zonas con anomalías K/Th, anomalías de $K > 1.4\%$ que se relacionan con zonas de alteración y cuerpos con empobrecimiento de K ($K < 0.9\%$) que se correlacionan con la presencia de cuerpos brechados de sílice (cuarzo POD) asociados a zonas de cruce de estructuras NO y NE (Figura 40), asimismo se observa un lineamiento semicircular en Pampa Bermejo asociado a una anomalía de K que puede corresponder a un cuerpo intrusivo en profundidad (Figura 40).

Las secciones geológicas (Figura 41) muestran un fuerte control estructural para el emplazamiento de los cuerpos silíceos y de las brechas de hematita, y un control litológico en el desarrollo de los halos de alteración, que se expanden lateralmente aprovechando litologías favorables; los horizontes hematitizados predominan en niveles dacíticos y volcanoclásticos, mientras que el halo sílice-sericita-pirita se desarrolla ampliamente en los niveles de lavas andesitas y dacitas, aunque también afecta a la secuencia volcanoclástica.

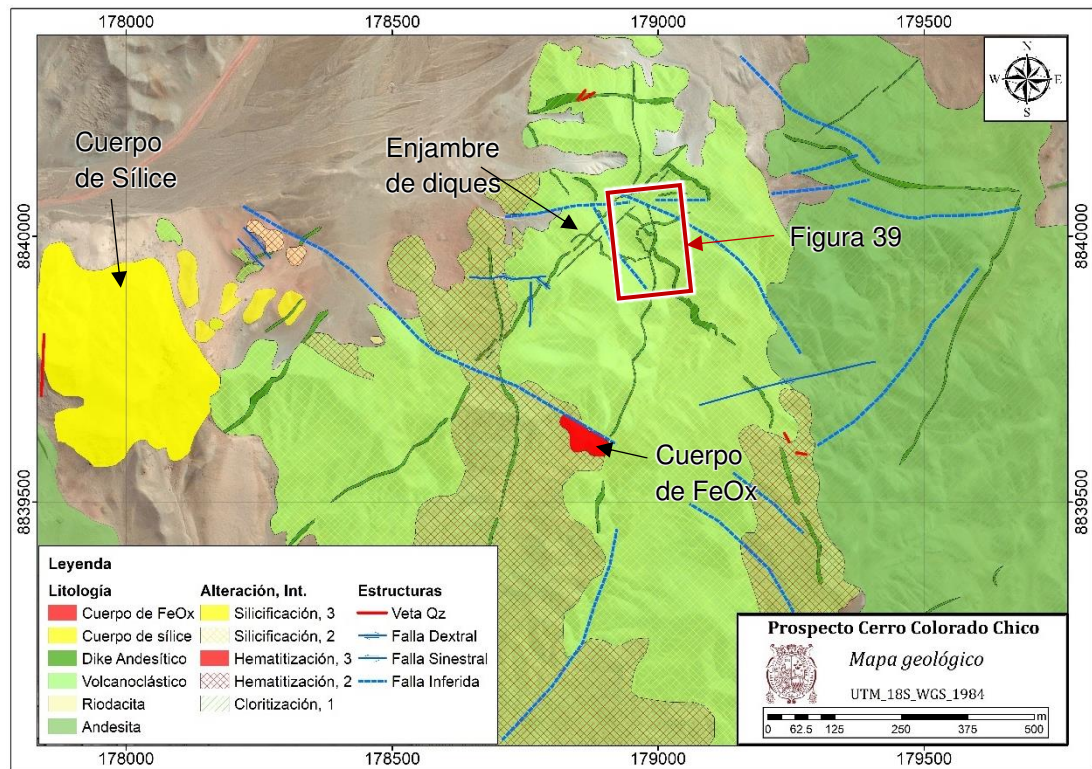


Figura 38. Detalle del mapa geológico de la zona norte del área de estudio, donde se puede apreciar los sets principales de fallas, y un enjambre de diques con orientaciones NE, NO, N-S y E-O



Figura 39. Fotografía panorámica con vista hacia el Este, donde se observa un enjambre de diques que se cortan entre sí, y desplazados por fallas posteriores. Foto: Eber Carbajal.

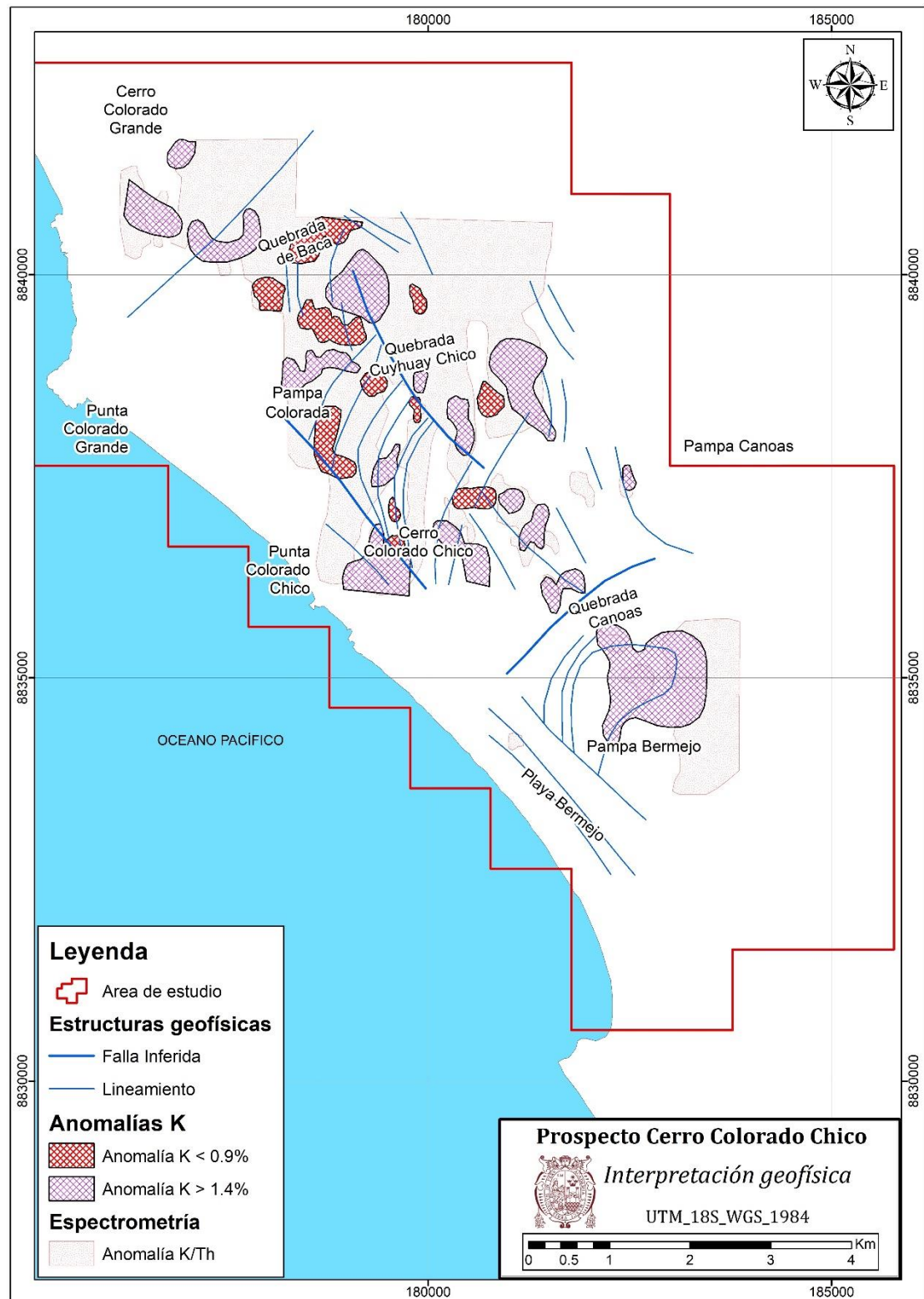


Figura 40. Interpretación estructural a partir de datos geofísicos, magnetometría y espectroscopía.

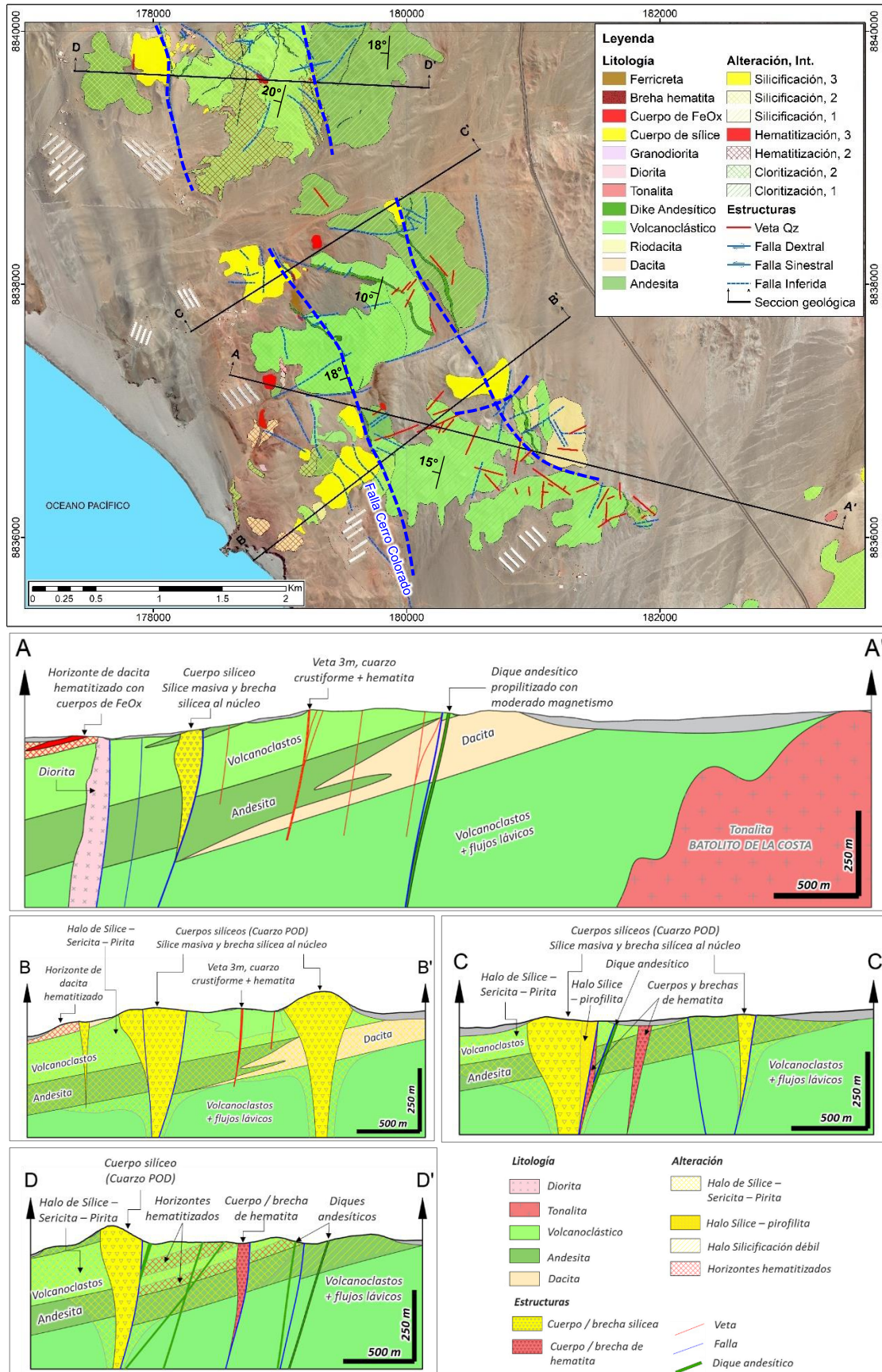


Figura 41. Secciones geológicas. Arriba: mapa geológico de referencia con las líneas de sección. Abajo: secciones interpretadas: AA', BB', CC' y DD'.

5.1.2. Signaturas de teledetección

Con el procesamiento de imágenes ASTER, aplicando combinaciones de bandas, álgebra y ratios de bandas se ha identificado y cartografiado las alteraciones predominantes en el prospecto Cerro Colorado Chico.

5.1.2.1. Combinaciones de Bandas

La combinación RGB de las bandas 4-6-1 (Figura 42) y 1-3-5 (Figura 43) permitió identificar y cartografiar la presencia de arcillas, óxidos y moscovita, se observa fuerte presencia de alteración en las áreas de Cerro Colorado Chico, Pampa Colorada, Pampa Bermejo y Pampa Canoas, resaltando la alteración moscovita – arcillas y zonas con fuerte oxidación. Entre Cerro Colorado Chico y Pampa Colorada se aprecia una franja de orientación NO – SE con predominancia de alteración hidrotermal que se asocia a la presencia de cuerpos silíceos controlados por la Falla Cerro Colorado (Figuras 42 y 43).

5.1.2.2. Algebra y ratio de Bandas

El álgebra y ratio de bandas de imágenes ASTER, permite identificar los minerales de alteración con mayor detalle, de acuerdo con índices de alteración (tablas 4 y 5), basado en Ninomiya (2004):

Tabla 4

Ratio de bandas ASTER para identificar alteraciones.

ENSAMBLE DE ALTERACIÓN	ECUACIÓN
Alt. Argílica Avanzada	B4/B5
Alt. Argílica-Fílica	B4/B6
Alt. Propilítica	B5/B8
Óxidos e Hidróxidos de Fe	B2/B1

Tabla 5

Índices de Ninomiya para identificar minerales de alteración en imágenes ASTER.

ÍNDICE DE NINOMIYA	MINERALOGÍA	ECUACIÓN
OHla	Moscovita-Illita-Montmorillonita	$Ohla = \frac{B4 * B7}{B6 * B6}$
Ohlb	Pirofilita	$Ohlb = \frac{B4 * B7}{B5 * B5}$
ALI	Alunita	$ALI = \frac{B7 * B7}{B5 * B8}$
CLI	Calcita	$CLI = \frac{B6 * B9}{B8 * B8}$

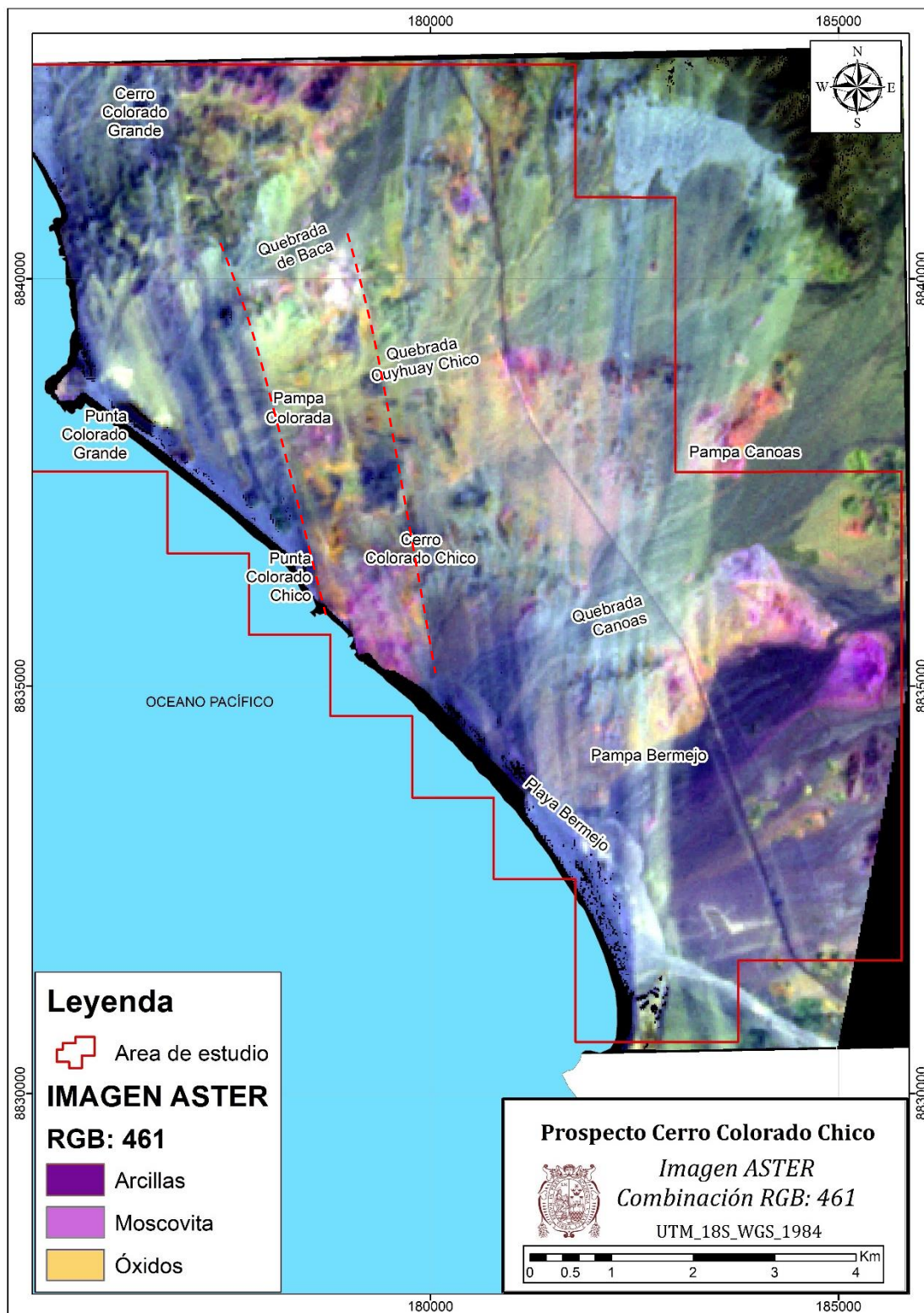


Figura 42. Plano de alteraciones usando la combinación de bandas ASTER RGB: 4-6-1.

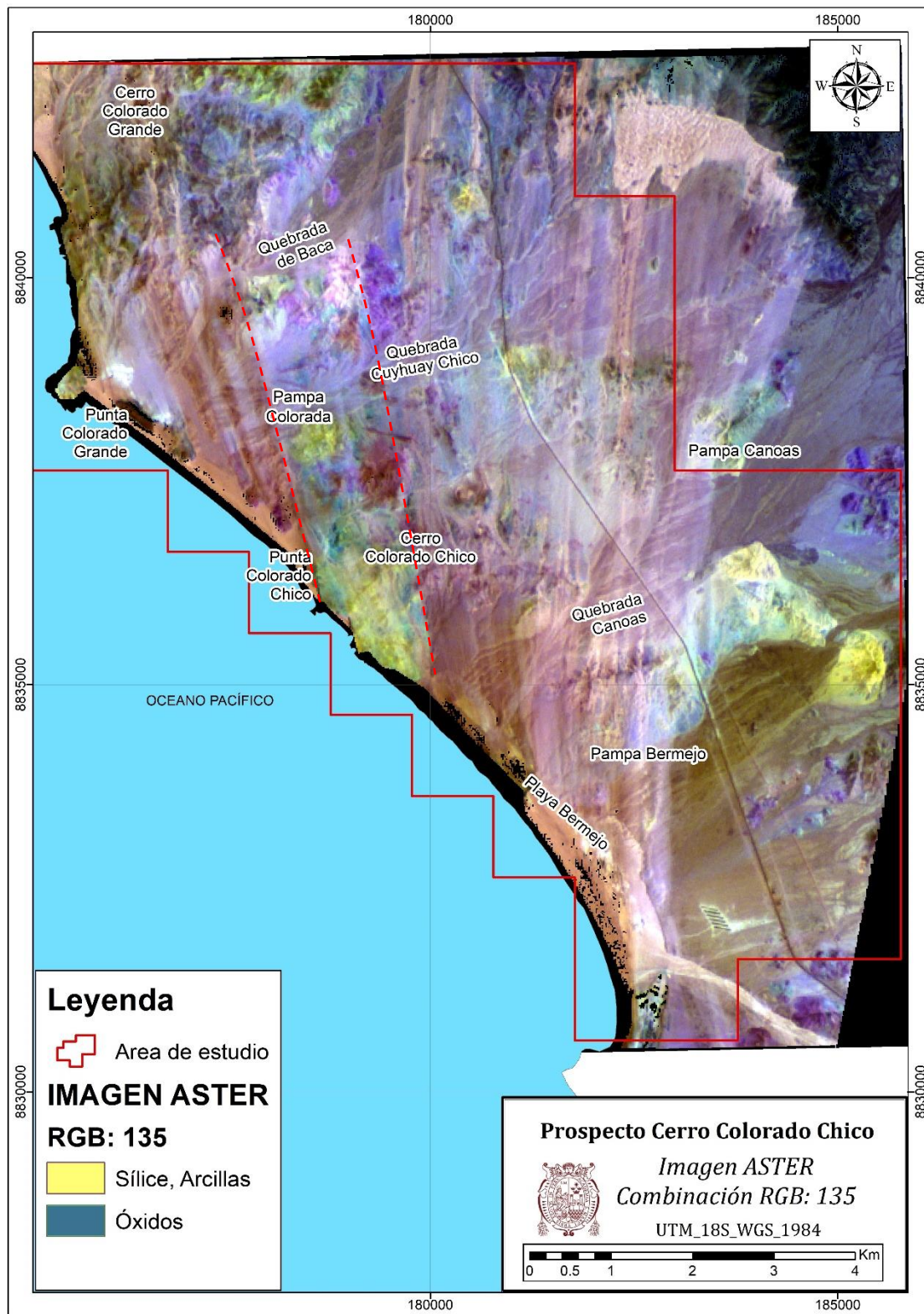


Figura 43. Plano de alteraciones usando la combinación de bandas ASTER RGB: 1-3-5.

Usando los ratios de bandas (Figura 44) se ha identificado la presencia de alteración argílica avanzada y alteración argílica – sericita, rodeada con óxidos e hidróxidos de hierro, estas alteraciones se extienden en Cerro Colorado Chico, Punta Colorado Chico, Pampa Colorada, Pampa Bermejo y Pampa Canoas, de manera distal se presenta alteración propilítica, la amplia distribución de estas alteraciones en la zona de estudio sugiere fuerte actividad hidrotermal.

Del mismo modo, usando el álgebra de bandas (Figura 45) se ha identificado minerales de alteración argílica avanzada como pirofilita-alunita, minerales de alteración argílica-sericita como motmorillonita-illita-moscovita, y minerales de alteración propilítica como calcita. La distribución espacial de estos minerales se contrasta con las alteraciones identificadas con los ratios de bandas, lo cual aporta a incrementar la confiabilidad del uso de la teledetección para la identificación de las alteraciones hidrotermales.

Adicionalmente se usó la técnica SAM (Spectral Angle Mapper) para mapeo de minerales de alteración (Figura 46), con el cual se identificó presencia de alunita, pirofilita, moscovita, dentro de las zonas con alteración argílica avanzada, y argílica-sericita, en los alrededores presencia de dikita, caolinita, illita y motmorillonita, y más distalmente epidota, clorita y calcita.

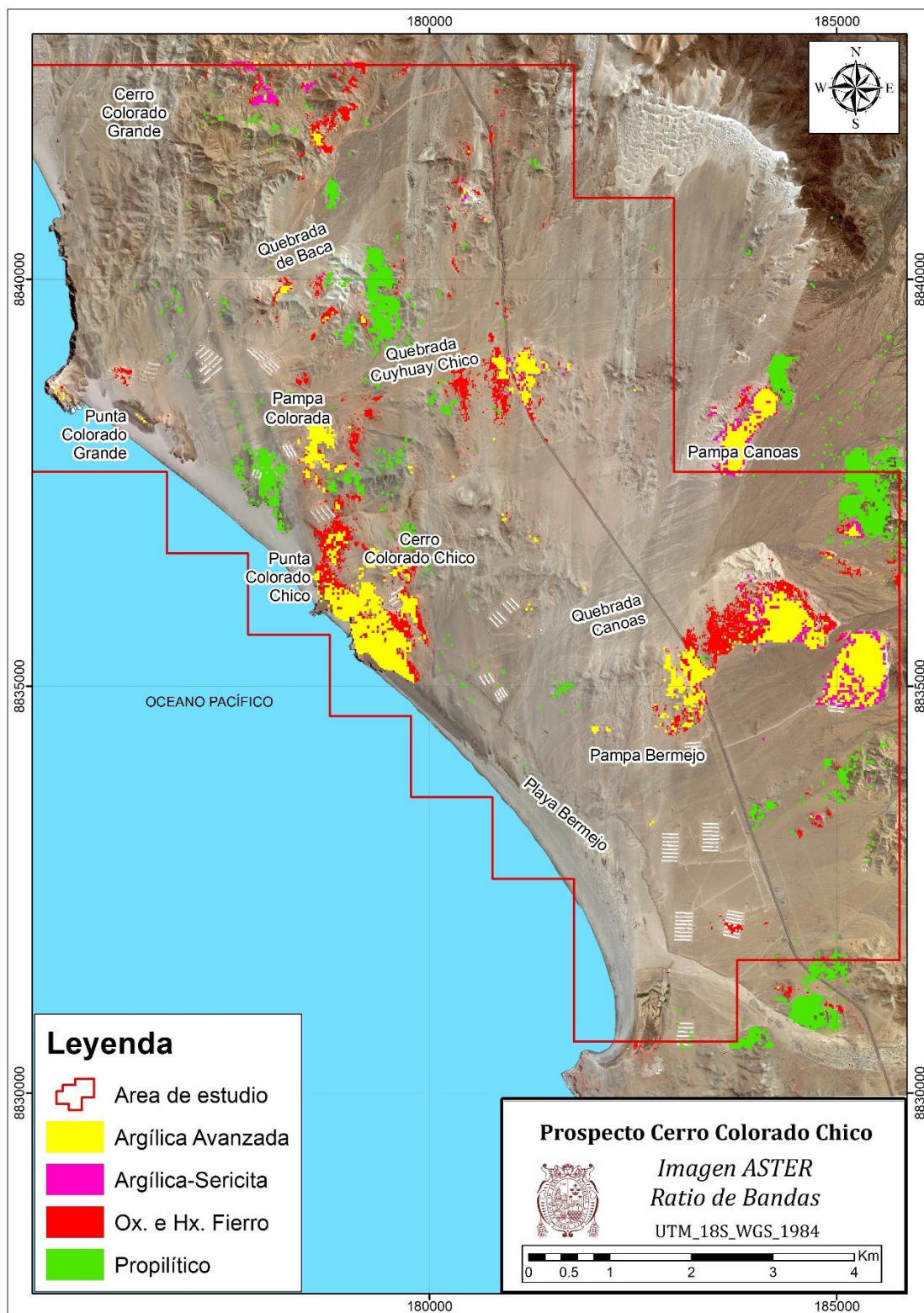


Figura 44. Plano de alteraciones usando ratio de bandas ASTER de acuerdo a la tabla N°4

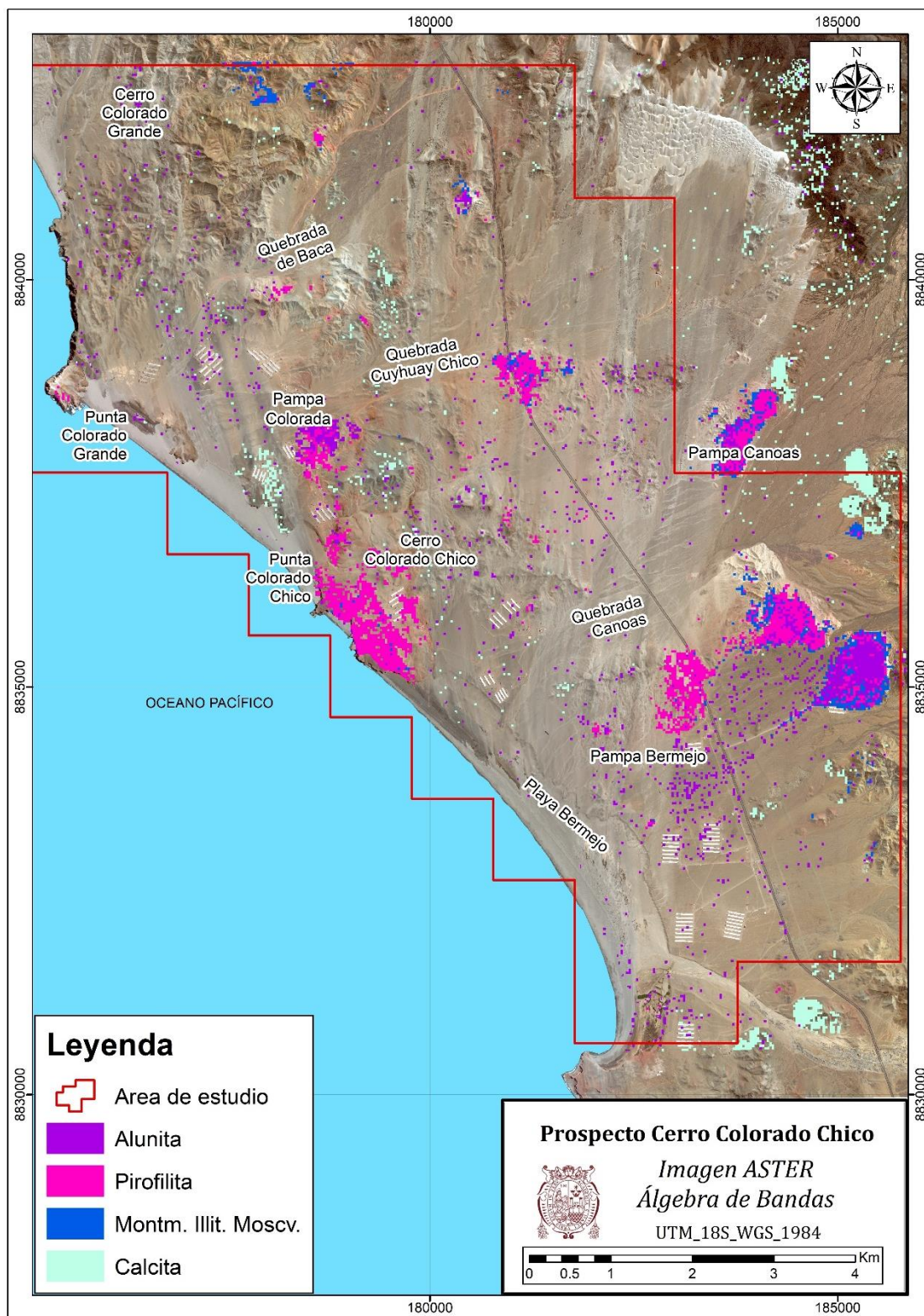


Figura 45. Plano de alteraciones usando álgebra de bandas ASTER con los Índices de Ninomiya de la tabla N° 5.

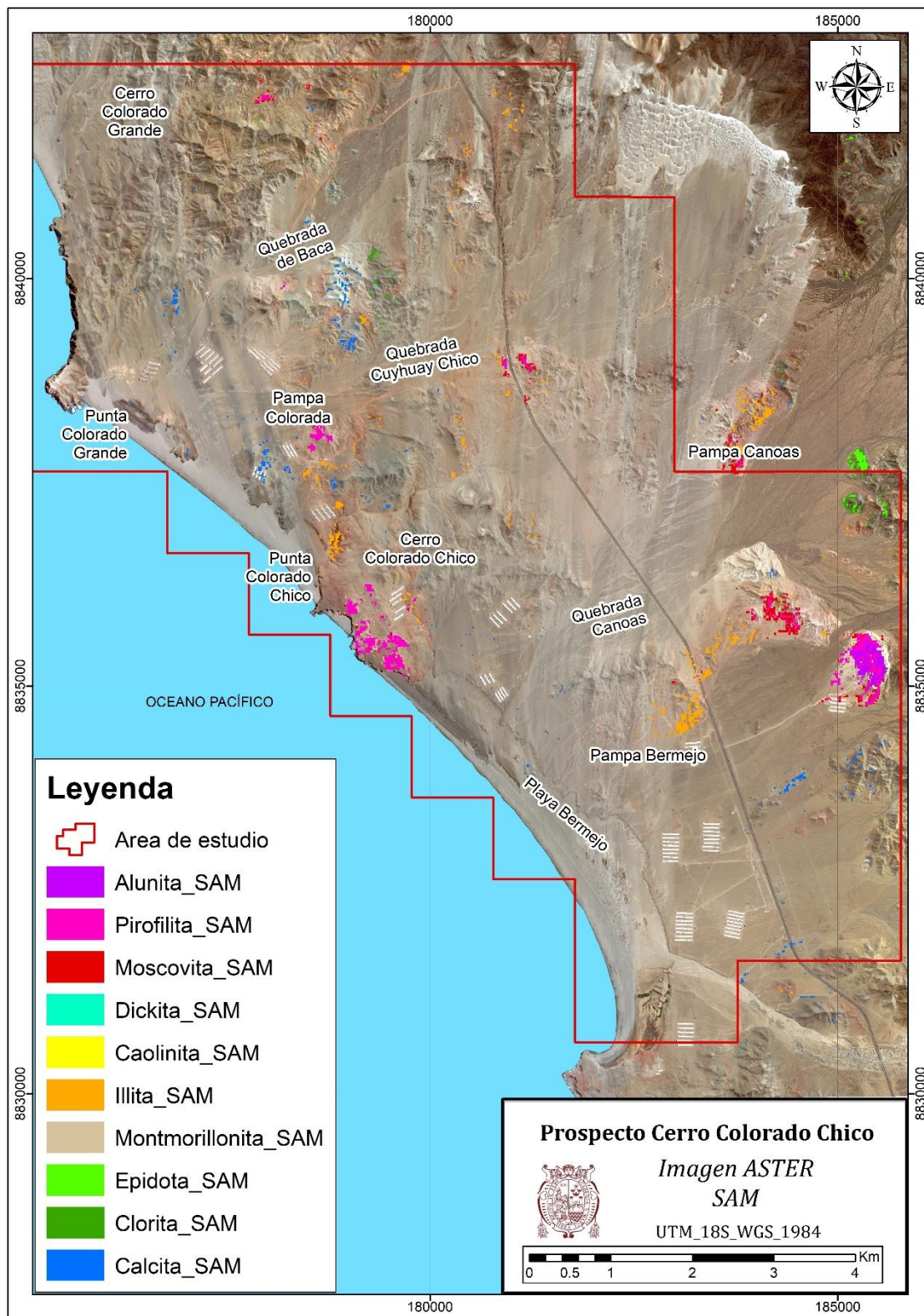


Figura 46. Plano de minerales de alteración usando SAM.

5.1.3. Geoquímica de Suelos

Se cuenta con 231 muestras de suelo (Figura 47) que han sido muestreadas en una malla regular de 200 m x 200 m en las zonas de Pampa Canoas (90) y Pampa Bermejo (103 muestras) y en una malla regular de 100 m x 100 m en la Punta Colorado Chico (38 muestras), los horizontes muestreados fueron horizonte C y B de acuerdo con la disponibilidad del suelo en cada área, en calicatas de 0.20 m a 0.50 m de profundidad.

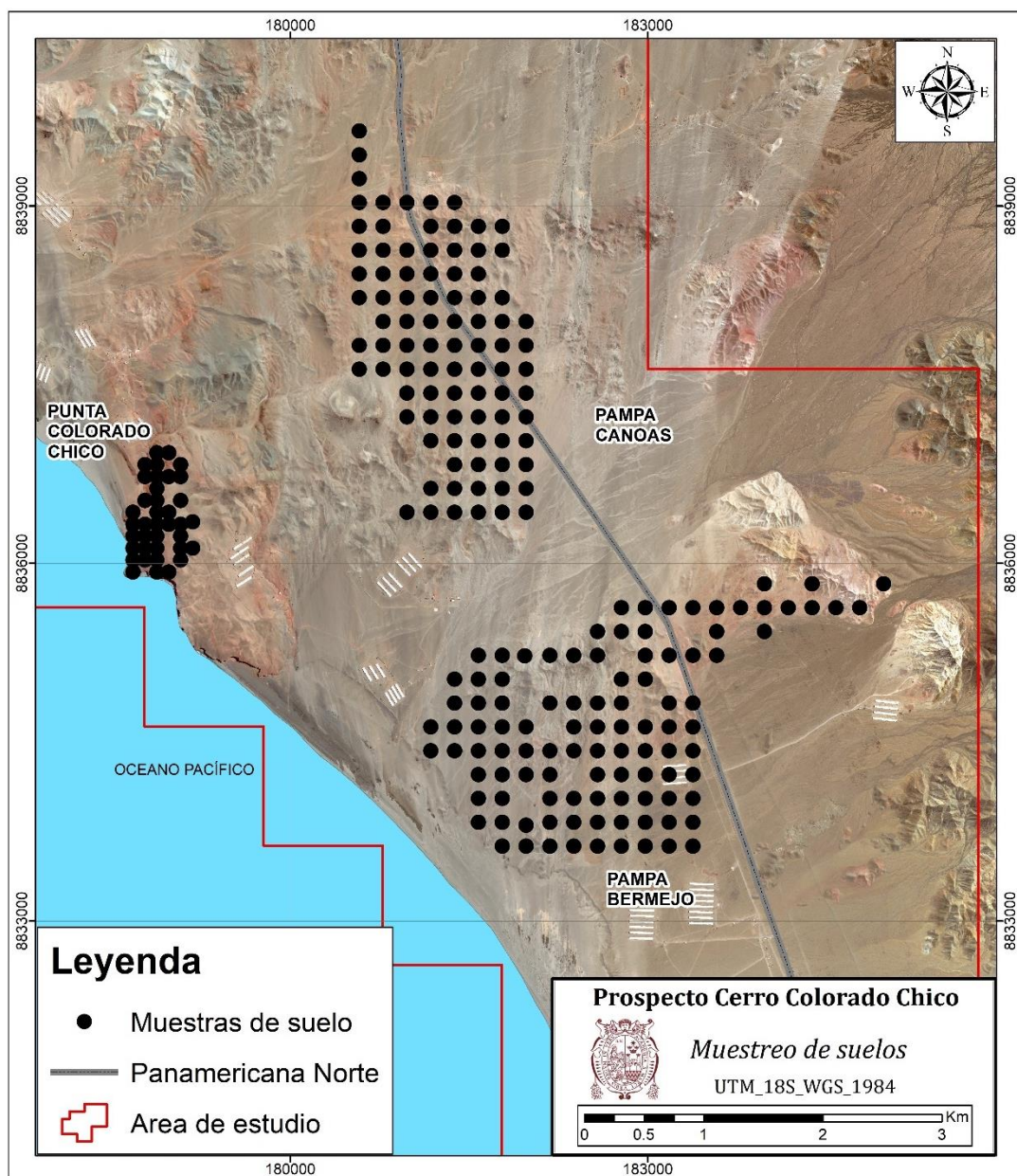


Figura 47. Plano de distribución de muestras de suelo.

5.1.3.1. Análisis exploratorio de datos

Las 231 muestras de suelo han sido analizadas por el método de iones metálicos móviles (Mobile Metal Ions, MMI) por 53 elementos, cuyos límites de detección, cantidad de valores censurados y porcentaje de datos censurados se muestran en la Tabla 6.

Helsel (2012) sugiere que para 80% a más datos censurados no es confiable realizar estimaciones estadísticas, sólo se podría estimar los percentiles altos como 90% o 95% para grandes conjuntos de datos, por lo que en esta investigación los elementos con 80% o más datos censurados ha sido separada, ya que para fines de exploración geoquímica es necesario contar con las medidas de tendencia central entre otras estadísticas descriptivas, que por obvias razones no podrían estimarse para tales elementos.

De acuerdo con la distribución espacial de las muestras (Figura 47), se ha subdividido en tres poblaciones muestrales, Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo; para el análisis de distribución estadística y determinación de parámetros estadísticos.

Tabla 6

Elementos reportados mediante la técnica MMI con sus límites de detección y cantidad de datos censurados.

Elemento	Muestras	LD	LS	DC	%DC	Tipo de censura
Ag_ppb	231	1		10	4%	<1 Por la izquierda
Al_ppm	231	1	300	226	98%	<1 Por la izquierda
As_ppb	231	10		2	1%	<10 Por la izquierda
Au_ppb	231	0.1		21	9%	<0.1 Por la izquierda
Ba_ppb	231	10		114	49%	<10 Por la izquierda
Bi_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Ca_ppm	231	10		0	0%	<10 Por la izquierda
Cd_ppb	231	1		0	0%	<1 Por la izquierda
Ce_ppb	231	5		231	100%	<5 Por la izquierda
Co_ppb	231	5		3	1%	<5 Por la izquierda
Cr_ppb	231	100		231	100%	<100 Por la izquierda
Cs_ppb	231	0.5		15	6%	<0.5 Por la izquierda
Cu_ppb	231	10		0	0%	<10 Por la izquierda
Dy_ppb	231	1		223	97%	<1 Por la izquierda
Er_ppb	231	0.5		210	91%	<0.5 Por la izquierda
Eu_ppb	231	0.5		231	100%	<0.5 Por la izquierda
Fe_ppm	231	1		56	24%	<1 Por la izquierda
Ga_ppb	231	1		230	100%	<1 Por la izquierda
Gd_ppb	231	1		228	99%	<1 Por la izquierda
Hg_ppb	231	1		164	71%	<1 Por la izquierda
In_ppb	231	0.5		231	100%	<0.5 Por la izquierda
K_ppm	231	0.1	100	74	32%	>100 Por la derecha
La_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Li_ppb	231	5		1	0%	<5 Por la izquierda
Mg_ppm	231	1	300	219	95%	>300 Por la derecha
Mn_ppb	231	10		16	7%	<10 Por la izquierda
Mo_ppb	231	5		85	37%	<5 Por la izquierda
Nb_ppb	231	0.5		229	99%	<0.5 Por la izquierda
Nd_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Ni_ppb	231	5		9	4%	<5 Por la izquierda
P_ppm	231	0.1		155	67%	<0.1 Por la izquierda
Pb_ppb	231	10		70	30%	<10 Por la izquierda
Pd_ppb	231	1		227	98%	<1 Por la izquierda
Pr_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Pt_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Rb_ppb	231	5		0	0%	<5 Por la izquierda
Sb_ppb	231	1		228	99%	<1 Por la izquierda
Sc_ppb	231	5		207	90%	<5 Por la izquierda
Sm_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Sn_ppb	231	1		116	50%	<1 Por la izquierda
Sr_ppb	231	10		0	0%	<10 Por la izquierda
Ta_ppb	231	1		225	97%	<1 Por la izquierda
Tb_ppb	231	1		231	100%	<1 Por la izquierda
Te_ppb	231	10		228	99%	<10 Por la izquierda
Th_ppb	231	0.5		220	95%	<0.5 Por la izquierda
Ti_ppb	231	3		122	53%	<3 Por la izquierda
Tl_ppb	231	0.5		14	6%	<0.5 Por la izquierda
U_ppb	231	1		3	1%	<1 Por la izquierda
W_ppb	231	1		230	100%	<1 Por la izquierda
Y_ppb	231	1		190	82%	<1 Por la izquierda
Yb_ppb	231	1		223	97%	<1 Por la izquierda
Zn_ppb	231	20		0	0%	<20 Por la izquierda
Zr_ppb	231	5		223	97%	<5 Por la izquierda

LD=Límite de detección, LS=Límite superior, DC=Datos censurados

5.1.3.2. Parámetros estadísticos

Antes de realizar el cálculo de los parámetros estadísticos se realizó el análisis de distribución usando el ajuste de Anderson-Darling con la finalidad de determinar el tipo de distribución que presentan los elementos geoquímicos en cada población muestral, se consideró cuatro tipos de distribución Weibull, Lognormal, Loglogística y Normal, en la mayoría de los casos se observó que los elementos presentan distribución lognormal.

Los parámetros estadísticos y geoquímicos se determinaron por población muestral considerando las estadísticas descriptivas (ED) para aquellos elementos que no contienen datos censurados, y a través de análisis de fiabilidad (análisis de supervivencia) con censura arbitraria usando el estimador de máxima verisimilitud (MLE, por sus siglas en inglés) para aquellos elementos que contienen datos censurados (debajo del límite de detección).

Las tablas 6, 7 y 8 muestran en resumen los parámetros estadísticos para los elementos Ag, As, Au, Ba, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn en cada población muestral respectivamente. Las imágenes 48 y 49 muestran las anomalías respectivas para Cu y Au.

Tabla 7

Parámetros estadísticos para la población muestral Punta Colorado Chico.

Población Muestral		PUNTA COLORADO CHICO									
Elemento	Ag_ppb	As_ppb	Au_ppb	Ba_ppb	Cd_ppb	Cu_ppb	Mn_ppb	Mo_ppb	Ni_ppb	Pb_ppb	Zn_ppb
Total de muestras	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Muestras censuradas	5	0	13	5	0	0	0	0	0	0	0
Muestras no censuradas	33	38	25	33	38	38	38	38	38	38	38
Distribución más ajustada	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Weibull	Lognormal	Loglogística	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal
Anderson-Darling	0.513	0.388	1.343	1.324	0.324	1.031	0.544	0.441	0.381	0.756	0.557
Método de cálculo	MLE	ED	MLE	MLE	ED	ED	ED	ED	ED	ED	ED
Media	14.60	153.50	1.13	387.47	60.10	210.20	1109.00	17.34	916.60	583.00	623.00
Desviación estándar	36.87	79.00	5.91	2400.46	71.70	195.50	1362.00	9.81	221.30	1717.00	1326.00
Mediana	5.38	150.50	0.21	61.74	48.00	149.50	648.00	17.00	912.00	180.00	288.00
Primer cuartil	2.07	84.30	0.06	16.95	14.80	115.80	361.00	11.00	756.00	100.00	189.00
Tercer cuartil	13.95	188.80	0.73	224.91	68.50	207.30	967.00	19.00	1027.80	547.00	669.00
Rango Inter cuartil (IQR)	11.88	104.50	0.67	207.96	53.80	91.50	607.00	8.00	271.80	447.00	480.00
Valor máximo	87.00	318.00	35.10	1543.00	391.00	1154.00	5576.00	62.00	1485.00	10745.00	8305.00
Umbral anomalía débil	13.95	188.80	0.73	224.91	68.50	207.30	967.00	19.00	1027.80	547.00	669.00
Umbral anomalía fuerte	31.77	345.55	1.73	536.85	149.20	344.55	1877.50	31.00	1435.50	1217.50	1389.00

MLE: Estimado de máxima verosimilitud por sus siglas en inglés

ED: Estadísticas descriptivas

Tabla 8

Parámetros estadísticos para la población muestral Pampa Canoas

Población Muestral		PAMPA CANOAS									
Elemento	Ag_ppb	As_ppb	Au_ppb	Ba_ppb	Cd_ppb	Cu_ppb	Mn_ppb	Mo_ppb	Ni_ppb	Pb_ppb	Zn_ppb
Total de muestras	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Muestras censuradas	3	0	8	61	0	0	4	33	1	20	0
Muestras no censuradas	87	90	82	29	90	90	86	57	89	70	90
Distribución más ajustada	Lognormal	Weibull	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Loglogística
Anderson-Darling	0.364	0.404	0.593	9.862	0.204	1.178	1.873	2.371	1.953	2.313	0.686
Método de cálculo	MLE	ED	MLE	MLE	ED	ED	MLE	MLE	MLE	MLE	ED
Media	20.88	106.13	1.94	17.17	40.78	676.00	641.28	14.69	472.16	181.23	899.00
Desviación estándar	44.96	73.48	5.37	61.31	55.22	991.00	3515.38	22.70	1151.56	857.53	1491.00
Mediana	8.79	92.50	0.66	4.63	27.00	310.00	115.09	7.98	179.12	37.47	466.00
Primer cuartil	3.62	51.75	0.24	1.55	14.00	173.00	32.97	3.79	70.03	11.31	306.00
Tercer cuartil	21.35	141.75	1.78	13.80	48.00	763.00	401.76	16.82	458.13	124.11	972.00
Rango Inter cuartil (IQR)	17.73	90.00	1.53	12.24	34.00	590.00	368.80	13.03	388.10	112.79	665.00
Valor máximo	3643.00	312.00	181.40	204.00	459.00	6278.00	4980.00	75.00	1388.00	2019.00	10989.00
Umbral anomalía débil	21.35	141.75	1.78	13.80	48.00	763.00	401.76	16.82	458.13	124.11	972.00
Umbral anomalía fuerte	47.94	276.75	4.08	32.17	99.00	1648.00	954.96	36.35	1040.27	293.30	1969.50

MLE: Estimado de máxima verosimilitud por sus siglas en inglés

ED: Estadísticas descriptivas

Tabla 9

Parámetros estadísticos para la población muestral Pampa Bermejo

Población Muestral		PAMPA BERMEJO									
Elemento	Ag_ppb	As_ppb	Au_ppb	Ba_ppb	Cd_ppb	Cu_ppb	Mn_ppb	Mo_ppb	Ni_ppb	Pb_ppb	Zn_ppb
Total de muestras	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Muestras censuradas	2	2	0	48	0	0	12	52	8	50	0
Muestras no censuradas	101	101	103	55	103	103	91	51	95	53	103
Distribución más ajustada	Weibull	Weibull	Loglogística	Lognormal	Lognormal	Loglogística	Lognormal	Weibull	Lognormal	Lognormal	Loglogística
Anderson-Darling	0.286	0.398	4.007	7.73	0.314	0.566	0.833	6.613	0.538	4.251	0.668
Método de cálculo	MLE	MLE	ED	MLE	ED	ED	MLE	MLE	MLE	MLE	ED
Media	13.90	143.96	4.11	97.98	44.45	590.00	55.77	14.91	68.57	14.27	620.20
Desviación estándar	13.21	104.04	19.76	863.25	45.32	1271.00	73.53	26.28	119.63	13.36	975.00
Mediana	10.01	121.65	1.20	11.05	29.00	231.00	33.70	5.36	34.10	10.42	282.00
Primer cuartil	4.34	64.98	0.80	2.70	14.00	131.00	17.12	1.23	15.37	6.10	143.00
Tercer cuartil	19.34	199.43	1.50	45.22	61.00	478.00	66.32	17.06	75.69	17.79	556.00
Rango Intercuartil (IQR)	15.00	134.46	0.70	42.52	47.00	347.00	49.20	15.82	60.32	11.69	413.00
Valor máximo	121.00	475.00	189.70	2108.00	277.00	9398.00	435.00	122.00	425.00	106.00	6453.00
Umbral anomalía débil	19.34	199.43	1.50	45.22	61.00	478.00	66.32	17.06	75.69	17.79	556.00
Umbral anomalía fuerte	41.85	401.12	2.55	108.99	131.50	998.50	140.12	40.79	166.17	35.32	1175.50

MLE: Estimado de máxima verosimilitud por sus siglas en inglés

ED: Estadísticas descriptivas

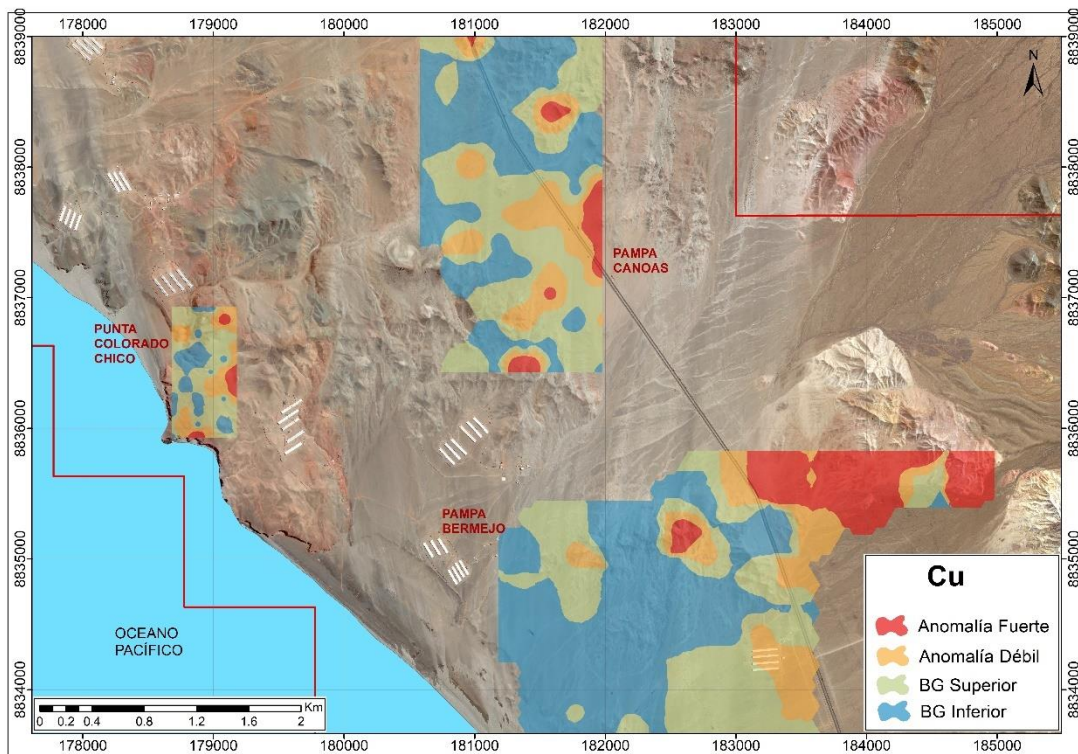


Figura 48. Anomalías de Cobre en suelos, los valores de los umbrales por población muestral se especifican en las tablas 6, 7 y 8.

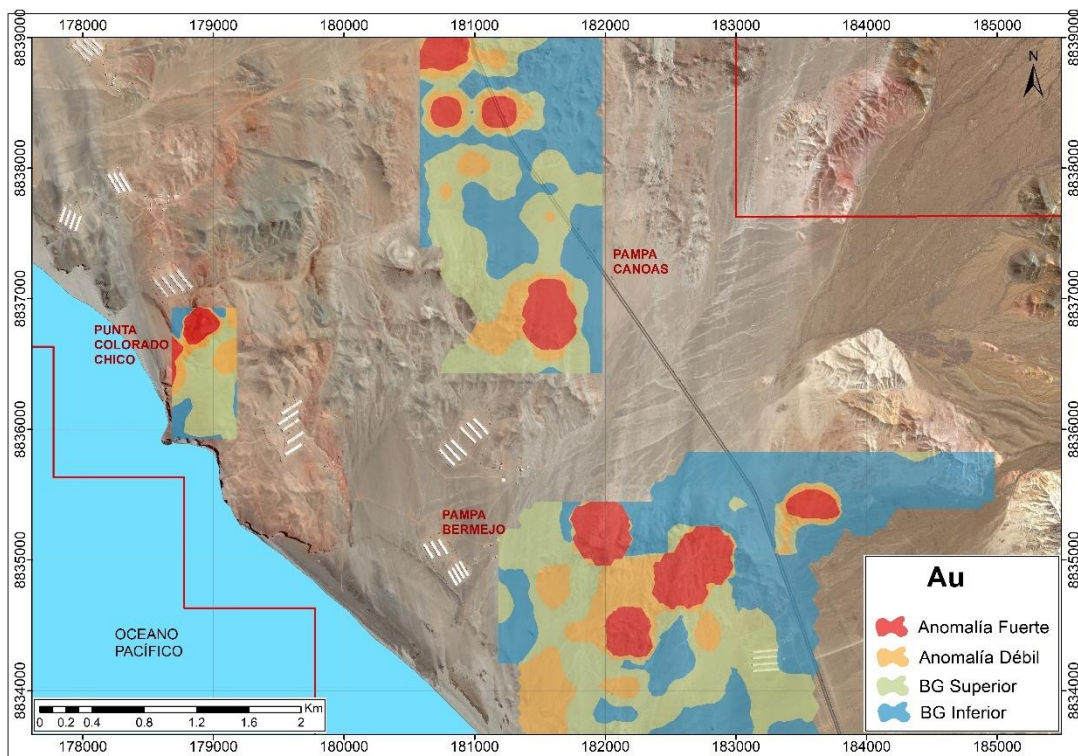


Figura 49. Anomalías de Oro en suelos, los valores de los umbrales por población muestral se especifican en las tablas 6, 7 y 8.

5.1.3.3. Análisis de componentes principales

Se realizó el análisis de componentes principales usando el software loGas™ 7.3, para lo cual, previamente se realizó una imputación de datos usando una regresión de orden estadística robusta con el software proUCL para aquellos elementos que presentaban datos censurados por cada población de muestreo, luego se realizó la transformación Logratio centrada (CLR) para abrir y normalizar los datos.

Con los datos transformados mediante CLR de las 231 muestras de suelos se calcularon las componentes principales considerando 17 variables: elementos calcófilos (Ag, As, Cd, Cu, Pb, Zn), elementos siderófilos (Au, Co, Fe, Mn, Mo, Ni) y elementos litófilos (Ba, Ca, Sr, Ti, U).

La gráfica de sedimentación (Figura 50), siguiendo el criterio de Kaiser, muestra que son necesarias 5 componentes principales (valor propio mayor a 1) para explicar la mayor varianza de los datos, alcanzando a explicar el 72.35 % de la varianza acumulada (tabla 10).

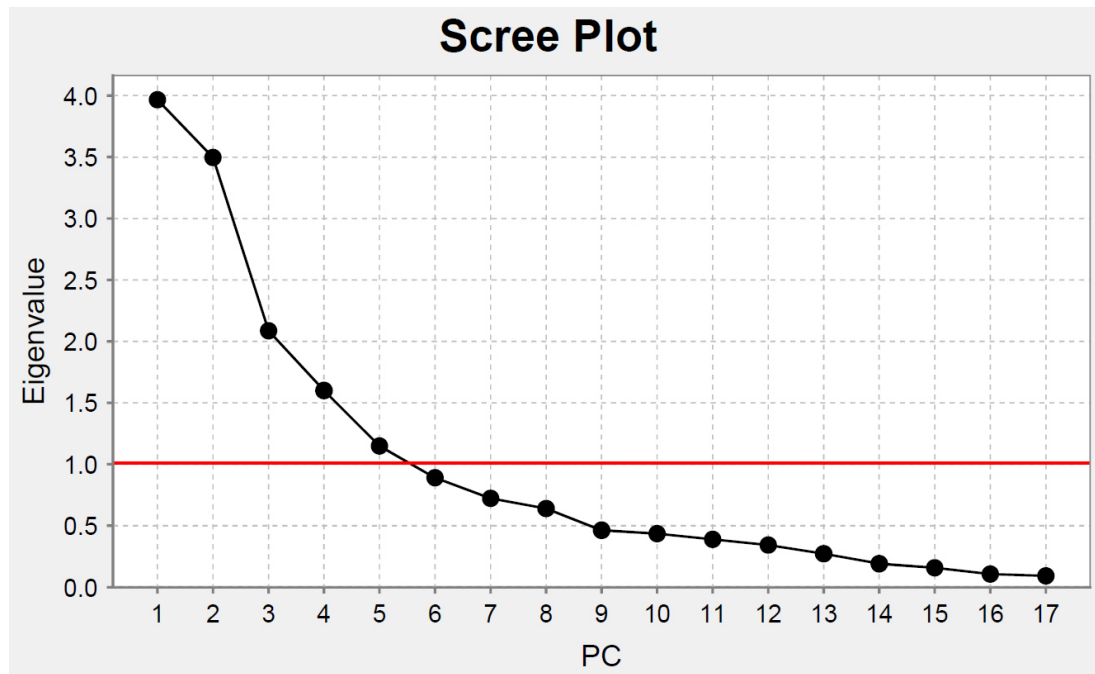


Figura 50. Gráfica de sedimentación de los valores propios (eigenvalue) para las 17 variables analizadas.

Tabla 10

Porcentaje de varianza explicada por cada componente principal.

PC	Valor propio	Porcentaje	% Acumulado
PC1	3.97	23.33	23.33
PC2	3.49	20.57	43.90
PC3	2.09	12.27	56.18
PC4	1.60	9.41	65.59
PC5	1.15	6.76	72.35

La tabla 11 muestra los valores escalados de las componentes principales para cada elemento transformado.

Tabla 11

Valores escalados de las componentes principales para cada elemento transformado.

Coordenadas escaladas	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Ag-CLR	0.40	0.06	0.70	0.07	0.20
As-CLR	-0.16	-0.45	0.41	-0.35	0.56
Au-CLR	0.48	-0.50	0.20	0.24	-0.20
Ba-CLR	-0.79	-0.34	0.05	-0.23	-0.28
Cd-CLR	0.49	0.22	0.54	0.09	-0.15
Co-CLR	0.36	-0.12	-0.03	-0.42	0.28
Cu-CLR	0.70	-0.16	-0.37	-0.21	0.07
Fe-CLR	-0.26	-0.64	-0.01	0.60	0.13
Mn-CLR	-0.36	0.81	-0.06	0.17	0.01
Mo-CLR	0.15	0.08	-0.63	-0.32	0.06
Ni-CLR	-0.26	0.73	-0.30	0.12	0.26
Pb-CLR	-0.38	0.79	0.09	0.14	-0.07
Zn-CLR	0.72	0.35	0.07	0.10	-0.13
Ca-CLR	-0.32	-0.39	-0.25	0.68	0.34
Sr-CLR	-0.65	-0.52	-0.13	-0.28	-0.27
Ti-CLR	-0.53	0.27	0.27	-0.21	0.46
U-CLR	0.57	-0.10	-0.54	0.12	0.25

En rojo asociaciones con cargas positivas,
En azul asociaciones con cargas negativas

La PC1 explica el 23.33 % de varianza de los datos (tabla 10) y asocia [Zn-Cu-U-Cd-Au-Ag] inversamente correlacionados con [Ba-Sr-Ti] (tabla 11), esta asociación predominantemente calcófila puede representar posibles zonas mineralizadas con Cu, y se concentra hacia el lado este de Pampa Bermejo, y al sur y norte de Pampa Canoas (Figura 51) coincidiendo con las zonas anómalas Cu (Figura 48).

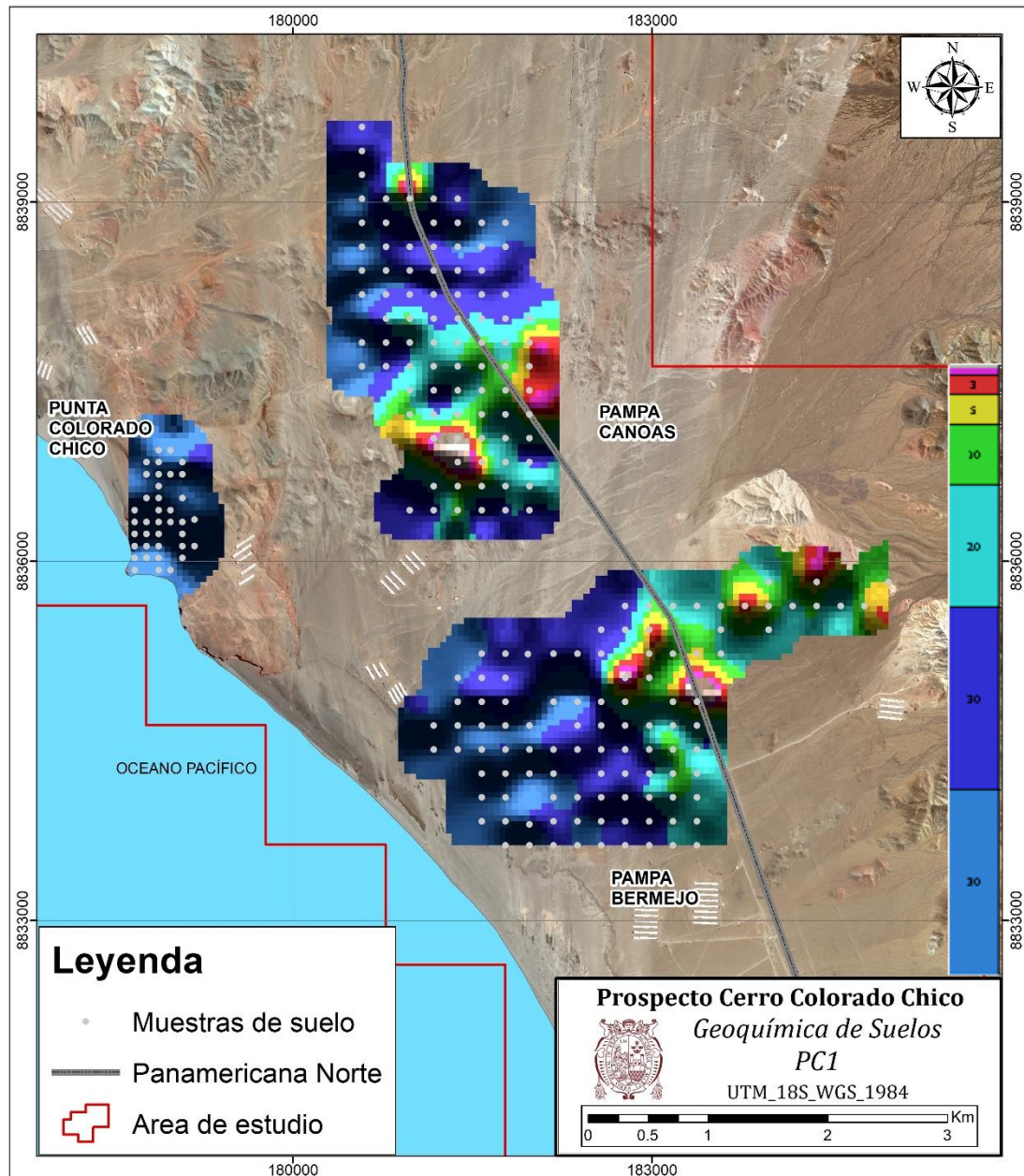


Figura 51. Mapa de distribución de PC1 en las zonas muestreadas Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo. La barra de colores muestra los umbrales por percentiles.

La PC2 explica el 20.57 % de varianza de los datos (tabla 10) y asocia a [Mn-Pb-Ni] inversamente correlacionados con [Fe-Sr] (tabla 11), esta asociación predominantemente siderófila puede representar posibles zonas mineralizadas relacionadas a menas de hierro, y se concentra al norte de Pampa Canoas y al oeste de Punta Colorado Chico (Figura 52).

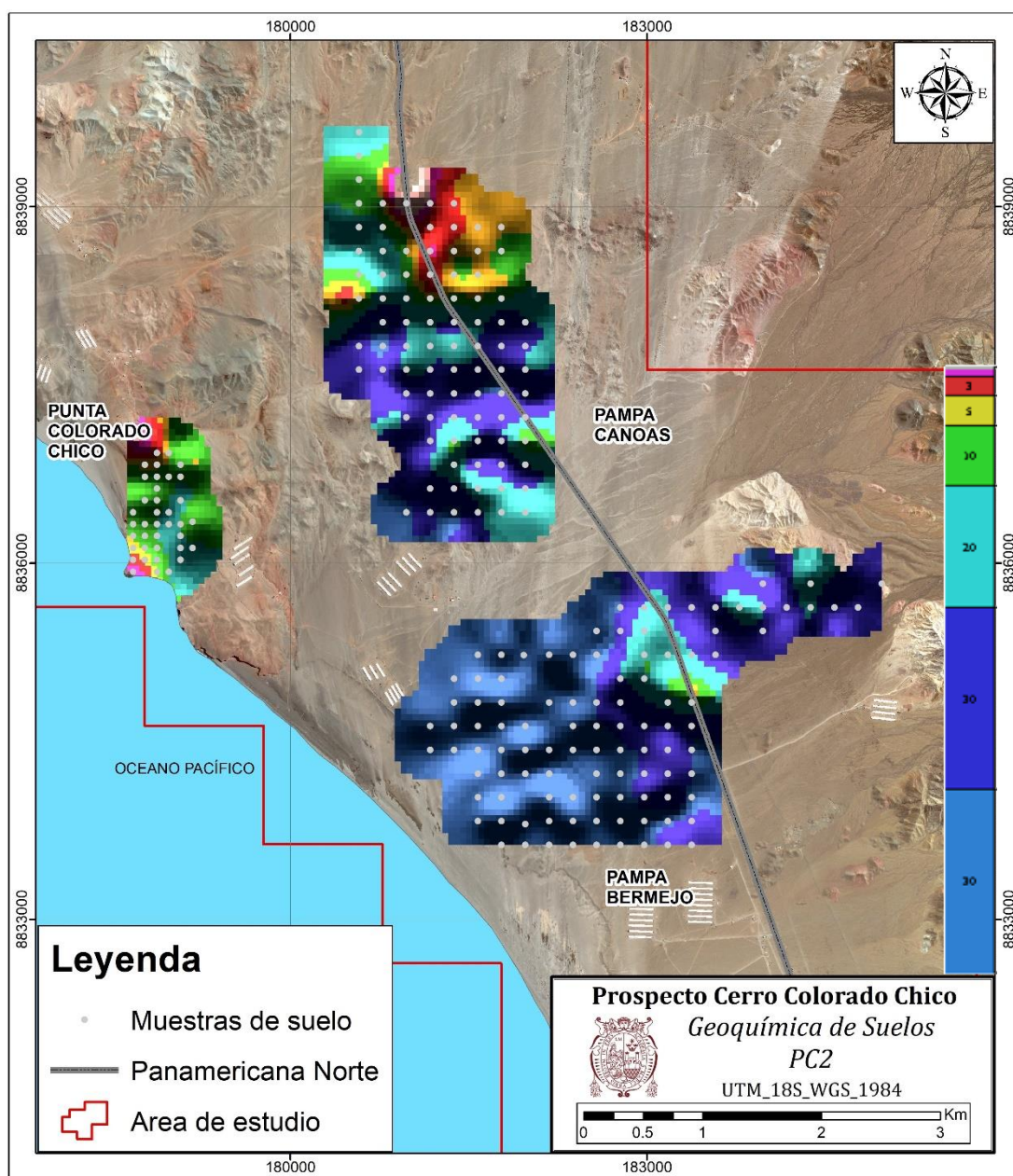


Figura 52. Mapa de distribución de PC2 en las zonas muestreadas Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo. La barra de colores muestra los umbrales por percentiles.

La gráfica de cargas y puntuaciones PC1-PC2 (Figura 53) muestra dos asociaciones bien diferenciadas: [(Zn-Cd-Ag)-(U-Cu-Co)-Au] y [Mn-Pb-Ni] asociaciones calcófilas y siderófilas que representan mineralización de Cu y Au relacionada a depósitos tipo IOCG.

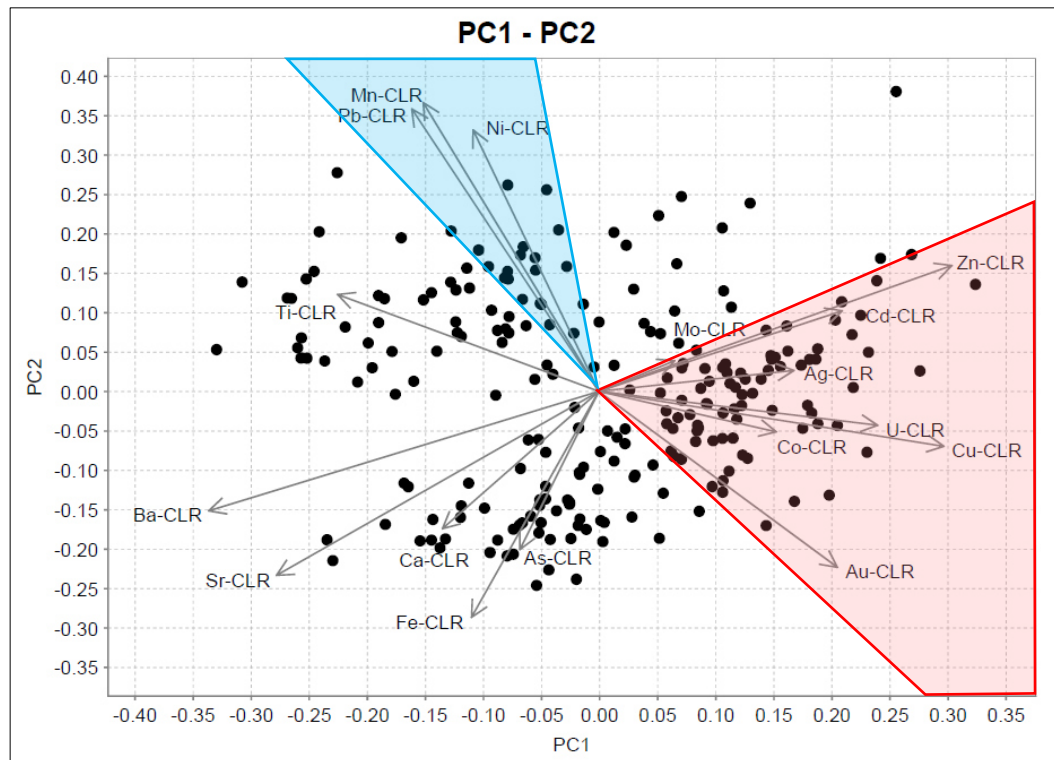


Figura 53. Gráfica de cargas y puntuaciones de las componentes principales PC1-PC2.

5.1.4. Geoquímica de rocas

Para esta investigación se ha considerado el análisis ICP-AES de 208 muestras de roca (Figura 54) que han sido muestreadas en una malla regular de 200 m x 200 m en las zonas Punta Colorado Chico, Pampa Canoas y Pampa Bermejo, y en una malla regular de 100 m x 100 m en el Pampa Colorada, en cada punto de muestreo se ha descrito la litología, alteración y mineralización. Estos datos geoquímicos se han analizado utilizando ioGAS™ que se ha convertido en una aplicación estándar de la industria para el tratamiento y análisis de conjunto de datos geoquímicos multielementos, se ha determinado los umbrales geoquímicos para diferenciar los valores de fondo, anomalías débiles y anomalías fuertes para los elementos indicadores Cu y Au y elementos pathfinders de IOCG como V y Ti (Figura 55). Se observa anomalías fuertes de Cu al oeste y norte de Pampa Colorada, hacia el este de Punta Colorado Chico y al sur de Pampa Bermejo, anomalías fuertes de Au al este de Punta Colorado Chico entre Pampa Canoas y Pampa Bermejo, anomalías fuertes de V entre Pampa Colorada y Punta Colorado Chico y anomalías fuertes de Ti al este de Punta Colorado Chico.

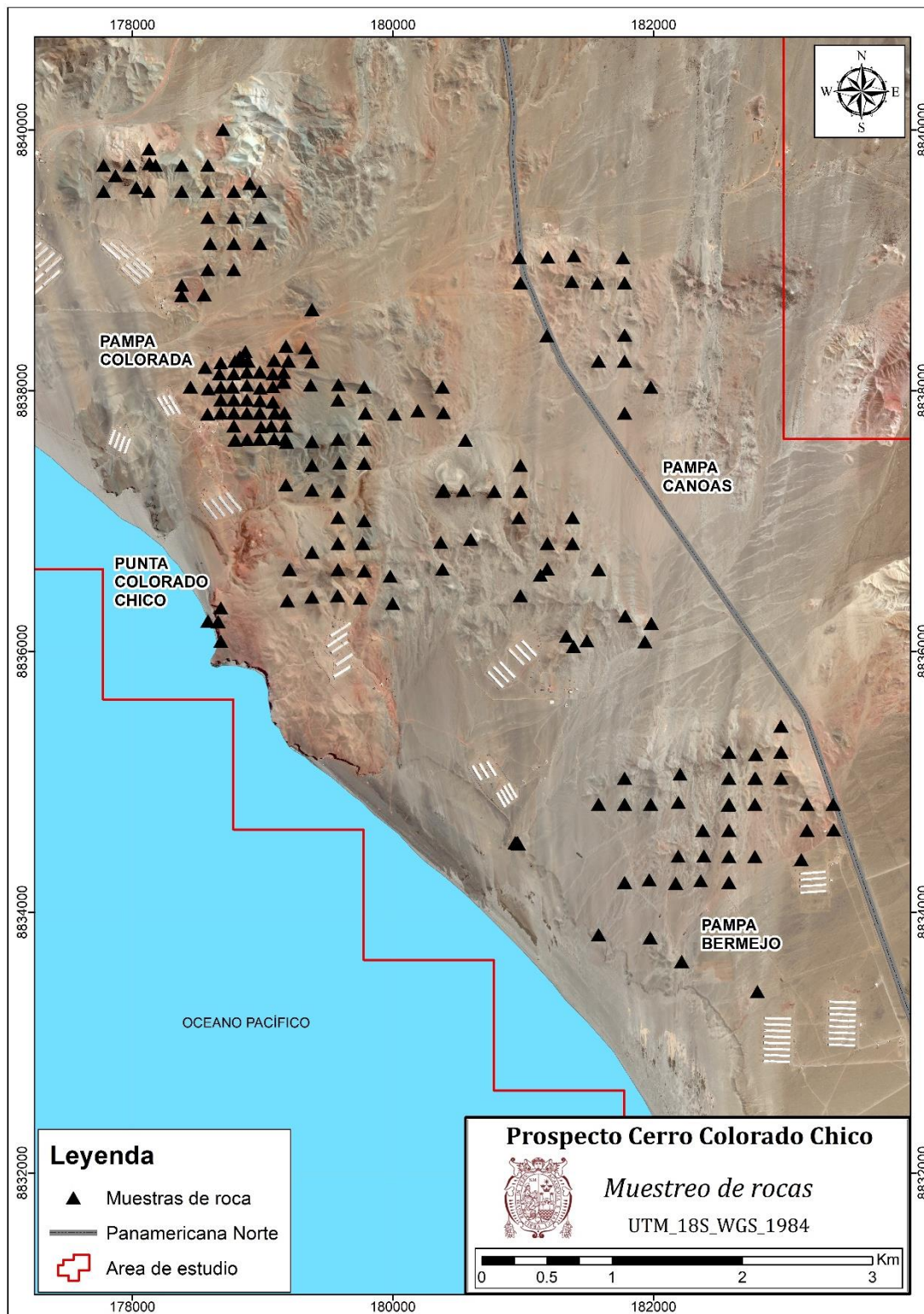


Figura 54. Plano de distribución de muestras de roca

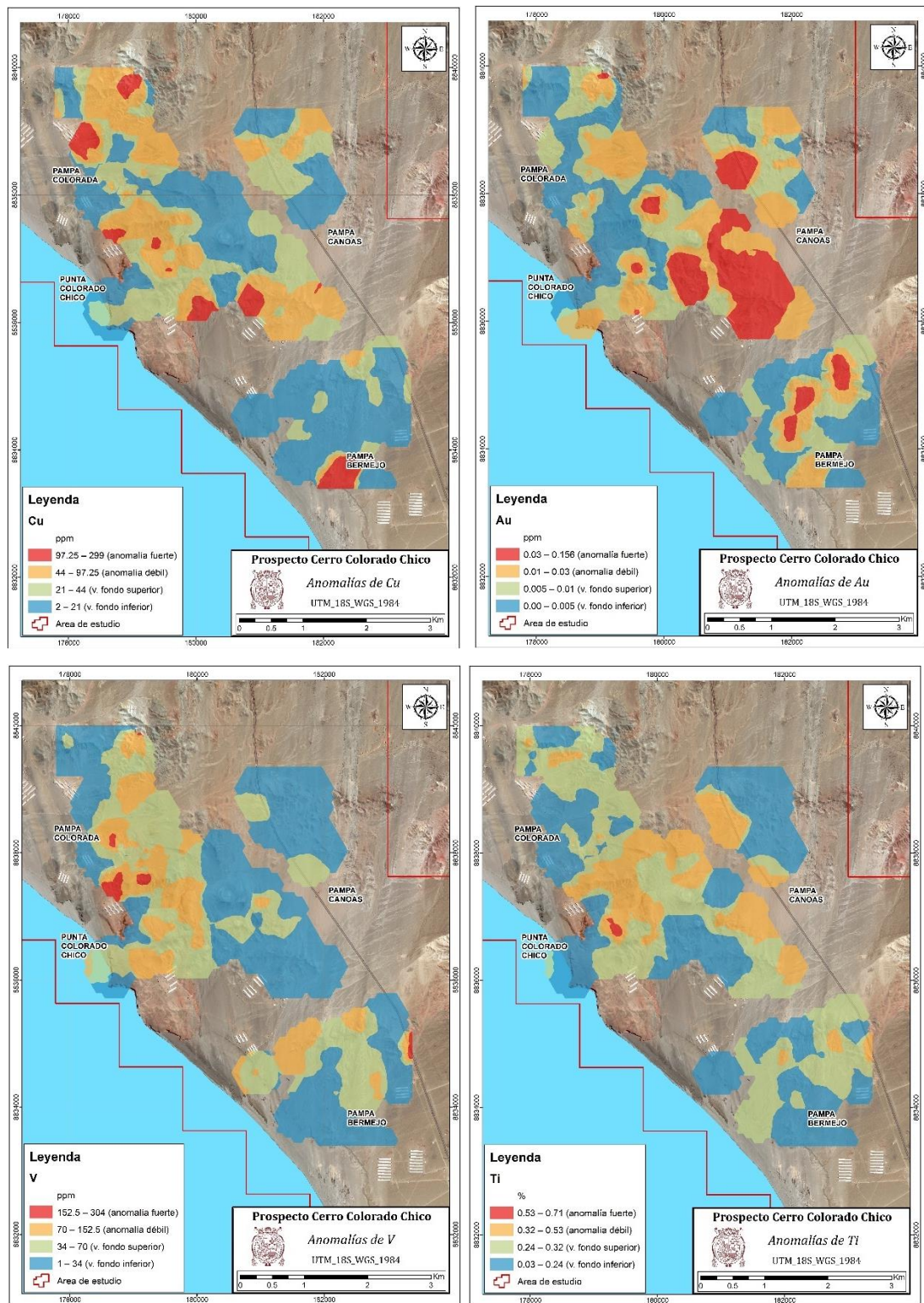


Figura 55. Mapas geoquímicos, mostrando las anomalías de Cu, Au, V y Ti en rocas.

5.1.4.1. Caracterización geoquímica de rocas

Para los fines de esta investigación se ha planteado diagramas binarios de Sc Vs Ti (Figura 56) y Sc Vs V (Figura 57) a fin de discriminar las muestras de rocas que han sido afectadas por alteración hidrotermal, ya que es sabido que los elementos de transición como el Sc y V tienen propiedades químicas similares por lo que es de esperarse que presenten una correlación lineal positiva como se observa en la Figura 56, al mismo tiempo que el Sc disminuye con la diferenciación magmática como lo explica Halley (2020), la propagación de Sc alto (correspondiente a rocas con alto contenido de Fe) a Sc bajo (correspondiente a rocas con bajo contenido de Fe) indica rangos de composición de máfico a félsico, sin embargo se observa que un set de muestras se desvía de la tendencia lineal de Sc versus Ti y V esto se debe al enriquecimiento de estos elementos en los minerales de alteración (Wilkinson et al., 2015), y una desviación por debajo de la tendencia lineal podría deberse a fraccionación de óxidos opacos, saturación de sulfuro en fundidos o lixiviación de metales durante la alteración hidrotermal (Halley, 2020)

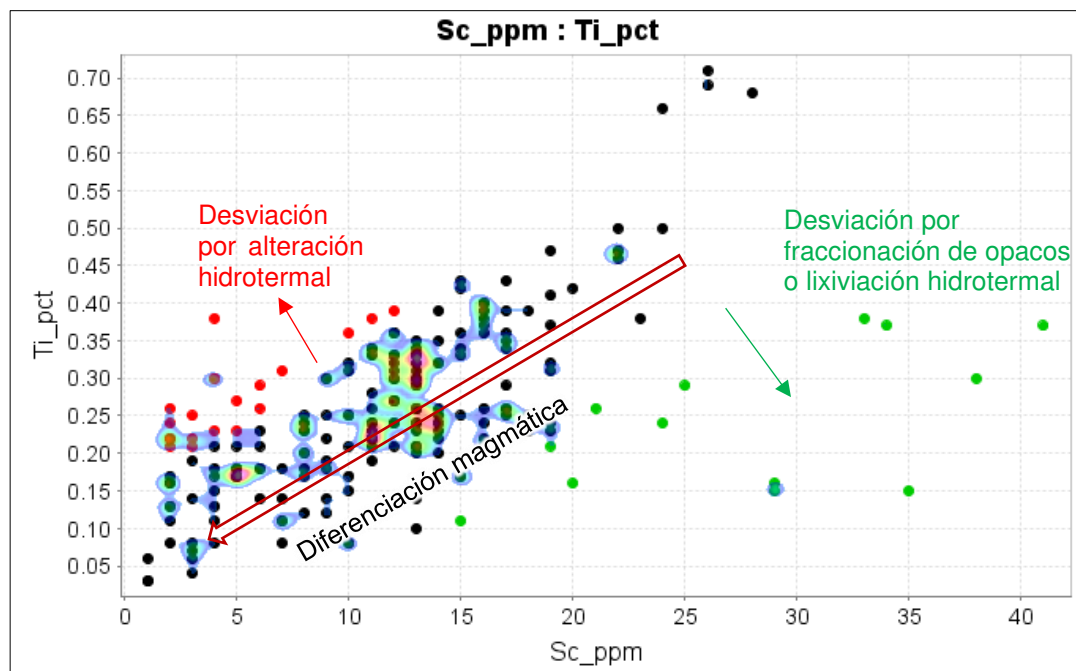


Figura 56. Diagrama binario Sc Vs Ti.

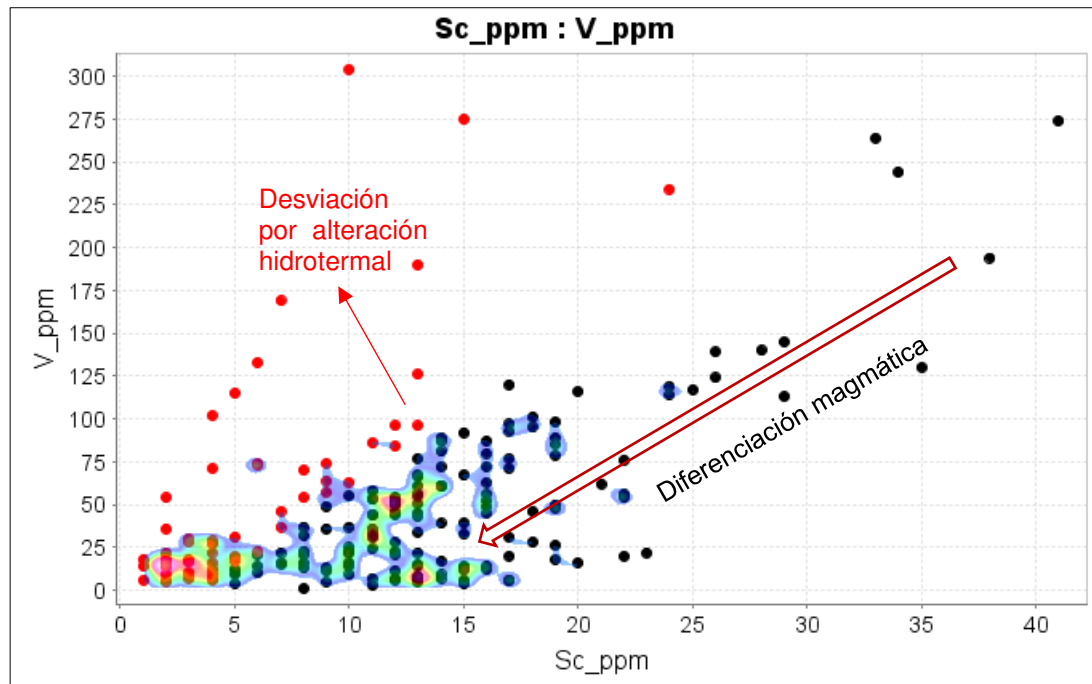


Figura 57. Diagrama binario Sc Vs V.

El diagrama binario Sc Vs Cr (Figura 58) se elaboró con la finalidad de evidenciar posible mezcla de magmas que suele ser común en sistemas magmático-hidrotermales (Halley, 2020). Se observa al menos tres clusters de rocas que siguen la tendencia lineal de diferenciación magmática, en los tres casos la muestras se plotean en el campo por encima de 30 ppm de Cr. Winter (2010) sugiere que los fundidos dacíticos típicamente suelen tener de 10 a 30 ppm de Cr, los niveles de cromo muy por encima de este generalmente apuntan al piroxeno de Cr como una fase de fenocristales, que debe provenir de una fusión de composición máfica (Mair et al., 2011), por lo que este grupo de andesitas con niveles de Cr mayores a 30 ppm puede sugerirnos una mezcla de magmas; los procesos de mezcla comúnmente implican una inyección de magma máfico derivado del manto en profundidad (Halley, 2020), proceso muy común en cuentas extensivas de vulcanismo bimodal submarino.

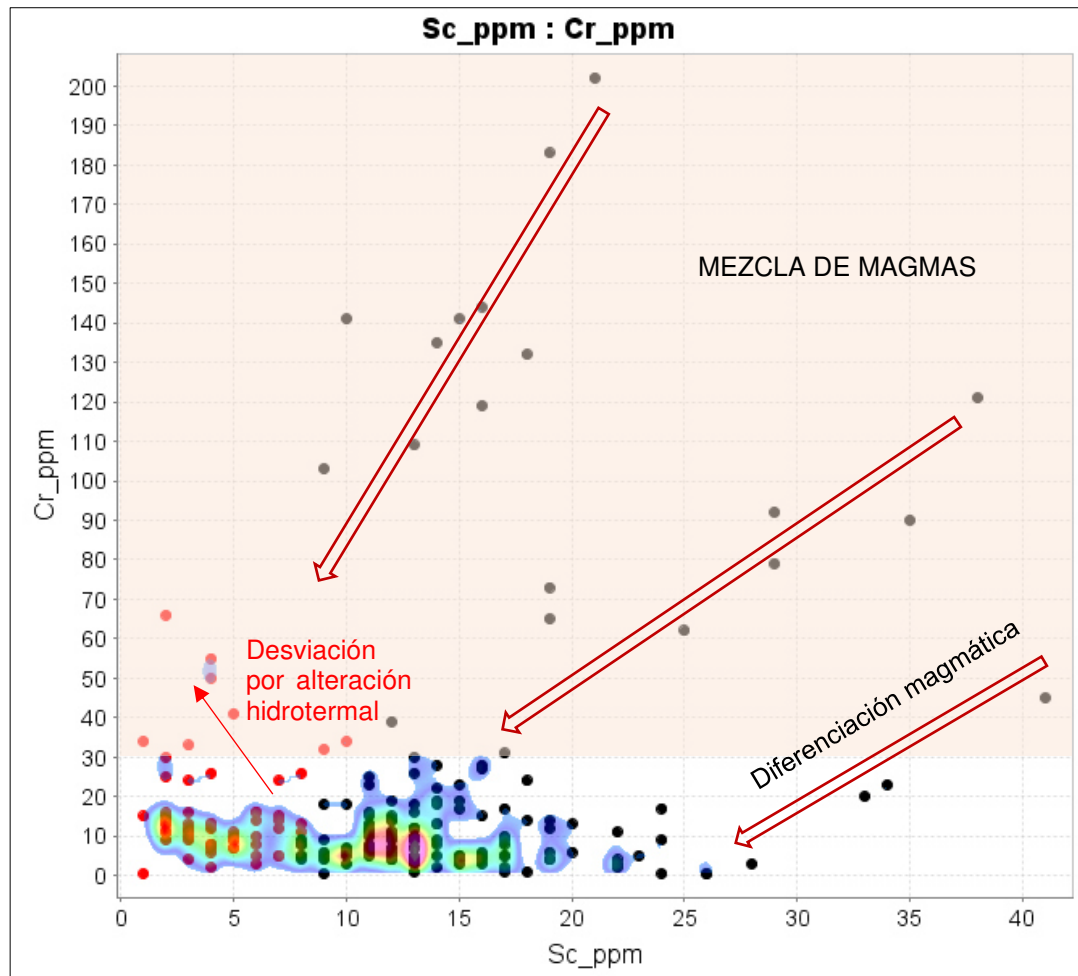


Figura 58. Diagrama binario Sc Vs Cr

En la Figura 59 se plotea el diagrama binario Sc Vs Al, es sabido que la mayoría de las rocas magmáticas contienen entre 6 y 9 % de Al (Winter, 2010), se observa un gran número de muestras que se plotean por debajo de 6% de Al, las mismas que se identificaron en los diagramas anteriores como el set de muestras alteradas. Los valores bajos de Al son generalmente el resultado de la dilución como resultado de procesos hidrotermales (Halley, 2020).

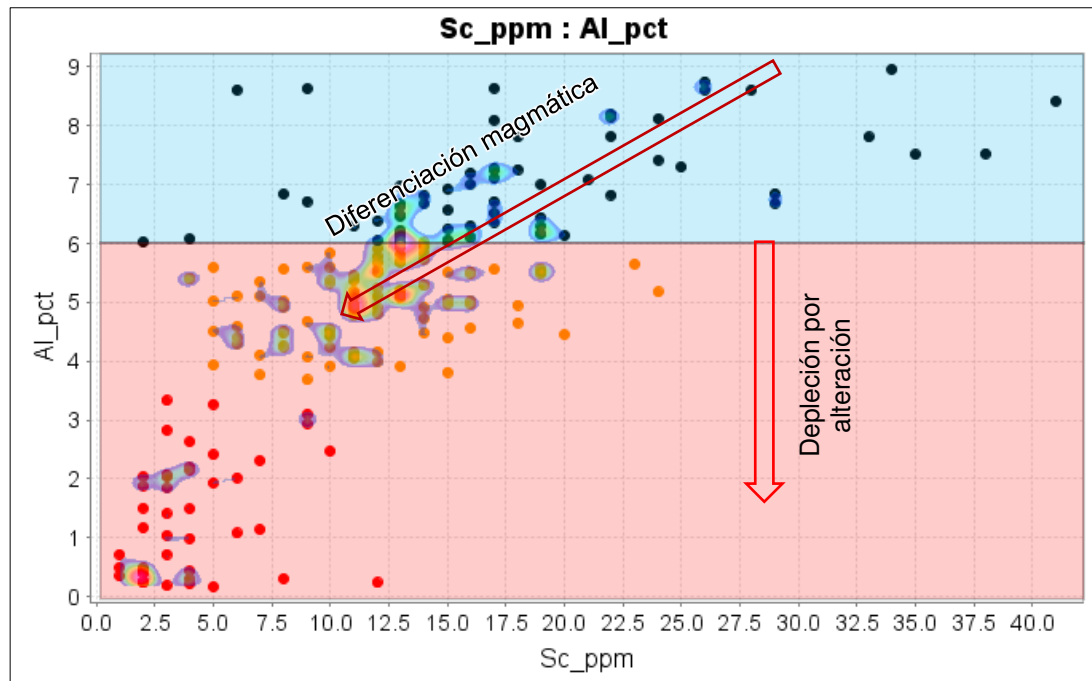


Figura 59. Diagrama binario Sc Vs Al.

Las Figuras 60 y 61 muestran el diagrama AFM y el diagrama ternario de discriminación del ambiente tectónico de rocas ígneas en los cuales se puede apreciar dos grupos de rocas, las primeras se plotean en el campo de composición calcoalcalina (Figura 60) en un ambiente tectónico tipo arco de isla toleítico y calcoalcalino (Figura 61) y el segundo grupo se plotean en el campo toleítico (Figura 60) en un ambiente tectónico tipo dorsal oceánica toleítico y alcalino de las cuales la mayoría corresponde a rocas que han sido identificadas como rocas alteradas en los diagramas anteriores, dicha alteración puede estar sesgando la clasificación, toda vez que hay un incremento de Fe durante la alteración hidrotermal.

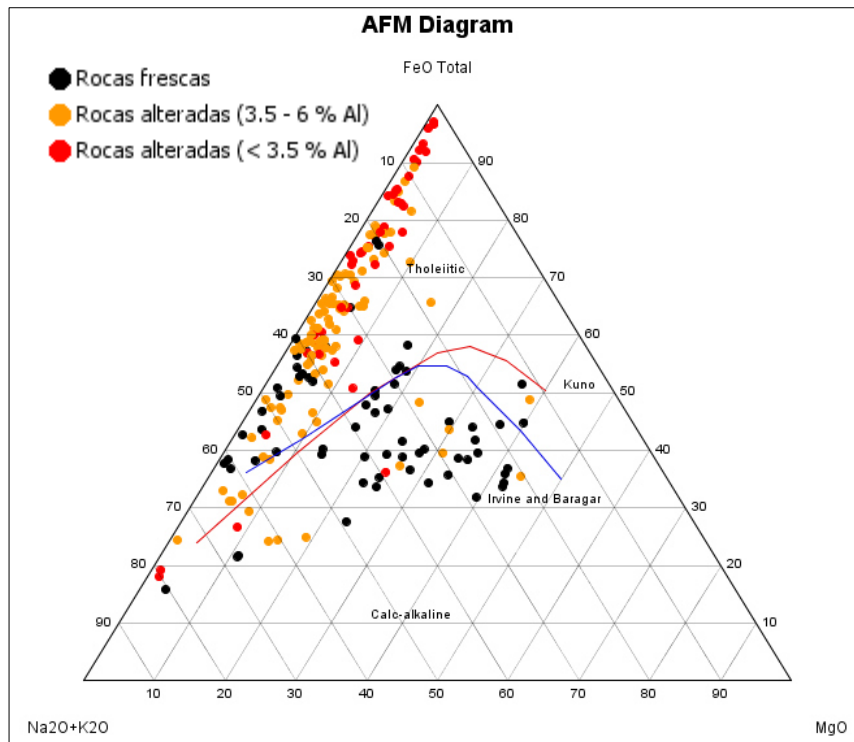


Figura 60. Diagrama AFM para discriminar series magmáticas en rocas ígneas.

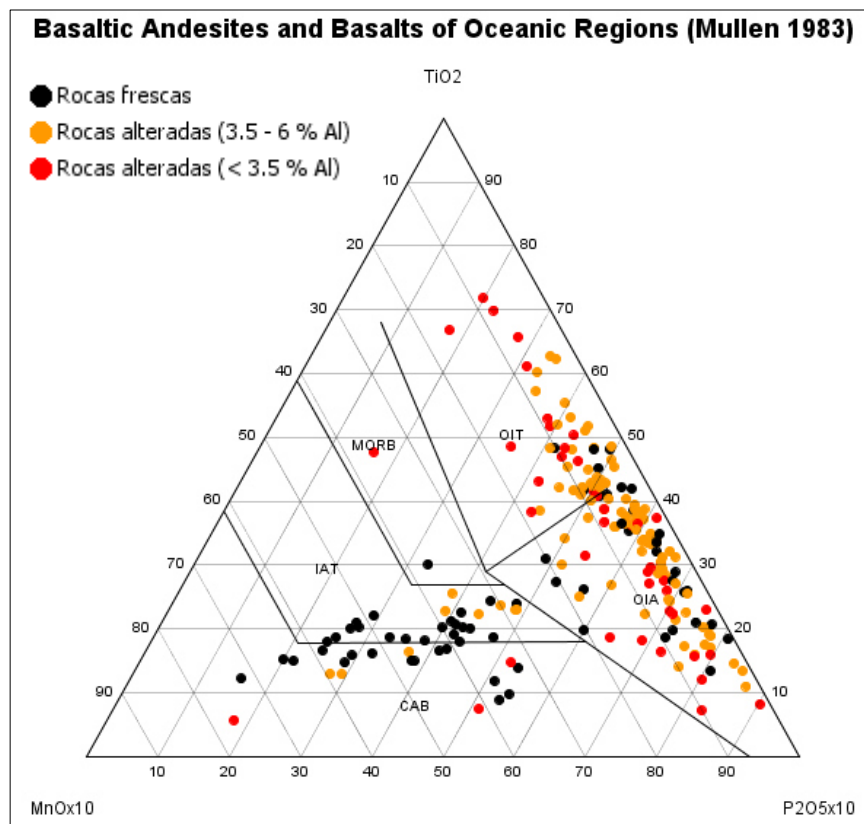


Figura 61. Diagrama ternario para discriminar el ambiente tectónico de rocas ígneas. (MORB: Mid-ocean Ridge Basalt, IAT: Island Arc Tholeiite, CAB: Island Calc-Alkaline, OIT: Seamount Tholeiite, OIA: Seamount Alkalic) Mullen 1983.

La Figura 62 muestra el diagrama ternario de Jensen en el cual se observa que las rocas frescas se clasifican como basaltos, andesitas, dacitas y riolitas las cuales demuestran el vulcanismo bimodal que caracteriza a la secuencia volcano-sedimentaria en el área de estudio.

Las rocas alteradas se muestran empobrecidas en Al y enriquecidas en Ti y Fe.

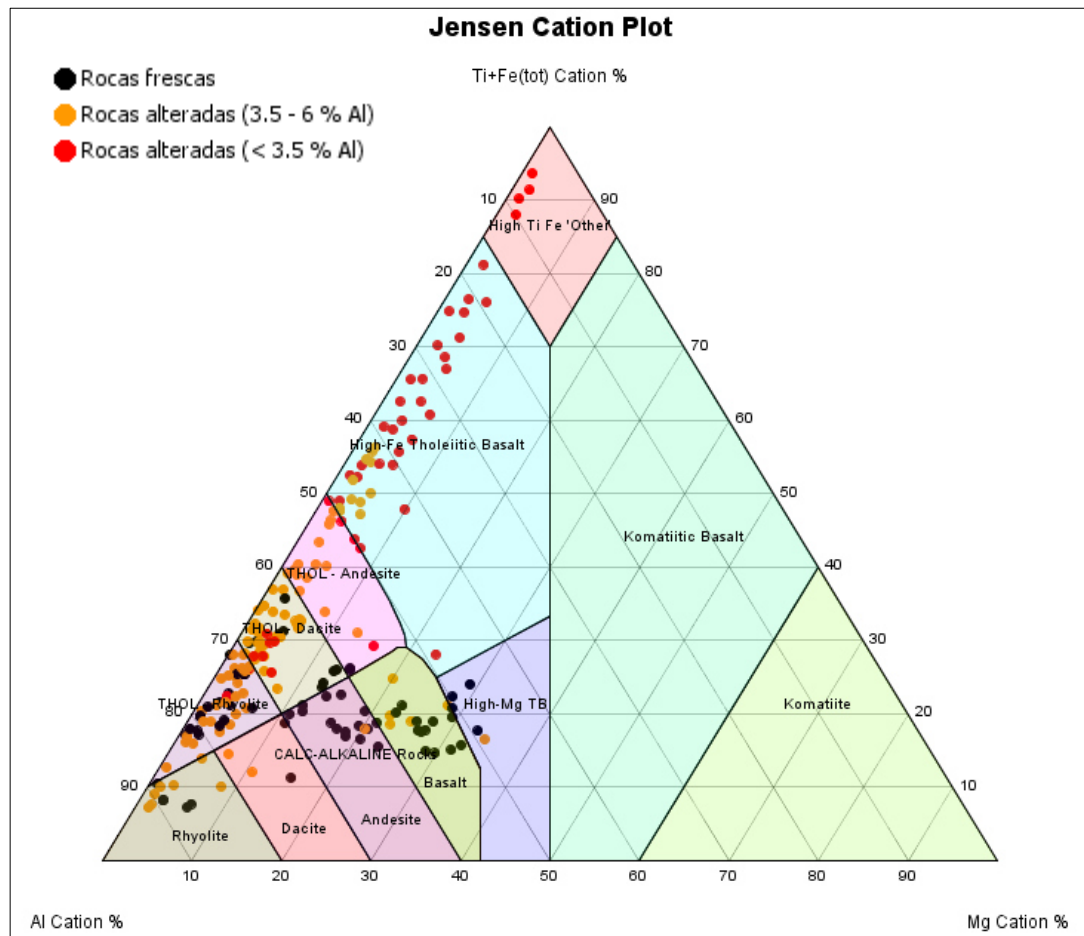


Figura 62. Diagrama ternario de Cationes de Jensen para clasificación de rocas ígneas.

5.1.4.2. Índices de alteración

En la Figura 63, se plotea las muestras de roca en el diagrama de ratios molares Na/Al Vs K/Al, donde se observa que la mayoría de rocas frescas se plotean debajo cerca de la línea Plagioclasa-Feldespato potásico esto sugiere que las rocas pueden estar débilmente alteradas, luego se observa un gran número de rocas alteradas que se plotean en el campo de la moscovita, es necesario precisar que la alunita se plotea en el mismo punto que la moscovita en este diagrama, por lo que este campo corresponde a muestras con alteración moscovita/sericita y/o alunita, otro grupo de rocas alteradas se plotean en el campo de las arcillas, en este último se estarían ploteando tanto minerales de alteración argílica (caolinita) como minerales de alteración clorítica y epidota dado que estos minerales no tienen Na ni K en su composición se plotean en el origen del diagrama, entre el punto de las arcillas y la moscovita se plotean las muestras con alteración argílico intermedio como illita, otro grupo de muestras alteradas se plotean en el campo de Albite, esto puede representar alteración calcosódica, y otro grupo de muestras que no aparecen en este diagrama por su alta relación Na/Al (Figura 64) puede corresponder a muestras con silicificación pervasiva.

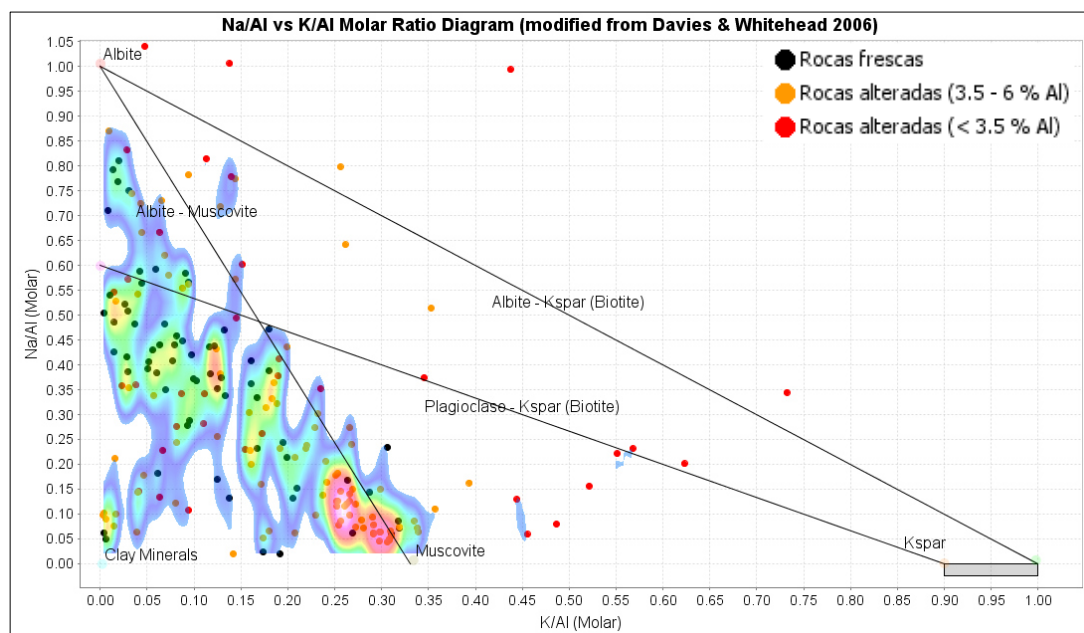


Figura 63. Diagrama de discriminación de alteraciones en función del ratio molar Na/Al Vs K/Al (Davies y Whitehead, 2006)

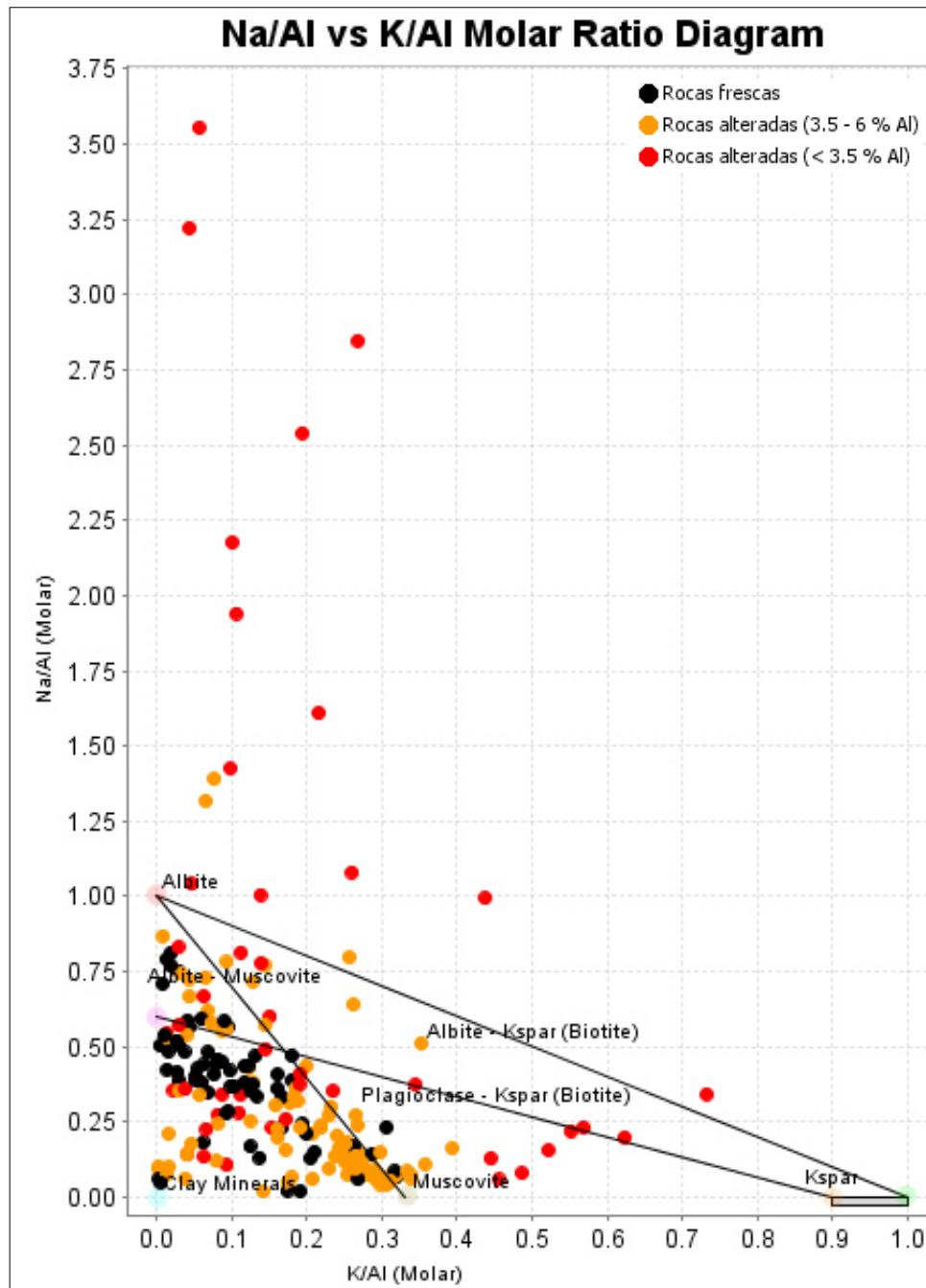


Figura 64. Diagrama extendido de discriminación de alteraciones en función del ratio molar Na/Al Vs K/Al.

El diagrama de caja de rocas alteradas con los índices CCPI y AI (Figura 65) muestra que en el área se tiene andesitas poco alteradas, dacitas poco alteradas y riolitas poco alteradas y un gran número de muestras se plotean en la caja de rocas alteradas.

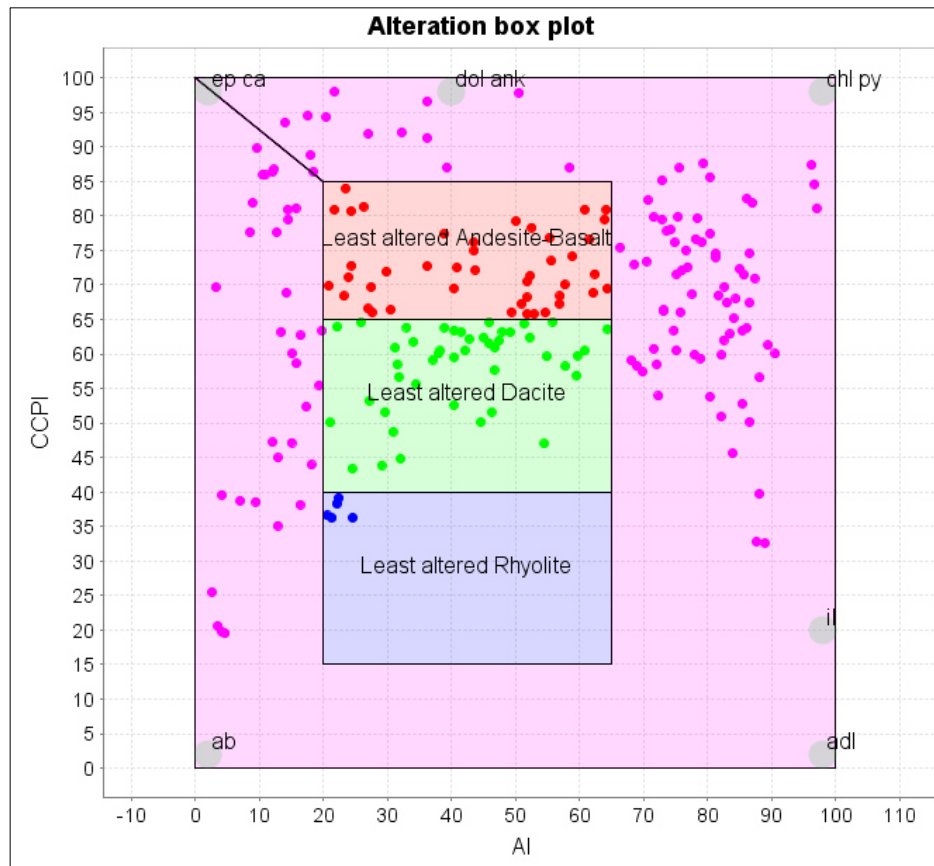


Figura 65. Diagrama de caja de rocas alteradas usando los índices CCPI y AI.

Para las muestras de roca de la zona de investigación (Figura 66), se observa que las muestras alteradas se plotean siguiendo los trends de alteración sericítica (mica blanca/moscovita), arcillas/cloritas, Illita, y algunas muestras se presentan con ganancia de K.

La Figura 67 muestra que las rocas alteradas se plotean siguiendo dos trends principales, la mayoría siguiendo el trend de alteración fílica (moscovita) – feldespato potásico y las demás siguiendo el trend de alteración argílico avanzado.

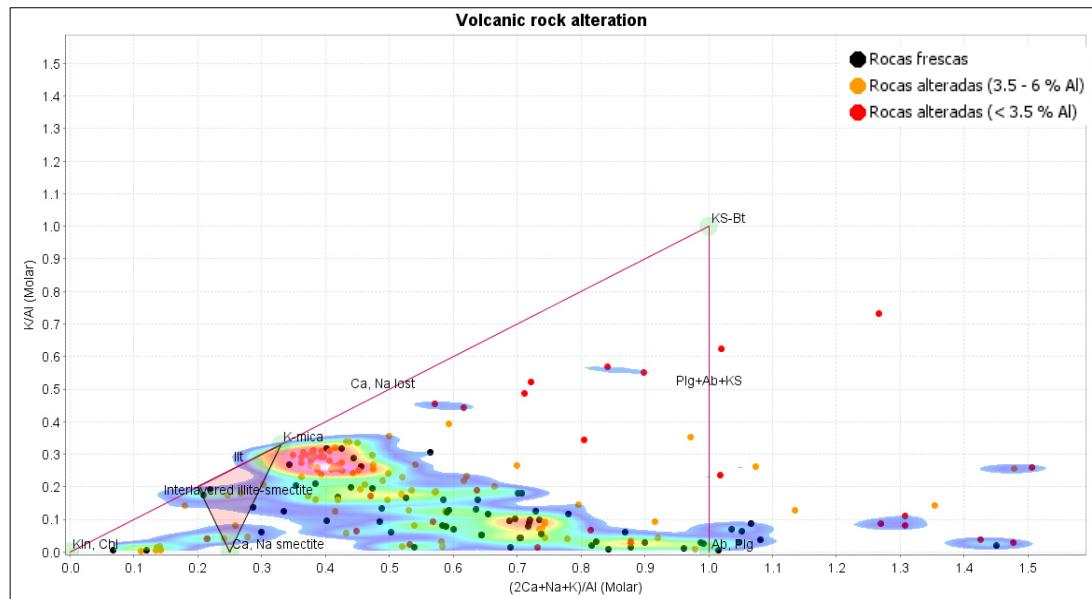


Figura 66. Diagrama de discriminación de alteraciones en rocas volcánicas (Warren et al, 2007)

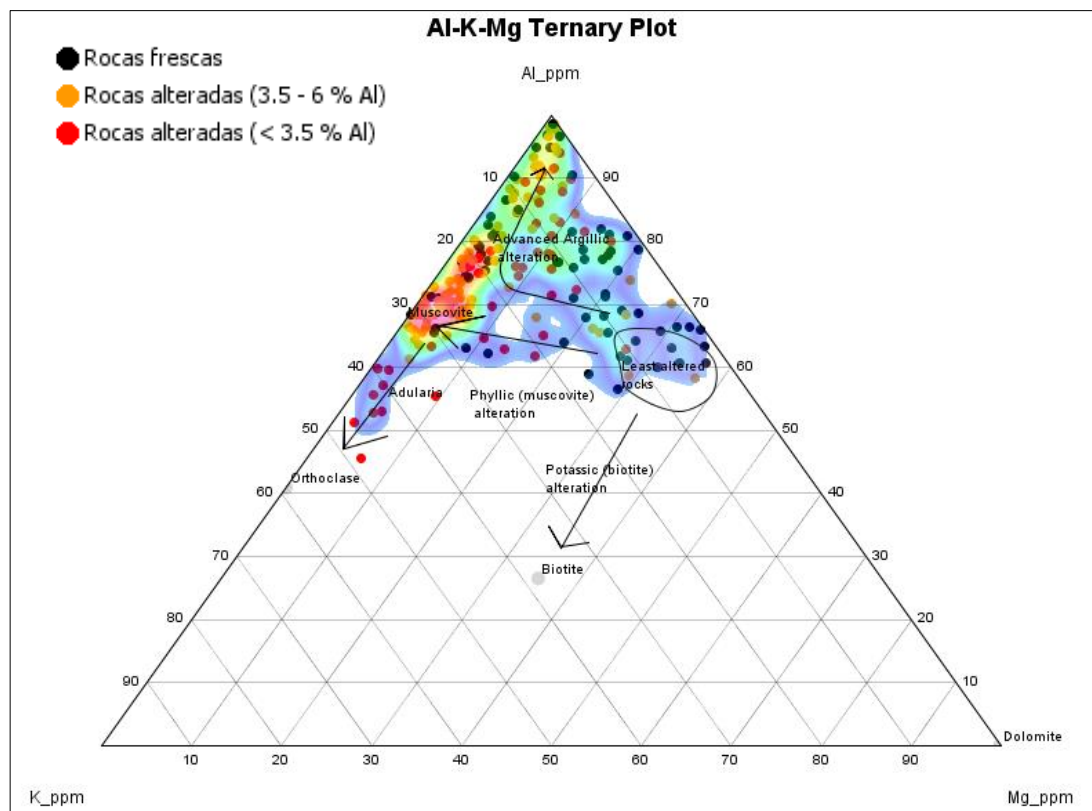


Figura 67. Diagrama ternario Al-K-Mg, mostrando los trends de alteración en sistemas magmático-hidrotermales (Halley, 2016).

La Figura 68 muestra la relación S vs Fe en la cual se puede observar que una gran cantidad de rocas alteradas tienden hacia la línea de pirita, lo cual evidencia la saturación S y Fe durante el proceso de alteración, en el área de estudio es común observar en campo que las rocas alteradas presentan diseminación de pirita o pátinas de jarosita dentro del halo de alteración sílice – sericita - pirita.

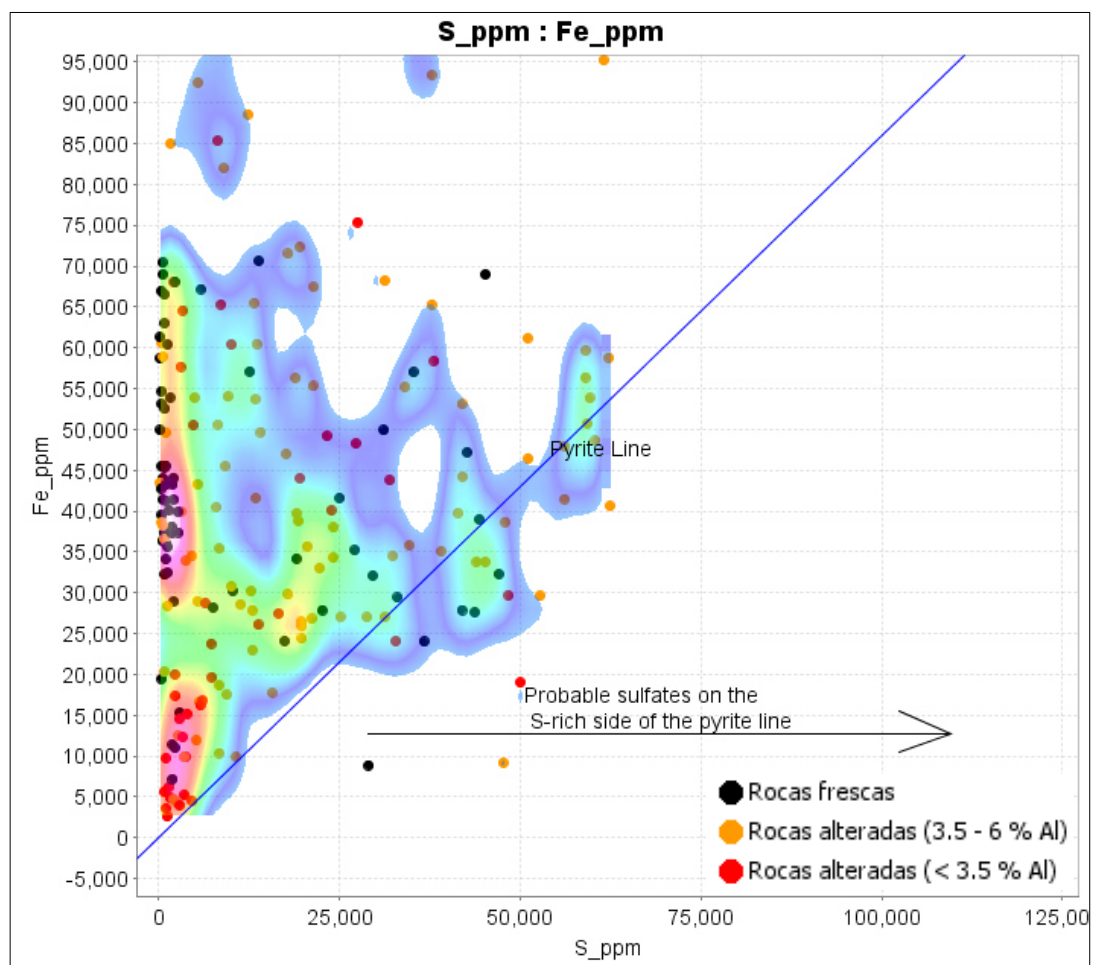


Figura 68. Diagrama S Vs Fe, mostrando la línea de Pirita.

En el diagrama S Vs Fe (figura 68) no es posible discernir la saturación de S como sulfuro o sulfato por lo que en la figura 69 se presenta el diagrama ternario de Ca-Fe-S en el cual se observa que las rocas alteradas se separan siguiendo dos trends, el primero las rocas alteradas con 3.5 – 6 % de aluminio se plotean siguiendo el trend de pirrotita – pirita y segundo las rocas alteradas con Al < 3.5% se plotean siguiendo el trend de anhidrita, lo que evidencia la

partición de S como sulfuro (reducido) y como sulfato (oxidado), o la posible reducción del fluido al reaccionar con las rocas volcano-sedimentarias.

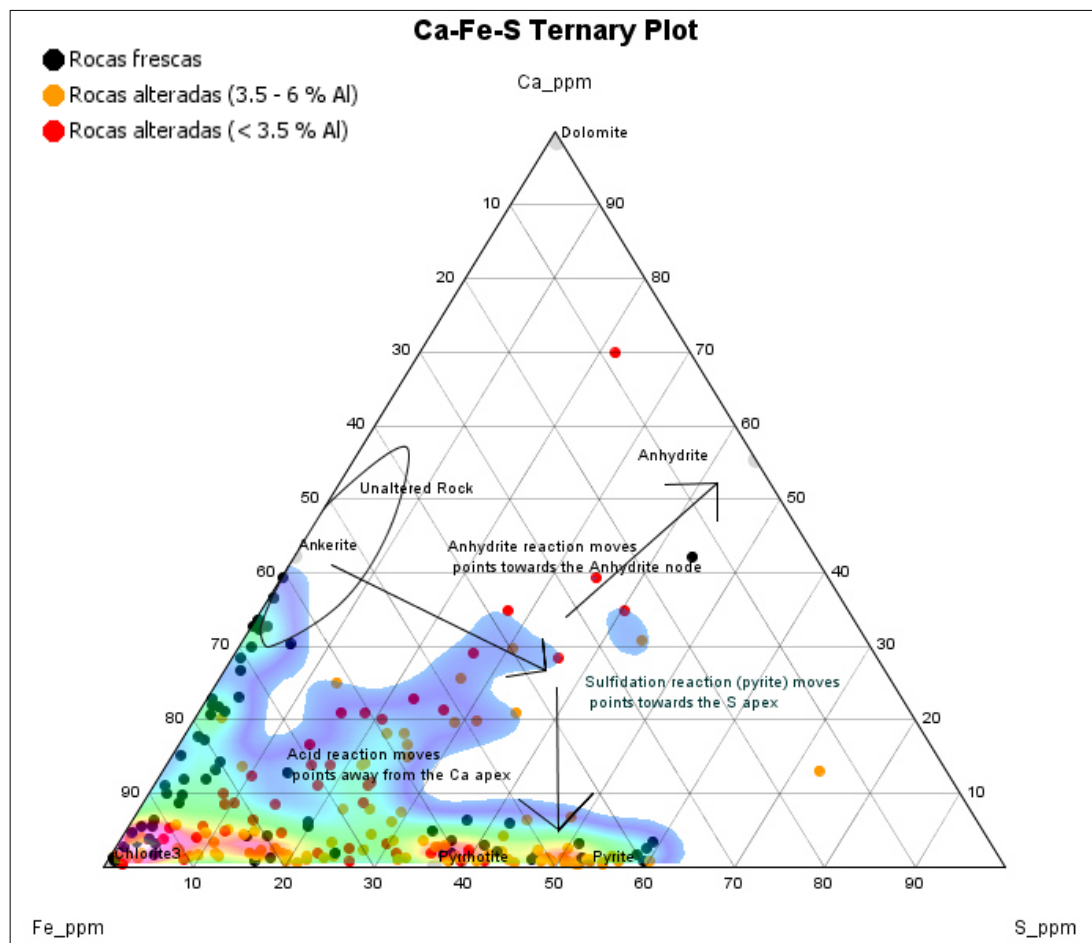


Figura 69. Diagrama ternario Ca-Fe-S

En la figura 70 se muestra el plano de alteraciones clasificadas a partir de las figuras 63, 66 y 67, y de la descripción observada en campo.

Según el plano de distribución de alteraciones (figura 70) se observa una amplia distribución de alteración con moscovita – illita, hacia el noroeste en Pampa Colorado y Cerro Colorado Chico se observa la predominancia de silicificación y alteración argílica, y zonas con oxidación, hacia el sureste en Pampa Bermejo, se presenta alteración potásica y oxidación.

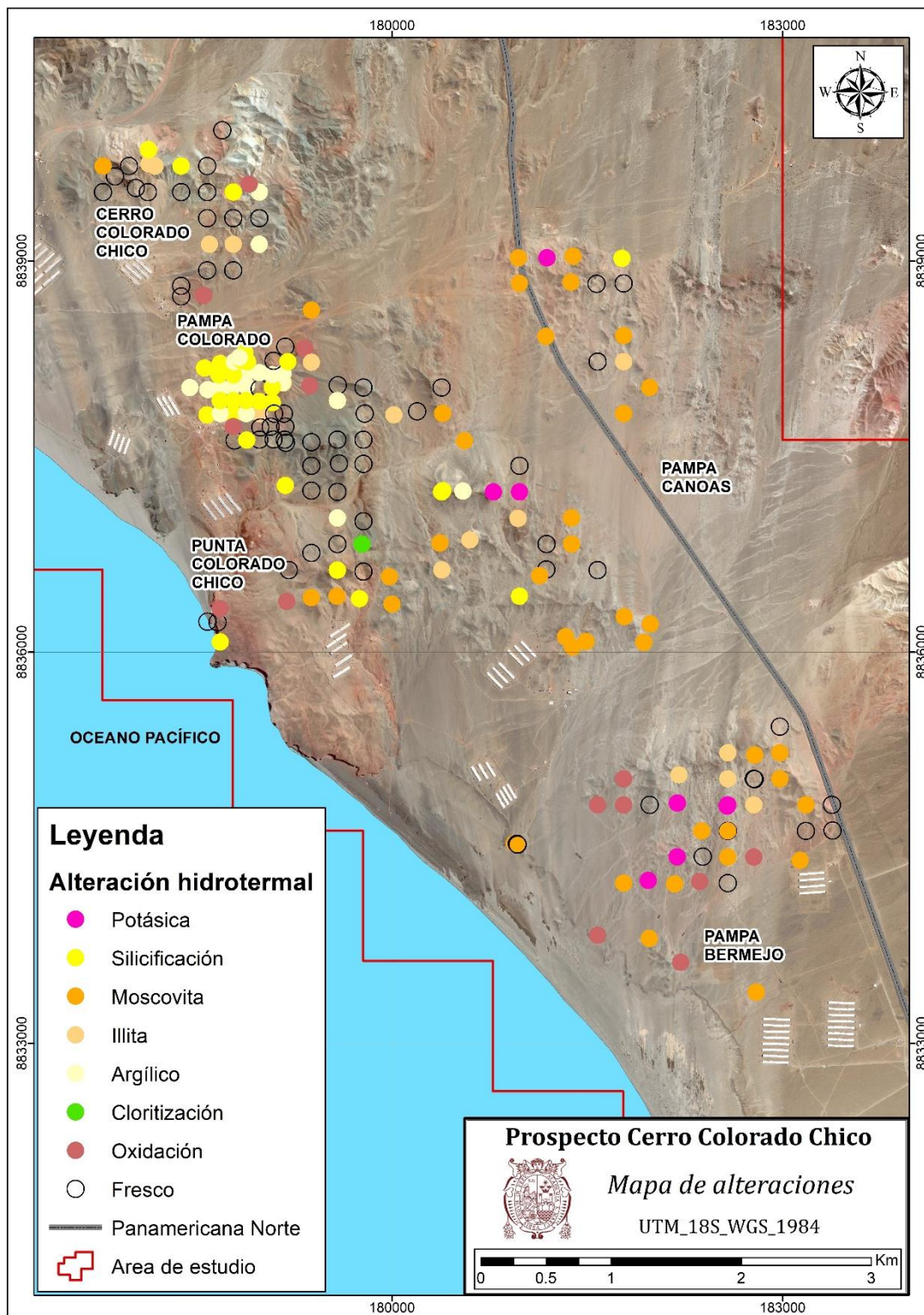


Figura 70. Plano de distribución de muestras con alteración hidrotermal.

5.1.4.3. Caracterización geoquímica de alteraciones

A partir de la clasificación geoquímica de alteraciones que se realizó en el apartado anterior, realizamos la caracterización geoquímica de las alteraciones identificadas usando gradientes de distribución de elementos traza.

El gradiente de distribución de los elementos traza en rocas alteradas puede dar pistas de los procesos magmático-hidrotermales que dieron lugar a dichas alteraciones, a continuación, se muestran la concentración de elementos traza como calcófilos, litófilos y siderófilos para las muestras alteradas en el área de estudio.

ELEMENTOS CALCÓFILOS.

La Figura 71 muestra la frecuencia acumulada de los elementos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn tanto para rocas alteradas como para las rocas frescas, y la Figura 72 muestra el diagrama de cajas de los elementos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn también para rocas alteradas y frescas, ambos casos (Figuras 71 y 72) representan la relación de concentración de elementos calcófilos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn en las alteraciones clorítica, argílica, illita, moscovita, potásica, oxidación y silicificación, y roca fresca del área de estudio, donde se observa que el oro (Au) se presenta enriquecido en las alteraciones potásica y moscovita, mientras que en las alteraciones silicificación, oxidación y e illita se presenta con concentraciones similares a la roca fresca, en tanto en la alteración argílica se presenta empobrecido por debajo de la roca fresca. El arsénico (As) se presenta relativamente enriquecido en todas las alteraciones, mucho más en la alteración potásica respecto de la roca fresca. El cobre (Cu) se presenta empobrecido en las rocas alteradas respecto de la roca fresca. El molibdeno (Mo) se presenta enriquecido en las rocas alteradas respecto de la roca fresca. El plomo (Pb) en la mayoría de los casos se presenta empobrecido respecto de la roca fresca, sin embargo, en altas concentraciones se observa un enriquecimiento relativo en las rocas alteradas respecto de la roca fresca. Finalmente, el zinc (Zn) en las rocas alteradas se presenta empobrecido respecto de la roca fresca.

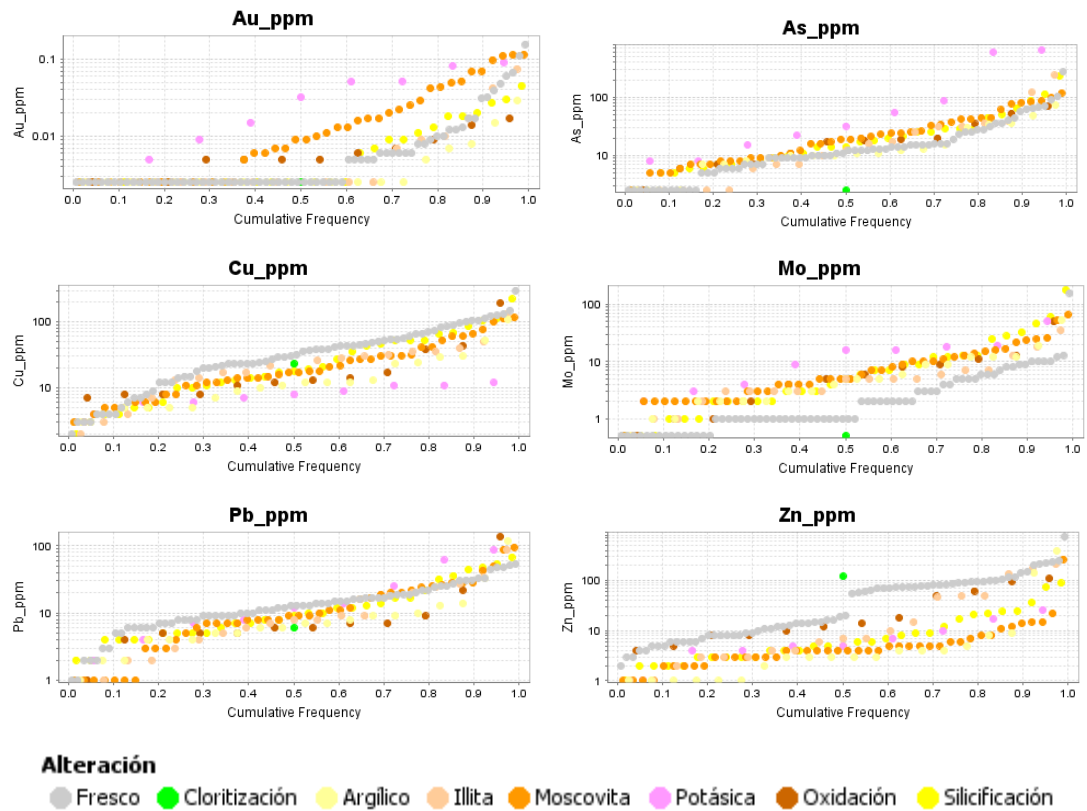


Figura 71. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración en ppm de elementos calcófilos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn para las muestras alteradas.

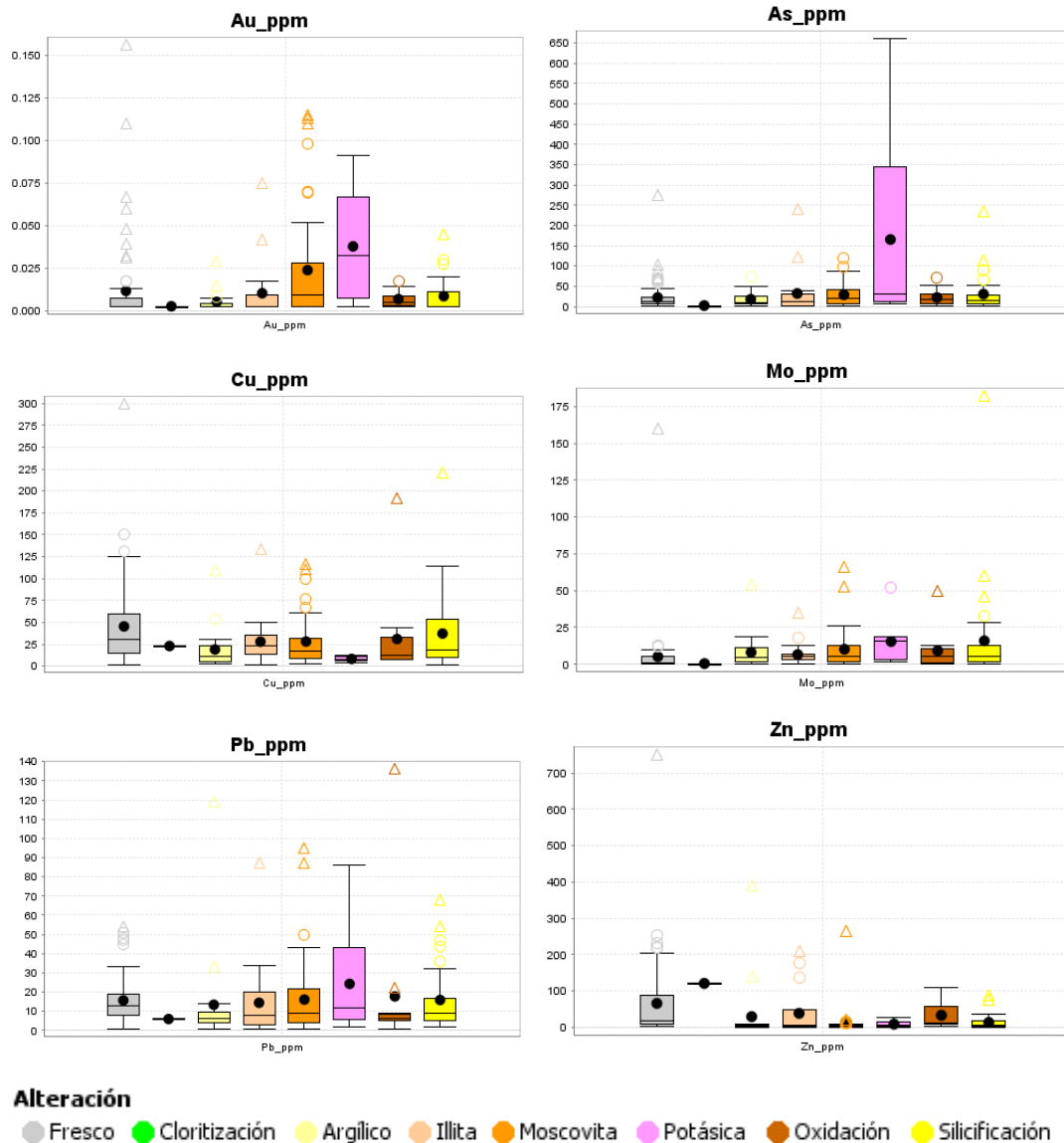


Figura 72. Diagramas de cajas de la concentración en ppm de elementos calcófilos Au, As, Cu, Mo, Pb y Zn para muestras alteradas.

ELEMENTOS LITÓFILOS

Los elementos litófilos Al, Ti, y Sc se presentan empobrecidos en todas las rocas alteradas respecto a las rocas frescas (Figura 73), lo que podría evidenciar removilización de estos elementos por actividad magmático-hidrotermal. El Sr se presenta empobrecido en las alteraciones illita, moscovita, potásica y oxidación, y se presenta enriquecido en las alteraciones argílica y silicificación. El Ba también se muestra empobrecido en las rocas con alteración oxidación, argílica y silicificación, mientras que en las muestras con alteración illita, moscovita y potásica se muestra relativamente

enriquecido respecto a las rocas frescas. El V se presenta empobrecidos en rocas con alteración illita, moscovita, potásica y silicificación mientras que en las rocas con alteración argílico y oxidación se presenta enriquecido respecto de las rocas frescas.

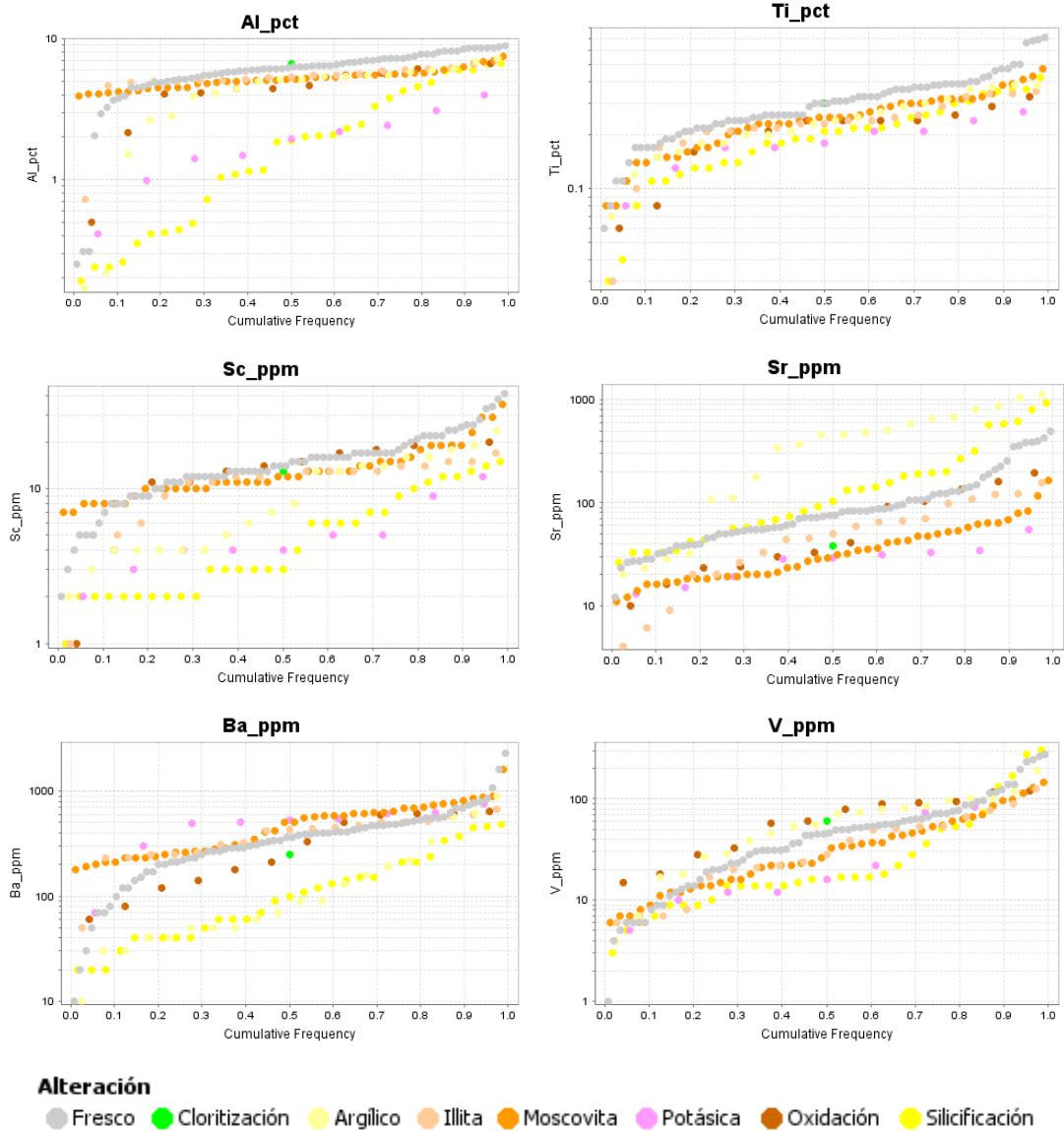


Figura 73. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración de elementos litófilos Al, Ti, Sc, Sr, Ba, V para las muestras alteradas.

ELEMENTOS SIDERÓFILOS

Los elementos siderófilos Fe, Co, Ni y Mn (Figura 74) se presentan relativamente empobrecidos en las alteraciones argílico, illita, moscovita, potásica y silicificación respecto de las rocas frescas. Mientras que en la alteración oxidación, Fe, Ni, Co y Mn se presentan relativamente enriquecidos.

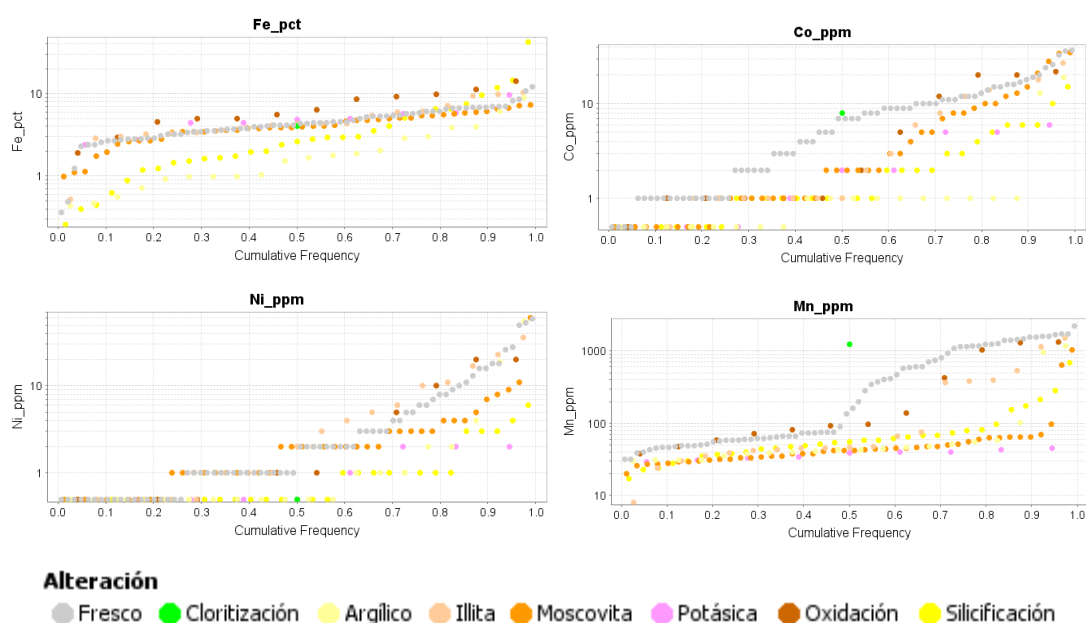


Figura 74. Diagramas de probabilidad por frecuencia acumulada de la concentración de elementos siderófilos Fe, Co, Ni, Mn para las muestras alteradas.

La zonación y variación espacial de los elementos traza en los sistemas magmático-hidrotermales (Figura 75) han sido muy bien estudiadas por Cohen (2011) y Halley, Dilles y Tosdal (2015), quienes describen que los fluidos magmático-hidrotermales dominan el centro del sistema hidrotermal, mientras que las zonas periféricas y superiores están dominadas por fluidos no magmáticos. Para todos los tipos de fluidos, sus metales trazas se modifican mediante la adición y remoción de elementos como resultado de la alteración de la roca caja. El fluido hidrotermal, por lo tanto, evoluciona composicionalmente a lo largo de su flujo y transporta elementos desde un área fuente a nuevos sitios donde pueden fijarse en minerales hidrotermales. Los gradientes de elementos traza en rocas alteradas generalmente imitan

las gradientes en composiciones de elementos traza de dichos minerales hidrotermales (Cohen, 2011), por lo que la geoquímica de elementos traza en alteraciones puede darnos pistas de los minerales de alteración presentes.

Las variaciones de los elementos traza en rocas alteradas del prospecto Cerro Colorado Chico permiten sugerir que están asociadas a un sistema magmático hidrotermal relacionado a una intrusión en profundidad o lateral (Figura 75), donde se aprecia enriquecimiento de Au, As y Mo, empobrecimiento de Cu, Pb y Zn, empobrecimiento de Al, Ti, Sc, enriquecimiento de Sr en alteración argílica y silicificación, enriquecimiento de Ba en alteración illita y moscovita (sericita), enriquecimiento de V en alteración de oxidación (hematización), empobrecimiento en siderófilos a excepción de la oxidación que se presenta relativamente enriquecida en éstos.

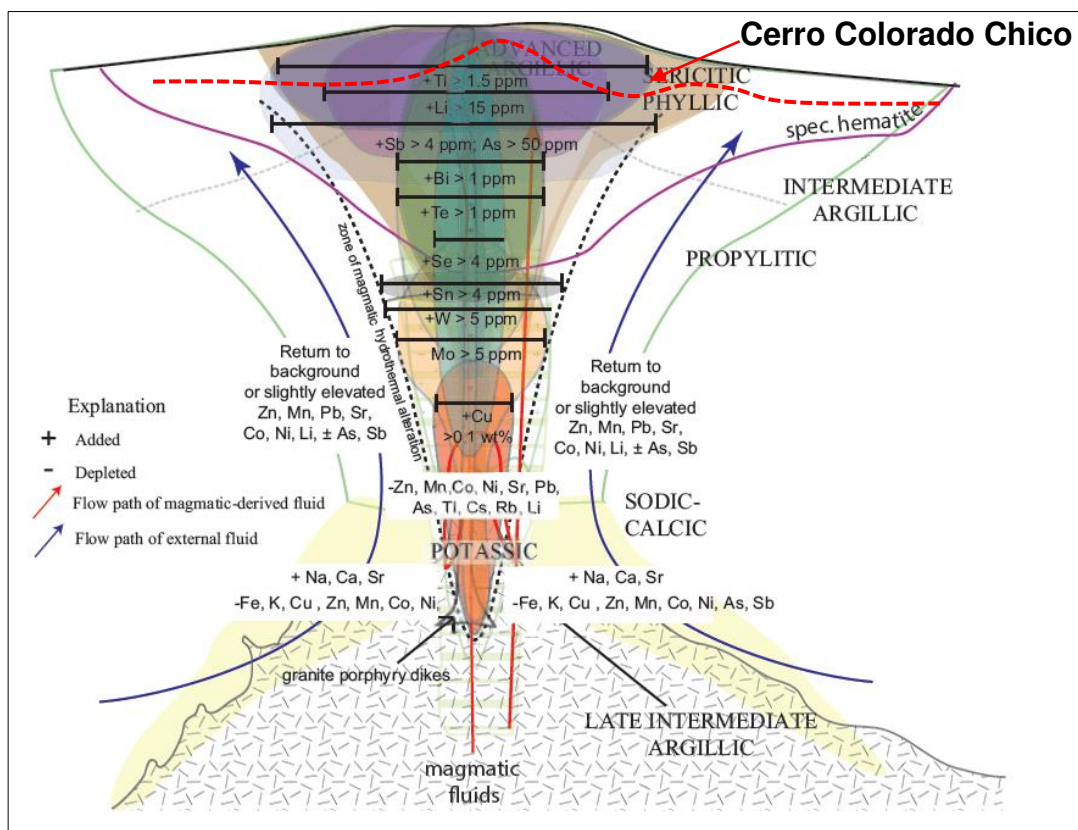


Figura 75. Variación de elementos traza en un sistema magmático-hidrotermal (Modificado de Halley, Dilles y Tosdal, 2015). Mostrando el posible nivel donde se encuentra Cerro Colorado Chico.

5.1.4.4. Firmas espectrales de alteraciones

Este estudio fue desarrollado con apoyo del laboratorio de teledetección del INGEMMET. Se determinó las firmas espectrales de las muestras usando el equipo espectroradiómetro FILEDSPEC 4HI-RES y el software RS3. Las muestras fueron secadas en un horno a temperatura de 20°C a 40°C por 24 horas para eliminar la humedad, luego se midieron las firmas espectrales, se hizo una lectura por cada cambio de coloración, textura y estructuras de la muestra.

La caracterización e interpretación fue realizado teniendo en consideración los rasgos de absorción y signos diagnósticos de cada mineral de alteración por muestra, siendo patrones propios de cada mineral.

Los resultados de 10 muestras evidencian la presencia de minerales de alteración hidrotermal como: sílice, illita/moscovita, pirofilita, dickita/caolinita, alunita potásica, clorita, jarosita, hematita, goethita, yeso/anhidrita, calcita, (Figuras 76 – 79) lo cual corrobora los ensambles de alteración identificados mediante geoquímica y teledetección.

Teniendo en cuenta las firmas espectrales determinadas las cuales nos dan una guía de los minerales que se tienen en las muestras mediante los espectros respectivos. Se puede verificar que la caracterización de las alteraciones a través de la geoquímica fue correcta, cabe precisar que el término sericita (término textural) se usa para describir el mineral de alteración del grupo de las micas blancas que geoquímica y mineralógicamente corresponde a moscovita, y lo que se clasificó geoquímicamente como alteración potásica probablemente esté relacionada a alunita K u otras arcillas ricas en K, ya que no se ha identificado feldespato potásico.

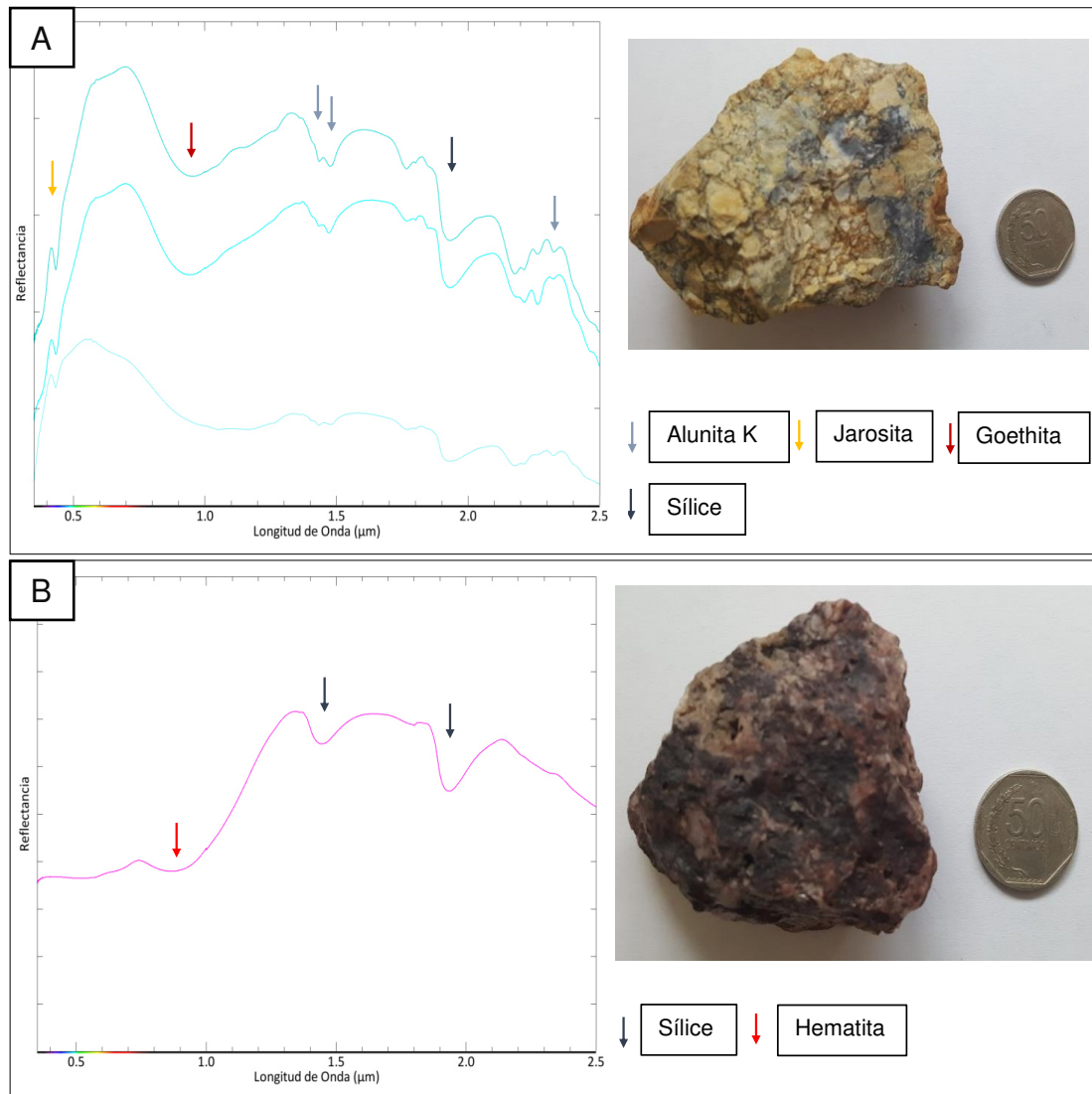


Figura 76. Firma espectral de muestras de la zona Pampa Bermejo. A: Brecha sílicea con minerales de alteración Alunita K, jarosita, goetita y sílice. B: Sílice masiva con FeOx, el espectro muestra presencia de sílice y hematita.

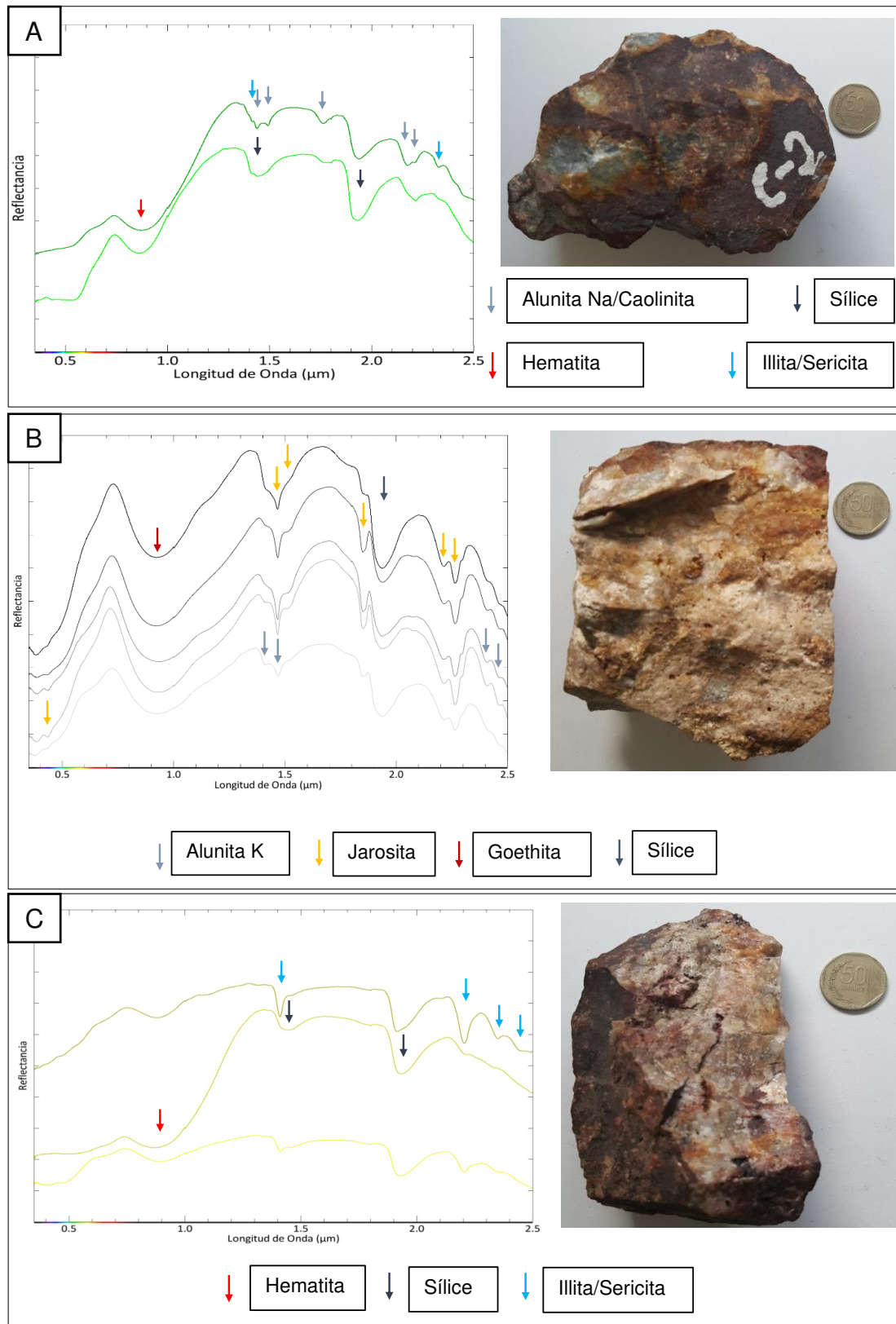


Figura 77. Firma espectral de muestras de la zona Cerro Colorado Chico. A: Roca con silicificación pervasiva y FeOx, el espectro muestra Alunita Na/Caolinita, Sílice, Hematita, Illita/sericita. B: Brecha silíceo con FeOx, el espectro muestra Alunita K, jarosita, goetita y sílice. C: Estructura de Cuarzo-Hematita, el espectro muestra Hematita, Sílice e Illita/Sericita.

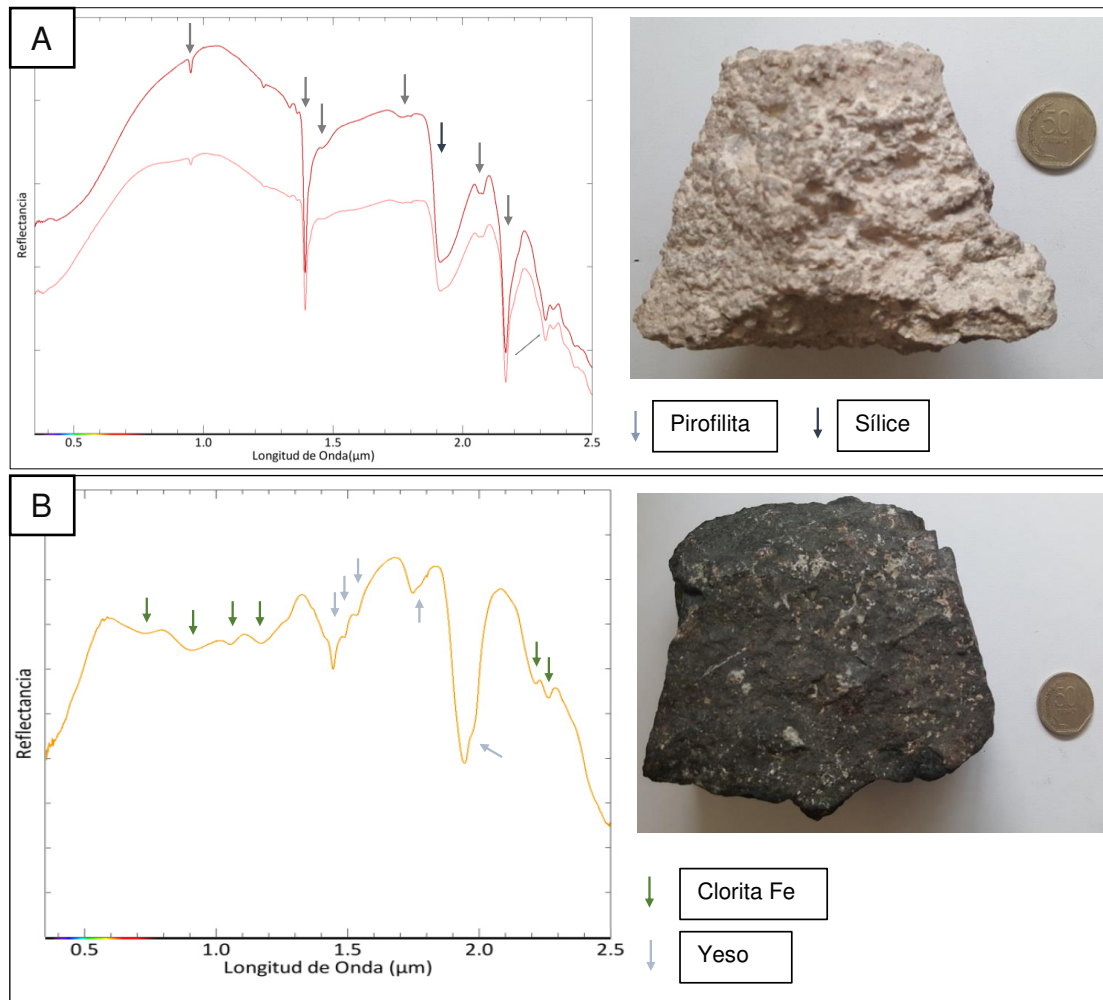


Figura 78. Firma espectral de muestras de la zona Pampa Colorada. A: Alteración pervasiva con textura patchy con ensamble de sílice-pirofilita, B: Roca volcanoclástica gris verdosa propilitizada, el espectro muestra la presencia de Clorítica férrica y yeso.

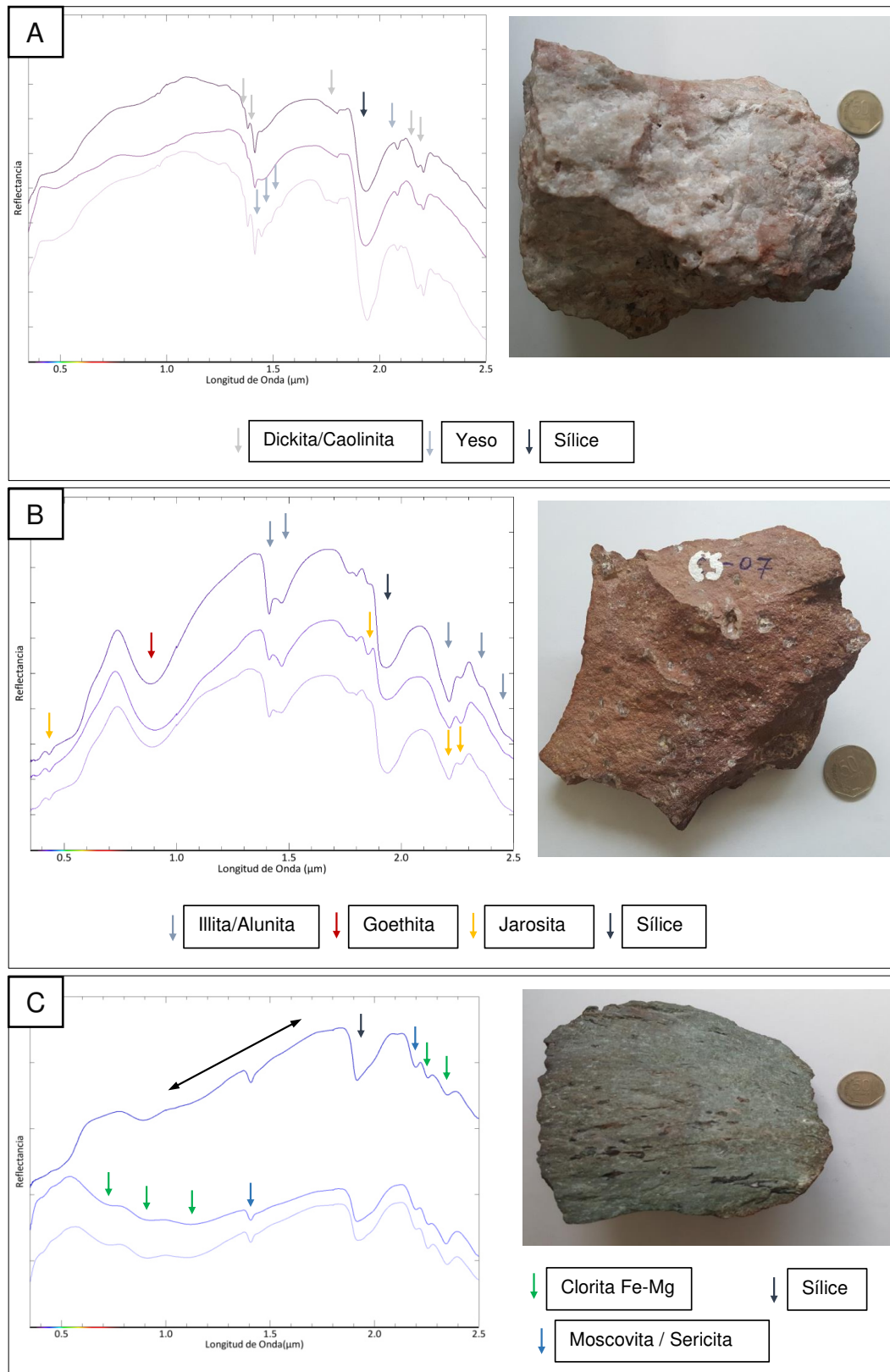


Figura 79. Firma espectral de muestras de la zona al noroeste de Pampa Colorada. A: Sílice masiva con hematita, el espectro muestra Dickita/Caolinita y Yeso. B: Roca riolítica con textura vesicular, fuertemente hematitizada, el espectro muestra Illita/alunita, goethita, jarosita y sílice. C: Roca volcanoclástica color gris verdosa con textura fluidal, con vesículas alargadas rellenas de mineral verde oscuro, el espectro muestra Clorita, sílice, Moscovita/sericita.

5.1.5. Características petrominerográficas

Para la caracterización petrominerográfica se ha considerado seis estudios de petrografía y seis estudios minerográficos con apoyo del Laboratorio de Petromineralogía de INGEMMET, así como, tres estudios petrográficos, siete estudios minerográficos y nueve análisis mineralógicos por Difracción de Rayos X (DRX) de catorce muestras elaborado por el Laboratorio de Caracterización Mineralógica de BISA.

Los estudios petrográficos (Figura 80) han permitido identificar la mineralogía de alteraciones, reemplazamientos y asociaciones, caracterizando sus tamaños, formas, y texturas cada uno de ellos.

El mineral más abundante es cuarzo hidrotermal hasta 3 generaciones (Cuarzo I, II y III), el cuarzo I se encuentra de formas subangulares y angulosas con tamaños menores a 0.4 mm. Se observa reemplazando a toda la roca, acompañado de sericita y arcillas. El cuarzo II se presenta como cristales subhedrales y anhedrales de hábitos prismáticos y agregados granulares, con tamaños de 0.1 a 3 mm, se encuentra rellenando numerosas cavidades y fracturas por toda la muestra. El cuarzo III se presenta como agregados microcristalinos con arcillas y óxidos de hierro rellenando cavidades y fracturas. También abunda y es ubicuo la sericita que se muestra como cristales anhedrales de hábitos tabulares, agrupados en agregados fibrosos, escamosos y microcristalinos, se encuentra dispersa, diseminada y rellenando cavidades por toda la matriz, se encuentra acompañada de arcillas y limonitas y en ocasiones de alunita. Las arcillas se observan como cristales anhedrales a subhedrales en agregados escamosos aplastados y microcristalinos, se observa formando parte de la matriz, acompañado de sericita, jarosita y limonitas. En menor proporción se ha observado minerales opacos que se presentan como cristales anhedrales a subhedrales de formas irregulares, con tamaños menores a 1.6 mm. Se encuentran rellenando cavidades y fracturas. En algunas muestras se ha identificado rutilo, como cristales subhedrales a manera de trazas en moldes de cristales dentro de cuarzo (Figura 81).

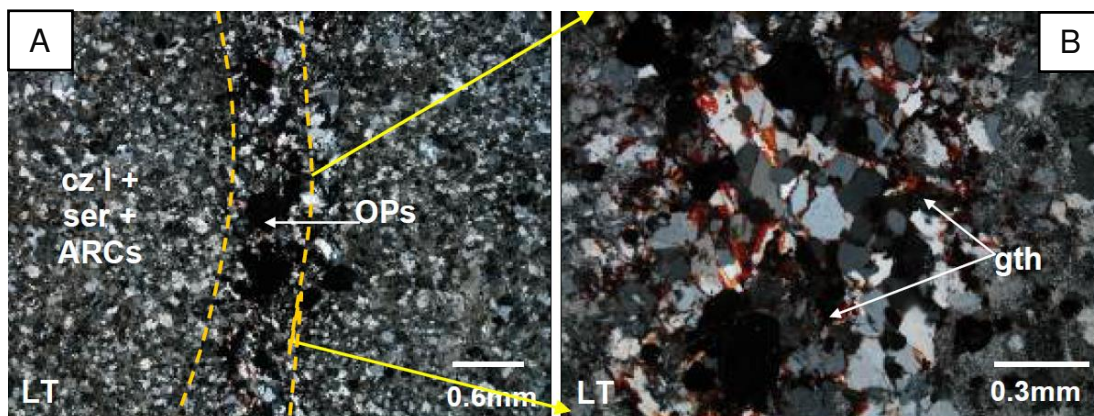


Figura 80. Micrografía de muestra con alteración cuarzo-sericita-óxidos de hierro. A: Granos subredondeados e irregulares de cuarzo I (cz I) acompañados de sericita (ser) y arcillas (ARCs). B: Detalle de fractura rellena de goethita (gth), cuarzo II (cz II) y minerales opacos (OPs).

Así mismo se observa óxidos e hidróxidos de hierro como goethita y limonitas que se presentan como cristales anhedrales y microcristalinos, agrupados en agregados terrosos y granulares finos, relleno de cavidades, fracturas e intersticios por toda la muestra, tiñen parcialmente la muestra. Es conveniente precisar que en algunos casos se encuentran acompañadas de jarosita o remplazando minerales opacos, y más frecuentemente relleno de espacios abiertos con cuarzo hidrotermal, este último caso puede entenderse como producto de la hidratación de hematita hidrotermal (Figura 81).

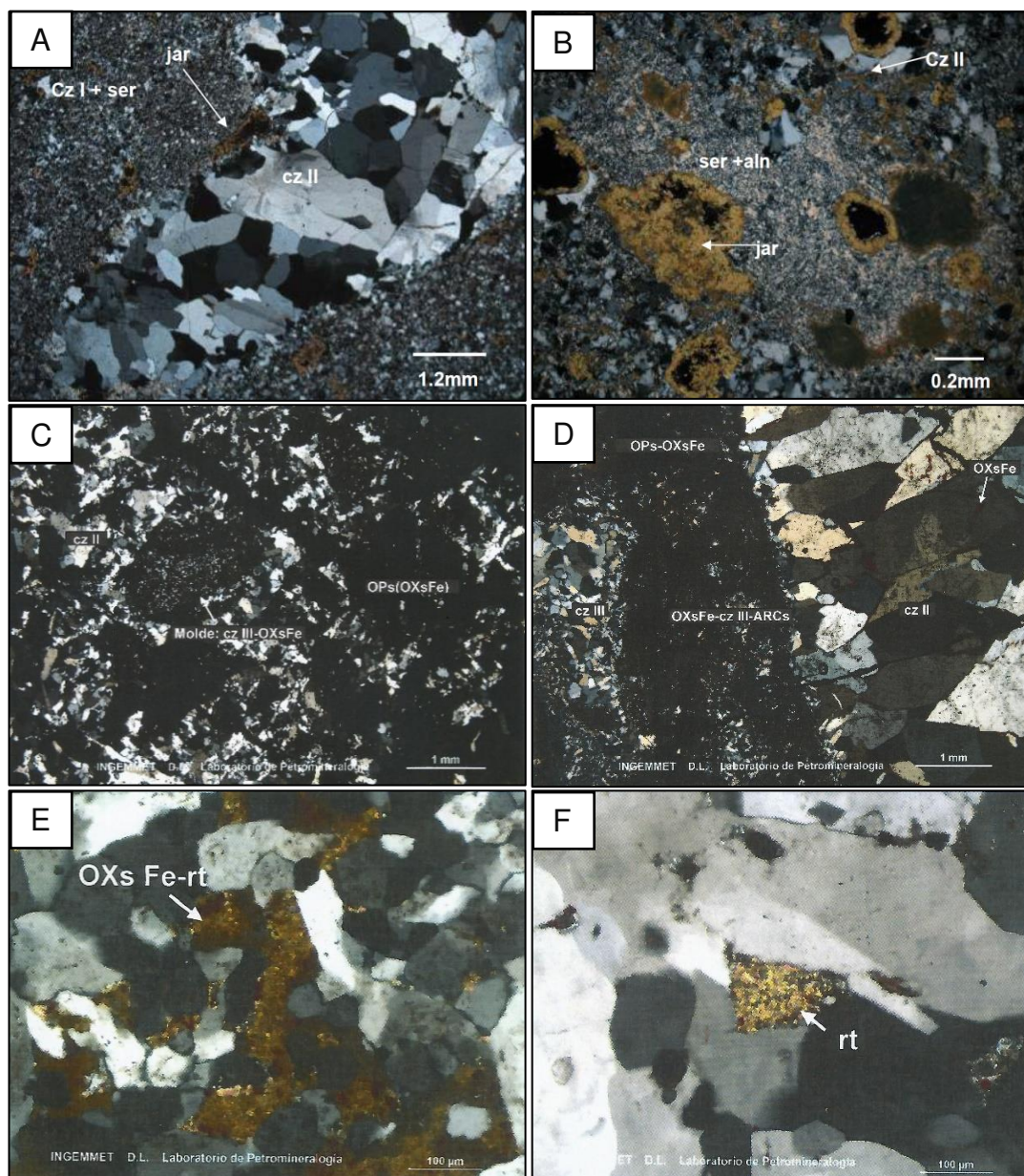


Figura 81: Micrografías de tres generaciones de cuarzo, y óxidos de hierro relleno de cavidades y venillas. A: Cuarzo II (Cz II) relleno de cavidades dentro de una roca alterada con cuarzo I (Cz I) y sericita (ser), jarosita (jar) reemplazando minerales opacos. B: Cuarzo II (Cz II) y minerales opacos (OPs) relleno de cavidades en roca alterada con sericita y alunita (ser+aln), jarosita (jar) reemplazando minerales opacos (OPs). C: Cuarzo hidrotermal, dos generaciones (II y III) con impregnaciones de arcillas, opacos diseminados con y óxidos de hierro. D: Cuarzo hidrotermal, dos generaciones (II y III) con impregnaciones de arcillas y venillas de óxidos de hierro reemplazando minerales opacos (OPs). E: Óxidos de hierro (OXs Fe) y rutilo (rt) en cristales anhedrales inmersos en matriz silicificada (cuarzo). F: cristales de rutilo (rt) subhedrales en manera de trazas en moldes de cristales dentro de cuarzo.

Los estudios mineragráficos (Figuras 82 y 83) han permitido identificar la mineralogía mena y ganga, caracterizando sus tamaños, formas, texturas asociaciones y paragénesis de cada uno de ellos.

El mineral ubicuo es hematita, y se observan como cristales anhedrales agrupados en agregados terrosos y pulverulentos. Están presentes en los intersticios, cavidades, y venillas rellenando fracturas, en ocasiones se observa como alteración de posible magnetita, tomando sus formas externas, y en algunos casos como agregados coliformes remplazados por limonitas/goetita. Algunos moldes o pseudomorfos de hematita presentan diminutos granos de pirita en su interior. También se observa rutilo que se encuentra como cristales anhedrales de formas irregulares y alargadas, con tamaños menores a 0.08 mm, se muestra rellenando cavidades y como disseminaciones. En ocasiones se observan sulfuros pirita y calcopirita principalmente, pirrotita ocasionalmente, que ocurren como cristales subhedrales y anhedrales con hábitos cúbicos, formas irregulares y relícticas con tamaños menores a 0.6 mm, se encuentran rellenando cavidades y fracturas, en algunos casos está reemplazada por hematita y limonitas, goetita, jarosita, quedando solo relictos en su interior.

Los análisis mineralógicos semicuantitativos por Difracción de Rayos X (Figuras 85) han permitido determinar la presencia de minerales con un límite de detección (L.D.) de 1.14 % en promedio.

En este estudio se ha podido constatar la presencia de cuarzo, moscovita, alunita, rutilo, natroalunita, albita, hematita, pirita, jarosita.

A partir de las observaciones microscópicas y difracción de rayos X se puede precisar la paragénesis de los principales minerales de alteración y opacos en Cerro Colorado Chico de acuerdo con la Figura 84, donde se ha identificado tres estadios hipógenos y un estadio supergénico.

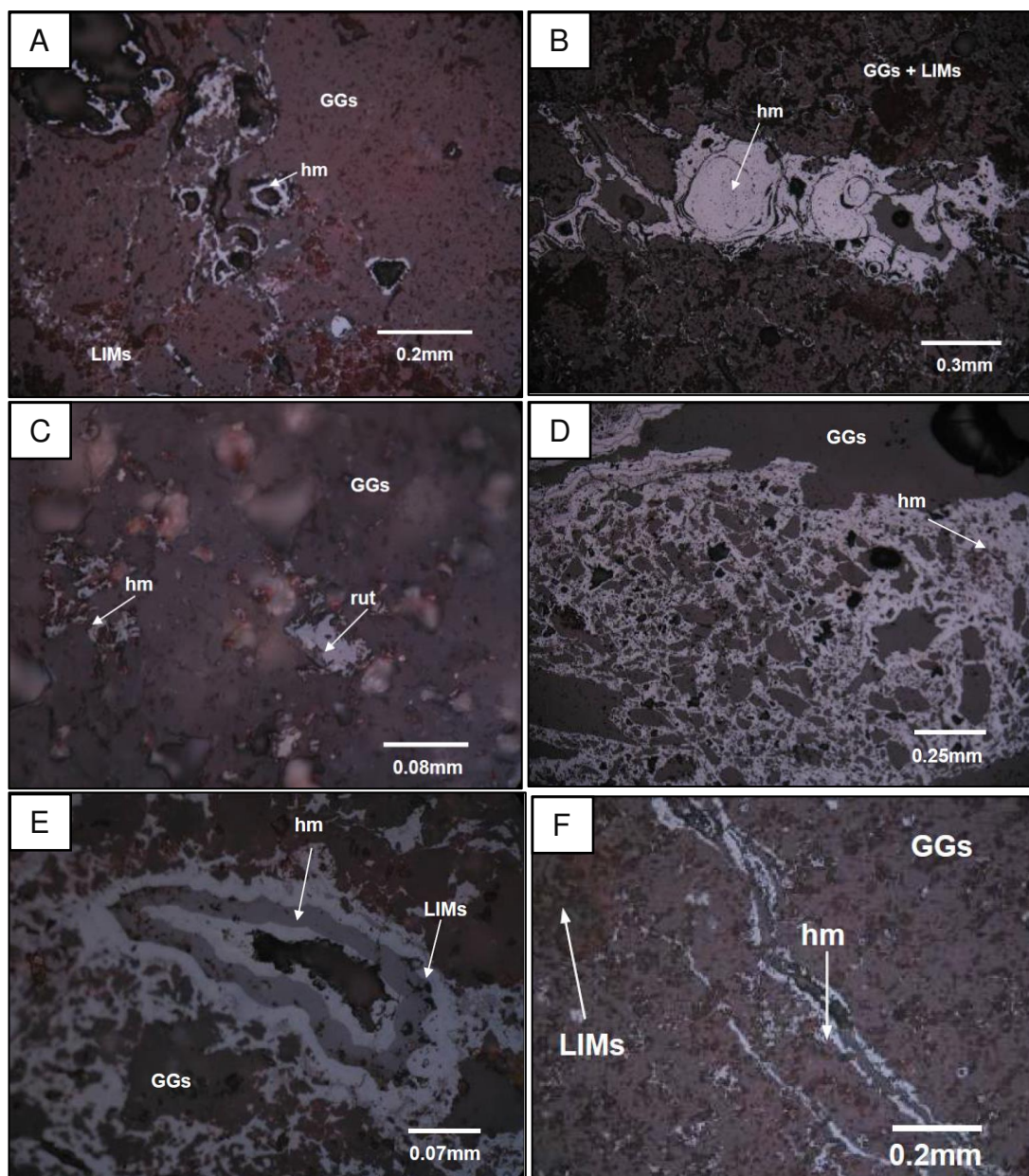


Figura 82: Micrografías con las diferentes manifestaciones de óxidos de hierro. A: Pseudomorfos octaédricos de posible magnetita reemplazada por hematita (hm) y limonitas (LIMs) B: Hematita (hm) en venillas rellenas de fracturas reemplazada por limonitas. C: Presencia de hematita (hm) y rutilo (rut) rellenas de cavidades, acompañado de limonitas (LIMs) tiñendo toda la muestra. D: Brecha hematítica, fragmentos angulosos de roca cubiertos con abundantes óxidos de Fe (hm). E: Hematita (hm) de hábito coliforme y con forma en corona rellenas de cavidades y limonitas (LIMs) reemplazando hematita y tiñendo parcialmente la muestra. F: Vetillas de hematita cortando toda la muestra, y limonitas (LIMs) tiñendo toda la muestra.

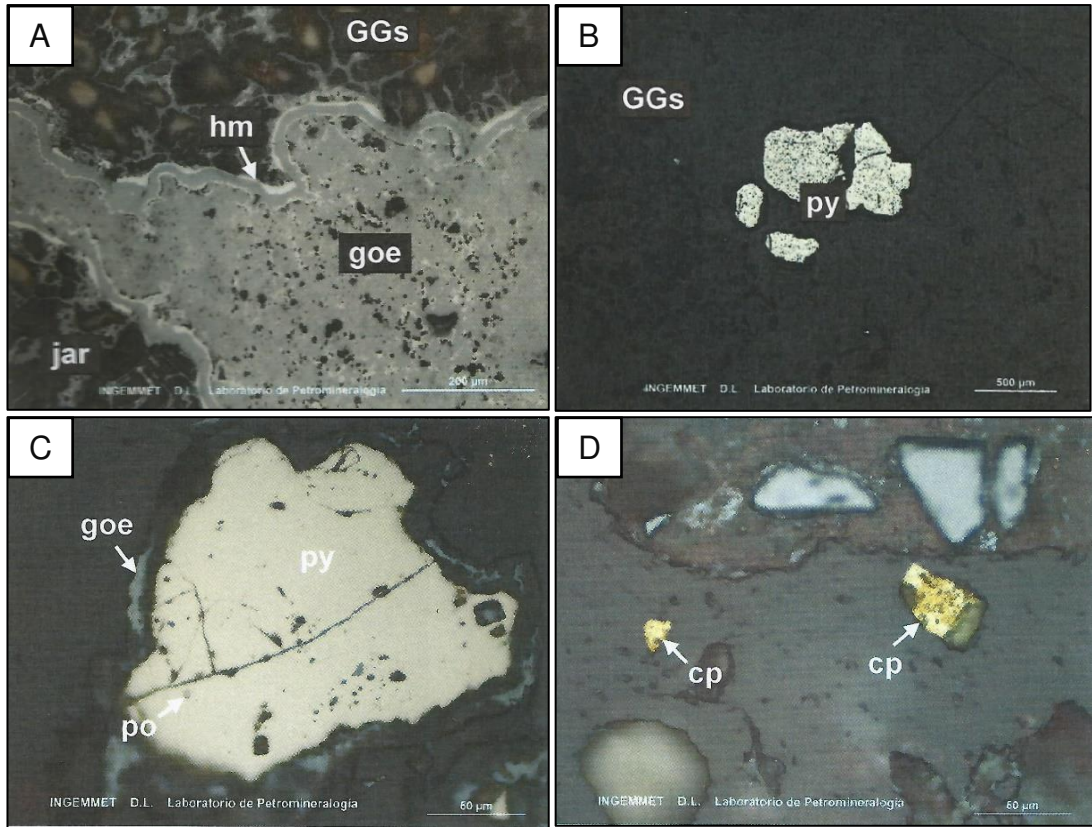


Figura 83: Micrografías de sulfuros con óxidos de hierro. A: agregados botroidales de goetita cubierta con hematita y jarosita en intersticios y fracturas. B: Pirita subhedral diseminada en gangas. C: pirita y trazas de pirrotita anhedral, con halos de goetita. D: pirita y calcopirita diseminadas.

	HIPÓGENO			SUPÉRGENO
	ESTADÍO I	ESTADÍO II	ESTADÍO III	ESTADÍO IV
Cuarzo	—	—	—	
Albita	—			
Sericita / muscovita	—	—		
Magnetita		—		
Hematita		—	—	—
Rutilo		—		
Arcillas	—	—	—	—
Alunita		—		
Pirita	—	—	—	
Calcopirita		—	—	
Pirrotita			—	
Goetita				—
Jarosita				—

Figura 84. Secuencia paragenética de los principales minerales de alteración y opacos en Cerro Colorado Chico.

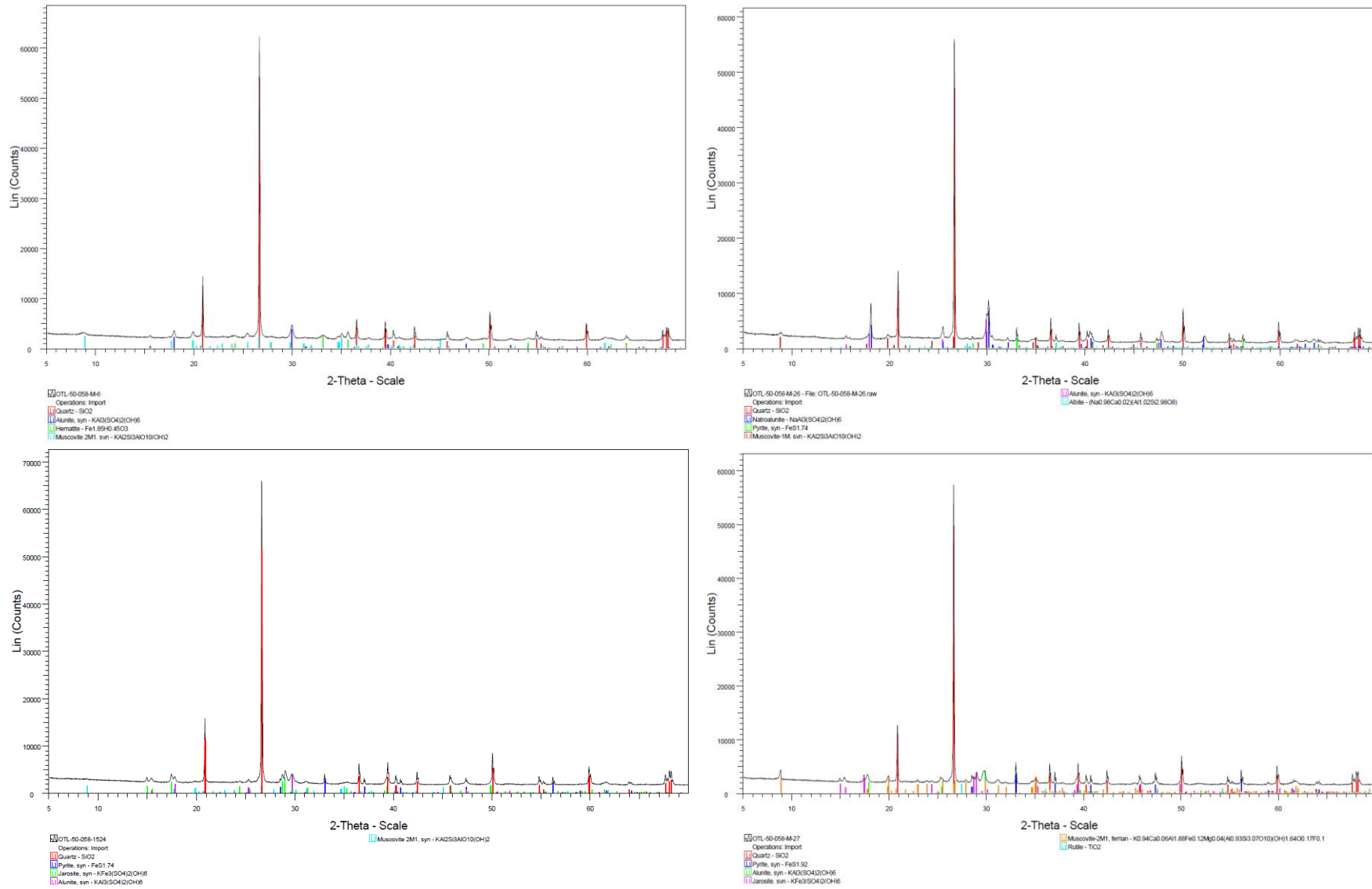


Figura 85. Difractogramas de cuatro muestras con los respectivos minerales identificados.

5.1.6. Inclusiones fluidas

5.1.6.1. Identificación de inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas se realizó con apoyo del laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET, se usó un microscopio electrónico para identificar las inclusiones fluidas en cuatro muestras, en las cuales se reconocieron familias de inclusiones fluidas primarias bifásicas (IF-BIF), de formas irregulares y tabulares, de tipo L con grado de relleno (FILL) hasta de 0.30 y con tamaños hasta de 18 μm , y secundarias bifásicas (IF-BIF), de formas irregulares, tipo L con grado de relleno (FILL) en promedio de 0.30 y con tamaños hasta de 13 μm , familias de inclusiones fluidas primarias trifásicas (IF-TRIF), de formas irregulares, de tipo L ricas en líquido con grado de relleno (FILL) hasta de 0.45 y con tamaños hasta de 10 μm .

La primera muestra corresponde cuarzo oqueroso de estructura silíceo (cuarzo POD) conformada por cristales anhedrales de cuarzo II como relleno hidrotermal, además se encuentran escasos cristales de pirita diseminados en cuarzo II, con presencia de óxidos de hierro relleno vetillas e intersticios; en menor proporción micas y arcillas en algunos intersticios. Asociado al cuarzo II se observan escasos cristales de pirita, diseminados y agregados botroidales de goethita relleno intersticios y moldes de cristales, ocasionalmente se encuentran junto con hematita. En los cristales de cuarzo II se encontró inclusiones de tipo bifásico con tamaños menores a 15 μm . Asimismo, se observan inclusiones primarias, las que se encuentran en planos de crecimiento de los cristales de cuarzo II. Figura 86.

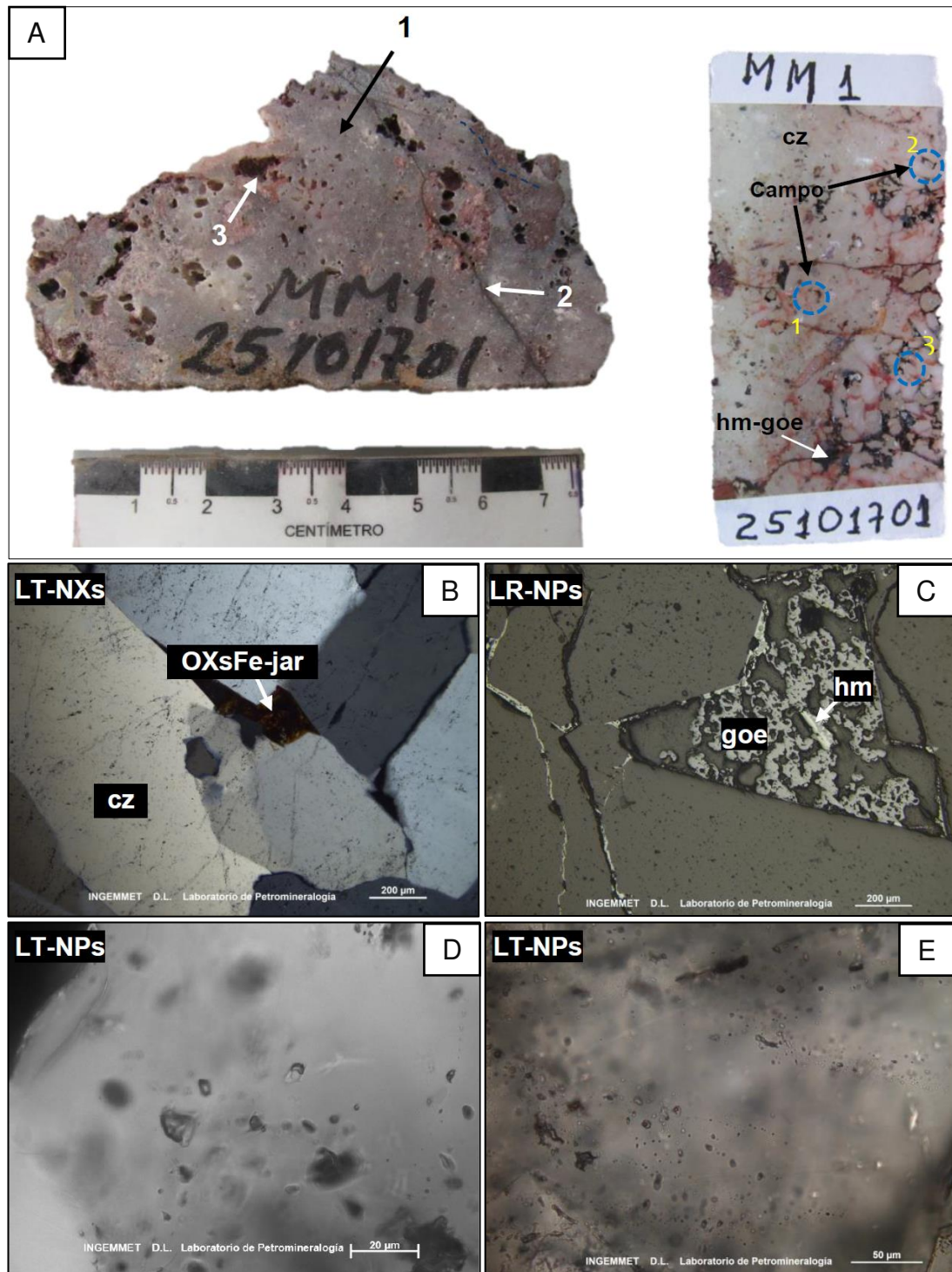


Figura 86. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de sílice oquerosa. A: A la izquierda, muestra de mano, 1. Cuarzo hidrotermal con impregnaciones de óxidos. 2. Vetillas irregulares rellenas por óxidos de hierro. 3. Oquedades, algunas rellenas por óxidos de hierro. A la derecha, sección delgada, los campos 1, 2 y 3 se encuentra en cuarzo hidrotermal, en los cuales se encontraron inclusiones fluidas primarias bifásicas con tamaños hasta de 15 μm . B: Óxidos de hierro junto con jarosita: OXsFe-jar en intersticios de cristales de cuarzo: cz. C: Agregados de goethita: goe junto con hematita: hm, principalmente en bordes. D: Familias de inclusiones trifásicas primarias ricas en líquido irregulares. E: Familia de inclusiones bifásicas primarias ricas en líquido, irregulares y subredondeadas

La segunda muestra corresponde a brecha silícea (cuarzo POD) conformada por cristales anhedrales de cuarzo II y cuarzo III como relleno hidrotermal, con presencia de óxidos de hierro rellenando vetillas e intersticios, ocasionalmente se encuentran junto con agregados botroidales de goethita o rellenando moldes de cristales, además escasa pirita diseminada; en menor proporción micas y arcillas en intersticios, y por sectores se observan agregados de carbonatos junto con los óxidos. En los cristales de cuarzo secundario se encontró inclusiones de tipo bifásico con tamaños menores a 15 μm . Figura 87.

La tercera muestra corresponde a brecha silícea (cuarzo POD) con cemento de sílice y hematita, la microscopía evidencia que está conformada por cristales anhedrales de cuarzo II y cuarzo III como relleno hidrotermal con presencia de óxidos de hierro rellenando intersticios y venillas sinuosas, ocasionalmente también rellenando moldes de cristales, además se observan trazas de pirita diseminada; en menor proporción micas y arcillas presentes en intersticios, y por sectores se observan agregados de sericita con impregnaciones de arcillas en intersticios de cuarzo II. En los cristales de cuarzo secundario se encontró inclusiones de tipo bifásico con tamaños menores a 14 μm y trifásicos menores a 10 μm . Figura 88.

La cuarta muestra corresponde a brecha de hematita, está conformada por cristales subhedrales de cuarzo hidrotermal, con presencia de abundantes agregados criptocristalinos algunos botroidales de óxidos de hierro reemplazando agregados de cuarzo y rellenando intersticios, en trazas se encuentran micas presentes en intersticios a modo de parches. Se observan trazas de cristales de pirita y calcopirita, dispuestos como diseminados en minerales ganga de cuarzo secundario. Además, abundantes agregados de goethita como parches irregulares, los que se encuentran englobando cristales de gangas (cuarzo secundario). En los cristales de cuarzo secundario se encontró inclusiones de tipo bifásico con tamaños menores a 12 μm . Figura 89.

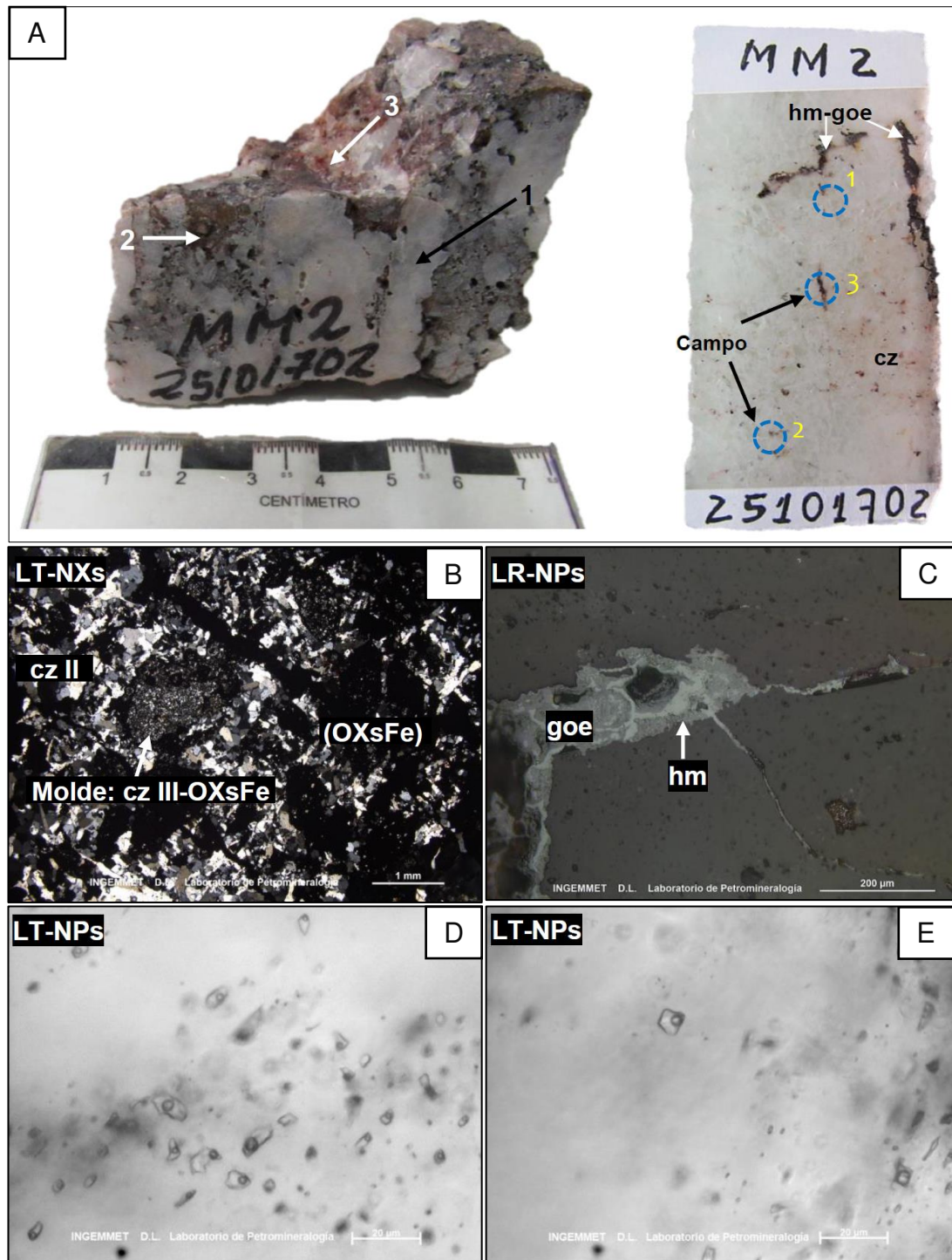


Figura 87. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha de sílice. A: Izquierda, muestra de mano. 1. Cuarzo hidrotermal con impregnaciones de óxidos. 2. Oquedades irregulares rellenas por óxidos de hierro. 3. Pátinas de coloración rojiza debida a la presencia de óxidos de hierro. Derecha, sección delgada mostrando los Campos 1, 2 y 3 para el estudio de IF. B: Mosaico de cristales de cuarzo II: cz II, moldes reemplazados por cuarzo III y óxidos: cz III-OXsFe. Y óxidos relleno cavidades (OXsFe). C: Fracturas rellenas por hematita: hm, siendo reemplazada por goethita: goe. D y E: Familia de inclusiones bifásicas primarias ricas en líquido irregulares y tabulares, además familia de inclusiones bifásicas secundarias ricas en líquido irregulares.

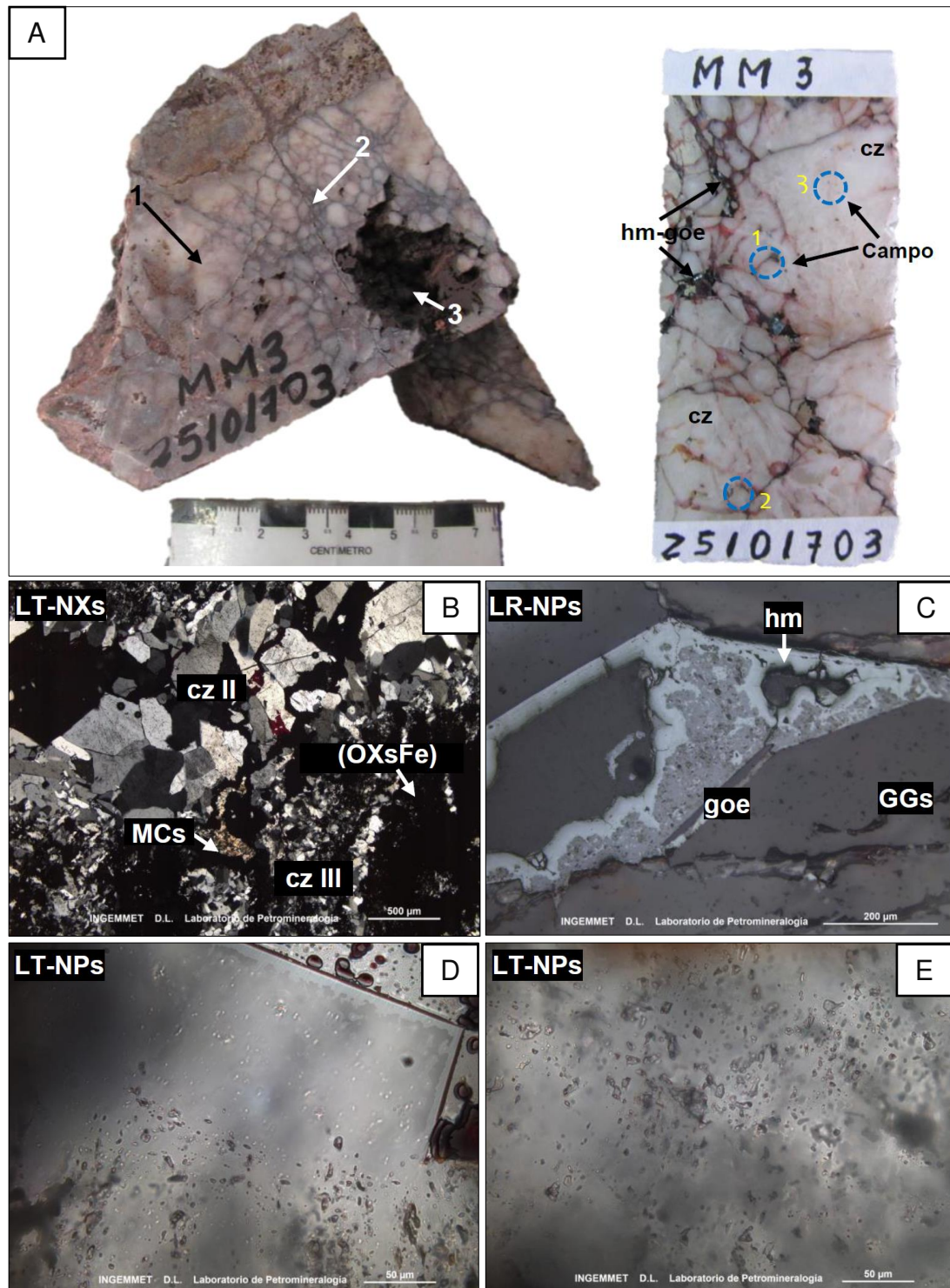


Figura 88. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha craquel de cuarzo con cemento de óxidos. A: Derecha, fotografía de muestra de mano. 1. Relleno hidrotermal de cuarzo con impregnaciones de óxidos. 2. Venillas sinuosas rellenas por óxidos de hierro. 3. Oquedades rellenas por óxidos. Izquierda, Campos 1, 2 y 3 seleccionados para su estudio de IF. B: Moldes reemplazados por cuarzo III: cz III; además cristales de cuarzo II: cz II, óxidos de hierro, y micas en intersticios. C: Moldes y vetillas rellenas por goethita: goe, y hematita: hm. D: Familias de inclusiones bifásicas primarias ricas en líquido con formas tabulares, subredondeados e irregulares. E: Familia de inclusiones bifásicas y trifásicas primarias con formas tabulares e irregulares.

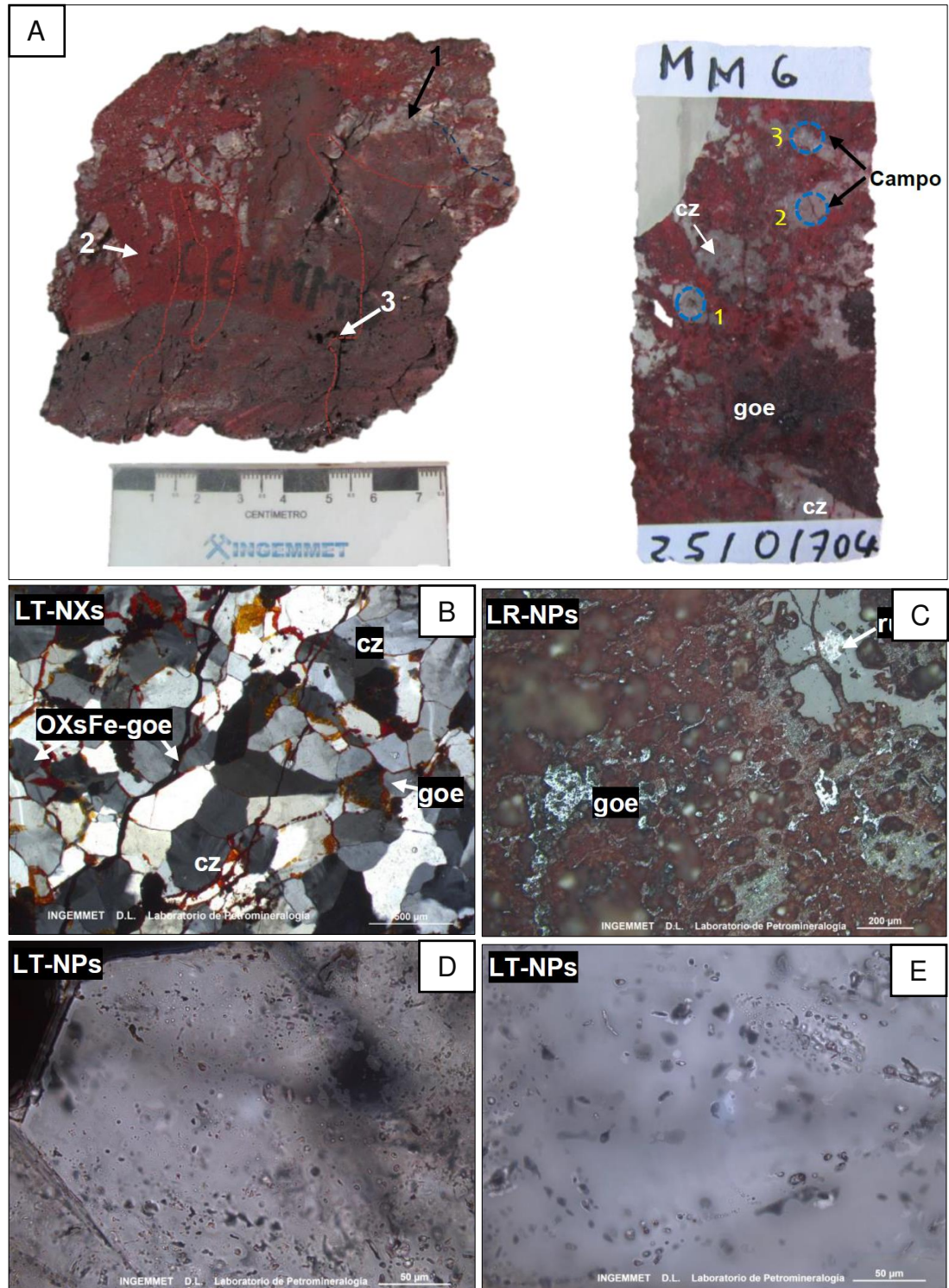


Figura 89. Fotografía, micrografías e inclusiones fluidas en una muestra de brecha de hematita. A: Muestra de mano con los campos 1, 2 y 3 seleccionados para su estudio de IF. 1. Relleno hidrotermal de cuarzo hidrotermal con impregnaciones de óxidos. 2. Parches e intersticios rellenos por óxidos de hierro. 3. Fracturas algunas rellenas por óxidos. B: Agregados en mosaico de cuarzo: cz con microfracturas y contactos rellenos de óxidos de hierro y goethita: OXs Fe-goe. C: Parches irregulares de goethita: goe, además rutilo: rut, en intersticios. D: Familia de inclusiones bifásicas primarias ricas en líquido irregulares. E: Familias de inclusiones bifásicas y trifásicas primarias ricas en líquido irregulares alargados.

5.1.6.2. Temperatura de homogenización y salinidad de los fluidos

Para el caso de la primera muestra, el diagrama de Salinidad vs Temperatura de Homogeneización muestra dos poblaciones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 560° y 605°C y la segunda entre 164° y 286°C; estas poblaciones poseen salinidades entre 45% a 48% y 2.5% a 5.0% NaCl eq., respectivamente. Lo cual indica que posiblemente ha ocurrido un enfriamiento del sistema y dilución del fluido gatillado por una mezcla con fluidos externos. Asimismo, en cada población se puede observar diferentes procesos en la evolución de los fluidos, en las muestras del campo 1 donde se ha encontrado familias de inclusiones fluidas primarias Trifásicas (IF-TRIF), de tipo L ricas en líquido con grado de relleno (FILL) de 0.45 hasta de 10 μm se observa un proceso de dilución (Figura 90 - a) de 47.66% a 44.82% NaCl eq a medida que el fluido se enfría de 605° a 560°C. Mientras que en los campos 2 y 3 donde se ha encontrado familia de inclusiones fluidas primarias bifásicas (IF-BIF), de tipo L con grado de relleno (FILL) de 0.30 y con tamaños hasta de 12 μm , se observa al menos dos procesos hidrotermales, un proceso de ebullición (Figura 90 - b) a medida que el fluido se enfría de 286° a 215°C lo cual provoca un aumento en la salinidad de 2.57% a 4.95% de NaCl eq. esto explica el aspecto brechado de la muestra, y un proceso de dilución (de 4.95% a 2.57% NaCl eq) cuando el fluido de enfría de 194° a 164°C (Figura 90 - c).

Las características observadas en la muestra 1 de IF evidencia la existencia de 2 pulsos hidrotermales; el primero caracterizado por fluidos salinos de alta temperatura, probablemente derivados de un magma en profundidad, los fluidos hidrotermales derivados de los magmas que se descomprimen a menos de 4 Km de profundidad a los 600° sufren partición en dos fases, una fase vapor de baja densidad y baja salinidad (alrededor de 1% NaCl eq.) y una fase líquida salina que puede alcanzar hasta 50% NaCl eq). La temperatura y salinidad de las IF del campo 1 de la primera muestra son concordantes con este tipo de fluido derivado de un magma particionado en la fase salina. Y un segundo pulso hidrotermal caracterizado por fluidos de baja temperatura que sufren ebullición y probable mezcla con fluidos salinos externos, luego enfriamiento y dilución.

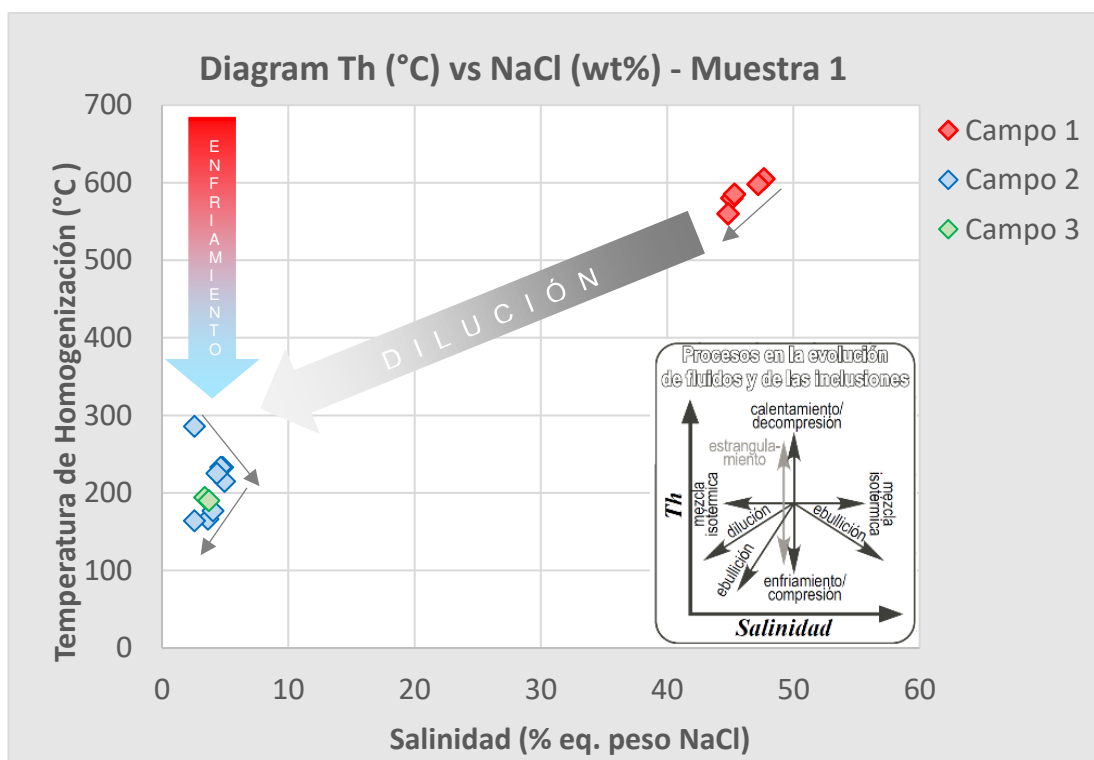


Figura 90. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la primera muestra para los 3 campos estudiados.

Para la segunda muestra de IF, el diagrama de Salinidad vs Temperatura de Homogeneización muestra tres poblaciones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 265 y 295 °C, la segunda entre 142 y 207 °C y la tercera entre 226 y 261 °C; con salinidades entre 2.0 y 10.0 % de NaCl eq. y se puede distinguir al menos tres procesos de evolución de los fluidos, primero ocurre una mezcla de fluidos con fluidos externos salinos, a temperaturas de 265 a 295 °C provocando un incremento en la salinidad de 2.07 a 6.45 % NaCl eq., seguido de un proceso de ebullición a medida que enfría el fluido de 261 a 226 °C que incrementa la salinidad de 8.68 a 9.73 % NaCl eq, y luego un proceso de dilución y enfriamiento de 207 a 142 °C con salinidades de 4.96 a 4.03 % NaCl eq. Figura 91.

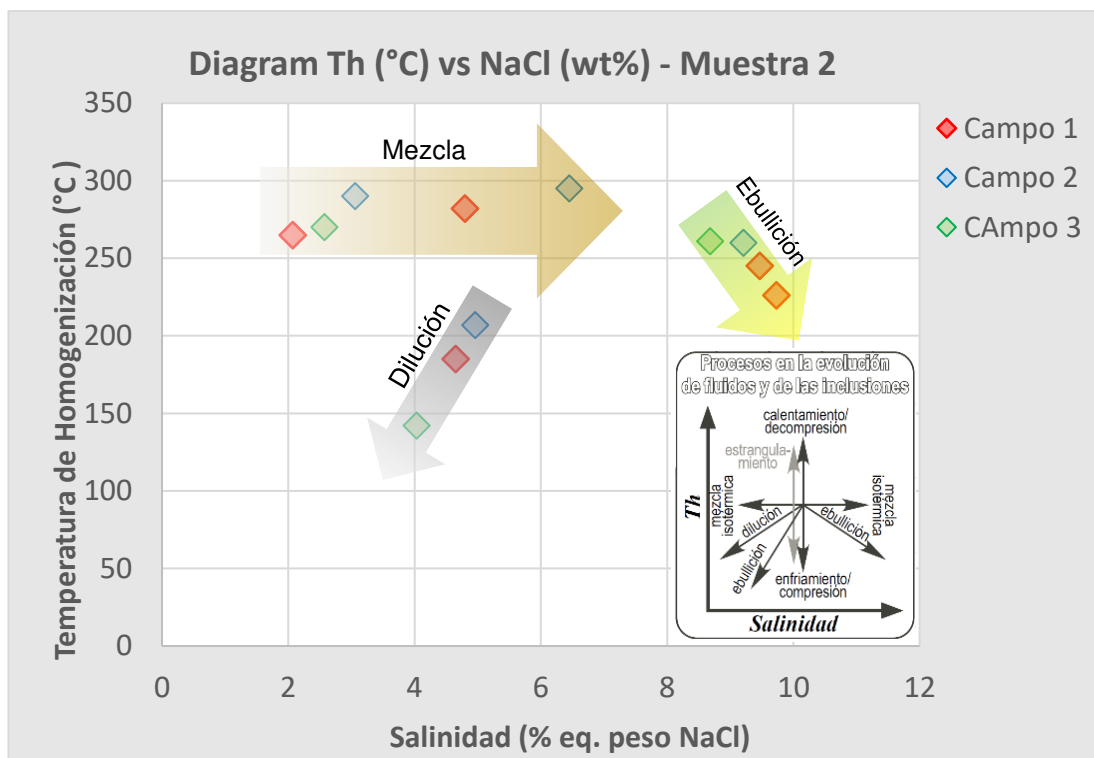


Figura 91. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la segunda muestra para los 3 campos estudiados.

Para la tercera muestra de IF, el diagrama de Salinidad vs Temperatura de Homogeneización muestra dos poblaciones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 186 y 280 °C y la segunda entre 165 y 221 °C; estas poblaciones poseen salinidades entre 4.0 y 7.0 % NaCl eq. peso, dentro de las cuales se puede distinguir una serie de procesos de evolución de los fluidos, partiendo con un proceso de enfriamiento desde los 280°C hasta los 243°C con salinidades alrededor de 4.65 % eq. peso NaCl, seguido de un proceso de dilución y enfriamiento del fluido hasta los 186 °C, con salinidades entre 4.8 a 4.03 % eq. peso NaCl, a los 221 °C se produce una mezcla con fluidos salinos externos que provoca un incremento en la salinidad hasta 5.71 % eq. peso NaCl, luego se observa una relativa dilución a medida que el fluido se enfría hasta 186 °C y 5.56 % eq. peso NaCl, luego un proceso corto de ebullición que incrementa la salinidad hasta 5.71 % eq. peso NaCl a 165°C donde se observa un fuerte proceso de mezcla isotérmica con salinidades entre 5.71 y 6.45, probablemente debido a la inyección fluidos externo aún más salinos que se diluían de 6.74 a 6.45 % eq. peso NaCl a medida que se enfriaban de 190 a 168 °C. Figura 92.

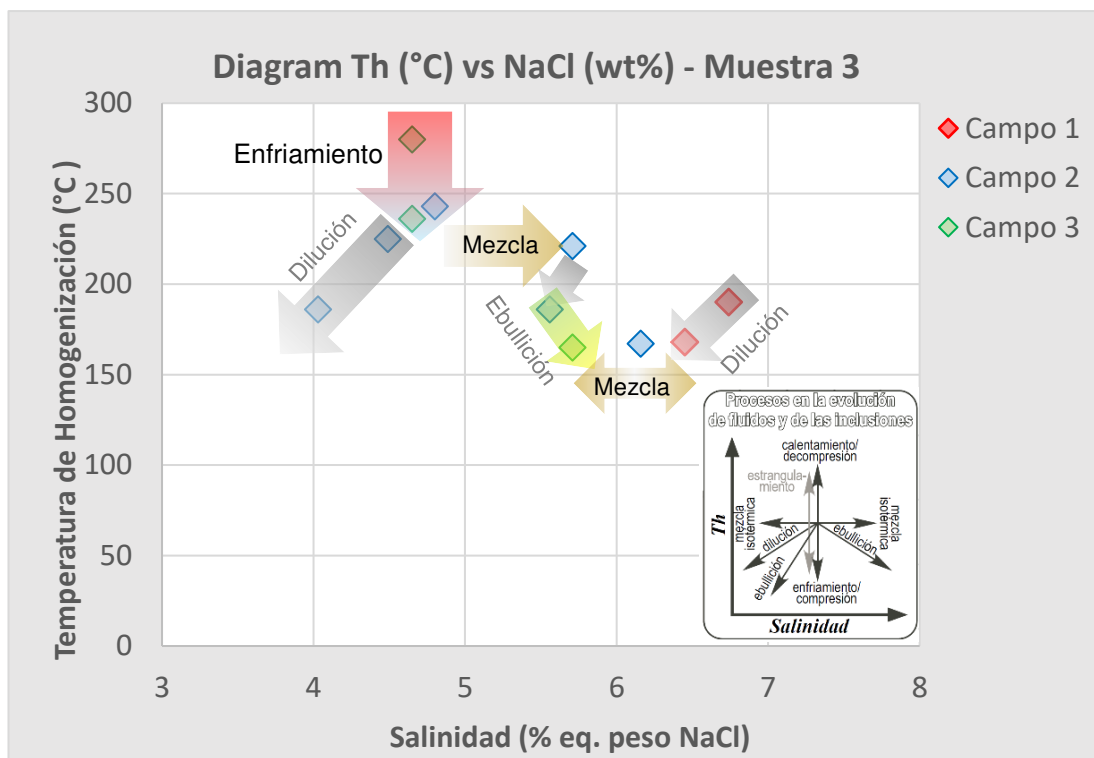


Figura 92. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la tercera muestra para los 3 campos estudiados.

Para la cuarta muestra de IF, el diagrama de Salinidad vs Temperatura de Homogeneización muestra tres poblaciones, la primera con temperatura de homogeneización que varían entre 308 y 329 °C, la segunda entre 164 y 287 °C y la tercera entre 138 y 203 °C; estas poblaciones poseen salinidades de 0.7 a 0.9% eq. peso NaCl, 2.9 a 7.0% eq. peso NaCl y 7.0 a 9.0 % eq. peso NaCl, respectivamente. En las cuales se puede distinguir al menos tres procesos en la evolución de los fluidos y las inclusiones, iniciando con un fluido diluido que se enfría de 329 a 308 °C con salinidades entre 0.7 a 0.88% eq. peso NaCl, luego una mezcla isotérmica con fluidos salinos alcanzando una salinidad de 7.02 eq. peso NaCl a 287°C, seguido de un proceso de dilución constante a medida que se enfría el fluido desde 287 °C a 164 °C donde alcanza una salinidad de 2.9 eq. peso NaCl a 287°C, luego un segundo proceso de mezcla que se producen entre 203 y 175 °C que provoca un incremento de la salinidad hasta 8.95 eq. peso NaCl, seguido de dilución hasta los 138 °C alcanzado una salinidad de 7.86 eq. peso NaCl. Figura 93.

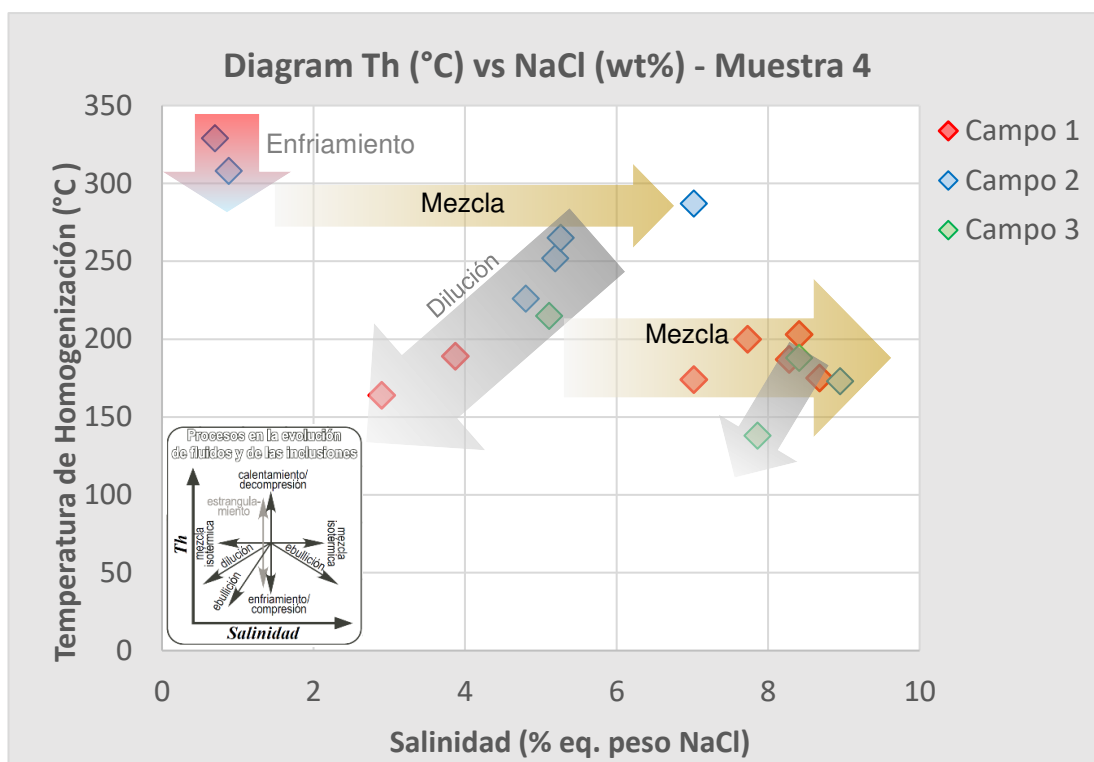


Figura 93. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización de la cuarta muestra para los 3 campos estudiados.

5.1.6.3. Evolución de fluidos

De las muestras estudiadas en las ocurrencias de Cerro Colorado Chico se puede distinguir la existencia de dos estadios de fluidos hidrotermales (Figura 94), el primero a temperaturas mesotermales entre 605 a 560 °C con salinidades de 47.66 a 44.82 % NaCl eq, que corresponde a fluidos salinos mesotermales derivados de exsolución magmática durante la partición de dos fases fluidas inmiscibles, una fase densa salina reflejada en inclusiones primarias trifásicas ricas en líquido (Figura 86D) y una fase vapor de baja densidad. El segundo a temperaturas epitermales entre 329 y 138 °C con salinidades de 0.7 a 9.73, caracterizado por inclusiones primarias y secundarias bifásicas ricas en líquido (Figura 87D), dentro del cual se observa complejos procesos de evolución de fluidos que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, destacan dos procesos de mezcla isotérmica con fluidos salinos, el primero entre 295 y 280 °C y el segundo a 186 y 165 °C (Figura 94), pulsos de incremento en la salinidad de los fluidos, estos procesos complejos se han identificado tanto en los estudios

petrográficos como en los afloramientos de campo donde se ha podido describir hasta tres etapas hidrotermales.

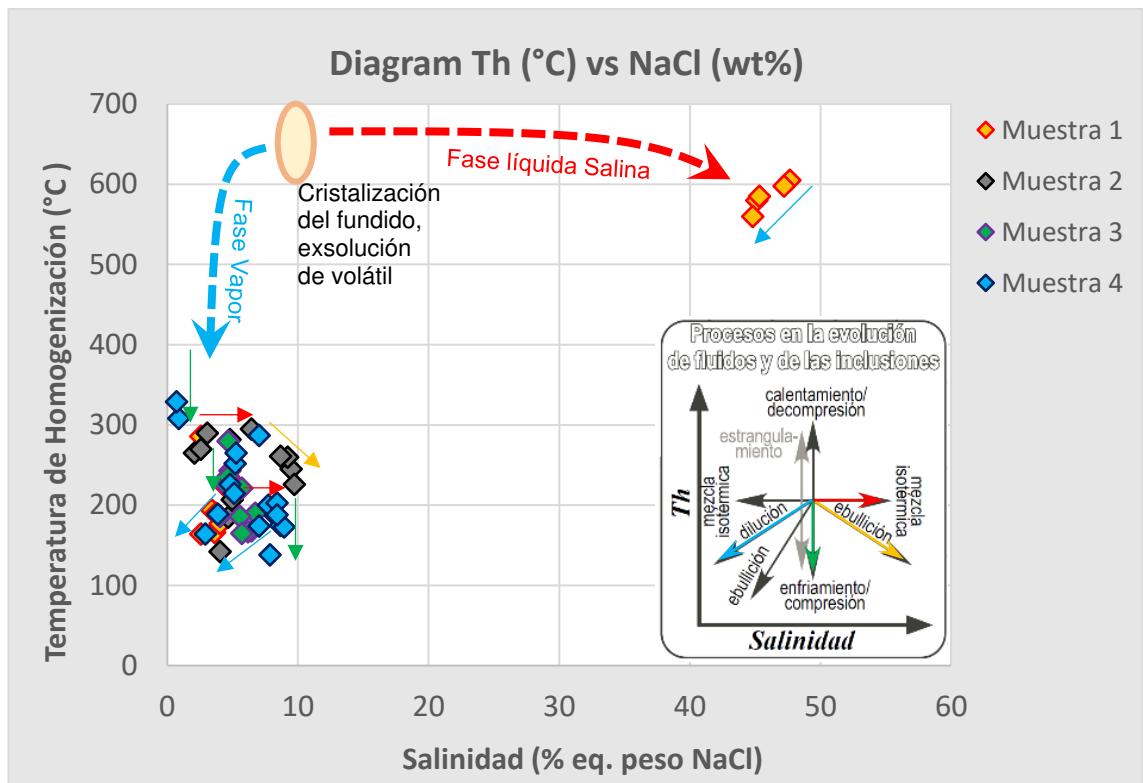


Figura 94. Diagrama de Salinidad (%Eq. Peso NaCl) vs T° Homogeneización mostrando los procesos de evolución de los fluidos hidrotermales.

5.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS

5.2.1. Hipótesis general

El modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

5.2.2. Hipótesis específicas

- Las firmas de teledetección de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirán de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Las firmas geoquímicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirán de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Las características petrominerográficas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirán de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- Las características de las inclusiones fluidas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirán de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

5.2.3. Variables

Variable independiente: Modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash.

Variable dependiente: Perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

Tabla 12

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash.	El modelo geológico constituye un compendio de las características y propiedades de un depósito mineral, que permiten diferenciarlo geológica y genéticamente de otros depósitos.	Esta variable recoge las características de litoestratigrafía, teledetección, geoquímica, petrominerografía e inclusiones fluidas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico.	Geología local	Litología Alteración Mineralización Estructuras
			Teledetección	Combinación de bandas Ratios de bandas Índices de Ninomiya SAM
			Geoquímica	Geoquímica de suelos Geoquímica de Rocas Geoquímica de alteraciones
			Petrominerografía	Minerales de alteración Minerales opacos Paragénesis
			Inclusiones Fluidas	Temperatura de homogenización Salinidad
Perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.	Criterios geológicos que ayudan en la búsqueda de ocurrencias minerales, con la finalidad de estudiar su origen, distribución espacial y potencial económico.	Esta variable recoge los principales criterios para explorar por depósitos Fe-Cu-Au en la costa norte del Perú, a partir del modelo propuesto para Cerro Colorado Chico.	Perspectivas de exploración	Criterios: Litológico Estructural Geomofológico Alteraciones Mineralización Herramientas útiles: Signaturas de teledetección Firmas geoquímicas Características petrominerográficas Inclusiones fluidas.

5.2.4. Contrastación de la hipótesis.

En esta investigación nos planteamos la hipótesis general “El modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú”.

Entonces:

- **H0:** El modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, **no** permitirá de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.
- **H1:** El modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, permitirá de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

Para contrastar la hipótesis nula (H0) usamos como premisa las apreciaciones resultantes del análisis, interpretación y discusión de resultados donde se presentó las características geológicas, signatures de teledetección, firmas geoquímicas, características petromineraográficas e inclusiones fluidas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico las cuales nos permiten de manera significativa proponer el modelo genético de dichas ocurrencias a partir del cual se puede establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

Esta contrastación del enunciado de la hipótesis nula (H0) con las apreciaciones resultantes del análisis, interpretación y discusión de resultados nos permite rechazar la hipótesis nula (H0) y aceptar la hipótesis alterna (H1). Con lo cual la hipótesis queda probada.

5.3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.3.1. Propuesta del modelo genético

Considerando las evidencias encontradas el área de Cerro Colorado Chico concernientes a:

El control litoestratigráfico, rocas volcano-sedimentarias del Cretáceo que se relacionan con un periodo de extensión durante la subducción de alto ángulo evidenciado por generar un vulcanismo bimodal (Cueva, Mamani y Rodríguez, 2010). Este vulcanismo (representado por el Grupo Casma; Guevara, 1980) datado en 130-105 Ma, corresponde a la roca encajonante de la mayoría de yacimientos tipo IOCG en el Sur del Perú y Norte de Chile (Chen et al, 2013).

La ocurrencia de cuerpos de sílice multifasético con brechas silíceas, sílice masiva, granular, oquerosa/vesicular, con presencia de hematita en su red cristalina (sílice rosácea) y patinas de óxidos de hierro en las fracturas, que sugieren una fuerte actividad hidrotermal, aunque son relativamente estériles. A este tipo de estructuras en el Arco Lufiliano Lobo-Guerrero (2004) lo denominó "Quartz Pod" y los relacionó a manifestaciones distales de depósitos IOCG, y han sido registradas por varios autores a lo largo de la costa peruana, como Biminchumo (2013) en Ancash, el cuerpo Caseli; Martínez et al (2014) en Acarí - Arequipa, en las montañas Romerillo, asociado espacialmente a los depósitos IOCG Pampa del Pongo y Hierro Acarí; Reyes (2019) reporta ocurrencias de cuarzo POD en la costa norte del Perú entre los paralelos 9º y 12º.

Ocurrencia de brechas y cuerpos de hematita, horizontes con fuerte hematitización que afecta a niveles volcanoclásticos y de dacita/riolita. Barton y Johnson (2004) sugieren que la escasa presencia de magnetita y abundante hematita hidrotermal y goethita secundaria sugiere un nivel superior de posibles estructuras con presencia de magnetita en profundidad.

Ocurrencia de vetas de cuarzo-hematita con textura crustiforme, y ocasionalmente con patinas de óxidos de cobre.

La presencia de un extenso halo de alteración sílice-sericita-pirita y un halo restringido al borde de los cuerpos silíceos de sílice-pirofilita-alunita que sugiere condiciones de fluidos ácidos. Hitzman, Oreskes y Einaudi (1992) y Tornos et al (2008) consideran a estos ensambles como zona de alteración epitermal y de condiciones de pH ácido a neutro (Richards y Mumin, 2013). Y la presencia de un halo distal de cloritización de moderada a débil que afecta principalmente a las rocas volcanoclásticas.

Anomalías geoquímicas en suelos y rocas de elementos indicadores como Cu y Au, y elementos pathfinders como V y Ti.

Asociaciones geoquímicas en suelos como [Zn-Cu-U-Cd-Au-Ag], [Mn-Pb-Ni] y [(Zn-Cd-Ag)-(U-Cu-Co)-Au] que sugieren la presencia de una asociación de elementos calcófilos y siderófilos que puede estar relacionada a un sistema magmático hidrotermal del tipo IOCG.

Rocas alteradas con gradientes de elementos traza que muestran un empobrecimiento de Cu, Pb, Zn, Al, Ti, Sc, Co y Mn y enriquecimiento en Au, As, Sr, Ba, V, Fe, Ni; esto permiten sugerir un nivel epitermal de un sistema magmático hidrotermal relacionado a una intrusión en profundidad o lateral.

El estudio de Inclusiones fluidas que muestra temperaturas epitermales entre 329 y 138 °C con salinidades de 0.7 % a 9.73 % NaCl-eq dentro del cual se observa complejos procesos de evolución de fluidos que incluyen enfriamiento, dilución, mezcla y ebullición de fluidos, que dan soporte a los complejos de brechas observados en campo y en los estudios petromineraográficos.

En base a estas evidencias y conforme a los conceptos de un modelo empírico y conceptual de Ariosa y Diaz (2001) se propone que Cerro Colorado Chico y sus alrededores estudiados en esta investigación corresponde a un lithocap con extensa alteración sílice – sericita – pirita, hematización, cuerpos silíceos (cuarzo POD) controlados estructuralmente con halos de alteración argílica avanzada sílice-pirofilita-alunita, y vetas distales de cuarzo - hematita (Ver Figura 95).

Este lithocap formaría parte de un sistema magmático-hidrotermal tipo IOCG más grande asociado a stocks dioríticos relacionados al emplazamiento de los plutones dioríticos/tonalíticos del batolito de costa, que en profundidad pueden estar desarrollando brechas y mantos de magnetita, hematita y

calcopirita, en un nivel de alteración potásica con feldespato potásico y biotita secundaria.

Los lithocaps son dominios volumétricamente significativos de rocas alteradas con sílice hipógena, argílica avanzada y argílica que pueden formarse por encima y al lado de complejos intrusivos hidratados en la corteza superior (Cooke, White y Zhang, 2017), comúnmente asociados a depósitos tipo pórfido (Sillitoe, 1995; Sillitoe, 2010; Chang et al. 2011; Cooke, White y Zhang, 2017); sin embargo, los depósitos IOCG andinos también están relacionados a sistemas magmático-hidrotermales (Sillitoe, 2003; Pollard, 2006; de Haller y Fontboté, 2009; del Real et al., 2020; Rodríguez-Mustafa et al., 2020; Rodríguez-Mustafa et al. 2021). Entiéndase un sistema magmático hidrotermal aquel donde los fluidos y metales son exsueles a partir de un magma que se está enfriando y que es su fuente principal, entre ellos tenemos a los pórfidos y IOCGs que pueden formarse por procesos similares (Tornos et al. 2010), Richards y Mumin (2013) realizaron una comparación entre estos dos sistemas magmático hidrotermales encontrando varias similitudes respecto a su génesis, diferenciándose por las rocas encajonantes, edad, alteraciones, profundidad de emplazamiento y mineralización.

Alteración argílica avanzada asociada a sistemas IOCG ha sido reportada en algunos depósitos chilenos como en la zona de Copiapó, El Laco y Productora (Sillitoe y Burrows, 2002; Kreiner, 2011; Kreiner y Barton, 2017), caracterizada por un ensamble cuarzo-pirofilita-hematita, se diferencia de la alteración argílica avanzada relacionada a depósitos tipo pórfido por su bajo contenido de azufre, y por lo tanto carecen de abundante pirita y otros sulfuros, alunita hipógena, rocas lixiviadas de Al (cuarzo “vuggy” residual) así como de mineralización rica en Au-Cu-Ag ± As (Kreiner y Barton, 2017)

Las zonas de alteración argílica avanzada en los IOCGs tienden a ser más restringidas, controladas estructuralmente, a diferencia de los ensambles dominados por sericita y clorita que se extienden lateralmente hacia afuera y verticalmente hacia abajo (Kreiner y Barton, 2017).

Se postula el origen de un ensamble argílico avanzado con bajo contenido de azufre a partir de HCl generado por la precipitación de óxidos de hierro de complejos de cloruro de hierro de un fluido de alta salinidad por reacciones como $3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2$ (Kreiner y Barton, 2017).

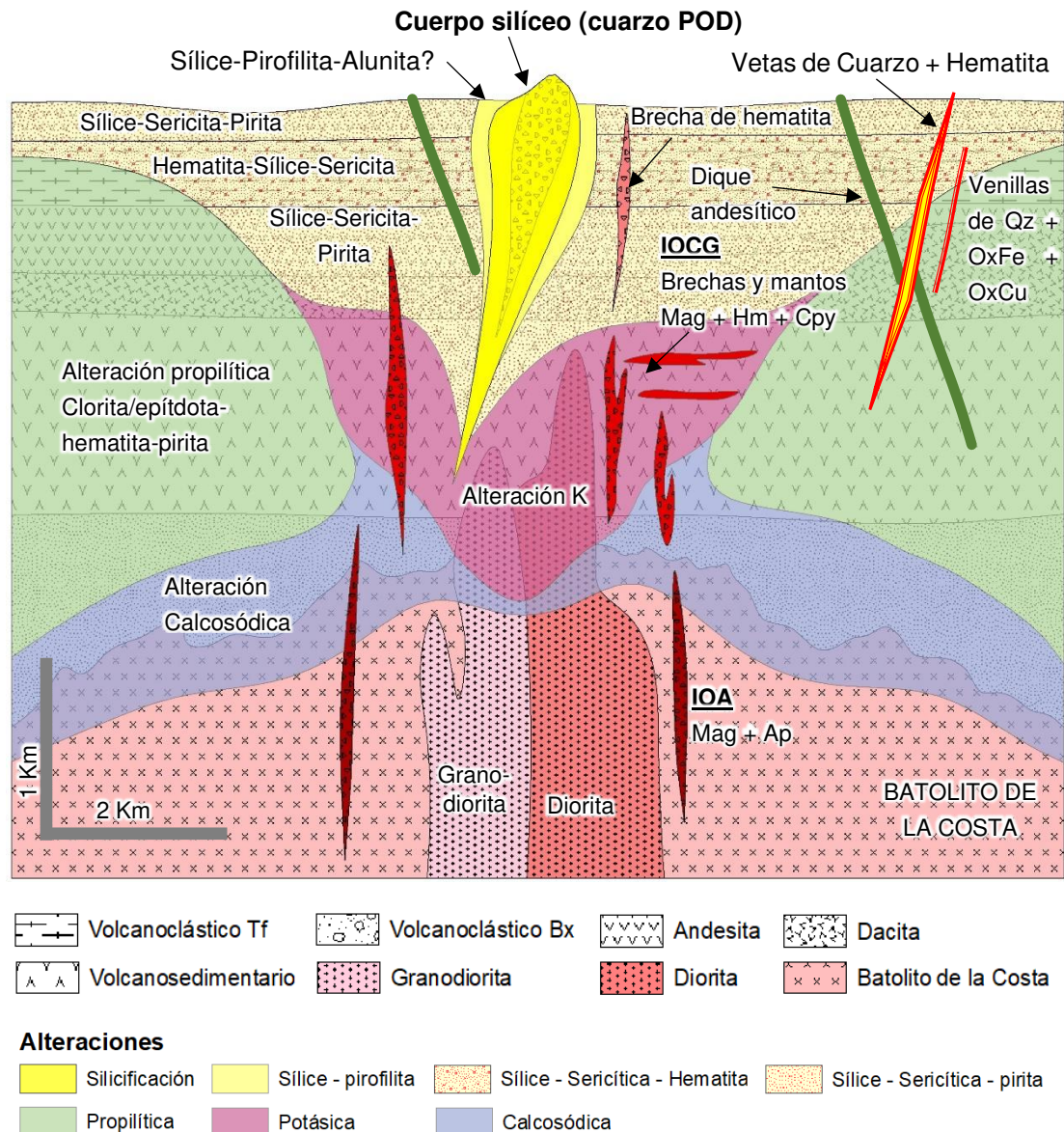


Figura 95. Modelo teórico del depósito Cerro Colorado Chico. Elaboración propia.

De acuerdo con los modelos actuales (Tornos et al., 2010; Palma et al. 2020) los sistemas IOCG están relacionados a profundidad con estructuras de magnetita y apatito tipo IOA. Estos sistemas magmático-hidrotermales están vinculados con magmas máficos-intermedios, los depósitos IOA pueden generar fluidos ricos en Fe-Cu-Au que migran a los niveles superiores donde pueden formar mineralización tipo IOCG. Es probable que se formen en entornos más profundos y estén relacionados con rocas más máficas que los pórfidos convencionales.

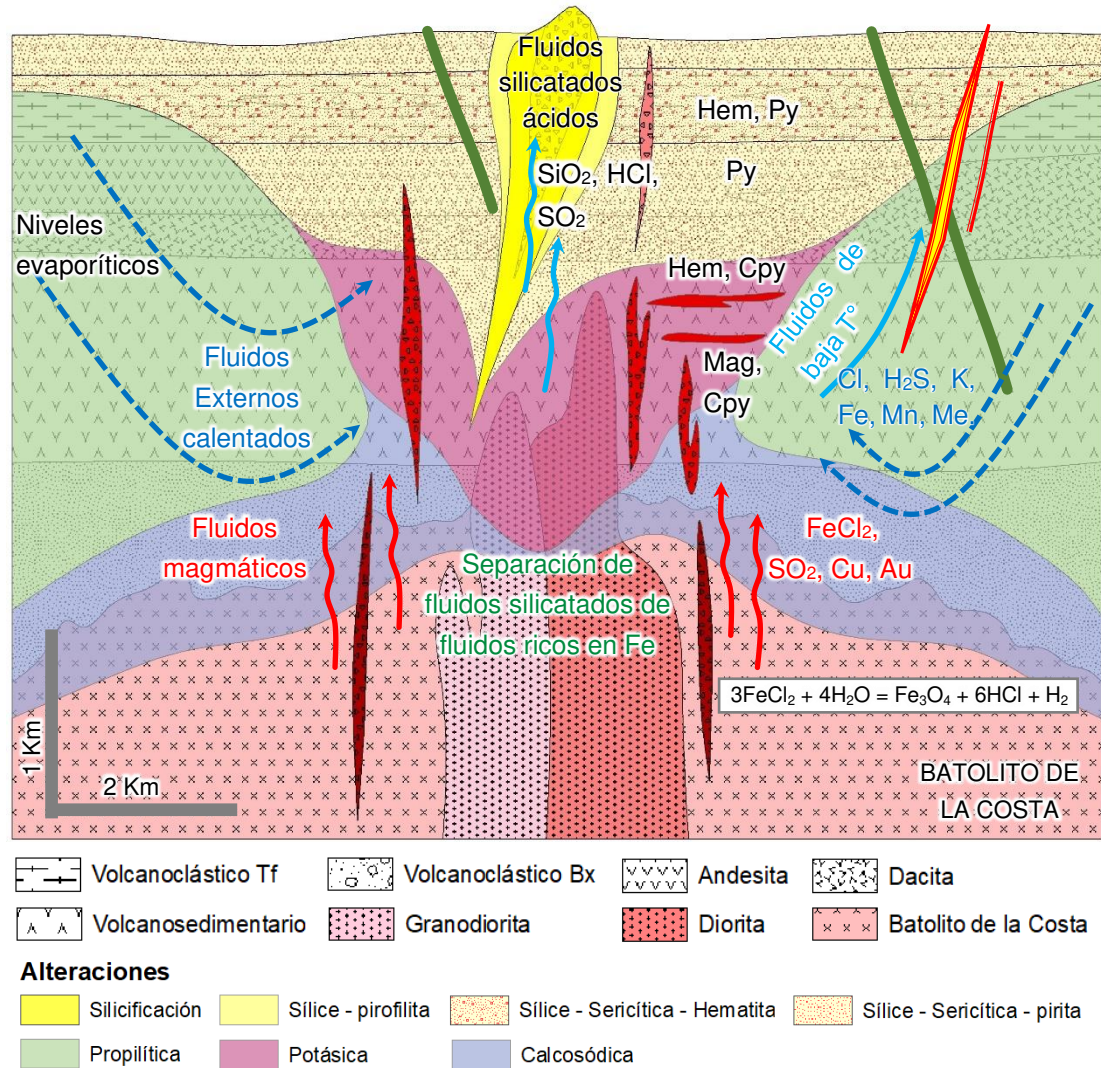


Figura 96. Génesis del depósito Cerro Colorado Chico. Elaboración Propia.

Nuestro modelo para Cerro Colorado Chico (Figura 96) sugiere la partición de dos fundidos inmiscibles uno rico en sílice y uno rico en hierro a partir de magmas intermedios poco diferenciados (dioritas/tonalitas), pulsos magmáticos tempranos del batolito de la costa, tal como explican Hou et al. 2018, Tornos, Velasco y Hanchar, 2016 y Lledo et al., 2020. La cristalización del fundido rico en hierro formaría depósitos de magnetita y apatito (IOA) en profundidad y los fluidos que se exsuelven migran a través de estructuras hasta los niveles superiores donde se mezclan con fluidos externos que se infiltran a través de las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Casma, se calientan en profundidad y lixivian componentes de la roca encajonante en especial de los niveles evaporíticos (ricos en sales), los cuales contribuyen y

enriquecen a los fluidos derivados del magma, la mezcla de estos fluidos generan condiciones explosivas que pueden formar brechas de magnetita, hematita y calcopirita, y mantos en los niveles favorables. Hacia los niveles más superiores donde predominan los fluidos superficiales diluidos forma brechas y cuerpos de hematita y horizontes hematitizados. Los fluidos silicatados que se exsuelven de los fundidos ricos en sílice se canalizan a través de las fallas para formar cuerpos silíceos (cuarzo POD) relativamente estériles.

La precipitación de óxidos de hierro como magnetita y hematita a partir de complejos clorurados de Fe generan HCl acidificando los fluidos que ascienden a los niveles superiores donde se condensan y generan una alteración ácida al reaccionar con la roca encajonante (Figura 97), formando un lithocap con sílice-sericita-pirita, sílice-pirofilita-alunita restringida como halo de los cuerpos silíceos, y niveles hematitizados en horizontes favorables.

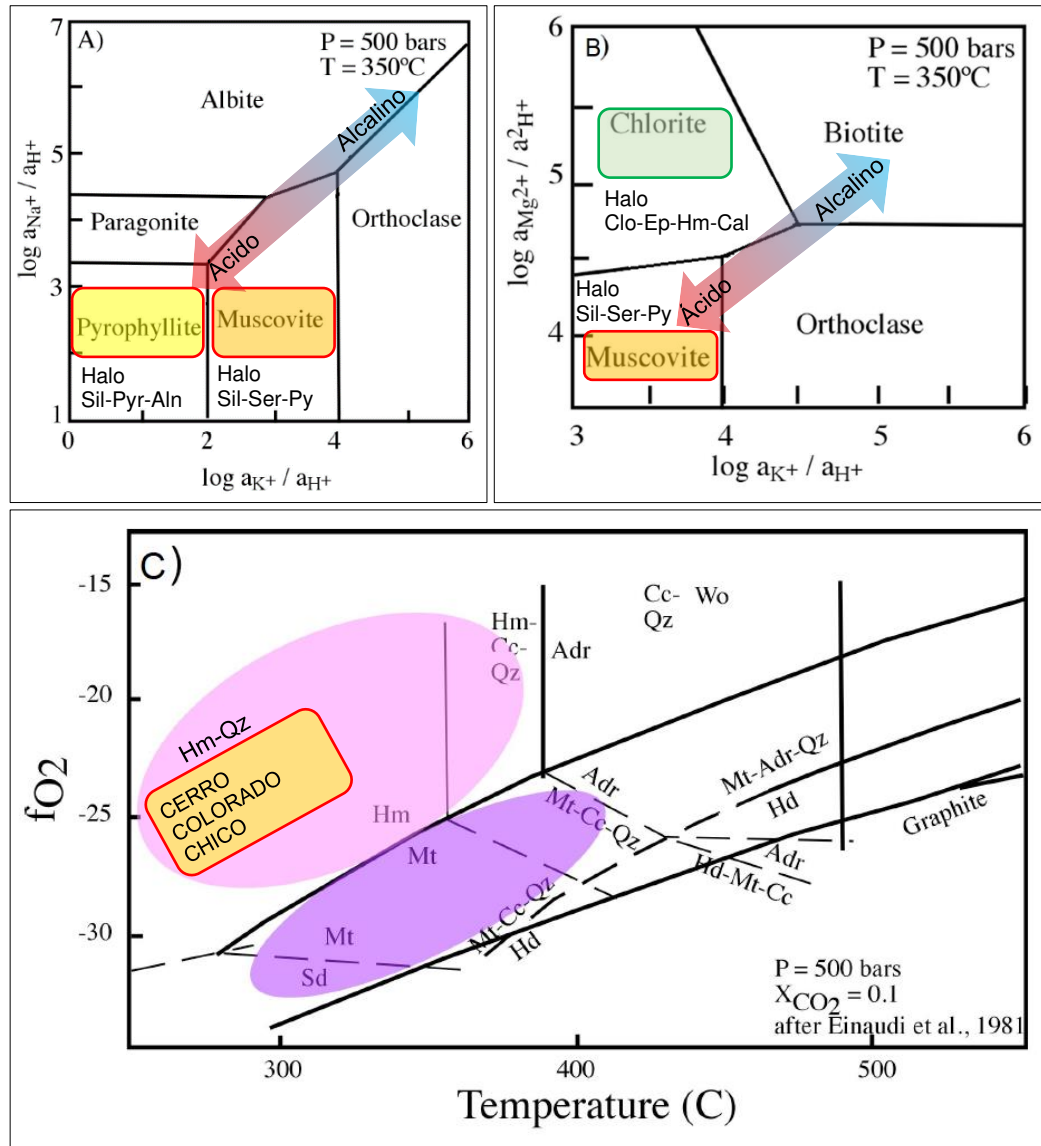


Figura 97. Diagramas de estabilidad para minerales de alteración mostrando los campos de los ensambles observados en Cerro Colorado Chico. A) Diagrama de fases de actividad de Na^+/H^+ Vs K^+/H^+ (modificado de Kreiner 2011). B) Diagrama de fases de actividad de Mg^{2+}/H^+ Vs K^+/H^+ (modificado de Kreiner 2011). C) Diagrama de fO_2 Vs T° (modificado de Kreiner, 2011).

Los fluidos magmáticos relacionados a IOCG pueden liberar grandes cantidades de sílice que es inmisible con los fluidos ricos en hierro (Figura 98A), los cuales migran a los niveles superiores y laterales a través de estructuras sobresaturándose en sílice (Figura 98B) formando cuerpos silíceos (Cuarzo PODs), que en contacto con la roca caja, debido a la alta acidez y temperatura forma halos de sílice-pirofilita-alunita (Figura 98B), y dado que el influjo de sílice es intermitente puede generar brechas silíceas en el núcleo del conducto, estas brechas silíceas tienen la particularidad de estar conformadas por clastos de sílice cementados por sílice, en Cerro Colorado

Chico se observa que la sílice que cementa las brechas tiene tonalidades rosáceas por el contenido de hematita en su red cristalina lo que corrobora que dichos fluidos están asociados a fluidos ricos en hierro en profundidad.

La inmiscibilidad de fundidos silíceos y de fundidos ricos en hierro ha sido estudiada experimentalmente por Kamenetsky et al., 2013 y Hou et al. 2018 quienes observaron la partición de FeO_t , TiO_2 , MgO , CaO , P_2O_5 en dos fundidos inmiscibles conjugados uno rico en Si y otro rico en Fe que se generan a partir del enfriamiento y diferenciación de un fundido toleítico. Hou et al. 2018, Tornos, Velasco y Hanchar, 2016 y Lledo et al., 2020 sugieren que este fundido rico en Fe es el responsable de la formación de depósitos tipo IOA como el Laco en Chile, sin embargo, se conoce poco sobre el fundido rico en Si, que puede ser el responsable de la formación de los cuerpos silíceos (cuarzo POD) observados en Cerro Colorado Chico y en otras partes de la costa peruana.

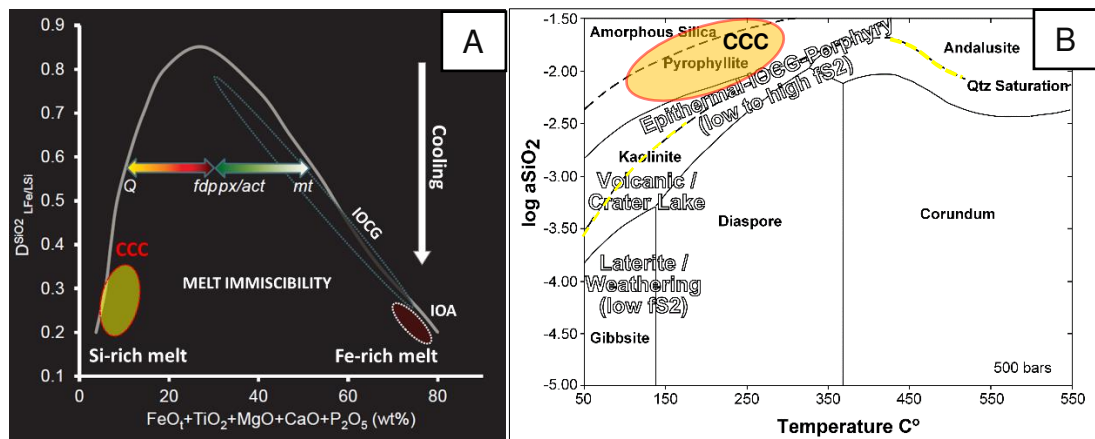


Figura 98. A la izquierda (A): composición de fundidos inmiscibles, uno rico en Si y otro rico en Fe que se fraccionan a partir de un fundido toleítico (modificado de Tornos, 2019 y Hou et al. 2018). A la derecha (B): Diagrama de fases de actividad de SiO_2 Vs T° , mostrando el campo de estabilidad de los ensamblajes observados en Cerro Colorado Chico (CCC).

El modelo propuesto para cerro colorado Chico, permite sugerir un modelo generalizado de sistemas magmático – hidrotermales relacionado a mineralización de óxidos de hierro, cobre y oro (IOCG) para los depósitos de este tipo en Perú (Figura 99) en el que se establece una relación genética entre los depósitos tipo IOA – IOCG – Quartz POD, que explica la evolución de los fluidos a partir de la separación de dos fundidos inmiscibles, uno rico en sílice y otro rico en hierro provenientes de un magma de composición intermedia poco diferenciado.

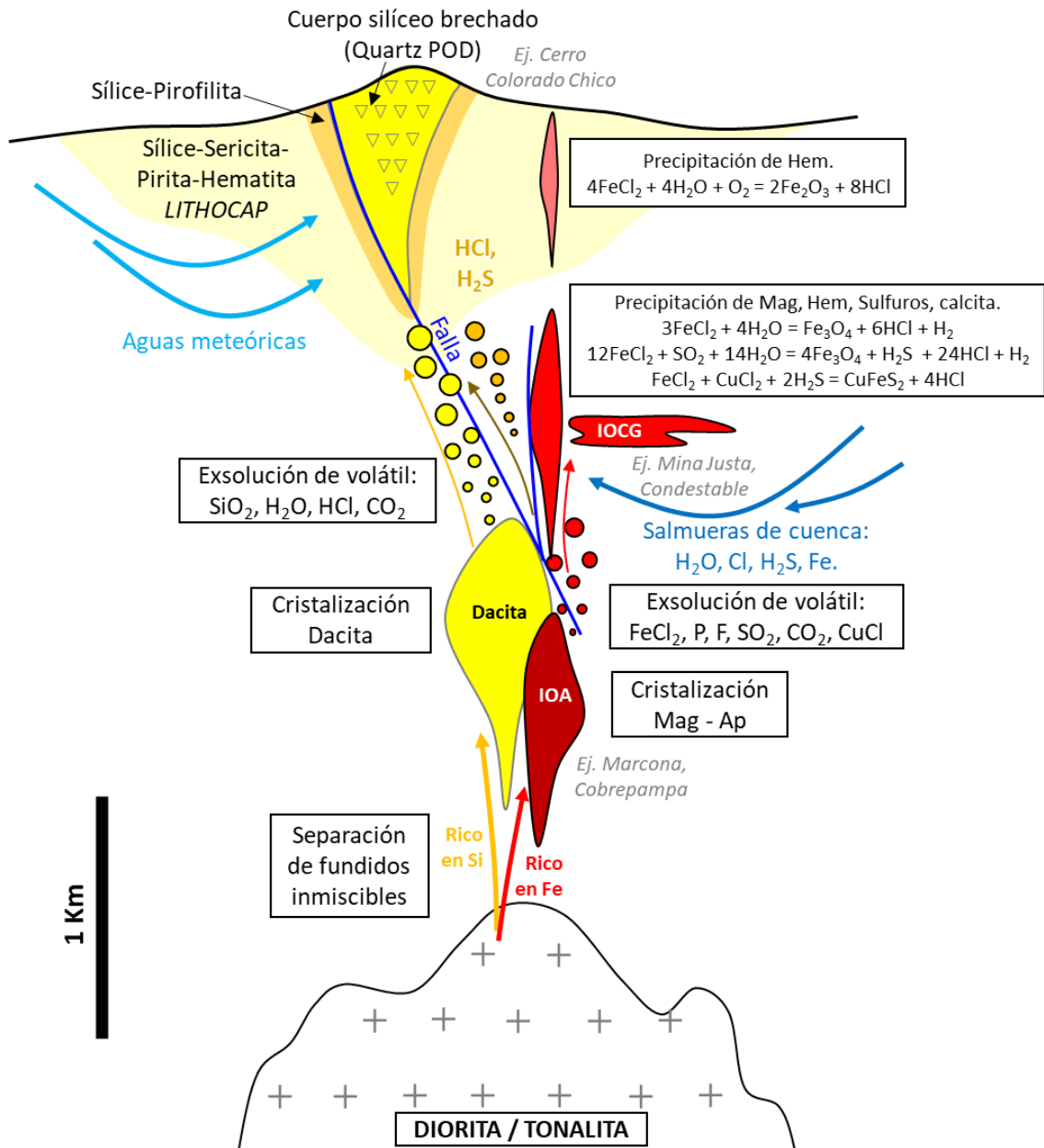


Figura 99. Modelo idealizado para sistemas magmático-hidrotermales relacionados a mineralización IOCG en Perú.

5.3.2. Perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

El modelo genético propuesto para Cerro Colorado Chico permite establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

Reyes (2019) propuso la posibilidad de explorar por IOCGs en la costa norte del Perú siguiendo como guías de exploración la relación espacial de los Cuerpos de cuarzo PODs con depósitos IOCG (Lobo-Guerrero 2004).

Las consideraciones geológicas para tomar en cuenta en futura exploración en la costa norte del Perú por depósitos tipo IOCG inferidas a partir de las ocurrencias observadas en Cerro Colorado Chico son:

Litológicas: Rocas volcano-sedimentarias, intercalaciones lávicas bimodales andesitas – dacitas y secuencias volcanoclásticas, del Grupo Casma, que han sido intruídas por unidades poco diferenciadas, dioritas – tonalitas del Batolito de la Costa, como lo es la unidad Santa Rosa. Características de este tipo se puede observar a lo largo de la costa norte del Perú desde Lima hasta Trujillo (Figura 100) donde además se tiene reportado varias ocurrencias de Au y Cu que pueden corresponder a manifestaciones de depósitos tipo IOCG.

Estructurales: El control de primer orden observado en Cerro Colorado Chico es de rumbo andino que está asociado al proceso de rifting cuando se depositó el Grupo Casma, las mismas que sirvieron de canales para el emplazamiento del batolito de la costa, este mismo control se extiende a lo largo de toda la costa norte del Perú.

Geomorfológicas: En Cerro Colorado Chico son notorias las geoformas positivas subredondeadas que sobresalen de la planicie costanera, con coloraciones rojizas y blanquecinas y texturas rugosas, características que también se observan en varias partes de la costa norte del Perú cuando se transita por la panamericana norte.

Alteraciones hidrotermales: En Cerro Colorado Chico predomina la silicificación, sericita - pirita, y hematización, este tipo de alteraciones son fácilmente reconocibles en imágenes LandSat y ÁSTER (Figura 101), un estudio exhaustivo de teledetección a lo largo de la costa norte del Perú podrá permitirnos identificar las zonas específicas donde se presenta estas alteraciones.

Cuerpos de Cuarzo PODs: denominados así por Lobo-Guerrero (2004) a cuerpos masivos y brechados de sílice, que en Cerro Colorado Chico se interpreta, no solo relacionados espacialmente, sino también genéticamente a depósitos tipo IOCG, este tipo de estructuras han sido identificadas en varias partes de la costa norte del Perú (Reyes 2019) y merecen mayor atención exploratorio.

Geoquímicas: Asociaciones calcófilas y siderófilas en muestras de suelo y roca, anomalías de Cu, Au, Fe, V, Ti en rocas.

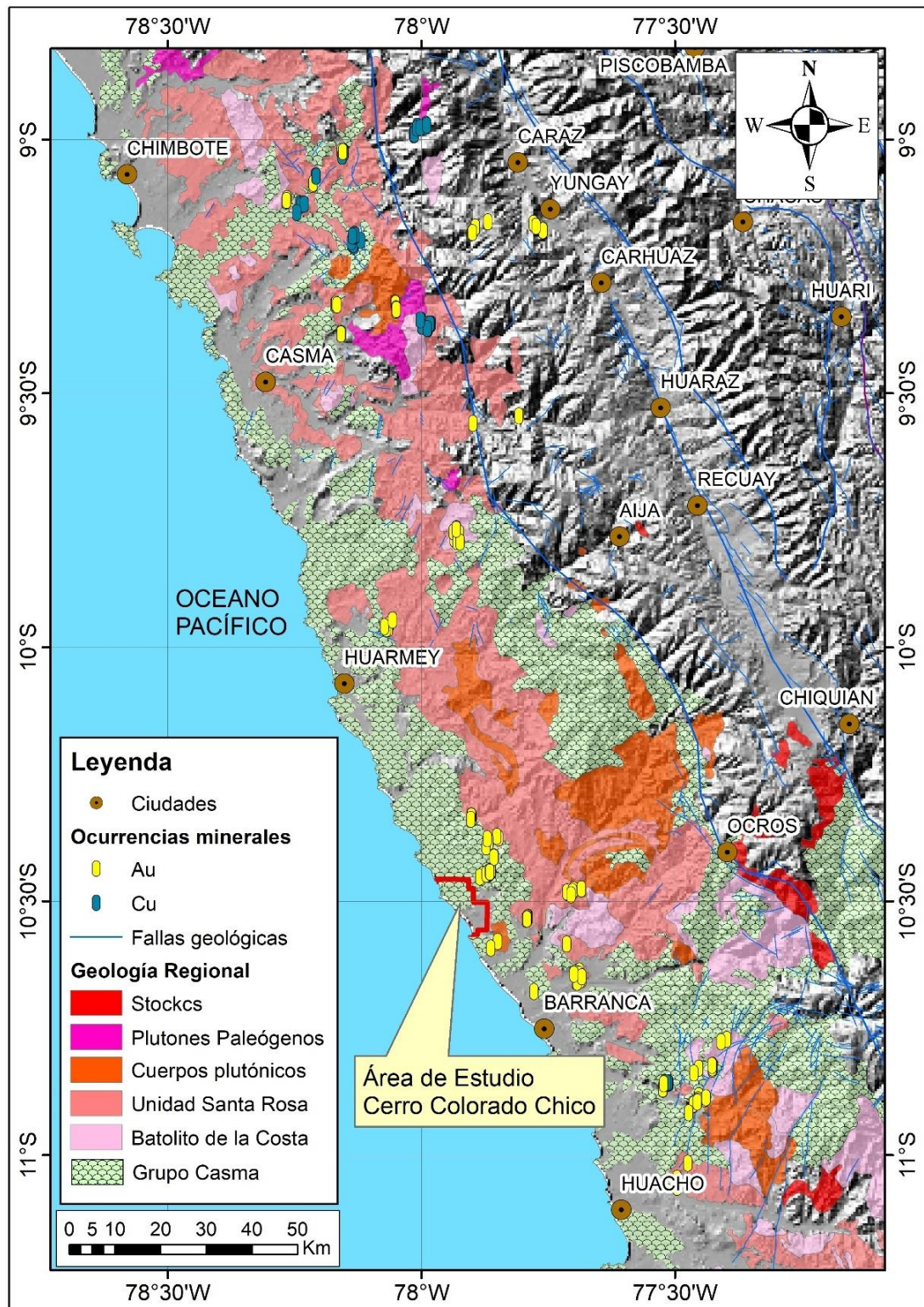


Figura 100. Plano geológico de la costa norte del Perú mostrando las unidades geológicas del Cretácico.

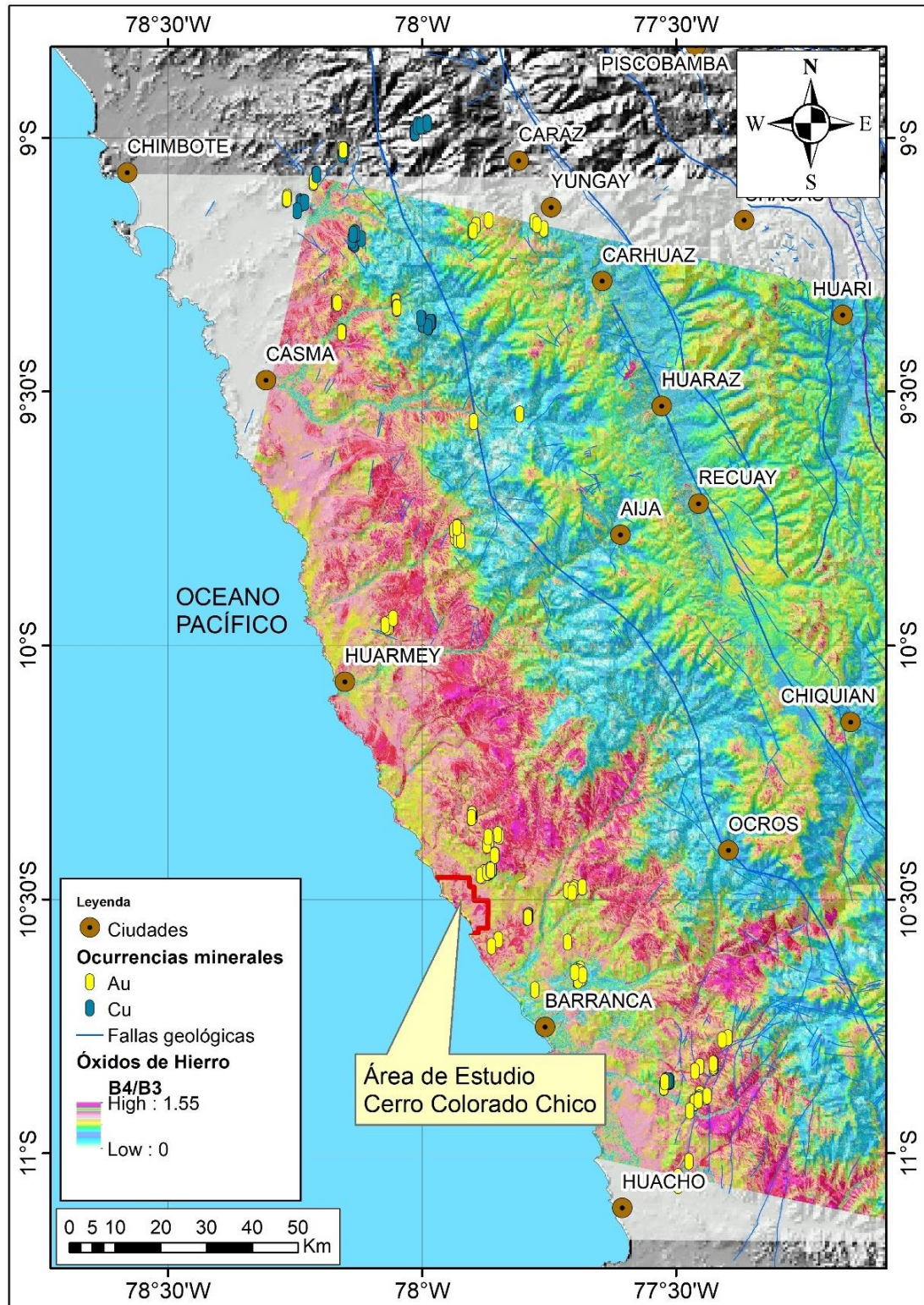


Figura 101. Imagen Land Sat de la costa norte del Perú mostrando el ratio de bandas B4/B3, en rojo y magenta se muestra las zonas con presencia de óxidos de hierro.

CONCLUSIONES

Se definió el modelo genético de ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, como un posible lithocap con alteración sílice – sericita – pirita, hematización pervasiva, cuerpos o pipes silíceos (cuarzo POD) controlados estructuralmente con halos de alteración argílica avanzada sílice-pirofillita-alunita, brechas y cuerpos de hematita, y vetas distales de cuarzo – hematita – óxidos de cobre, probablemente relacionado a un depósito tipo IOCG en profundidad, este modelo permite de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú siguiendo las consideraciones litológicas, estructurales, geomofológicas, alteraciones-mineralización y geoquímicas inferidas a partir de las características presentadas en Cerro Colorado Chico.

Las características geológicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico están dadas por la presencia de una secuencia volcano-sedimentaria del Grupo Casma, compuesta por secuencias lávicas bimodales andesitas a riolacitas, intercaladas con secuencias volcanoclásticas de cenizas y líticos, que han sido intruídas por plutones poco diferenciados dioritas – tonalitas del batolito de la costa, la unidad Santa Rosa, cortados por stocks dioríticos a granodioríticos y diques andesíticos tardíos. Se observa una extensa alteración de silicificación, sericita – pirita y hematización, presencia de cuerpos silíceos que gradan de textura masiva, granular y brechada de la periferia hacia el centro de los cuerpos, que de manera localizada presentan un halo de sílice-pirofillita-alunita.

Las firmas de teledetección de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, obtenidas del procesamiento de imágenes satelitales ASTER y Landsat 8 en el software ENVI 5.3 utilizando ratios y combinaciones de bandas, muestran la presencia de óxidos, arcillas y óxidos-arcillas, las cuales pueden usarse como guía para explorar este tipo de ocurrencias en la costa norte del Perú.

Las firmas geoquímicas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, Ancash, están dadas por presencia de anomalías geoquímicas de Ag, As, Au, Cu, Zn, Pb, Mn, Ba en suelos, además de asociaciones como [Zn-Cu-

U-Cd-Au-Ag], [Mn-Pb-Ni] y [(Zn-Cd-Ag)-(U-Cu-Co)-Au], asociaciones calcófilos-siderófilos, que son características de sistemas tipo IOCG. Asimismo, las características geoquímicas de las alteraciones permitieron identificar alteraciones como Moscovita/sericita, Illita, propilítica, potásica y argílica, corroboradas mediante estudio de firmas espectrales, siendo la alteración sericítica la más distribuida que de acuerdo al modelo propuesto forma parte del lithocap relacionado a un IOCG en profundidad. El conocimiento de estas firmas geoquímicas permite establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú por depósitos tipo IOCG.

Las características petrominerales en las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, están dadas por presencia de óxidos de hierro (hematita y goethita) abundantes, así como jarosita y limonita. Se ha definido alteraciones predominantes (silicificación y oxidación) así como sericitización, incipiente argilización y carbonatación. En cuanto a minerales opacos, los óxidos de hierro generalmente están rellenando fracturas y moldes de cristales, la pirita esta como traza diseminada, y ocasionalmente calcopirita. Estas características son concordantes con la presencia de un lithocap posiblemente relacionado a un depósito IOCG lo cual permite de manera significativa establecer nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú.

Las características de las inclusiones fluidas de las ocurrencias Fe-Cu-Au en Cerro Colorado Chico, muestran inclusiones primarias bifásicas y trifásicas dando resultados de Temperatura de Homogeneización desde 138° a 329°C y Salinidades que varían desde 0.7 a 9.73% de NaCl eq. que siendo ploteados en Diagrama de Wilkinson (2001) es concordante con sistemas epitermales, así mismo, en una muestra se registró temperaturas de 560° a 605° C con salinidades de 44.82% a 47.66% NaCl eq. lo que hace pensar que estos cuerpos silíceos se forman desde etapas tardimagmáticas, lo cual corrobora nuestro modelo como un nivel alto de un sistema magmático-hidrotermal en profundidad. Esto favorece de manera significativa las nuevas perspectivas de exploración en la costa norte del Perú por depósitos IOCG.

RECOMENDACIONES

Realizar una cartografía geológica con mayor detalle a escala 1/2000 con la finalidad de describir litología, alteraciones, estructuras y mineralización del área de estudio.

Ampliar la malla geoquímica de suelos y rocas hacia toda el área de estudio, en una malla regular de 200 m x 200 m.

Realizar una malla de muestreo de rocas para estudio de firmas espectrales, con el fin de elaborar un mapa de alteraciones definiendo correctamente los ensambles de alteración presentes y su respectiva zonación.

Realizar un estudio petromineralógico de una mayor cantidad de muestras de roca con el fin de poder determinar con más precisión los ensambles mineralógicos, alteraciones y la paragénesis mineral.

Realizar una campaña de exploración geofísica IP para delimitar el lithocap con anomalías de resistividad y posibles niveles de sulfuros con anomalías de cargabilidad, luego complementar con un estudio magnetométrico para identificar anomalías magnéticas que probablemente correspondan a brechas y cuerpos de magnetita en profundidad.

Realizar estudios de isótopos $\delta^{56}\text{Fe}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en hematita, $\delta^{18}\text{O}$ en cuarzo, $\delta^{34}\text{S}$ en pirita, con la finalidad de determinar la fuente y génesis de los fluidos causantes de la alteración extensa que se observa en Cerro Colorado Chico.

Realizar datación geocronológica de las alteraciones en sericita y alunita a fin de identificar la posible edad de mineralización y correlacionarlo con la edad de mineralización de los depósitos IOCG en el sur del Perú.

Realizar una campaña de teledetección a lo largo de toda la costa norte del Perú usando imágenes satelitales de alta resolución Landsat, ASTER y SENTINEL 2 para definir lineamientos regionales estructurales, alteraciones argílicas, silicificación y oxidación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Paico, D., Santisteban, A. (2020). Memoria mapa metalogenético del Perú 2020. INGEMMET, 13 p.
- Aitchison, J. (1986). *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman y Hall, London.
- Akritas, M.G. (1994). Statistical analysis of censored environmental data, Chapter 7 in G.P. Patil and C.R. Rao, eds., *Handbook of Statistics*, Vol. 12. North-Holland, Amsterdam, 927 p.
- Andersen, P.K. (2014). Censored Data. in Balakrishnan, N. (2014). *Methods and Applications of Statistics in Clinical Trials (Concepts, Principles, Trials, and Design)*. John Wiley y Sons, Inc, V 1, pp: 139–145. DOI:10.1002/9781118596005.ch12
- Arhens, L. H. (1954). The lognormal distribution of the elements (A fundamental law of geochemistry and its subsidiary). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 5, pp. 49 – 73.
- Ariosa, J. D., Diaz, R. (2001). Modelos de yacimientos minerales: tipologías y aplicaciones. *Revista Minería y Geología* Vol. XVII I, N° 2. 12 p.
- Atherton, M. P., y Webb, S. (1989). Volcanic facies, structure, and geochemistry of the marginal basin rocks of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 2, pp. 241-261.
- Barton, M.D., y Johnson, D.A. (1996). An evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide(-REE-Cu-Au-U) mineralization: *Geology*, v. 24, p. 259–262.
- Barton, M. y Johnson, D. (2004). Footprints of Fe-oxide(-Cu-Au) systems. SEG 2004: Predictive Mineral Discovery Under Cover. Centre for Global Metallogeny. Spec. Pub 33. The University of Western Australia, pág. 112-116.
- Bedell, R., Crósta, A. P., Grunsky, E. (2009) *Remote Sensing and Spectral Geology*, Society of Economic Geologists. Society of Economic Geologists, Volume 16, 252 p.
- Biminchumo, E. M. G. (2013). Análisis geológico del cuerpo de cuarzo pod Caseli del IOCG Divimín, usando como herramientas: magnetometría, espectrometría y polarización inducida. Ancash, Lima – Perú. Tesis de grado, UNI, 139 p.

- Buck, S.F. (1960). A Method of Estimation of Missing Values in Multivariate Data Suitable for use with an Electronic Computer. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* Vol. 22, No. 2, pp. 302-306
- Camprubí, A. (2010) Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Volumen 62, núm. 1, pp. 25-42
- Chang Z, Hedenquist J.W., White N.C., Cooke, D.R., Roach M., Deyell C.L., Garcia J., Gemmell J.B., McKnight S., Cuisson A.L. (2011). Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Econ Geol* 106: 1365–1398
- Chen, H., Cooke, D. y Baker, M. (2013). Mesozoic Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Central Andes and Gondwana Supercontinent Breakup. *Society of Economic Geology, Inc. Economic Geology*, v. 108, pág. 37-44.
- Chen, S., Plouffe, A., Hattori, K. (2019). A multivariate statistical approach identifying the areas underlain by potential porphyry-style Cu mineralization, south-central British Columbia, Canada. *J. Geochem. Explor.* 202: 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.03.016>
- Cheng, Q., Bonham-Carter, G., Wang, W., Zhang, S., Li, W., Xia, Q. (2011). A spatially weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. *Comput. Geosci.* 37, 662–669. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.11.001
- Cobbing, E. J., Pitcher, W. S., Wilson J. J., Baldock, J. W., Taylor, W. P., McCourt, W. y Snelling, N. J. (1981). The geology of the Western Cordillera of Northern Peru. *Overseas Memoirs, Institute of Geological Sciences*, 5.
- Cobbing, J. (1973). Geología de los cuadrángulos Barranca, Ambar, Oyon, Huacho, Huaral y Canta, Servicio de Geología y Minería, Servicio de Geología y Minería, Boletín N° 26, Lima, 171 p.
- Cohen, A. C., J.R. (1950). Estimating the mean and variance of normal populations from singly truncated and doubly truncated samples. *Ann. Math. Statist.* 21, 557.
- Cohen, A.C. (1959). Simplified estimators for the normal distribution when samples are singly censored or truncated. *Technometrics* 1, 217–237.

- Cohen, D.R., Bowell, R.J. (2014). Exploration Geochemistry, in Holland HD; Turekian KK (ed.), Treatise on Geochemistry (Second Edition), Elsevier, Netherlands, pp. 623 – 650
- Cohen, J.F. (2011). Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration at the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada: Comparison of large-scale ore exploration techniques to mineral chemistry: tesis de maestría, Oregon State University, 111 pages (plus appendices, pp. 112-580).
- Cooke, D.R., White, N.C., y Zhang, L. (2017). Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. Mineral Resources to Discover - 14th SGA Biennial Meeting 2017, Volume 1. pp. 291 – 294.
- Cooke, D.R.; Agnew, P., Hollings, P., Baker, M., Chang, Z., Wilkinson, J.J., Ahmed, A., White, N.C., Zhang, L., Thompson, J., Gemmell, J.B., Danyushevsky, L., Chen, H. (2020). Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper–gold–molybdenum deposits: detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration. Published by The Geological Society of London for GSL and AAG. 30 p.
- Corriveau, L., Montreuil, J.F., Potter, E. G. (2016). Alteration Facies Linkages Among Iron Oxide Copper-Gold, Iron Oxide-Apatite, and Affiliated Deposits in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada. Society of Economic Geologists, v. 111, pp. 2045–2072
- Cox, D. P. y Singer, D. P. (1993). Mineral deposits models, USGS Bulletin.
- Croghan, C. W. y Egeghy, P. P. (2003). Methods of Dealing with Values Below the Limit of Detection using SAS, paper presented at the Southeastern SAS User Group, City, 22–24.
- Cueva, E., Mamani, M., Rodríguez, R. (2010). Magmatismo y geoquímica del volcanismo Albiano-Cenomaniano (Grupo Casma) y Mastrichtiano-Daniano entre Pucusana y Chimbote. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica de Perú, Pub. Esp. N° 9, Cusco p. 921-924
- Daniel, J. (2014). Comparison of Mesozoic magmatic evolution and iron oxide (-copper-gold) ('IOCG') mineralization, Central Andes and Western North America. Tesis doctoral, departamento de Geociencias, Universidad de Arizona. 363 p.
- Davies, J.F. y Whitehead, R. E. (2006). Alkali-Alumina and MgO-Alumina Molar Ratios of Altered and Unaltered Rhyolites: Exploration and Mining Geology, Vol. 15, Nos. 1-2, pp. 75-88

- de Haller, A., Fontboté, L. (2009). The Raúl-Condestable iron oxide copper- gold deposit, central coast of Peru: Ore and related hydrothermal alteration, sulfur isotopes, and thermodynamic constraints: *Economic Geology*, v. 104, p. 365–384.
- del Real, I., Thompson, J.F., Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. Elsevier, *Ore Geology Reviews* 102, 48 p.
- del Real, I., Thompson, J.F.H., Simon, A.C., and Reich, M. (2020). Geochemical and isotopic signature of pyrite as a proxy for fluid source and evolution in the Candelaria-Punta del Cobre iron oxide copper-gold district, Chile: *Economic Geology*, v. 115, p. 1493–1518.
- Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V. (2016). What are compositional data and how should they be analyzed?. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa* Vol. 32, No. 1, pp. 5-29
- Egozcue, J.J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., Barcelo Vidal, C. (2003). Isometric logratiotrans formations for compositional data analysis. *Math. Geol.* 35, 279–300.
- Eilu, P., Mikucki, E.J., y Groves, D.I. (1997). Wall-rock alteration and primary geochemical dispersion in lode-gold exploration: *Society for Geology Applied to Mineral Deposits Short Course Series*, v. 1, 65 p.
- Einaudi, M. T. (1997). Mapping altered and mineralized rocks. An introduction to the “Anaconda Method”. Short-course notes Stanford University, USA, 16 p.
- Elliott AC, y Woodward W.A. (2007). *Statistical analysis quick reference guidebook with SPSS examples*. 1st ed. London: Sage Publications.
- Field A. (2009). *Discovering statistics using SPSS*. 3 ed. London: SAGE publications Ltd; p. 822.
- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia, M., Pokrovski, G. (2017). Sulfide Minerals in Hydrothermal Deposits. *Elements* 13 (2), pp. 97–103.
- Gemmell, J.B., y Fulton, R. (2001). Geology, genesis, and exploration implications of the footwall and hanging-wall alteration associated with the Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, Tasmania, Australia: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 96, p. 1003–1035.
- Gemmell, J.B., y Large, R.R. (1992). Stringer system and alteration zones underlying the Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, Tasmania, Australia: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 87, p. 620–649.

- Ghasemi, A. y Zahediasl, S. (2012). Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians. *Int J Endocrinol Metab*. Vol. 10(2). Pp. 486-489. DOI: 10.5812/ijem.3505
- Gijbels, I. (2010). Censored data. *WIREs Comp Stat* (2), pp. 178–188. DOI: 10.1002/wics.80
- Grunsky E.C. y Caritat. P. (2019). State-of-the-Art Analysis of Geochemical Data for Mineral Exploration. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 33 p. DOI: <https://doi.org/10.1144/geochem2019-031>
- Guevara, C. (1980). El Grupo Casma del Perú central entre Trujillo y Mala, *Sol. Soc. Geol. Perú*, 67: 73-83.
- Gumiel, P. (1992). Utilidad y aplicacion de nuevas tecnicas multidisciplinarias en la exploración de yacimientos minerales. *Revista Tierra y Tecnología*. 7 p.
- Hald, A. (1949). Maximum Likelihood Estimation of the Parameters of a Normal Distribution which is Truncated at a Known Point. *Scandinavian Actuarial Journal*, 1, 119-134. <http://dx.doi.org/10.1080/03461238.1949.10419767>
- Halley, S. (2016). Using ME_MS61 or ME-ICP61 to characterize alteration in porphyry Cu and epithermal systems. *Mineral Mapping*. 5 p.
- Halley, S. (2020). Mapping Magmatic and Hydrothermal Processes from Routine Exploration Geochemical Analyses. Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, v. XXX, no. XX, pp. X–X
- Halley, S., Dilles, J., y Tosdal, S. (2015). Footprints: Hydrothermal Alteration and Geochemical Dispersion Around Porphyry Copper Deposits: Advancing Science and Discovery, *SEG news letter*, number 100, pp. 11 – 17.
- Hawkes, H.E. y Webb, J.S. (1962) *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row, New York. 415 p.
- Haynes, D. W. (2000). Iron oxide copper(-gold) Deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin, in Porter, T. M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits A Global Perspective*, 1: Adelaide, Australia, Australian Mineral Foundation, p. 71-90.
- Helsel, D. (2005a): Insider Censoring: Distortion of Data with Nondetects. *Human and Ecological Risk Assessment*, 11: 1127–1137. DOI: 10.1080/10807030500278586
- Helsel, D. (2005b): More Than Obvious: Better Methods for Interpreting nondetect data. *Environmental Science y Technology*, pp 419 – 423.
- Helsel, D.R. (2012). *Statistics for Censored Environmental Data Using Minitab and R*. Second Edition. John Wiley and Sons, NY. 343 p.

- Henley, R. W. y Berger, B. R. (1993). "What is an exploration model anyway? An analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration", en: Kirkham, R.V., Sinclair, W. D., Thorpe, R. I. y Jduke, M. *Mineral Deposit Modelling*, GAC, Special Paper 40: 41-45.
- Hitzman, M.W. (2000) Iron Oxide-Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why. In: Porter, T.M., Ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 1, PGC Publishing, Adelaide, 9-25.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. y Einaudi, M. T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-UAu-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 241–287
- Hoaglin, D., Mosteller, F., & Tukey, J. W. (Eds.). (2000). *Understanding robust and exploratory data analysis (Wiley classics library ed.)*. New York: Wiley.
- Hornung, R. W. y Reed, L. D. (1990). Estimation of Average Concentration in the Presence of Nondetectable Values – Applied Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 5, No. 1, pp. 46–51. <http://dx.doi.org/10.1080/1047322X.1990.10389587>
- Hou, T., Charlier, B., Holtz, F., Veksler, I., Zhang, Z. C., Thomas, R., Namur, O. (2018). Immiscible hydrous Fe–Ca–P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits. *Nat Commun* 9:1415. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03761-4>
- Huff, L. C., 1952, Abnormal copper, lead, and zinc content of soil near metalliferous veins: *Econ. Geology*, v. 47, no. 5, p. 517-542.
- Kamenetsky, V.S., Charlier, B., Zhitova, L., Sharygin, V., Davidson, P., y Feig, S. (2013). Magma chamber–scale liquid immiscibility in the Siberian Traps represented by melt pools in native iron: *Geology*, v. 41, p. 1091–1094, doi: 10.1130/G34638.1.
- Kaplan, E.L. y Meier, P. (1958). Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 53, No. 282, pp. 457-481. <https://doi.org/10.2307/2281868>
- Klein, J.P. y Moeschberger, M.L. (2003). *Survival Analysis, Techniques for Censored and Truncated Data*. Springer-Verlag (2da Ed.), New York. 542 p.
- Kreiner, D.C. (2011). Epithermal style iron oxide(-Cu-Au) (=IOCG) vein systems and related alteration. Tesis doctoral, Universidad de Arizona. 659 p.
- Kreiner, D.C., y Barton, M.D. (2017). Sulfur-poor intense acid hydrothermal alteration: A distinctive hydrothermal environment. *Ore Geology Reviews*, v. 88, p. 174–187

- Large, R.R., Gemmell, J.B., Paulick, H., y Huston, D.L., (2001), The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 96, p. 957–971.
- Liu, Y., Cheng, Q., Zhou, K., Xia, Q., y Wang, X. (2016). Multivariate analysis for geochemical process identification using stream sediment geochemical data: A perspective from compositional data. *Geochemical Journal*, Vol. 50: 293 - 314. DOI:10.2343/geochemj.2.0415
- Lledo, H. L., Naslund, H. R. & Jenkins, D. M. (2020). Experiments on phosphate–silicate liquid immiscibility with potential links to iron oxide apatite and nelsonite deposits. *Contrib. Mineral. Petrol.* 175, 111. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01751-8>
- Lobo-Guerrero, A. (2004). Quartz pods: an exploration guide to iron-oxide–copper–gold mineralization?. SEG 2004 Predictive Mineral Discovery Under Cover Economic Geology Research Institute. 4p.
- Lobo-Guerrero, A. (2005). Pre- and post-Katangan granitoids of the Greater Lufilian arc – geology, geochemistry, geochronology and metallogenic significance. Tesis doctoral presentada a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo. 734 p.
- Mair, J.L., Farmer, G.L., Groves, D.I., Hart, C.J., y Goldfarb, R.J. (2011). Petrogenesis of postcollisional magmatism at Scheelite dome, Yukon, Canada: Evidence for a lithospheric mantle source for magmas associated with intrusion-related gold systems: *Economic Geology*, v. 106, no. 3, pp. 451–480.
- Mamani, Y. y Jacay, J. (2016). Tectónica sedimentaria asociada al del Grupo Casma. XVIII Congreso Peruano de Geología, 5 p.
- Marchionni, D. y Schalamuk, I. (2010). Aplicación de la teledetección espacial óptica y de radar para el análisis geológico y la detección de áreas mineralizadas en el sector central del macizo del deseado, provincia de santa cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4), pp. 592 – 607
- Martínez, W., Cerrón, F., López, W., Rodríguez, L., Vera, M., y Arcos, F. (2014). Quartz pods; una guía de exploración en yacimientos tipo IOCG; el caso de las montañas Romerillo – Acari / Arequipa Perú. XVII Congreso Peruano de Geología. 3 p.
- Matschullat, J., Ottenstein, R. y Reimann, C. (2000). Geochemical background – can we calculate it?. *Environmental Geology* 39 (9). pp. 990 – 1000.
- McLeod, J.R. (1993). *Management Information Systems*, 5ta ed. McMillan Publishing.

- Meeker, W.O. y Escobar, L.A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley, New York, 680 pp.
- Meyer, C. (1988). Ore deposits as guides to geologic history of the Earth: *Annual Reviews of Earth Science*, v. 16, p. 147-171
- Miesch, A. (1967). Methods of computation for estimating geochemical abundance. U.S. Geological Survey Professional Paper 574-B, 15 pp.
- Mullen, E. (1983). MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, p. 53-62
- Myers, J. (1980). Geología de los cuadrángulos Huarney y Huayllapampa, IGEMMET, Carta Geológica Nacional, Boletín N° 33 Serie A, 172p.
- Nash, J.T. (1976). Fluid inclusión petrology – data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S.G.S. Professional Paper 907D, 16 p.
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *proceedings of SPIE- The international society for optical engineering*, 5234, pp. 180-190.
- Oyarzun, R. (2011). *Introducción a la Geología de minas, Exploración y Evaluación*. Ed. GEMM. 184 p.
- Oztuna D, Elhan AH, y Tuccar E. (2006). Investigation of four different normality tests in terms of type 1 error rate and power under different distributions. *Turkish Journal of Medical Sciences*.;36(3):171-6.
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A. C., Romero, R. (2020). A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews* 126. 41 p.
- Pawłowsky-Glahn, V., y Egozcue, J. J. (2006). Compositional data and their analysis: an introduction. In: Buccianti, A., Mateu-Figueras, G., Pawłowsky-Glahn, V. (eds) *Compositional Data Analysis in the Geosciences: From Theory to Practice*. Geological Society, London, Special Publications, 264, pp. 1-10.
- Peat J, y Barton B. (2005). *Medical Statistics: A guide to data analysis and critical appraisal*. Blackwell Publishing.
- Pitcher, W. S., 1977, The anatomy of a batholith; President's anniversary address 1977: *Journal of the Geological Society of London*, v. 135, p. 157-182.
- Pollar, P. (2006). An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces. *Miner Deposita* 41, pp. 179–187
- Pollard, P.J. (2000). Evidence of a Magmatic Fluid and Metal Source for Fe-Oxide Cu-Au Mineralization; in Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide*

- Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 27-41.
- Quintanilla, B. (2017). Estadística en variables con censura: aplicación a datos medioambientales. UOC. 70 p.
- Railsback, L.B. (2003). An earth scientist's periodic table of the elements and their ions. *Geological Society of America*. v. 31; no. 9; p. 737–740.
- Reimann, C. y Garrett, R.G. (2005). Geochemical Background-Concept and Reality. *Science of the Total Environment*, 350, 12-27. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry* 17: 185–206. PII: S0883-2927(01)00066-X
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment* 346, pp. 1– 16. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.11.023.
- Reyes, J.P. (2019). Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9º-12º. Proexplo 2019, Lima, 5p.
- Richards, J. y Mumin, H. (2013). Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *GEOLOGY*, v. 41; no. 7; p. 767–770
- Rodriguez-Mustafa, M.A., Simon, A.C., Bilenker, L.D., Bindeman, I., Mathur, R., Machado, E.L.B. (2021). The Mina Justa Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposit, Peru: Constraints on Metal and Ore Fluid Sources. *Economic Geology* 2022, v. XXX, no. XX, pp. X–X
- Rodriguez-Mustafa, M.A., Simon, A.C., del Real, I., Thompson, J.F.H., Bilenker, L.D., Barra, F., Bindeman, I., and Cadwell, D. (2020). A continuum from iron oxide copper-gold to iron oxide-apatite deposits: Evidence from Fe and O stable isotopes and trace element chemistry of magnetite: *Economic Geology*, v. 115, p. 1443–1459.
- Rollinson, H. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. British Library Cataloguing in Publication Data.
- Sánchez, F. (2018). Geología del sistema de vetas auríferas en la mina Phoenix-5, Huarmey, Ancash – Perú. Tesis de grado, UNSAAC. 187 p.
- Sanford, R.F., Pierson, C. T., y Crovelli, R. A. (1993). An Objective Replacement Method for Censored Geochemical Data. *Mathematical Geology*, Vol. 25, No. 1: 59 – 80.

- Sillitoe, R. H. (1995). Exploration of porphyry copper lithocaps. AUSIMM Publication Series 9: 527–532
- Sillitoe, R.H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Miner. Deposita* 38, pp. 787–812.
- Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. *Econ Geol* 105: 3–41
- Sillitoe, R.H., y Burrows, D.R. (2002). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology*, Vol. 97, pp. 1101–1109
- Smith, R. J. (2002). Geophysics of iron oxide copper-gold deposits, in T. M. Porter, ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*: PGC Publishing, 2, 357–367.
- Stanley, C.R. y Sinclair, A.J. (1989). Comparison of probability plots and gap statistics in the selection of threshold for exploration geochemistry data. *J. Geochem. Explor.*, 32: 355-357.
- Succop, P. A., Clark, S., Chen, M. y Galke, W. (2004): Imputation of data values that are less than a detection limit – *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 1, No. 7, pp. 436–441. DOI: 10.1080/15459620490462797
- Tornos, F., Carriedo, J., Velasco, F. y Tome, C. (2008). Génesis de los depósitos de tipo IOCG: Geología y Geoquímica de Mineralizaciones en los Andes e Iberia. Conferencia: XIV Congreso Peruano de Geología y XIII Congreso Latinoamericano de Geología.
- Tornos, F., Velasco, F., Barra, F., Morata, D. (2010). The Tropezón Cu-Mo-(Au) deposit, Northern Chile: the missing link between IOCG and porphyry copper systems. *Mineralium Deposita* 45 (4), pp. 313–321.
- Tornos, F., Velasco, F., Hanchar, J. M. (2016). Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: the El Laco deposit, Chile. *Geology* 44:427–430
- Torres, A., Cerrón, J., y López, D. (2020). Localización y evidencias geológicas enfocados en la determinación del yacimiento tipo IOCG Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM* vol 23 n° 45, pp. 63 - 74.
- Torres, J.A. y Cerrón, J.F. (2021). Vetas epitermales y su relación con un posible depósito tipo IOCG en Cerro Colorado Chico, Ancash-Perú. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr.* vol 24 n° 47. pp. 155 – 162. Doi: 10.15381/iigeo.v24i47.20660.
- Tripathi, V.S. (1979). Factor analysis in geochemical exploration. *J. Geochem. Explor.*, 11: 263-275.

- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company Inc. Philippines. 711 p.
- Turnbull, B.W. (1976). The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 38, 290–295.
- Valls, R.A. (2008). Why, and how, we should use compositional data analysis. *A Step-by-Step Guide for the Field Geologists*. Valls Geoconsultant. 58 p.
- Verbovsek, T. (2011). A comparison of parameters below the limit of detection in geochemical analyses by substitution methods. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, Vol. 58, No. 4, pp. 393–404.
- Wang, J. y Zuo, R. (2016). An extended local gap statistic for identifying geochemical anomalies. *J. Geochem. Explor.* 8 p. Doi: 10.1016/j.gexplo.2016.01.002
- Warren, I., Simmons, S. F., y Mauk, J. L., (2007). *Whole-Rock Geochemical Techniques for Evaluating Hydrothermal Alteration, Mass Changes, and Compositional Gradients Associated with Epithermal Au-Ag Mineralization*: Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, v. 102, pp. 923–948
- Wilkinson, J. J. (2001). *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits*. Elsevier Science B.V., *Lithos* 55, Pag. 229-272
- Wilkinson, J.J., Chang, Z., Cooke, D.R., Baker, M.J., Wilkinson, C.C., Inglis, S., Chen, H., y Gemmell, J.B. (2015). The chlorite proximator: A new tool for detecting porphyry ore deposits: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 152, pp. 10–26.
- Williams-Jones, A.E., y Vasyukova, O.V. (2018). The economic geology of scandium, the runt of the rare earth element litter: *Economic Geology*, v. 113, no. 4, pp. 973–988.
- Winter, J.D. (2010). *An introduction to igneous and metamorphic petrology*: Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 697 p.
- Zuo, R. (2011). Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). *J. Geochem. Explor.* 111, 13–22. DOI:10.1016/j.gexplo.2011.06.012
- Zuo, R., Xia, Q., Wang, H. (2013). Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization: Elsevier Ltd, *Applied Geochemistry* 28 (2013), pp. 202–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.031>