

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGIA GEOFISICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**



**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE MODELOS ESTADÍSTICOS Y
PROBABILÍSTICOS PARA OBTENER UN MAPA DE FAVORABILIDAD DE
OCURRENCIAS DE DEPÓSITOS DE ORIGEN EPITERMAL EN EL
DEPARTAMENTO DE AREQUIPA**

TESIS PRESENTADA POR LA BACHILLER:

Yngrid Greysi Orozco Yaulli

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Geóloga

ASESOR: Dr. Ing. Fredy Fortunato García

Zúñiga

AREQUIPA – PERÚ

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGIA GEOFISICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA**



**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE MODELOS ESTADÍSTICOS Y
PROBABILÍSTICOS PARA OBTENER UN MAPA DE FAVORABILIDAD DE
OCURRENCIAS DE DEPÓSITOS DE ORIGEN EPITERMAL EN EL
DEPARTAMENTO DE AREQUIPA**

JURADO

PRESIDENTE: Msc. Juan Anibal Lajo Soto

VOCAL: Dr. Ing. Fredy Fortunato García Zúñiga

SECRETARIO: Msc. Salome Guadalupe Chacon Arcaya

TESIS PRESENTADA POR LA BACHILLER: Yngrid Greysi Orozco Yauilli

AREQUIPA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

A mi abuelo que desde el cielo me observa.

A mi madre quien me enseña día a día el esfuerzo
y la dedicación.

A mis hermanos: Shara y José, personas más
importantes de mi vida, que a pesar de ser muy
jóvenes una puede aprender mucho de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Teledetección del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico por permitirme ser parte de su equipo y guiarme en los inicios de este trabajo.

Al Dr. Fredy García asesor académico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, por su guía, consejo y paciencia para la culminación de este trabajo.

¡GRACIAS A TODOS!

RESUMEN

Existen diferentes métodos en la búsqueda de potencial o zonas favorables de depósitos minerales, estos métodos se basan en la interacción de diferentes variables o eventos como la geología, geofísica, geoquímica, estructuras, teledetección por mencionar algunas.

En este trabajo se ha evaluado métodos probabilísticos como el Peso por Evidencias y el método estadístico como la Regresión Logística para encontrar nuevas áreas favorables en la ocurrencia de depósitos epitermales en la Sierra del departamento de Arequipa, empleando softwares que van asegurar la asociación espacial y geográfica. Para ambos métodos es indispensable considerar la existencia de ocurrencias de minerales denominados puntos de entrenamiento. Se ha hecho una búsqueda de datos o eventos considerados influenciables en la búsqueda de este tipo de depósitos. Los eventos considerados son la geología, estructuras, geoquímica y teledetección, datos que se pueden descargar de manera gratuita, los cuales se procesaron e integraron en una base de datos. Los eventos se clasificaron en diferente número de clases, cada una de ellas se evaluó según el método aplicado. El mapa final obtenido por cada método se validó con puntos de entrenamiento aleatorios que no participaron en la evaluación para obtener el mapa final. Ambos métodos resultan efectivos ya que la mayoría de áreas con alto potencial coinciden con zonas actualmente explotadas.

Palabras clave: Ocurrencia de minerales, depósitos epitermales, eventos geológicos, métodos probabilísticos y estadísticos, teledetección.

ABSTRAC

There are different methods to search for potential or favorable zones of mineral deposits, these methods are based on the interaction of different variables or events such as geology, geophysics, geochemistry, remote sensing structures to name a few.

In this work, probabilistic methods such as Evidence Weight and the statistical method such as Logistic Regression have been evaluated to find new favorable areas in the occurrence of epithermal deposits in the Sierra of the department of Arequipa, using software that will ensure spatial and geographic association. For both methods it is essential to consider the existence of occurrences of minerals called training points. A search was made for data or events considered to be influential in the search for this type of deposit. The events considered are geology, structures, geochemistry and remote sensing, data that can be downloaded free of charge, which were processed and integrated into a database. Events were classified into different number of classes; each one was evaluated according to the applied method. The final map obtained by each method was evaluated with random training points that did not participate in the evaluation to obtain the final map. Both methods are effective since most areas with high potential coincide with currently exploited areas

Key words: Occurrence of minerals, epithermal deposits, geological events, probabilistic and statistical methods, remote sensing.

INDICE

CAPITULO I	1
2.1. Antecedentes	1
2.2. Formulación del problema	3
2.3. Justificación	5
2.4. Alcances y limitaciones	6
2.5. Variables e indicadores.....	7
2.6. Hipótesis	8
2.7. Objetivos	8
2.8. Metodología	9
CAPITULO II	11
GENERALIDADES	11
2.9. Ubicación	12
2.10. Accesibilidad.....	12
2.11. Clima	13
2.12. Flora y fauna.....	13
2.13. Geomorfología	14
2.14. Marco Geológico Regional	16
2.15. Rocas Intrusivas	31
2.16. Subvolcánicos	34
2.17. Tectónica general	35
CAPITULO III	39
MARCO TEORICO	39
3.1. Características de los depósitos epitermales.....	39
3.2. Métodos de Evaluación de Favorabilidad u Ocurrencias	42
CAPITULO IV	52
PROCESAMIENTO DE DATOS	52
4.1. Fuente de datos	53
4.2. Geología	53
4.3. Estructuras.....	54
4.4. Geoquímica	56
4.5. Teledetección	65
4.5.2. Imágenes ASTER.....	69
4.5.3. Imágenes SENTINEL	78
CAPITULO V	88

ASOCIACION ESPACIAL Y VALIDACIÓN	88
5.1. Peso por evidencia (Weight of evidence).....	88
5.2. Geología	91
5.3. Estructuras.....	93
5.4. Geoquímica	94
5.5. Teledetección	98
5.6. Modelo final	103
5.7. Regresión logística	104
5.8. Modelo final	108
5.9. Validación de los Modelos Probabilísticos (Peso por evidencias) y Estadísticos (Regresión Logística).....	110
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES.....	117
BIBLIOGRAFIA.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1:Columna estratigráfica propuesta para el área de estudio (Elaboración propia).....	37
Figura N° 2: Esquema basado en los depósitos de Summitville (Stoffregen, 1987)	40
Figura N° 3:Diagrama de Venn, relación espacial entre los patrones de predictores binarios y los patrones binarios de los depósitos=área; B: predictor binario presente; B^{-} predictor binario ausente; D: depósitos minerales presente; D^{-} : depósitos minerales ausente.	45
Figura N° 4: Productos de imágenes satelitales usados para identificación de estructuras.	57
Figura N° 6: Distribución del Au.	58
Figura N° 6: Distribución de la Ag.	58
Figura N° 7: Elementos de la Teledetección.	66
Figura N° 8: Espectro Electromagnético.	66
Figura N° 9: : Región del Visible en el espectro electromagnético, sacado de https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html	67
Figura N° 10: Procedimiento para la calibración de imágenes ASTER: Subnivel VNIR-SWIR.....	71
Figura N° 11: Valores de Ganancia para las diferentes bandas de ASTER.....	74
Figura N° 12: Modificación de las firmas espectrales debido a la corrección de las Imágenes ASTER, A) Imagen a corregir, B) Firma espectral en niveles digitales, C) Firma digital en Radiancia, D) Firma digital en Reflectancia.	75
Figura N° 13: A) Imágenes de una misma fecha para realizar el mosaico, B) Mosaico obtenido.	76

Figura N° 14: Procedimiento para la calibración de imágenes ASTER subnivel TIR.	77
Figura N° 15: Coeficientes para la recalibración de las bandas del subnivel TIR en base a la fecha de observación y el RCC.	77
Figura N° 16:Modificación de las firmas espectrales debido a la corrección de las Imágenes ASTER, A) Imagen a corregir, B) Firma espectral en niveles digitales, C) Firma digital en Radiancia, D) Firma digital en Emisividad.	79
Figura N° 17: Firma espectral de la reflectancia al tope de la atmosfera (TOA); B) Firma espectral en superficie (BOA).	81
Figura N° 18: A) Minerales representativos para la Alteración argílica, bandas características 4 y 6. B) Imagen con la componente 4, los valores más altos están representado por el color blanco.....	84
Figura N° 19:A) Minerales representativos para la Alteración filica, bandas características 5 y 6. B)Imagen con la componente 3, los colores blancos representan los valores más altos.....	85
Figura N° 20:A)Minerales representativos para la Alteración propilítica, bandas características 5 y 8.B) Imagen con la componente 3, los valores más altos están representados por los colores blancos.....	86
Figura N° 21:A) Imagen con el Índice de Sílice, los valores más oscuros resaltan su presencia, B) Firma espectral de un Granito dimensionada a la resolución espectral de la imagen ASTER.....	87
Figura N° 22:A) Firma espectral de óxidos (férrico y ferroso) dimensionada a resolución espectral de la imagen SENTINEL. B) Imagen con la componente 3, los valores altos (Blancos) representan las zonas con presencia de óxidos.	87

Figura N° 23: Evaluación de clases con los puntos de entrenamiento, cada clase representa los valores de la reclasificación del Raster y los puntos verdes representa las ocurrencia o puntos de entrenamiento.	90
Figura N° 24: A) Clases iniciales en base a los ambientes definidos para la geología, B) Clase evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta representa la sociación espacial positiva y el Azul la asociación espacial negativa.	95
Figura N° 25: A) Clases iniciales reclasificados para las estructuras, B) Clase 5 evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta representa la asociación espacial positiva y el Azul la asociación espacial negativa.....	96
Figura N° 26:A) Clases iniciales reclasificados para el Au, B) Clase 2 evaluada con las ocurrencias minerales, C) Mapa binario final, el Magenta representa los valores con alta correlación espacial y y el Azul la baja correlación espacial.	97
Figura N° 27: A) Clases iniciales reclasificadas para la Ag, B) Clase 3, evaluada con las ocurrencias minerales, C) Mapa binario final, mostrando los valores positivos como las zonas con alta correlación espacial y los negativos como las zonas con baja correlación espacial.....	98
Figura N° 28: A) Clases iniciales clasificadas de la Alteración Argílica, B) Clase 6, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa.	101
Figura N° 29:A) Clases iniciales, clasificadas de la Alteración Fílica, B) Clase 5, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa	103
Figura N° 30: Clasificación inicial para los Óxidos, B) Clase 5, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa.....	104

Figura N° 31:A)Mapa de Índice de Sílice B) Clase 1, evaluada con las ocurrencias de los minerales iniciales,C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa..... 106

Figura N° 32:Alteración Propilítica, A) Clases iniciales B) Clase evaluada C) Mapa binario final..... 105

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: Formulación del problema	5
Tabla N° 2: Indicadores.....	7
Tabla N° 3: Cuadro de procedimiento.	10
Tabla N° 4: Coordenadas del área de trabajo.	12
Tabla N° 5: Comparación de los sistemas de alta y baja sulfuración (Camprubi y otros, 2003)	41
Tabla N° 6: Métodos de mapeo potencial mineral (Bonham-Carter, 1997).....	43
Tabla N° 7: Agrupación de las formaciones geológicas en diferentes ambientes. ...	54
Tabla N° 8: Categorías para fallas identificadas	55
Tabla N° 9: Categoría según la orientación de las fallas.....	56
Tabla N° 10: Estadística para el Au	58
Tabla N° 11: Numero de bandas y rango espectral y espacial de las imágenes ASTER.	70
Tabla N° 12: Valores de Irradiancia solar para cada banda de ASTER ((Smith, 2004).	74
Tabla N° 13: Bandas espectrales, resolución espacial de SENTINEL-2.....	80
Tabla N° 14: Componentes principales.....	83
Tabla N° 15:Componentes principales.....	84
Tabla N° 16: Componentes principales	85
Tabla N° 17: Componentes principales para Oxidos.....	86
Tabla N° 18: Total de ocurrencias minerales.	89
Tabla N° 19: Columnas que debe tener la tabla de atributos	90
Tabla N° 20: Tabla de intersección con el conteo de entidades.....	90
Tabla N° 21: Tabla de cálculos.	91

Tabla N° 22: Ambientes definidos inicialmente y código asociado después de la reclasificación.....	92
Tabla N° 23: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para la geología.	93
Tabla N° 24: Valores calculados para cada clase definida de las estructuras.	94
Tabla N° 25: Valores calculados para cada clase definida del Oro.....	95
Tabla N° 26: Valores calculados para cada clase definida de la Plata.....	97
Tabla N° 27: Valores calculados para cada clase definida en la Alteración Argílica.	99
Tabla N° 28: Valores calculados para cada clase definida en la Alteración Filica..	100
Tabla N° 29: Valores calculados para cada clase definida en la alteración Propilitica.	100
Tabla N° 30: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para el índice de Silice.....	102
Tabla N° 31: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para los óxidos.	102
Tabla N° 32: Variables a considerar en la Regresión Logística.	107
Tabla N° 33: Distintas medidas para cada evidencia	108
Tabla N° 34: Variables evaluadas	109
Tabla N° 35: Distribución de los pixeles por categoría propuesta y percentiles	111
Tabla N° 36: Intersección de ocurrencias con las clases para el Peso por evidencias	111
Tabla N° 37: Distribución de los pixeles por categoría propuesta y percentiles	112
Tabla N° 38: Intersección de ocurrencias con las clases para la Regresión Logística.	112

LISTA DE MAPAS

Mapa N° 1: Ubicación de la zona de estudio.....	15
Mapa N° 2: Geología de la zona de estudio.....	38
Mapa N° 3: Ambientes geológicos definidos.....	59
Mapa N°4: Densidad de estructuras (Fallas y lineamientos).....	61
Mapa N° 5:Distribución de datos geoquímicos.....	62
Mapa N° 6:Anomalías geoquímicas del Au.	63
Mapa N° 7:Anomalías geoquímicas de la Ag.	64
Mapa N° 8: Distribución de las imágenes ASTER en la zona de estudio.....	73
Mapa N° 9:Mapa de Favorabilidad: Peso por Evidencias	113
Mapa N° 10: Mapa de Favorabilidad: Regresión Logística	114

CAPITULO I

INTRODUCCION

A lo largo de los años se ha visto por conveniente utilizar diferentes métodos para encontrar zonas con alto potencial de recursos minerales, estos métodos van desde una superposición física de mapas hasta realizar ponderaciones y cálculos objetivos para las diferentes fuentes de información que usan.

2.1. Antecedentes

Los estudios relacionados a la determinación de zonas potenciales y/o favorables para encontrar recursos minerales utilizando métodos de probabilidades han sido poco aplicado en nuestro país.

Estos métodos están orientados a predecir donde pueden ocurrir depósitos minerales (evento) con evidencias conocidas, relacionando las asociaciones espaciales entre los depósitos minerales y sus características geológicas; para llevar acabo esto, se han empleado técnicas basadas en teoría de probabilidades y estadística (Carranza, 2002).

Dentro del método de probabilidades: el método de Pesos por Evidencias se ha utilizado con mayor frecuencia, donde un patrón de depósitos minerales está relacionado con varias capas (mapas - eventos) que representan datos geocientíficos e indicadores de ocurrencias de depósitos minerales (Agterberg & Cheng, 2002) varios autores han aplicado esta técnica como: Carranza y Hale (2000, 2003), Cheng y Agterberg (1989), Shahi y Kamkar-Rouhani (2014), entre otros; esta técnica también se ha aplicado en la búsqueda de petróleo (Aguilar & Arellano, 2011).

En el modelo de Regresión Logística (Método estadístico) los datos no son condicionalmente independientes como en el modelo de Pesos por Evidencia (Agterberg, Bonham-Carter, Cheng, & Wright, 1993), es decir no hace ninguna suposición sobre la distribución de las variables independientes (Carranza & Hale, 2001). El depósito mineral objetivo suele representarse como presente o ausente y la probabilidad de su ocurrencia está determinada por numerosas variables geológicas con una distribución imprecisa y la relación con los yacimientos minerales suele ser compleja. Al igual que el modelo anterior este modelo ha sido aplicado por autores como: Carranza y Hale (2001), Chung y Agterberg (1980), Reddy (1991), entre otros.

En la estimación de potencial mineral desarrollado en Perú se ha aplicado procesos analíticos de variables, conjuntamente con la elaboración de una matriz de comparaciones pareadas y suma ponderada de cada variable para evaluar zonas con posibilidades de desarrollo de la actividad minera y aplicado para la elaboración de un Manual de evaluación de recursos y potencial minero (Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, 2013). Un estudio realizado con el patrocinio de CIA minera Buenaventura muestra la riqueza mineral de las regiones, se realizó un compendio con la información obtenida de diferentes fuentes de los proyectos y los prospectos,

mostrando los recursos explotados actualmente y las reservas regionales (Cabos, 2009).

En estudios de metalogenia a nivel nacional, se han identificado 23 franjas metalogenéticas, esta información se considera una herramienta útil en la determinación de blancos para la exploración de recursos minerales (Quispe, y otros, 2008). Entre los años 2000 y 2005 se desarrollaron estudios de recursos minerales por franjas (Dirección de Geología Económica y Prospección, 2002), en el que se verificó y georreferenció ocurrencias metálicas (minas, proyectos y prospectos) con la finalidad de actualizar la base de datos, el mapa metalogenético y la carta geológica nacional, realizado por INGEMMET.

2.2. Formulación del problema

2.2.1. Definición del problema

En el Perú la economía depende principalmente de la utilización de los recursos naturales, su explotación ha sido tradicionalmente un componente importante en la economía ya que la riqueza mineral se encuentra distribuida a lo largo de todo el territorio nacional y en la mayoría de las regiones que tienen potencial se puede encontrar nuevos depósitos de los ya conocidos, es por esto que para el desarrollo sostenible de la economía se necesita una amplia información sobre los recursos minerales, datos geológicos y su distribución a lo largo del territorio.

En la continua búsqueda de zonas para el desarrollo de la actividad minera, la información geológica es un indicador importante en la exploración de recursos minerales, pero requiere de una gran inversión y largos períodos de investigación, además de una integración de varias técnicas geológicas (Carranza, 2002).

Los métodos convencionales de selección, evaluación y combinación de evidencias mediante la superposición física de mapas para determinar su relación se pueden mejorar con evidencias y métodos alternativos, además de técnicas basadas en Sistemas de Información Geográfica para la integración de los datos y el desarrollo de métodos modernos de exploración que sean rentables y puedan lograrse en poco tiempo, con la finalidad de mostrar la probabilidad de presencia de minerales de interés para su explotación.

Teniendo en cuenta que las ocurrencias de minerales varían espacialmente, el conocimiento cualitativo (características geológicas) no es suficiente para identificar “objetivos” de exploración, por tanto, es necesario complementar con métodos de análisis cuantitativo, para encontrar asociaciones espaciales entre las ocurrencias de minerales conocidos y ciertas características geológicas que controlan su presencia (Carranza & Hale, 2000).

La integración adecuada de los datos geoespaciales relevantes y disponibles utilizados en la exploración, como: litología, geoquímica, geofísica, teledetección, datos estructurales, cuerpos ígneos en el sistema de información geográfica (SIG) nos permite asegurar su ubicación espacial, y la correlación entre ellos, donde cada uno de los datos representa un indicador que se observa en depósitos fácilmente reconocibles, ya conocidos, por lo que nos llevará a la emplear nuevos métodos en la exploración.

Estos métodos son actualmente empleados por distintas entidades para caracterizar distintos fenómenos, como medio ambiente y riesgo geológico.

2.2.2. Formulación del problema

Tabla N° 1: Formulación del problema

PROBLEMA	CAUSAS	EFEECTO (solución)
¿Cómo se puede utilizar los datos geoespaciales como: litología (rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas), geoquímica, geofísica, teledetección, datos estructurales, entre otros, para encontrar nuevas áreas con probabilidad de ocurrencia mineral ¿conociendo la asociación espacial de las características geológicas de los depósitos minerales?	<p>Agotamiento de depósitos minerales fácilmente reconocibles en superficie.</p> <p>Falta de integración de datos geoespaciales en uno solo.</p> <p>Poco conocimiento de integración y uso de técnicas modernas para la exploración.</p> <p>Búsqueda continua de áreas para la exploración.</p>	<p>Conocer o ubicar nuevas áreas con altas favorabilidad de ocurrencia de minerales basados en métodos probabilísticos y estadísticos modernos empleados en la exploración.</p>

2.3. Justificación

Este estudio pretende ampliar y aplicar el conocimiento de los métodos de modelamiento probabilísticos y estadísticos utilizados en la ubicación de ocurrencias de recursos minerales, estableciendo una metodología para evaluar zonas de interés exploratorio y ayudar a focalizar las acciones y estrategias en la localización de zonas con alta probabilidad de ocurrencia de minerales. La región Arequipa destaca por la producción de cobre, oro y plata, principalmente de las minas de Cerro Verde, Orcopampa, Ares y Arcata. Gran parte del oro y plata proviene de depósitos epitermales (Orcopampa, Ares, Arcata y Caylloma) que en conjunto producen el 85% de oro y el 98% de plata (Cabos, 2009), representando un 10% y 6 % de la producción nacional (Pueblo, 2016) provenientes de la Cordillera Occidental donde ocurre la franja epitermal de metales preciosos en rocas volcánicas y porfiríticas de edad Terciario. Existe buenas posibilidades de seguir explotando oro, plata, por lo que

surge la necesidad de buscar y proponer métodos modernos en la exploración de dichos minerales.

2.4. Alcances y limitaciones

2.4.1. Alcances

- Aspecto social: Tener conocimiento y conciencia de la riqueza de recursos naturales de la región para su explotación y aprovechamiento de la población.
- Aspecto económico: Dinamizar las actividades para la exploración de depósitos minerales, impulsando el desarrollo local y regional con mano de obra, prestación de servicios, trabajos de ingeniería, etc.
- Aspecto ambiental: Obtener facilidades para la Licencia social, que ayudará a desarrollar una mejor política preventiva en el uso de tierras sin alejarse del cuidado del medio ambiente y la protección de los recursos.

2.4.2. Limitaciones

Existe una gran variedad de métodos probabilísticos y estadísticos que se pueden usar para la generación de modelos; en este trabajo planteamos dos métodos:

- Peso por evidencias
- Regresión Logística

También, se tiene una amplia variedad de softwares que pueden usarse en modelamiento SIG, como ArcGis y ENVI para el procesamiento de imágenes satelitales. La metodología a emplear reduce las limitaciones ya que se trabajará a pequeña y gran escala por la multiplicidad de datos a integrar en el modelo.

2.5. Variables e indicadores

2.5.1. Independientes

- Yacimientos conocidos.
- Datos geoquímicos y de teledetección.

2.5.2. Dependientes

- Modelos probabilísticos.
- Resultados del procesamiento e interpretación de datos geoquímicos y de teledetección.
- Variables geológicas: litología (rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas), datos estructurales (fallas, lineamientos).

2.5.3. Indicadores

Tabla N° 2: Indicadores

VARIABLES	DESCRIPCION	INDICADOR
Litología	Características de las rocas que constituyen las formaciones.	Rocas ígneas: Batolito de la Caldera, Gr. Tacaza. Rocas sedimentarias: Gr. Yura.
Geoquímica	Composición y dinámica de los elementos químicos de sedimentos	Au, Cu y As, también Ag, Zn, Sb, Sn, Mo, Bi (alta sulfuración) y valores altos de Au, Ag, Zn, As, Sb, Ba y localmente Te, Se y Hg (baja sulfuración).
Teledetección	Anomalías espectrales de imágenes satelitales como respuesta significativa en los valores digitales de un pixel con respecto a su entorno (cluster).	Arcillas, Óxidos: (SENTINEL-2A)
		Índices relacionados a alteraciones hidrotermales: (ASTER)
		Índice de sílice y cuarzo (ASTER)
Datos estructurales	Deformaciones por fuerzas tectónicas que actúan sobre la corteza terrestre (compresivos, distensivos o transcurrentes)	Fallas. Lineamientos que afecten la Cordillera Occidental.

2.6. Hipótesis

Los modelos probabilísticos y estadísticos basados en el sistema de información geográfica, mediante la integración, interpretación y análisis de diferentes datos geoespaciales, permiten localizar zonas favorables mineralización de Au, Ag en Arequipa.

2.7. Objetivos

2.7.1. General

Evaluar métodos probabilísticos, estadísticos de integración y evaluación de datos geoespaciales para identificar áreas muy favorables que contengan depósitos minerales de origen epitermal, relacionados a mineralización de Au, Ag en la región Arequipa.

2.7.2. Específicos

- Recopilar, integrar, evaluar y construir una base de datos geoespaciales en SIG, para identificar las características geológicas y asociaciones espaciales de depósitos epitermales con mineralización de Au, Ag.
- Determinar un modelo con relación espacial entre los datos geológicos, geoquímicos y geoespaciales para los depósitos epitermales.
- Validar los resultados obtenidos del modelamiento SIG en yacimientos conocidos para determinar zonas con probabilidades potenciales.
- Comparar los modelos propuestos de probabilidades y de regresión logística y mostrar cual es el más confiable y eficaz.

2.8. Metodología

El propósito de la investigación es producir un mapa de favorabilidad para encontrar nuevas áreas con ocurrencia de depósitos epitermales en el departamento de Arequipa. La Tabla N°3 muestra un resumen del procedimiento, el cual inicia con una revisión bibliográfica para obtener información de la geología general del área de estudio (geología, metalogenia, tectónica) y una revisión del modelo conceptual de los depósitos epitermales.

Se realizó una búsqueda de todos los datos que tengan acceso libre (Geología, Imágenes satelitales, Geoquímica, Metalogenia, Ocurrencias minerales) y se determinó estandarizar la escala de trabajo a 1/100000 en un formato digital en SIG.

Se busca realizar el tratamiento de datos, con la finalidad de la identificación de la geología para integrarla en un conjunto de ambientes geológicos según su edad y litología, el análisis y extracción de información de fallas y lineamientos, obtenida de los mapas geológicos existentes, además de emplear imágenes, modelos de sombra, para una interpretación adicional de lineamientos. El procesamiento de imágenes tales como ASTER y SENTINEL necesitan correcciones radiométricas y atmosféricas, además de técnicas que permiten caracterizar zonas con presencia de alteraciones hidrotermales, llevados a cabo en el software ENVI. Los datos de geoquímica se trabajan en base a cálculos realizados anteriormente en la zona de estudio, en el que se determinó sus valores de Background y Treshold para elementos de Au, Ag.

Posteriormente, se crean mapas para cada variable, estableciendo criterios para la identificación de las características más favorables en la formación de depósitos minerales. Se aplicaron los modelos propuestos para obtener mapas favorables en

base a la asociación espacial positiva con la mineralización de ocurrencia de Au y Ag.

La validación fue el último paso en realizar.

Tabla N° 3: Cuadro de procedimiento.

	DESARROLLO	PROCEDIMIENTOS			
Definición de los modelos empleados y la construcción de base de datos	Revisión de literatura y obtención de datos geoespaciales.	Modelos de formación de depósitos minerales, todas las características disponibles. Métodos probabilísticos y estadísticos para en la determinación de ocurrencia de minerales.			
		Litología (Mapas geológicos)	Estructuras (Mapas de estructuras)	Alteraciones De imágenes ASTER y SENTINEL.	Geoquímica Valores de
Tratamiento de datos y análisis	Extracción de datos geoespaciales (Reclasificación)	Extracción de litologías favorables y la asociación espacial con los depósitos ya conocidos	Asociación Espacial con los depósitos minerales ya conocidos	Extracción de alteraciones, índices, etc.	Asociación de los elementos relacionados depósitos ya conocidos.
	Creación de mapas espaciales	- Formaciones favorables para la mineralización -Distancia favorable de las rocas intrusivas	La distancia propicia de las estructuras	Ensamble de minerales e índices asociados a alteraciones hidrotermales.	Elementos indicadores
Aplicación de modelos probabilísticos y estadísticos	Combinación de los mapas con evidencias	Metodologías basadas en datos y conocimiento: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Peso por Evidencia ▪ Regresión Logística 			
	Validación	Zonas favorables para la mineralización			

CAPITULO II

GENERALIDADES

El relieve de los Andes en el sur del Perú es muy accidentado, la accesibilidad para el estudio geológico durante muchas décadas ha sido un reto, por lo que las instituciones del Estado se han percatado que los trabajos geológicos necesitan ser actualizados o desarrollados a escalas más detalladas, debido a que la cartografía geológica y las dataciones mayormente relativas no coinciden lateralmente con las pocas dataciones geocronológicas disponibles.

Esta preocupación la mostramos en este trabajo en que podemos observar que tanto las correlaciones y los nombres de las unidades litológicas no coinciden y nosotros presentamos una columna estratigráfica sintética, resultado del análisis de 18 cuadrángulos, lo cual es un trabajo de amplitud regional que además, nos permite utilizar la integración de los datos geológicos, con técnicas de teledetección.

2.9. Ubicación

La zona de estudio abarca 5 provincias de la región Arequipa: La Unión, Condesuyos, Castilla, Caylloma y Arequipa principalmente; sus límites regionales son Apurímac por el Noreste; Cuzco por el Este, Puno por el Sureste y Moquegua por el Sur (Mapa N°1), la zona de estudio tiene coordenadas UTM WGS-84 (Tabla N°1), zona 18 sur son:

Tabla N° 4: Coordenadas del área de trabajo

ESTE	OESTE
735435.543	8379747.217
892724.369	8346849.475
859732.966	8206483.326
704434.046	8241196.728

2.10. Accesibilidad

La accesibilidad al área de estudio y a cada una de las provincias se da desde la ciudad de Arequipa por vía terrestre (carreteras pavimentadas y afirmadas).

- Tramo Arequipa - Cotahuasi (Capital La Unión) de aproximadamente de 365 km y una duración aproximada de 7 horas.
- Tramo Arequipa - Chuquibamba (Capital de Condesuyos) de aproximadamente de 228 Km con una duración aproximada de 4 horas.
- Tramo Arequipa - Aplao (Capital de Castilla) de aproximadamente 180 km con una duración de 3 horas.
- Tramo Arequipa - Chivay (Capital de Caylloma) de aproximadamente 166 km con una duración de 3 horas.

2.11. Clima

La región Arequipa presenta diversos climas, estos van desde cálido y templado hasta el glacial y de nieves perpetuas. El clima cálido es propio de la costa con frecuentes lloviznas y garúas, así como las neblinas entre los meses de mayo y septiembre. A los 1000 metros de altitud a más, el clima varía a templado, templado-frío y frío en las montañas que dominan el paisaje; la variación de la temperatura es notoria, presentan lluvias regulares con precipitaciones altas entre los meses de enero a marzo. En las altas punas la temperatura desciende considerablemente, llegando sólo en el mes más cálido a los 0°C. Las precipitaciones de nieve, con mayor incidencia en los meses de Julio y Agosto en sectores superiores a los 4000 msnm., y temperaturas inferiores a los -20°C, con granizadas fenómeno que causa grandes pérdidas económicas entre los agricultores y ganaderos de la región (SENAHMI)

2.12. Flora y fauna

En las partes altas podemos encontrar cóndores, guanacos, tarucas, vicuñas y diferentes tipos de aves en los valles y cañones.

La región también presenta una gran variedad de flora siendo los más representativos en las zonas altas la yareta y los torales, entre los más conocidas tenemos al suncho, las plantas del tipo cardos o cetáceas, también se puede encontrar al platanillo, clavelinas, cucayo, higo, retama, chilca, altamisa, trébol, llantén, entre muchas variedades más de flora y fauna, así como flora comestible como la cebada, las habas, el maíz, la papa, la tuna, entre muchos otros (Arequipa Peru.org).

2.13. Geomorfología

Esta información es general, extraída de los boletines utilizados como referentes en el marco geológico.

2.13.1. Altiplano

Es la unidad más extensa localizada básicamente al oeste de la zona estudiada y ocupa gran parte de la región, las elevaciones varían entre 4,000 y 4,900 msnm la topografía es moderada con pequeños conos volcánicos, morrenas y abundantes bofedales; presenta planicies bien definidas y algunos valles de origen glaciar de extensión local.

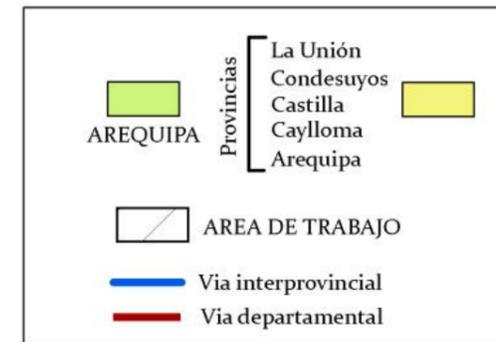
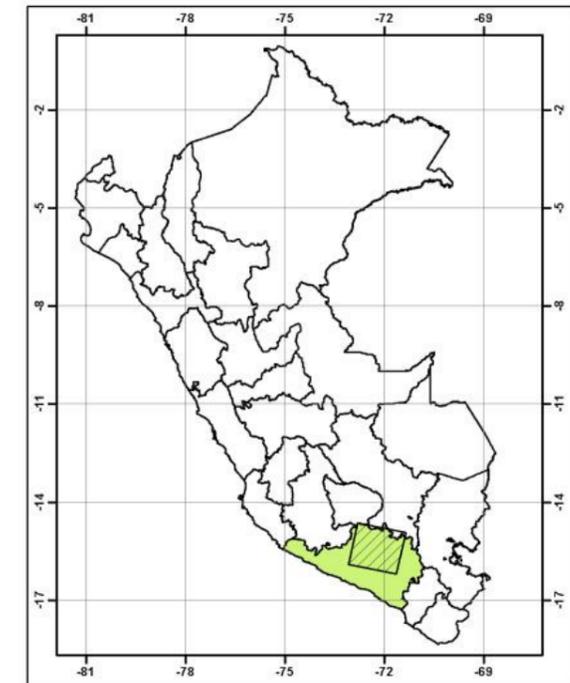
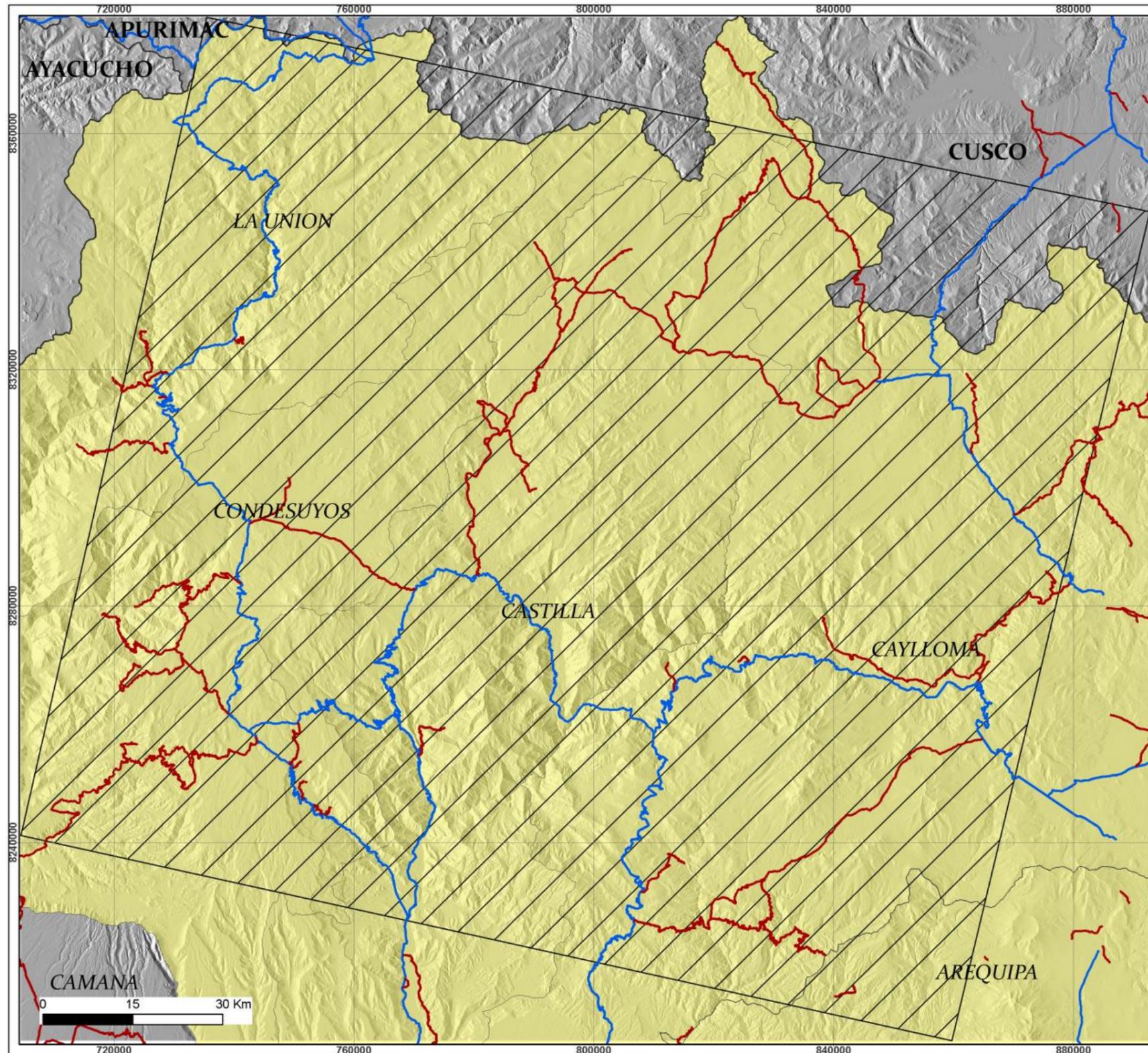
2.13.2. Cordillera occidental

Conforman cadenas de montañas que se alinean con una dirección NO-SE, una topografía accidentada con elevaciones que van de 4,500 a 5,300 msnm. Su topografía es agreste con predominio de fuertes pendientes por diferentes etapas de erosión. Representa las partes más altas de la Cordillera Occidental, que constituyen en parte la Divisoria Continental. Dentro de esta zona se encuentran edificios volcánicos en formas de domo – lava, o cónicos, simples y compuestos, bordeados por mesetas. Los edificios volcánicos más elevados por encima de los 5,000 msnm constituyen los glaciares, los cuales están cubiertos con nieves perpetuas.

2.13.3. Estribaciones andinas

Hacia el Este de la Cordillera Occidental se aprecia una zona bastante accidentada que pertenece a los flancos de la Cordillera Occidental de los Andes, se caracteriza por un fuerte cambio de pendiente con altitudes de más de 3,000 msnm. Está

Mapa N° 1: Ubicación de la zona de estudio



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
INGEMMET DIRECCIÓN DE LABORATORIOS <small>SECTOR ENERGÍA Y MINAS</small>	
Plano: Mapa de ubicación	
Elaborado por: Yngrid Greysi Orozco Yauilli	
Lámina:	
Proyección: UTM WGS-84 18S	Escala:
Fuente: Elaboración Propia	

constituida por cumbres más o menos redondeadas, correspondientes a restos de una superficie madura y disectada por numerosas quebradas.

2.13.4. Valles

Como resultados de erosión fluvial se han originado numerosas quebradas y valles profundos, por donde discurren en forma impetuosa hacia la costa. Los ríos descienden del Altiplano y de la Cordillera Occidental de los Andes, en ella se hallan comprendidos los valles amplios de Chuquibamba y Pampacolca que se conectan a valles estrechos, encañonados y de recorrido largo como el caso del río Colca.

2.14. Marco Geológico Regional

La geología regional descrita a continuación es una recopilación de las informaciones publicadas en varios boletines, resultado de los diferentes trabajos que se llevaron a cabo en la actualización de la carta geológica nacional a escala 1/100000 y 1/50000 (Mapa N°2) y resumiendo en una columna estratigráfica propuesta para la zona de estudio (Figura N°1).

Precámbrico

2.14.1. Complejo basal de la costa (Paleoproterozoico -Mesoproterozoico)

Agrupan diversas unidades de rocas metamórficas que afloran formando un macizo con orientación NO-SE. Litológicamente está constituido por facies metamórficas de: migmatitas, gneis, granulitas y esquistos con foliaciones NO, NS y NE; está asociada con dioritas y granitos antiguos intruidos por rocas graníticas y dioríticas. Este complejo es descrito y reconocido en los cuadrángulos de Chuquibamba (Olchauski & Dávila, 1994; Quispesivana & Navarro, 2003), Huambo (Romero & Ticona, 2003),

Aplao (Guizado , 1968). De acuerdo a algunas dataciones Rb/Sr indican una edad de $1\ 811 \pm 39$ Ma.

Mesozoico

2.14.2. Formación Chocolate (Jurásico Inferior)

Es una secuencia volcánica compuesta de brechas, tufos, coladas con intercalaciones de calizas y lutitas, esta formación pertenece al arco magmático Chocolate (Mamani, y otros, 2010). En el cuadrángulo de Arequipa (Localidad tipo) estudios recientes lo describen como una secuencia de paquetes sedimentarios conglomeráticos con clastos retrabajados de rocas volcánicas (Acosta y otros, 2009). Esta formación es identificada en los cuadrángulos de Huambo (Quispesivana & Navarro, 2003) y Arequipa (Vargas, 1970). La edad que se le asigna es Jurásica.

2.14.3. Formación Socosani (Jurásico Medio)

Secuencia marina carbonatada, conformada por calizas gris con ocasionales capas delgadas de lutitas y areniscas.

En la localidad tipo describen en su base conglomerados con clastos volcánicos, sobreponiéndose paquetes masivos de calizas con abundante contenido fosilífero (Acosta y otros, 2009).

En el área de estudio los mejores afloramientos se encuentran en el cuadrángulo de Huambo y Orcopampa (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003); Chuquibamba (Olchouski & Dávila, 1994). Se le asigna la edad de Jurásico medio (Toarciano Superior hasta el Bajoniano medio).

2.14.4. Grupo Yura (Jurásico - Cretácico)

2.14.4.1. Formación Puente (Jurásico medio)

Descrita como areniscas cuarcíticas de grano fino intercaladas con lutitas en capas delgadas con secuencias grano creciente.

Los afloramientos más destacables se encuentran en el cuadrángulo de Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003), Orcopampa (Caldas, 1993; Salas, y otros, 2003), Caylloma (Davila, 1988) y Arequipa (Vargas, 1970), Chuquibamba (Quispesivana & Navarro, 2003). Se le asigna la edad del Batoniano superior al Caloviano inferior (Vicente, 1989).

2.14.4.2. Formación Cachios (Jurásico medio)

Caracterizada por presentar lutitas pizarrosas gris oscuro a negro, carbonosas con intercalaciones de areniscas y limoarcillitas. Los afloramientos más destacables se encuentran en los cuadrángulos Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003) Arequipa (Vargas, 1970) y Caylloma (Davila, 1988). Se le asigna la edad del Caloviano al Oxfordiano del Jurásico superior.

2.14.4.3. Formación Labra (Jurásico superior)

Caracterizada por la presencia de areniscas de grano fino a medio de colores claros. Presenta mayor exposición en los cuadrángulos de Chuquibamba (Olchouski & Dávila, 1994; Quispesivana & Navarro, 2003), Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003) y Arequipa (Vargas, 1970) con inflexiones Este - Oeste debido a fallamientos. Por su posición estratigráfica se le asigna la edad del Oxfordiano-Kimmeridgiano inferior.

2.14.4.4. Formación Gramadal (Jurásico Superior)

Secuencia de calizas arrecifales marrones con bancos gruesos de areniscas cuarcíticas blanquecinas. Aflora en cerro del mismo nombre del cuadrángulo de Arequipa (Localidad tipo, descrita por Vargas, 1970), Caylloma (Quispesivana & Navarro, 2003), Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003), Aplao (Guizado , 1968) y Chuquibamba (Quispesivana & Navarro, 2003). Por su posición estratigráfica se le considera la edad del Titoniano (Acosta H. , Alvan, Hillerbrandt, Riegraf, & Oviedo, 2011).

2.14.4.5. Formación Hualhuani (Cretácico Inferior)

Caracterizado por areniscas cuarcitas y cuarcitas de grano fino a grueso (duras) con intercalaciones de limoarcillitas. Se encuentra distribuida en los cuadrángulos de Arequipa (Vargas, 1970), Caylloma (Davila, 1988; Quispesivana & Navarro, 2003), con mayor espesor en Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003) y Cotahuasi (Olchauski & Dávila, 1994; Salas, y otros, 2003). Se le asigna una edad Berriasiano a Valangiano del Cretácico Inferior.

2.14.5. Formación Murco (Cretácico Inferior)

Litológicamente consiste en una secuencia lomoarcillitas, areniscas, limolitas verdes, calizas y yeso. Se encuentra ampliamente distribuida, con afloramientos uniformes en dirección NO y capas inclinadas en el cuadrángulo de Arequipa (Vargas, 1970), se reconoce también en los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003), Aplao (Guizado , 1968), Caylloma (Davila, 1988), Cotahuasi y Chuquibamba (Olchauski & Dávila, 1994). Se le asigna la edad del Barremiano - Albiano inferior debido a evidencia fósil.

2.14.6. Formación Arcurquina (Cretácico superior)

Es caracterizada por tener predominancia de calizas con intercalaciones de areniscas, margas y algunos conglomerados calcáreos. Se encuentra distribuida a manera de grandes cuerpos en una franja NO-SE, cortada por el cañón del Colca (sinclinal) en el cuadrángulo de Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003).

Presenta plegamientos con ejes de direcciones NO en el cuadrángulo de Arequipa (Vargas, 1970), Chuquibamba (Olchouski & Dávila, 1994) y Cotahuasi (Olchouski & Dávila, 1994; Salas, y otros, 2003). Se le asigna la edad del Albiano- Cenomaniano con probable extensión al Turoniano, del Cretáceo Superior.

2.14.7. Formación Chilcane (Cretácico Superior)

Descrita como una secuencia de capas rojas yesíferas, Las capas que afloran en el área de Huambo al SO con estratificación cruzada, onduladas de corriente y huecos tabulares, consideran que la solución de yeso y su removilización, ha jugado un rol tectónico importante en la región (Dirección de Geología Económica y Prospección, 2002). Es descrita en el cuadrángulo de Arequipa (Vargas, 1970). Se le asigna una edad Turoniana Superior, por correlación estratigráfica.

2.14.8. Formación Ashua o Seraj (Cretácico Superior)

Inicialmente denominada Seraj por Hosttas (1967), descrita por Manrique (1970) y re-denominada a Ashua por Romero y Ticona (2003). Se caracteriza por tener en su limoarcillitas y limos rojos a verdosos intercaladas con areniscas arcóscicas y calizas fosilíferas, seguida de areniscas arcóscicas de grano medio a grueso intercalada con limoarcillitas. Presenta pequeños afloramientos en el cuadrángulo de Huambo (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003) en el que se le asigna la edad del Santoniano

del Cretácico Superior quizás hasta el Maestrichtiano. Cabe destacar que en el mapa geológico estas dos formaciones se encuentran separadas, pero poseen una misma descripción.

Cenozoico

2.14.9. Formación Huanca (Eoceno-Oligoceno)

Litológicamente está compuesta por conglomerados, areniscas, limoarcillitas y breccas volcánicas. Presenta 3 miembros:

2.14.9.1. *Querque*

Compuesto de conglomerados de rocas volcánicas.

2.14.9.2. *Huacamayo*

Compuesto de areniscas cuarzosas, limoarcillitas y clastos de calizas.

2.14.9.3. *Tarucani*

Conglomerados polimícticos de areniscas, calizas, intrusivos y gneis (Romero & Ticona, 2003). Presenta una dispersión en las quebradas del cuadrángulo de Arequipa (Vargas, 1970), se prolonga al cuadrángulo de Huambo como una franja delgada de dirección NNO-SSE (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003).

Por su posición estratigráfica se le asigna una edad muy probable del Eoceno-Oligoceno inferior y equivalente a la Formación Puno del Terciario inferior.

2.14.10. Formación Moquegua (Oligoceno)

Se caracteriza por presentar areniscas de grano medio y conglomerados de rocas volcánicas, arcillas rojas intercaladas con yeso. Es descrita en el cuadrángulo de

Aplao con ligera inclinación al Sur, aflora en el cuadrángulo de Aplao (Guizado , 1968) y Huambo (Romero & Ticona, 2003), Chuquibamba y Caravelí (Quispesivana & Navarro, 2003). Se le considera de edad de $30,7 \pm 0,5$ Ma para la formación inferior y la edad de $25,3 \pm 0,8$ Ma para la formación superior (Acosta y otros, 2011).

2.14.11. Formación Sotillo (Oligoceno)

Constituida por areniscas arcósicas, volcanoclásticas, grises con tonalidad rojiza en capas delgadas, laminación interna paralela, capas de yeso y niveles de conglomerados lenticulares. Sus mejores exposiciones se encuentran en el cuadrángulo de Aplao Se le asigna una edad entre el Oligoceno y probablemente hasta el Eoceno Superior (Vargas, 1970).

2.14.12. Grupo Tacaza (Mioceno Medio)

Su litología es variada constituida por rocas volcánicas (coladas, brechas y tobas) emitidas como manifestación del inicio del vulcanismo cenozoico (Cerpa, y otros, 2011) este grupo pertenece al arco volcánico del Tacaza - Calamarca que durante 30 a 24 Ma genera un magmatismo shoshonítico-alcalino a calcoalcalino de este a oeste (Mamani, y otros, 2010). Se encuentra bien desarrollado en la zona de estudio, donde varios autores como: Vargas (1970) quien describe tres niveles; Dávila (1988), Caldas (1993), De la Cruz (1995); Salas y otros (2003); Romero y Ticona (2003) reconocen dos secuencias en base a sus características geológicas. Cabe resaltar que para el sector oriental (Cuadrángulo de Chivay, Condorama) estudiada por Klinck (1986) se dividió en dos unidades redefiniendo sus límites en: Tacaza Viejo y Tacaza Joven, esto fue corroborado por Velarde (2006) para el cuadrángulo de Chivay con edades de 26 ± 0.88 Ma y en el Tacaza más oriental tiene una edad de $24,3 \pm 0.6$ Ma. El Grupo Tacaza en la zona de estudio presenta dos formaciones:

2.14.12.1. Formación Orcopampa

Propuesta y descrita por Caldas (1993) ya que parcialmente estaba vinculada con depósitos minerales; esta unidad está constituida por tobas, brechas, flujos de lava (andesitas, dacitas, riolita) con ocasionales horizontes de facies sedimentarias. Está dividida en tres miembros:

❖ Miembro Santa Rosa

Descrita localmente como Tudela - Santa Rosa (Arenas , 1975) posteriormente por Torres (1991), está constituido por una secuencia de brechas y coladas volcánicas, en algunos casos intercaladas con secuencias conglomeráticas, areniscas y lutitas. Esta formación se reconoce en los cuadrángulos de Huambo (Romero & Ticona, 2003), Cotahuasi y Orcopampa (Salas, y otros, 2003) al SE de la ciudad de Orcopampa y alrededores de la mina Santa Rosa – Tudela. Swanson (2004) le asigna la edad de $22,8 \pm 0,7$ y $19,47 \pm 0,6$ Ma correspondiente al Mioceno inferior.

❖ Miembro Manto

Identificada como Tobas (tufos) Manto por Arenas (1975), está constituida por tobas e ignimbritas blanquecinas de composición riolítica, dacítica, las cuales se encuentran meteorizadas. Afloran en los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa (Romero & Ticona, 2003; Salas, y otros, 2003) extendiéndose hasta los cuadrángulos de Caylloma (Davila, 1988). La edad de la toba Manto es de 19,7 Ma basado en tres determinaciones Ar/Ar por Swanson y otros (2004).

❖ Miembro Aicaje

Miembro superior, está constituida por lavas andesítica dispuestos en estratos horizontales y subhorizontales, siendo el típico afloramiento en el cuadrángulo de

Orcopampa al este de la mina Shila (Salas, y otros, 2003). Esta, además reconocida en el cuadrángulo de Huambo (Romero & Ticona, 2003). Se le asigna la edad de $11,4\pm 0,6$ Ma correspondiente al Mioceno medio a superior (Salas, y otros, 2003; Romero & Ticona, 2003).

2.14.12.2. Formación Ichocollo

Se le identifica como la última etapa del vulcanismo Tacaza, está constituida por lavas y domos dacíticos, en la base, así como por lavas andesíticas a andesítico-basálticas con niveles de areniscas y brechas. Aflora en el cuadrángulo de Caylloma (Davila, 1988), Orcopampa (Salas, y otros, 2003) y Huambo (Romero & Ticona, 2003). Esta unidad constituye uno de los metalotectos principales en el sur del Perú, que alberga mineralización polimetálica. Se le asigna una edad de 19.1 Ma y 18.9 Ma (Noble, 1974) indicando que pertenece al Mioceno superior.

2.14.13. Grupo Palca (Mioceno)

Está constituida por varios centros volcánicos formados en un rango de 24-18 Ma (Cerpa, y otros, 2011) asociado a sistemas de fallas regionales, un ejemplo de esto es el centro volcánico de Sibayo, cercano al área de estudio. Litológicamente está constituida por tobas y conglomerados tobaceos, (De la Cruz, 1995) intercalados con sedimentos arenosos y limolitas. Cabe destacar que en la zona de estudio la zona denominada Palca no se encuentra ninguna descripción en boletines ni memorias, por lo que se correlaciona de los cuadrángulos adyacentes.

2.14.14. Grupo Maure (Mioceno)

Secuencia sedimentaria pre Barroso, Klinck (1986) le da la categoría de grupo. Litológicamente está tiene productos sedimentarios y volcano-sedimentarios con inter

estratificación de ignimbritas, lavas andesíticas, dacitas de textura fina, ocasionado por el vulcanismo Maure (Velarde, 2006) los cuales se intercalan con sedimentos lacustrinos. Presenta una exposición escasa en las partes altas de la Cordillera Occidental entre Condorama (Sanchez & Zapata, 2003) y Yauri (Quispesivana & Navarro, 2003). Presenta varias edades $21,39\pm 0.15$ Ma; $18,82\pm 0.6$ Ma y 11.2 ± 0.6 Ma (Velarde, 2006) considerándolo Mioceno inferior, medio.

2.14.15. Formación Alpabamba (Mioceno medio)

Constituida por un conjunto variado de litología: tobas riolíticas a dacíticas, brechiodes, ignimbríticas, lapilli hasta secuencias sedimentarias. Autores como Palacios (1994), Salas y otros (2003), Martínez y Cervantes (2003) identifican dos a tres miembros, no llegando a tener una correlación entre estas, por lo que no se describe. Sus mejores exposiciones se describen en el cuadrángulo de Chuquibamba y Cotahuasi (Olchanski & Dávila, 1994; Salas, y otros, 2003), Chulca, Cayarani (Palacios, 1994; Salas, y otros, 2003) y en el cuadrángulo de Orcopampa, (Caldas, 1993; Salas, y otros, 2003). Su edad está comprendida entre los 19.4-18 Ma (Thouret, y otros, 2007), correspondiente al Mioceno medio.

2.14.16. Grupo Nazca (Mioceno Medio-Superior)

Identificada por Noble (1979). Litológicamente está formada de rocas volcánicas que afloran extensamente sobre la altiplanicie al este de Nazca. La parte superior del Grupo Nazca, conocida como Tobas Nazca presentan un rango composicional que varía desde riolitas a dacitas, se manifiesta en el cuadrángulo de Chuquibamba. En el cuadrángulo de Nazca se data unas tobas de 18 Ma (Ccallo, 2015) y en el cuadrángulo de Acari se data unas tobas hasta 8 Ma.

2.14.17. Grupo Sillapaca (Mioceno Superior)

Se considera a los productos generados por el arco Sillapaca, emplazado a más de 45 Km y con afinidad adakítica, que generó 15 centros volcánicos. Litológicamente está constituido por flujos de lava y piroclastos de ceniza (Cerpa, 2011), además de presentar secuencias de aglomerados y lavas fuertemente alteradas, en el cuadrángulo de Cotahuasi (Salas et al., 2003), Caylloma (Quispesivana y Navarro, 2003), Condorama (Cerpa, y otros, 2011). La edad asociada es de 13 - 10 Ma.

2.14.18. Formación Pisco (Mioceno medio)

Litológicamente está conformada por areniscas conglomeráticas de grano grueso con bioclastos y areniscas de grano medio estratificadas y laminadas, además de presentar areniscas tobáceas inter estratificadas (Fernandez, 1993). Se encuentra aflorando al SW del cuadrángulo de Chuquibamba (Quispesivana & Navarro, 2003). La edad que se le asigna es de 9.95 ± 0.47 hasta 3.7 Ma en niveles de tufos, considerándolo Mioceno-Plioceno.

2.14.19. Formación Ocoruro (Oligoceno Inferior)

Se asume esta denominación (Klinck, 1986) para los conglomerados que afloran al oeste del poblado de Ocoruro.

Presenta una parte inferior formada por conglomerados con clastos de calizas, rocas volcánicas, cuarcitas, areniscas e Intrusivos, y hacia la parte superior presenta intercalaciones de lutitas y areniscas. Por correlación estratigráfica se le considera Oligoceno inferior (Cerpa, y otros, 2011).

2.14.20. Formación Arma

Se denomina a una secuencia estratificada de materiales piroclásticos, aglomerados, lapilli, con estructuras volcánicas jóvenes en la base, su origen se remonta a observaciones de campo en la que indican la posibilidad de un control conjugado de tipo central y de fisura (Salas, y otros, 2003).

2.14.21. Formación Sencca (Mioceno Superior - Plioceno)

Se caracteriza por tener rocas piroclásticas: tobas de composición riolita a dacita y brechas con fragmentos angulosos a subredondeados. Sus afloramientos más destacados se encuentran en los cuadrángulos de Orcopampa (Caldas, 1993; Salas, y otros, 2003), Cotahuasi (Olchouski & Dávila, 1994; Salas, y otros, 2003), Caylloma (Dávila, 1988), finalmente en el cuadrángulo de Caraveli (Pecho, 1983). Se le asigna una edad entre 6.2 ± 0.2 (Noble, 1976) y 6.5 ± 0.3 Ma que correspondería al Mioplioceno.

2.14.22. Formación Capillune (Plioceno)

Litológicamente está constituida por areniscas finas granocrecientes de origen volcánico, arcillas, conglomerados y piroclastos, presentes en capas delgadas.

Dentro del área de estudio se presenta en el cuadrángulo de Caylloma (Quispesivana & Navarro, 2003). Por correlación estratigráfica se le asigna la edad Plioceno superior, ya se encuentra infrayaciendo al Grupo Barroso (Dirección de Geología Económica y Prospección, 2002).

2.14.23. Grupo Barroso (Mioceno - Plioceno)

Está conformada por estrato volcanes que coronan la Cordillera Occidental (Pino, Sempere, Jacay, & Fornani, 2004) con actividad efusiva, se han depositado lavas de composición mayormente andesíticas con textura porfirítica y afanítica, además de una secuencia de productos volcánicos con amplia distribución. Pertenece al arco volcánico del Barroso con un rango de edad de 10 a 3 Ma (Inferior) y 3 a 0 Ma (Superior) (Mamani, y otros, 2010).

2.14.23.1. Barroso Inferior

Considerada una fase explosiva, dando origen a piroclastos de ceniza, lapilli y tobas de bloques en cercanías a estructuras volcánicas (De la Cruz, 1995),

Las mejores expresiones son los afloramientos relacionados al volcán Coropuna y sus alrededores, además se correlaciona con la parte superior del Volcánico Chila que comprende la tercera etapa del Complejo Chachani (Vargas, 1970).

2.14.23.2. Barroso Superior

Considerada una fase lávica efusiva y brechoide con productos andesíticos a traquiandesíticos (De la Cruz, 1995). Sus mejores afloramientos están en las inmediaciones del volcán Firura, Solimana (Olchauski & Dávila, 1994). Cabe destacar que, en otros cuadrángulos, consideran de dos a tres miembros del Barroso.

2.14.23.3. Complejos volcánicos

❖ Coropuna

Se trata de las coladas volcánicas porfiríticas envueltos en una matriz afanítica, con brechas compuestas por bloques angulosos de rocas volcánicas de composición

andesítica. Los conglomerados son de tipo debris flow compuestos por clastos de rocas volcánicas principalmente (Romero & Ticona, 2003).

❖ **Hualca Hualca**

Se manifiesta una potente serie de coladas volcánicas porfiríticas correspondiendo a una andesita, brechas de bloques angulosos fragmentados de composición andesítica y aglomerados volcánicos que corresponden a depósitos de escombros (Romero & Ticona, 2003).

❖ **Ampato**

De composición andesítica y tobas se presentan soldadas con apariencia de disyunción columnar, pocos fragmentos líticos (Romero & Ticona, 2003).

Cuaternario

2.14.24. Formación Pusa (Pleistoceno)

Constituida por intercalaciones delgadas de areniscas de matriz fina y lodolitas de origen tobáceo y lacustrino, aflora en las localidades de Pusa y Pillune, por sus relaciones estratigráficas, se lo consideró de la edad Pleistocénica (Fernandez, 1993).

2.14.25. Depósitos glaciares

Se han depositado cubriendo los flancos de las altas cumbres asociadas principalmente, a las zonas de distribución de los aparatos volcánicos del Grupo Barroso.

Tienen mayor extensión en el sector nororiental del cuadrángulo de Orcopampa, donde se les encuentra bordeando antiguos conos volcánicos con presencia de morrenas laterales y frontales.

2.14.26. Depósitos lacustres

Están conformados por arenas y limos con abundante materia orgánica, se pueden encontrar lentes de conglomerados en la desembocadura de los ríos que alimentan lagunas.

2.14.27. Depósitos travertinos

Contienen sustancias calcáreas, depositadas en los sectores bajos los cuales podrían ser explotados para diferentes fines industriales.

2.14.28. Formación Santo Tomas

Identificada por Pecho (1981) en el cuadrángulo de Santo Tomas, se lo describe como una secuencia de flujos de lava andesítica basáltica de textura afanítica de color negro como parte del Grupo Andagua.

Se trata de un centro volcánico ubicado al sur de la laguna Angostura, las lavas muestran un marcado estado de conservación (Salas, y otros, 2003).

2.14.29. Grupo Andagua (Pleistoceno)

Está conformado por flujos de lava, complejos flujos y conos de escoria, las lavas en general fueron altamente fluidas, relleno de valles (hidrografía actual), pueden extenderse por muchos kilómetros.

Aflora a lo largo del cuadrángulo de Huambo, Orcopampa (Caldas, 1993; Romero & Ticona, 2003), Cotahuasi (Salas, y otros, 2003) y Chivay (Quispesivana & Navarro, 2003). Se le asigna una edad del Pleistoceno medio aproximadamente.

2.14.30. Depósitos fluvioglaciares

Ocupan las partes más bajas de los nevados Corpuna, Solimana y Firura, como consecuencia de la destrucción de las morrenas por acción fluvial, además de ocupar las planicies y quebradas pequeñas.

2.14.31. Depósito proluvial

Conformada por flujos de lodo, bloques, cantos, bolos con relleno limo arenoso-arcilloso depositados en el fondo de valles tributarios y conos deyección.

2.14.32. Depósitos fluviales

Constituidos por gravas y bloques subangulosos a subredondeados envueltos en una matriz limoarenosa que se encuentran formando terrazas aluviales a lo largo de los valles.

2.14.33. Depósitos coluviales

Estos depósitos sufrieron transporte corto antes de ser depositados, están compuestas de gravas, bloques subangulosos y angulosos que presentan una matriz limoarcillosa distribuidas en diferentes sectores.

2.15. Rocas Intrusivas

2.15.1. Batolito Atico - Camaná

Guizado (1968) lo identifica como granito y en la revisión de los mapas geológicos al 1/100000 León y Palacios (2000), cuadrángulo de Aplao, la definen como parte del Batolito Atico - Camaná. Dataciones realizadas en otros cuadrángulos le asignan un rango Ordovícico Inferior.

2.15.2. Batolito de la Costa

De acuerdo a los estudios de Cobbing (1977) y Pitcher (1985) se emplazó a lo largo de la faja costanera siguiendo grandes fallas y fracturas formado en la confluencia de los la placa de Nazca y la placa Sudamericana. El batolito de la costa se subdivide en 5 super unidades, de las cuales se presentan en el área de estudio las siguientes:

2.15.2.1. Super Unidad Patap

Los intrusivos plutónicos más antiguos están conformados por afloramientos de gabros de composición variable, además de granodioritas y tonalitas, son disectados por miembros más jóvenes y erosionados durante el cretáceo. Aflora como pequeños cuerpos al sur oeste del cuadrángulo de Chuquibamba (Quispesivana & Navarro, 2003). La edad de emplazamiento es de 102 Ma (Cobbing, Pitcher, & Taylor, 1977).

2.15.2.2. Super Unidad Incahuasi

Es considerada como parte del arco magmático de Incahuasi (Rodriguez, 2011), está integrada principalmente por intrusivos tonalíticos, granodioríticos y dioríticos, originados por fases de pulsaciones magmáticas y por el emplazamiento alargados siguiendo una zona de gran fracturamiento. En la zona de estudio está representada por las tonalitas en los cuadrángulos de Caraveli y Chuquibamba (Olchauski & Dávila, 1994; Quispesivana & Navarro, 2003). En dataciones realizadas por Martínez y Cervantes (2003) obtienen edades de 81 ± 0.2 Ma.

2.15.2.3. Super Unidad Linga

Presenta litologías bastante distinguibles que han sido determinadas como monzonitas, se asume responsable de la mineralización de Cu, Fe, Mo (Cobbing & Snelling, 1977). Dentro del área de estudio aflora al sur oeste del cuadrángulo de

Chuquibamba (Quispesivana & Navarro, 2003). La edad de emplazamiento es de 68.2 ± 0.4 Ma (Demouy, y otros, 2012).

2.15.2.4. Superunidad Tiabaya

Considerada como parte del arco magmático Toquepala, aflora en el sur y norte del Perú (Rodríguez, 2011), están asociados al sistema de fallas Cincha Lluta Incapuquio, comprende una facie de dioritas. Se encuentra como afloramientos en el cuadrángulo de Huambo (Romero & Ticona, 2003), Aplao (Guizado , 1968).“Por dataciones obtenidas por Santos y otros (2016) se le asigna la edad de 71 ± 0.8 Ma del cretácico superior.

2.15.3. Tonalitas

Romero y Ticona (2003) exponen una zona intermedia asociado a fallamientos NO-SE, la que definen como plutón Ashua, a lo largo de su exposición intruye y metamorfiza a las secuencias de la Formación Ashua, Murco, Arcurquina y al cerro Rodríguez, probablemente sean la última manifestación de la actividad plutónica (Cenoniano - Maestrichtiano?).

2.15.4. Dioritas

Salas y otros (2003) describe esta unidad como Complejo Cotahuasi cubierta por facies volcánicas del grupo Tacaza y Alpabamba. Se le asigna una edad de $53,7 \pm 2.7$ Ma asignado al Paleoceno tardío.

2.15.5. Choquechambe

Sánchez y Zapata (2003) en el cuadrángulo de Yauri consideran como parte del Oligoceno.

2.15.6. Andesitas

Salas y otros (2003) describen esta unidad como Complejo Pampamarca, formado por un conjunto intrusiones cerca de las localidades de Pampamarca y Taurisma, los cuales instruyen a las calizas de la Formación Arcurquina y Grupo Tacaza. Por su posición se le atribuye al Mioceno inferior.

2.16. Subvolcánicos

2.16.1. Jatun Sallaco

Considerada en la revisión y la actualización de la carta geológica por Sánchez y Zapata (2003) en el cuadrángulo de Condorama, como unidad subvolcánica de andesitas del Mioceno, anteriormente Palacios (1994) lo describió como un stock subvolcánico de andesitas y dacitas asociado al vulcanismo del Tacaza, Sillpaca, Barroso.

2.16.2. Complejo Chinchón

Conjunto de brechas y cuerpos dacíticos, con materiales correspondientes a la Caldera Chinchón, (Swanson, y otros, 2004) instruyen a los miembros Manto y Santa Rosa. El proceso de emplazamiento parece haberse iniciado con la expulsión de tobas y brechas tobáceas, luego se habrían emplazado brechas de flujo que comprometen la mayor extensión del afloramiento (Salas, y otros, 2003).

2.16.3. Dacitas

Olchauski y Davila (1994) reconocen esta unidad al oeste del distrito de Viraco en el cerro Pampachacra, intruye a la Formación Socosani. Debido a la meteorización de

la pirita diseminada, la superficie se cubre de un color rojizo dando la apariencia de sombrero de hierro.

2.16.4. Domo riolítico

Salas y otros (2003) describe esta unidad como Complejo Challahuire, el que está constituido por lavas riolítica a riodacítica con una morfología de domo colada con una base brechas riodacíticas, los cuales interpretan como una fase intermedia del volcanismo Barroso. La edad considerada es de 5.9 ± 0.2 Ma del Mioceno superior al Plioceno.

2.17. Tectónica general

La tectónica de la zona de estudio se va marcando desde el Mesozoico, se producen deformaciones como plegamientos y fallas con rumbo andino (NO-SE), que afectan a la Faja Costanera, Cordillera Occidental y Altiplano, estas fallas están asociados al emplazamiento de los batolitos cretáceos - paleógenos (Dirección de Geología Económica y Prospección, 2002).

Para el Cenozoico durante el periodo Paleógeno (Eoceno) se genera magmatismo intrusivo y volcánico; el margen peruano y los Andes siguen su orientación andina al noroeste, y por lo tanto los efectos de las altas tasas de convergencia a fines de este periodo fueron más severos (Vicente, 1989)

Desde el Oligoceno (30 Ma) hasta Mioceno tardío (6 Ma) se inicia el desarrollo de depósitos epitermales en el sur del Perú, por la ruptura de la placa Farallones en las placas Cocos y Nazca, que ocurrió alrededor de 25 Ma, marcando el comienzo de un período de tasas de convergencia más altas y ortogonales en la mayoría de los Andes centrales, el cual coincide con el inicio del magmatismo Mioceno generalizado. Debido

a la fase de subducción a gran velocidad se registran 3 eventos intrusivos (Acosta, Quispe, Santisteban, & Acosta, 2008).

De manera más individualizada los distritos mineros que se encuentran en la zona de estudio presentan diferentes direcciones que corresponde al emplazamiento de las vetas en estructuras generadas por acortamiento durante el Mioceno medio: acortamiento NS y para el Mioceno tardío acortamiento EW, que influye en las variaciones a escala de las vetas, que delimitan zonas más favorables en apertura y relleno a través de fallas, siendo las más destacadas:

Orcopampa: NE-SW, E-W (Fallas normales), emplazadas en unidades volcánicas, emplazados en volcánicos del Mioceno tardío.

Caylloma: Fracturas con dirección NE-SW.

Arcata: Fracturas con dirección EW (aproximadamente), a direcciones NW y SW.

Shila y Paula: con estructuras en dirección NE y EW, NE-SW.

Las alteraciones características que presentan son la silicificación a lo largo de las fallas, además de una argílica avanzada que rellena fracturas y poca presencia de alteración propilítica, como en Orcopampa, Caylloma, Madrigal, Arcata, en esta última presenta alteración fílica restringida que constituye una guía mineralógica de la continuidad de estructuras.

Además de caracterizarse la presencia de fuentes termales relacionada a sistemas geotermales con presencia de sinter de sílice y temperaturas que llegan hasta los 190°C (Steinmuller, 2001).

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLEOCENO	Depósitos Coluviales		Gravas y bloques angulos.	
			Depósitos Fluviales		Gravas y bloques.	
			Depósitos Proluviales		Flujos de lodo y bloques.	
			Depósitos Fluvioglaciales		Morrenas	
			Formación Andagua		Flujos de lavas.	
		PLEISTOCENO	Formación Santo Tomas		Lavas andesit. a basálticas.	
			Depósitos Travertinos		Travertinos estratificados.	
			Depósitos Lacustres		Limoarcillitas arenosas.	
			Depósitos Glaciares		Bloques y gravas subangu.	
			Formación Pusa		Areniscas finas y lodolitas	
	NEÓGENO	PLIOCENO	GRUPO BARROSO		Lavas y brechas.	
			Formación Capillune		Piroclastos.	
			Formación Sencca		Piroclastos y aglomerados.	
		MIOCENO	Formación Arma		Tobas riolíticas a dacíticas.	
			Formación Ocoruro		Piroclastos y aglomerados.	
			Formación Pisco		Conglom., calizas y volcan.	
			Formación Sillapaca		Areniscas medias a finas	
			Formación Alpabamba		Lavas y piroclastos.	
			Formación Nazca		Tobas riolíticas a dacíticas.	
			Grupo Maure		Ignimbritas intercaladas con sedimentos.	
			Formación Palca		Tobas y conglomerados tobáceos.	
			GRUPO TACAHA	Formación Ichocollo		Lavas y domos dacíticos.
				Formación Orcopampa		Lavas andesíticas.
Aicaje		Ignimbritas riolíticas y dacíticas				
PALEÓGENO	OLIGOCENO	Santa Rosa		Brechas y coladas volcan.		
		Formación Moquegua		Areniscas y conglomer.		
	EOCENO	Formación Sotillo		Areniscas arcoscas		
		Formación Tarucani		Conglom. polimicticos.		
		Formación Huasamayo		Areniscas cuarsozas y limoarcillitas		
MESOZOICO	CRETÁCICO	Formación Querque		Conglomerados de rocas volcánicas.		
		SUPERIOR	Formación Ashua		Areniscas de grano grueso con intercalaciones de calizas brechosas	
			Formación Seraj		Capas rojas yesíferas.	
			Formación Chilcane		Calizas intercaladas con areniscas, margas y congl.	
		INFERIOR	Formación Murco		Limoarcillitas, arenisca yeso.	
			Formación Hualhuani		Areniscas cuarcíferas.	
	JURÁSICO	SUPERIOR	Formación Gramadal		Calizas con intercalación de areniscas.	
			Formación Labra		Areniscas finas a medias	
			Formación Cachios		Lutitas pizarrosas	
			Formación Puente		Areniscas finas con intercalación de lutitas	
		MEDIO	Formación Socosani		Calizas con intercalación de areniscas y lutitas.	
			INFERIOR	Formación Chocolate		Lavas y brechas tufos con intercalaciones de lutitas y calizas.
				Formación Chocolate		Lavas y brechas tufos con intercalaciones de lutitas y calizas.
			PALEO-NEO-PROTER.			Complejo basal de la Costa

Figura N° 1: Columna estratigráfica propuesta para el área de estudio (Elaboración propia).

CAPITULO III

MARCO TEORICO

Las características observables de los diferentes depósitos están relacionadas a su distribución espacial, lo que permite calificarlas. Los métodos estadísticos y probabilísticos están basados en predecir un evento en base a cálculos objetivos de características que desencadenen dicho evento.

3.1. Características de los depósitos epitermales

Los depósitos epitermales se forman por la actividad de fluidos fértiles ricos en metales, consisten en agua de origen magmática y agua meteórica en varias proporciones. La precipitación de los metales en el fluido hidrotermal se desencadena por el cambio o la fluctuación del estado del fluido (mezcla, enfriamiento, ebullición, etc.), la temperatura de formación comprende temperaturas entre <100 °C y 320 °C aproximadamente y la mineralización ocurre dentro de 1 a 2 Km de profundidad (White & Hedenquist, 1995).

Los depósitos se asocian tanto espacial y temporalmente con rocas volcánicas subaéreas e intrusiones subvolcánicas. La actividad ígnea tiene un papel importante ya que proporciona el calor necesario para generar una fuente de convección hidrotérmica. Las fallas de escala regional en zonas de intensa fracturación tensional ejercen controles importantes (Mitchell & Garson, 1981) pues determinan la localización de los depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmática necesaria para la subsiguiente actividad hidrotermal (Hedenquist & Henley, 1985) y aunque estas ejercen un control directo sobre el emplazamiento la mineralización comúnmente no se encuentra en la estructura regional principal, sino que está situada en estructuras menores con influencia de la permeabilidad y en la distribución de la mineralización. La permeabilidad facilita la fluidez hidrotermal y se relaciona con las fracturas y fallas, los propios fluidos hidrotermales pueden generar permeabilidad dependiendo de la reactividad de las rocas con los fluidos. La alteración hidrotermal se crea simultáneamente con el proceso de mineralización hidrotermal, creando alteraciones alrededor (Figura N°2), depende de las condiciones físicas y químicas del fluido (Sillitoe, 2010).

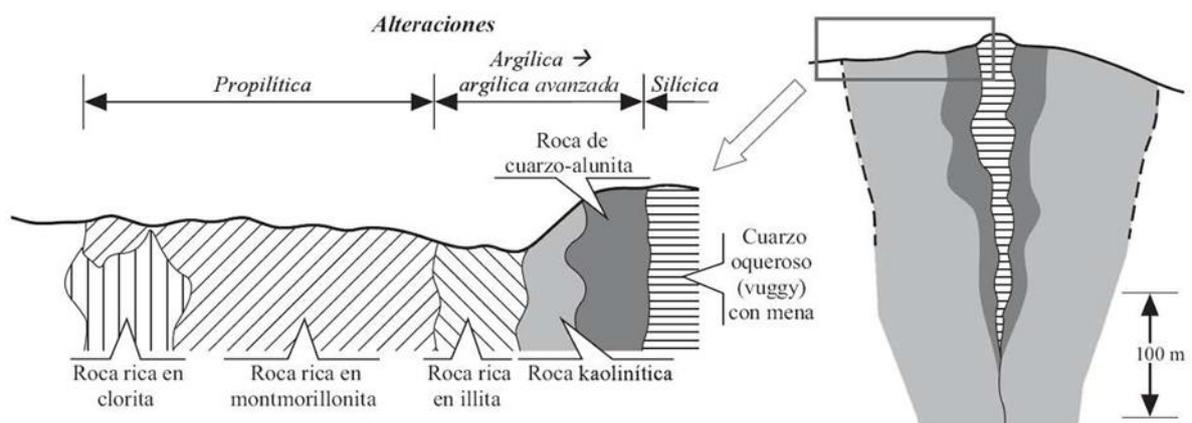


Figura N° 2: Esquema basado en los depósitos de Summitville (Stoffregen, 1987)

Tabla N° 5: Comparación de los sistemas de alta y baja sulfuración (Camprubi y otros, 2003)

	EPITERMALES DE ALTA SULFURACIÓN	EPITERMALES DE BAJA SULFURACIÓN
Rocas volcánicas	Rocas ácidas a intermedias (andesitas-riodacita).	Rocas subaéreas, rocas ácidas a intermedias (andesita-riodacita-riolita).
Controles de emplazamiento	Fallas a escala regional o intrusiones subvolcánicas.	Fallas o zonas de fractura relacionadas a centros volcánicos.
Extensión de la zona de alteración	Área extensa (km ²) y visualmente prominente.	Restringida y visualización sutil, pero puede abarcar áreas extensas.
Alteraciones	Alt. Propilítica: extensa en zonas adyacentes con baja relación agua-roca. Alt. Argílica: en depósitos subsuperficiales bastante alteración argílica. En depósitos someros, presentan un núcleo de sílice masiva con estrechos márgenes de alunita y caolinita. Alt. Argílica avanzada a argílica (+- sericitica). La clorita se presenta raramente.	Alt. Propilítica: extensa en zonas adyacentes con baja relación agua-roca. Alt. Argílica: dominante conforme disminuye la temperatura. Pueden originarse a partir de gases escapados por ebullición en la periferie (alt. Argílica avanzada) o superpuesta por fluidos profundos. Alteración Sericitica a argílica. La presencia de clorita es común.
Minerales importantes en la alteración	Alunita cristalina; en profundidad, pirofilita.	Sericita o illita ± adularia; roscoelita (mica-V) en depósitos asociados a rocas alcalinas; a veces, clorita.
Características distintivas	Presencia de niveles calentados por vapor (niveles superficiales), cuarzo poroso o vuggy (niveles intermedios), mineralización superpuesta a depósitos porfíricos (en profundidad).	Presencia de sínteres y niveles o cobijaduras de calcedonia (niveles superficiales), posible presencia de vetas de sulfuración intermedia en inmediaciones de cuerpos de alta sulfuración (en profundidad).

Carácter de la mineralización económica	Típicamente diseminada, tanto en zona de mica blanca–pirofilita como en sílice masiva. Poco común como relleno de cavidades o porosidad. La mineralización está asociada habitualmente a alteración argílica avanzada, típicamente con abundante pirita.	Característicamente como relleno de cavidades o porosidad, en vetas con contactos netos con el encajante. Típico relleno de filones en bandas, comúnmente con brechificaciones polifásicas. Hacia la superficie se presenta en stockwork o diseminada, según la naturaleza de la permeabilidad primaria y secundaria local.
Metales predominantes	Cu, Au, As (Ag, Pb)	Au, Ag (Zn, Pb, Cu)

3.2. Métodos de Evaluación de Favorabilidad u Ocurrencias

Para predecir y evaluar cuantitativamente recursos minerales existen diferentes enfoques y métodos disponibles cuyo uso dependerá de la complejidad geológica, las condiciones y la disponibilidad de los datos del área relacionados a la configuración de lo que se desea encontrar, al considerar este criterio algunas técnicas serán más efectivas que otras, varios autores recomiendan que tipo de inferencia debería considerarse antes de construir el modelo, estas inferencias son dos: una basada en el conocimiento (Knowledge-driven) y la otra basada en datos (Data-Driven) (Bonham-Carter G. , 1997). Se busca analizar las relaciones entre los depósitos conocidos y un conjunto de datos, que al analizar se puede tratar como zonas objetivo de ocurrencia de depósitos.

Si bien en el primer caso se considera puntos de entrenamiento (evidencia de la presencia de mineralización) para cuantificar los pesos probatorios de manera objetiva y establecer la relación de los puntos con las diferentes capas, se dice que

se elimina la dependencia del criterio del experto tanto como sea posible, no es del todo cierto, pues para la evaluación inicial de los datos siempre se tiene que considerar el criterio basado en el conocimiento del experto, ya que aportará un modelo conceptual de la relación espacial entre un depósito y la importancia relativa a cada dato empleado. Los métodos basados en datos se aplican con mayor facilidad en áreas donde se conocen muchos depósitos o sucesos suficientes para extraer evidencia relacionada.

Tabla N° 6: Métodos de mapeo potencial mineral (Bonham-Carter, 1997).

TIPO	PARAMETROS DEL MODELO	EXAMPLE
Data-driven	Calculo a partir de datos de entrenamiento.	Logistic regression Weights of evidence Natural networks
Knowledge-driven	Estimado por el experto	Bayesian updating Fuzzy Logic Dempster Shafer belief

El modelo basado en el conocimiento se basa en un modelo conceptual de las relaciones espaciales entre los depósitos y la evidencia geológica en otras áreas bien exploradas, el experto considera y decide la importancia relativa de cada evidencia.

El modelo conceptual de prospecto mineral envuelve 3 etapas:

- Modelo conceptual e identificación de parámetros (mapas) considerados como evidencias.
- Construcción de mapas
- Integración de mapas

En este trabajo se consideró 2 métodos basados en datos (Data Driven):

- Peso por evidencia (Weights of evidence)
- Regresión logística (Logistic regression).

3.2.1. Peso por evidencia (Weight for evidence)

Se basa en el modelo matemático Bayesiano que fue desarrollado inicialmente para el diagnóstico médico (Aspinall & Hill, 1983), posteriormente es adaptado, detallado y descrito para la aplicación en el mapeo del potencial mineral por Broham-Carter (1983, 1989, 1994, 1999) y Asterberg (1990, 1993, 2000), Raines (1999) y Carranza y Hale (1999,2000, 2003) entre otros; los cuales aplican en etapas de exploración, si es que hay un número adecuado de ocurrencias o depósitos minerales ya descubiertos.

Este modelo está basado en técnicas de Sistema de información geográfica (SIG) para relacionar los patrones característicos de un evento particular (Agterberg & Cheng, 2002) y cuantificar la asociación espacial entre los depósitos minerales y las características geológicas que los definen.

Este modelo relaciona un área de tamaño total **T** (Figura N°3) dividida en un número de celdas de igual tamaño **S**, entonces $N(T) = T/S$ es el número total de celdas en el área de estudio. Para entenderlo mejor dividimos en dos etapas:

Una probabilidad anterior o previa que corresponde a un número de celdas unitarias que contienen depósitos conocidos $N(D)$ (una deposito por celda) dividido por el número total de celdas del área de estudio $N(T)$, entonces se puede expresar por:

$$P(D) = N(D)/N(T) \quad (1)$$

Ahora la probabilidad posterior se calcula para encontrar el área que representan los depósitos u ocurrencias en una celda unitaria después de considerar la evidencia, a cada celda se le asigna un valor de probabilidad posterior que refleja la probabilidad previa modificada por la evidencia combinada presente dentro del área de la celda.

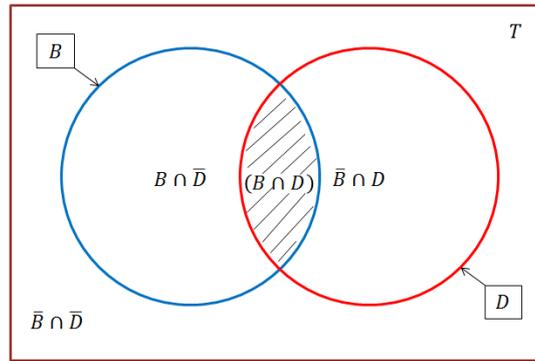


Figura N° 3: Diagrama de Venn, relación espacial entre los patrones de predictores binarios y los patrones binarios de los depósitos=área; B : predictor binario presente; \bar{B} predictor binario ausente; D : depósitos minerales presente; \bar{D} : depósitos minerales ausente.

Entonces ahora existe un patrón predictor binario B , que ocupa $N(B)$ celdas unitarias, y una serie de depósitos conocidos ocurre dentro del patrón, es decir $N(D \cap B)$, entonces la preferencia de localizar una ocurrencia dada la presencia de un predictor y la ausencia de un patrón puede ser expresada por la probabilidad condicional:

$$P(D|B) = \frac{P(D \cap B)}{P(B)} = \frac{P(D)P(B|D)}{P(B)} \quad (2)$$

Ahora la favorabilidad de encontrar un depósito mineral dada la ausencia de un patrón predictor puede ser expresada por la probabilidad condicional siguiente:

$$P(D|\bar{B}) = \frac{P(D \cap \bar{B})}{P(\bar{B})} = \frac{P(D)(\bar{B}|D)}{P(\bar{B})} \quad (3)$$

Donde P es la probabilidad, B es la presencia del patrón dicotómico, \bar{B} es la ausencia de patrón dicotómico, D es la presencia de la ocurrencia del evento.

También, $P(B)$ y $P(\bar{B})$ son las probabilidades previas de estar dentro y fuera del patrón predictor.

$P(D|B)$: Es la probabilidad posterior de la ocurrencia dada la presencia del patrón predictor.

$P(D|\bar{B})$: Es la probabilidad de una ocurrencia dada la ausencia del predictor.

El mismo modelo puede expresarse en una formulación de tipo de probabilidad, donde la probabilidad O , se definen como:

$$O = P/(1 - P) \quad (4)$$

Expresadas como probabilidades, la ecuación 2 y 3, respectivamente, se convierten en:

$$O(D|B) = O(D) \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (5)$$

$$O(D|\bar{B}) = O(D) \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (6)$$

Donde $O(D)$ es la probabilidad previa de una ocurrencia y $O(D|B)$ y $O(D|\bar{B})$ son las probabilidades posteriores de una ocurrencia dada la presencia y ausencia de un patrón predictor binario, respectivamente.

Los pesos para calcular el patrón predictor binario se definen como:

$$W^+ = \log_e \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (7)$$

$$W^- = \log_e \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (8)$$

Donde W^+ y W^- son los pesos de evidencia cuando un patrón predictor binario está presente y ausente, respectivamente. Por lo tanto:

$$\log_e O(DIB) = \log_e O(D + W^-) \quad (9)$$

$$\log_e O(D\bar{I}\bar{B}) = \log_e O(D + W^-) \quad (10)$$

El cálculo de pesos proporciona una medida de la asociación espacial entre los depósitos minerales con ubicación puntual y los patrones de evidencia. Para que haya una asociación positiva el peso tiene que ser un valor positivo, lo que indica que hay más depósitos en una clase de evidencia producida. Un valor negativo indica menor relación entre los depósitos y el patrón, resultando menos depósitos de lo esperado. Si el valor encontrado es cercano a cero o cero, indica que existe una distribución espacial al azar debido a que hay falta de asociación espacial.

La variancia de los pesos (Agterberg, Bonham-Carter, & Wright, 1990) se expresa:

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N(B \cap D)} + \frac{1}{N(B \cap \bar{D})} \quad (11)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{N(B \cap \bar{D})} \quad (12)$$

Los dos pesos son combinados mediante el Contraste (C), este es una medida de correlación entre un patrón y los depósitos conocidos (puntos de entrenamiento). El contraste también se calcula para a cada patrón, y es simplemente la diferencia entre los pesos:

$$C = W^+ + W^- \quad (13)$$

Un valor C grande y positivo indica que el patrón está fuertemente correlacionado con los puntos de entrenamiento, o que es probable que los sitios de entrenamiento ocurran dentro de ese patrón. Un valor C negativo indica una correlación negativa, y es poco probable que los sitios de entrenamiento ocurran dentro del patrón. Estos valores altos pueden ser un indicativo en la exploración.

Ahora el valor de la desviación estándar para el contraste se calcula de la siguiente manera:

$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (14)$$

El valor del Studentized es una ratio entre el valor de C y su desviación estándar, $C/S(C)$, siendo guía para la estadística significativa de la asociación espacial. Un patrón puede ser considerado un predictor útil de los puntos de entrenamiento cuando tiene un gran contraste positivo, y su contraste de Studentized también es suficientemente grande.

$$C/S(C) = C/\sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (15)$$

Bonham-Carter (1989, 1994) indica que para un contraste mayor a 2, es significativamente estadístico.

3.2.1.1. Independencia Condicional (IC)

La IC es una prueba considerada para determinar la relación entre dos variables o eventos, autores como Bonham-Carter G.(1994), Agterberg & Cheng (2002) consideran que para el método, las variables deben ser independientes unos de otros, es decir que la presencia de uno no debe ser influenciado por la presencia o ausencia de otro, por lo que se recomienda realizar una prueba por pares (Carranza, 2002).

Esto solo se determinaría si existe una coincidencia espacial entre las variables predictoras, la relación entre los patrones siempre será mayor a cero; caso contrario si la relación es cero no se cumpliría la IC y no existiría superposición. Puede existir alta correlación espacial de los valores de probabilidad entre dos eventos, se recomienda la omisión de uno de los eventos o combinación con otro evento más adecuado.

En este trabajo consideramos que todas las variables obtenidas se correlacionan espacialmente, y bajo el concepto anterior existirá la dependencia condicional, pero al tratarse de un trabajo con fines exploratorios establecemos que son independientes uno del otro pues el resultado de cada patrón o variable está en función de las relaciones teóricas con modelo de yacimientos y sistemas geológicos visibles u ocultos, entonces la independencia condicional no será necesaria calcularla. Raines (1999) considera que cuando la IC no puede eliminarse el resultado deben ser considerados como una clasificación ordinal.

3.2.2. Regresión Logística

Este modelo ha sido aplicado en las últimas décadas en estudios cuantitativos para el mapeo de potencial mineral, inicialmente Agterberg (1974) y Chung (1978) lo adaptaron, posteriormente lo aplican Chung & Agterberg (1980), además de estudios realizados por: Agterbeg (1989), Carranza y Hale (2001), Bonham-Carter y Chung (1983), Reddy (1991), entre muchos otros.

Este modelo es considerado el más adecuado para estudiar variables dicotómicas, las que pueden tomar cualquier forma, sin suponer una distribución normal.

Para obtener un mapeo de potencial es necesario tener el número de depósitos minerales que determinaran la presencia o ausencia (0 y 1) de estos en una celda,

que puede ser considerado como variables dependientes en los modelos de regresión y relacionado a las diferentes variables geológicas.

La probabilidad de que ocurra está determinada por numerosas variables de un ambiente geológico y es favorecido sobre otros modelos como la regresión lineal ya que restringe la probabilidad de uno a cero y elimina la dependencia condicional (Carranza, 2002).

Para este caso se usan celdas de igual tamaño. La regresión múltiple logística permite formar una relación de regresión multivariante entre una variable dependiente y varias variables independientes, estas pueden ser continuas o categóricas. Cuantitativamente la relación entre la ocurrencia y su dependencia de varias variables puede expresarse de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{(1 + e^{-z})} = \frac{e^z}{(1 + e^z)} \quad (18)$$

$$\log it (P) = \log_e \left(\frac{P}{1 - P} \right) = z \quad (19)$$

Donde **P** es la probabilidad de que ocurra el evento.

La probabilidad varía, como se mencionó antes, entre 0 a 1 en una curva en forma de S y Z es la combinación lineal. La regresión logística implica ajustar los datos a una ecuación de la forma:

$$Z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (20)$$

Donde b_0 es la intersección del modelo.

b_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) son los coeficientes de pendiente del modelo de regresión múltiple logística.

x_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) son variables independientes.

La Regresión logística busca un mejor ajuste como lo hace en la Regresión lineal, pero sus principios son diferentes. En primera instancia se usa el método de verosimilitud (Chung & Agterberg, 1980) indicado por la ecuación:

$$\prod_{i=1}^m P \prod_{j=m+1}^n (1 - P) \quad (21)$$

El modelo formado es entonces una regresión múltiple logística para la presencia o ausencia de los depósitos (condiciones presentes) en las variables independientes (condiciones previas).

Los coeficientes encontrados pueden ser usados a la vez para determinar los odds para las variables independientes del modelo anterior,

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO DE DATOS

Para este estudio se usan dos conceptos para los datos en el cálculo de los valores categóricos: nominales y ordinales, según la variable que se quiere representar. Los datos nominales no están ordenados, los valores numéricos asignados a cada grupo o clase solo representan un código, estos se evalúan con respecto a los sitios de entrenamiento y usando los pesos categóricos.

Los datos ordinales son datos ordenados y representan valores medidos (concentraciones, intensidades, etc), dándoles una escala de menor a mayor, para probar que los sitios de entrenamiento deberían estar más asociados con un valor alto (proximidad a las características), esto ayuda a seleccionar una zona adecuada alrededor de la característica positiva con $W+$ y C altos, que indican una fuerte correlación con los sitios de entrenamiento.

4.1. Fuente de datos

Los datos empleados están disponibles sin costo para el público en general.

- Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
- Web del GEOCATMIN (INGEMMET): Se obtuvieron los datos de Geología Regional, datos de geoquímica (muestras geoquímicas de sedimentos de arroyo obtenidos entre los años 2002 y 2009. Los puntos de entrenamiento u ocurrencia de depósitos minerales constituyen la evidencia de mineralización de Au y Ag, siendo un total de 132 puntos para la zona de estudio.

4.2. Geología

- Fuente de datos: Geología Regional de la plataforma del GEOCATMIN (INGEMMET).

Se emplearon mapas geológicos de 18 cuadrángulos que cubren el área, a escala 1/100000. Debido a la gran extensión del área de trabajo y al limitado número de ocurrencias minerales, no siendo suficientes para definir grupos más específicos, se consideró necesaria reducir y agrupar la información geológica a 10 grupos (Ambientes geológicos), garantizando que un número menor de clases proporcione pesos más estables (Bonham-Carter , 1994).

Se tomó como referencia los ambientes geológicos definidos en el estudio de recursos minerales por Franjas (Dirección de Geología Económica y Prospección , 2002) la edad y la litología.

La siguiente tabla muestra las diferentes formaciones agrupados en ambientes:

4.3. Estructuras

- Fuente de datos: información obtenida de la Geología Regional GEOCATMIN (INGEMMET).

Tabla N° 7: Agrupación de las formaciones geológicas en diferentes ambientes.

AMBIENTE DEFINIDO	UNIDADES GEOLÓGICAS
Depósitos Cuaternarios	Depósitos aluviales, aluviales-coluviales, fluvial, glaciár, lacustrino, proluvial, químico-travertino.
Intrusivos Cretácico-Paleógenos	Super unidad Inacahuasi (tonalita), Super unidad Linga (Monzonita), Super unidad Tiabaya (Diorita, granito, granodiorita, tonalita) Intrusivo Choquechambe (Diorita, granodiorita), intrusivos dioríticos, gabros, granito-tonalita, Tonalita, Tonalita-granodiorita.
Intrusivo Paleozoico	Batolito Atico-Camaná (Granito)
Metamórfico Proterozoico-Paleozoico	Complejo Basal de la Costa (Gneis, Gneis migmatítico)
Sedimentario Jurásico-Cretácico	Formación Arcurquina, Ashua, Cachios, Puente, Gramadal, Hualhuani, Labra, Chilcane, Murco, Murco, Seraj, Scocosani.
Sedimentario Paleógeno-Neógeno	Formación Huanca (Huasamayo, Querque, Tarucani), Moquegua, Ocoruro, Pisco y Sotillo.
Volcánico Cuaternario	Depósitos volcánicos (bloques y ceniza), Formación Pusa, Formación Santo Tomas, Grupo Andagua, Grupo Barroso (flujos andesíticos, traquiandesíticos, dacíticos, tobas de cristales, tobas soldada vitrificada)
Volcánico Jurásico-Cretácico	Formación Chocolate y Subvolcánicos Dacíticos
Volcánico Neógeno-Cuaternario	Formación Arma, Formación Capillune, Sencca, Grupo Barroso (andesitas, andesitas porfiríticas, dacitas, domos andesíticos, tobas, lavas vesiculares, tobas de cristales, tobas vesiculares, toba)
Volcánico Paleógeno-Neógeno	Andesitas, Dacitas Chinchon, Dacitas, Domos riolíticos, Formación Alpabamba, Formación Ichocollo, Formación Orcopampa (Aicaje, Manto y Santa Rosa), Grupo Maure, Grupo Nazca, Grupo Palpa, Grupo Sillapaca, Grupo Tacaza (Flujos de barro, ignimbritas, conglomerados volcarenitas), Andesita Jatun Sallaco.

La identificación de estructuras es uno de los principios importantes en la exploración de depósitos minerales, ya que guardan una estrecha relación de proximidad con el emplazamiento en zonas de debilidad ocasionadas para la mineralización.

Las estructuras se obtuvieron de los mapas geológicos a escala 1/100000, a esta información se adicionó la identificación de lineamientos con el uso de modelos de sombras (Hillshade) elaborados a partir del modelo de elevación SRTM a 30 metros por pixel, imágenes RADAR orto rectificadas, anáglifos y composiciones color 321 de imágenes ASTER (Figura N° 4). Considerando la tectónica de la zona durante el Mioceno y las principales estructuras que controlan la mineralización en los depósitos, se consideró agruparlas de acuerdo a:

- La importancia en la identificación durante el cartografiado geológico plasmado en los mapas geológicos como se muestra en la Tabla N°8. Estas fallas y lineamientos identificados tienen predominancia en la dirección andina, siguiendo la dirección de las grandes fallas regionales.

Tabla N° 8: Categorías para fallas identificadas

ID	CATEGORÍA
Fallas (Normal, Inversa, Sobreescurreamiento)	1
Fallas Ineridas (Normales, Inversas, Sobreescurreamiento)	2
Lineamientos	3

- La orientación de las estructuras agrupadas en familias, ya que la presencia de los depósitos minerales a escalas más locales se relaciona a orientaciones perpendiculares a las direcciones principales de las fallas a gran escala. Estas estructuras tienen varias direcciones (Tabla N°9), los NW conforman la mayor parte y siguen la dirección andina, los EW destacan más entre el segmento Arequipa y Paracas limitados por la falla Iquipi-Clavelinas y próximas al complejo Sabancaya-Ampato; los NE son menos frecuentes, los NS mucho menos frecuentes sin ninguna asociación en particular.

Todas las fallas se almacenaron en un formato vectorial (Shapefile) tipo línea crear un mapa Raster con tamaño de pixel de 30m (Mapa N°4).

Se empleó la herramienta Kernel Density del ArcGis que calcula la densidad de entidades (En este caso líneas que representan fallas) basado en el cálculo predeterminado de un radio de búsqueda, la configuración espacial y el número de entidades utilizadas, para expandir la cantidad conocida de la población de las entidades (ArcGis Pro).

Tabla N° 9: Categoría según la orientación de las fallas

ID	CATEGORÍA
EW	1
NE	2
NS	3
NW	4

El resultado obtenido es una muestra de intensidad de entidades (Mapa N°5), de tal manera que las líneas más cercanas y próximas tengan valores más altos y a medida que va aumentando la distancia disminuirá los valores de intensidad hasta llegar a cero en la distancia del radio de búsqueda desde la línea.

4.4. Geoquímica

- Fuente de datos: información obtenida del servidor GEOCATMIN (INGEMMET).

Los datos de geoquímica de sedimentos se colectaron en diferentes campañas realizadas como parte de los proyectos de investigación del Instituto Geológico Minero

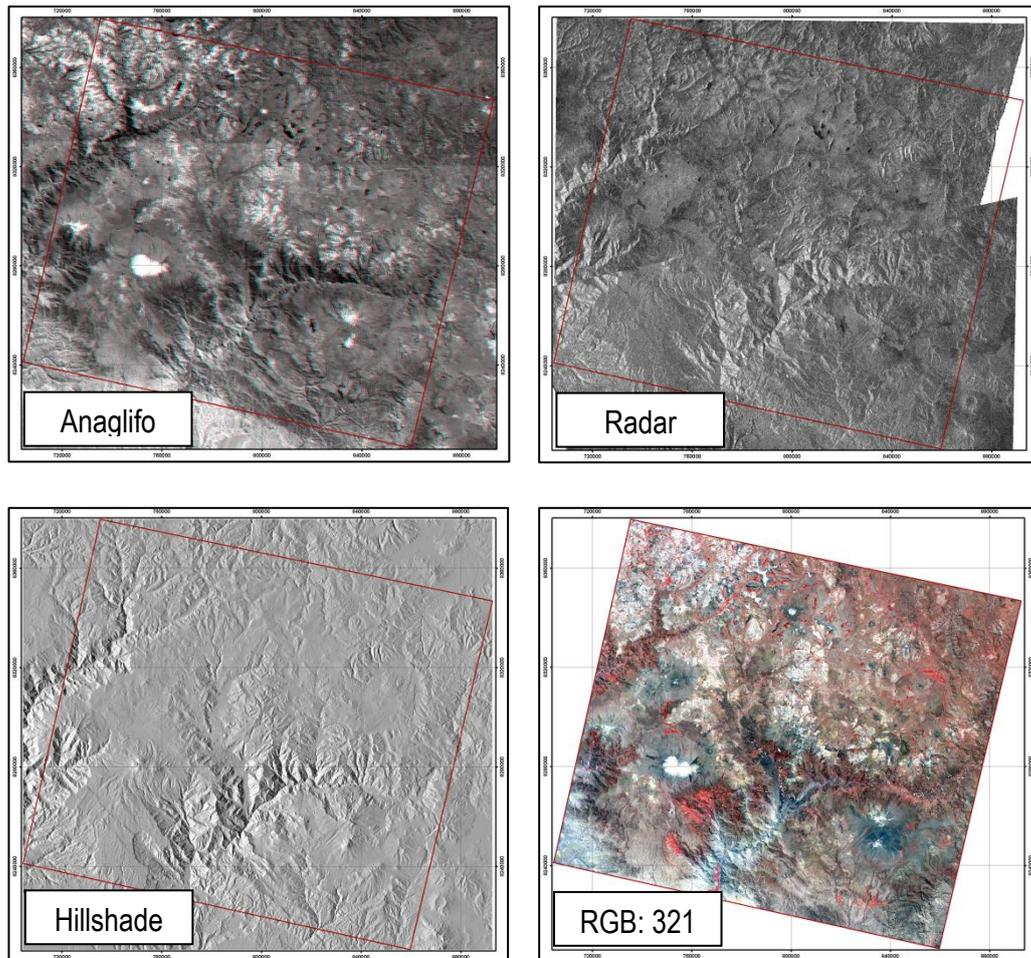


Figura N° 4: Productos de imágenes satelitales usados para identificación de estructuras.

y Metalúrgico (INGEMMET) como el estudio de recursos minerales del Perú- Franja N°2 realizado en el año 2002 y algunos datos de sedimentos activos recolectados durante el estudio de geoquímica ambiental de la cuenca del río Camaná-Majes-Colca del año 2008. Estos fueron descargados en formato shapefile (puntos), y se seleccionaron 645 muestras dentro del área de estudio (Mapa N° 6).

Debido a la necesidad de tener un mapa con una distribución global de las muestras de oro y plata teniendo en cuenta que el área de estudio es regional, se ve por conveniente a realizar una interpolación de inverso a la distancia ponderada (IDW)

que determinará los valores de celda a través de una combinación ponderada en función de la distancia de las muestras. Para el análisis general se observa todos los datos por elemento geoquímicos, seguido de una depuración de datos que tengan valores de 0, que no estén reconocidos (NA) y que estén por debajo del límite de detección (Rivera, 2007), ya que puede dar una alta desviación estándar, valores altos y bajos erráticos.

Un análisis básico con la estadística descriptiva se realiza a los datos para ajustar los datos a la curva de Gauss (Distribución aritmética o logarítmica) para obtener valores de: media, mediana, desviación estándar (Tabla N°10 y Figura N°6), y finalmente obtener una distribución de los valores para el Au y Ag (Mapa N°7 y N°8 respectivamente).

Tabla N° 10: Estadística para el Au

ELEMENTO	MIN	MAX	MEDIA	DS	T	A
Au (ppb)	2	1700	9.55	5.32	14.87	25.5
Ag(ppm)	0.1	126.2	0.7	0.5	1.3	1.8

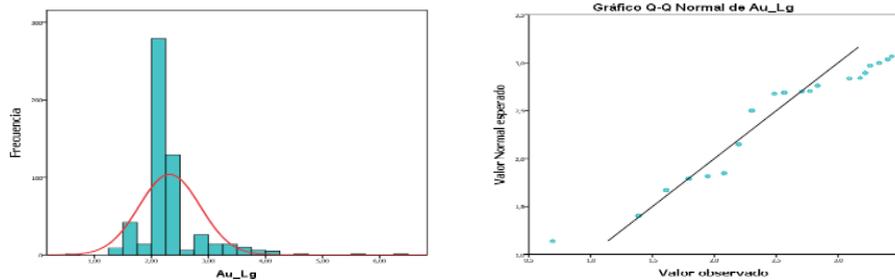


Figura N° 6: Distribución del Au.

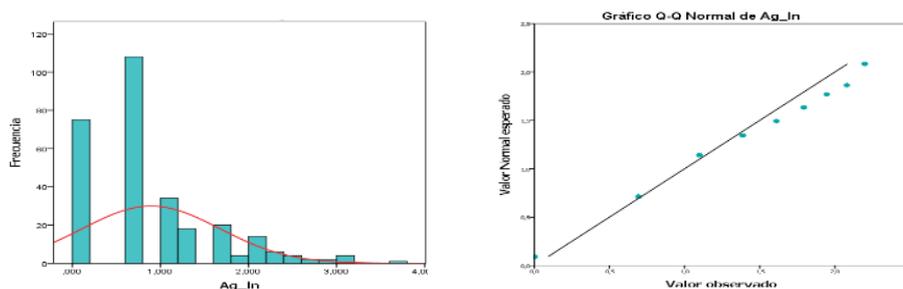
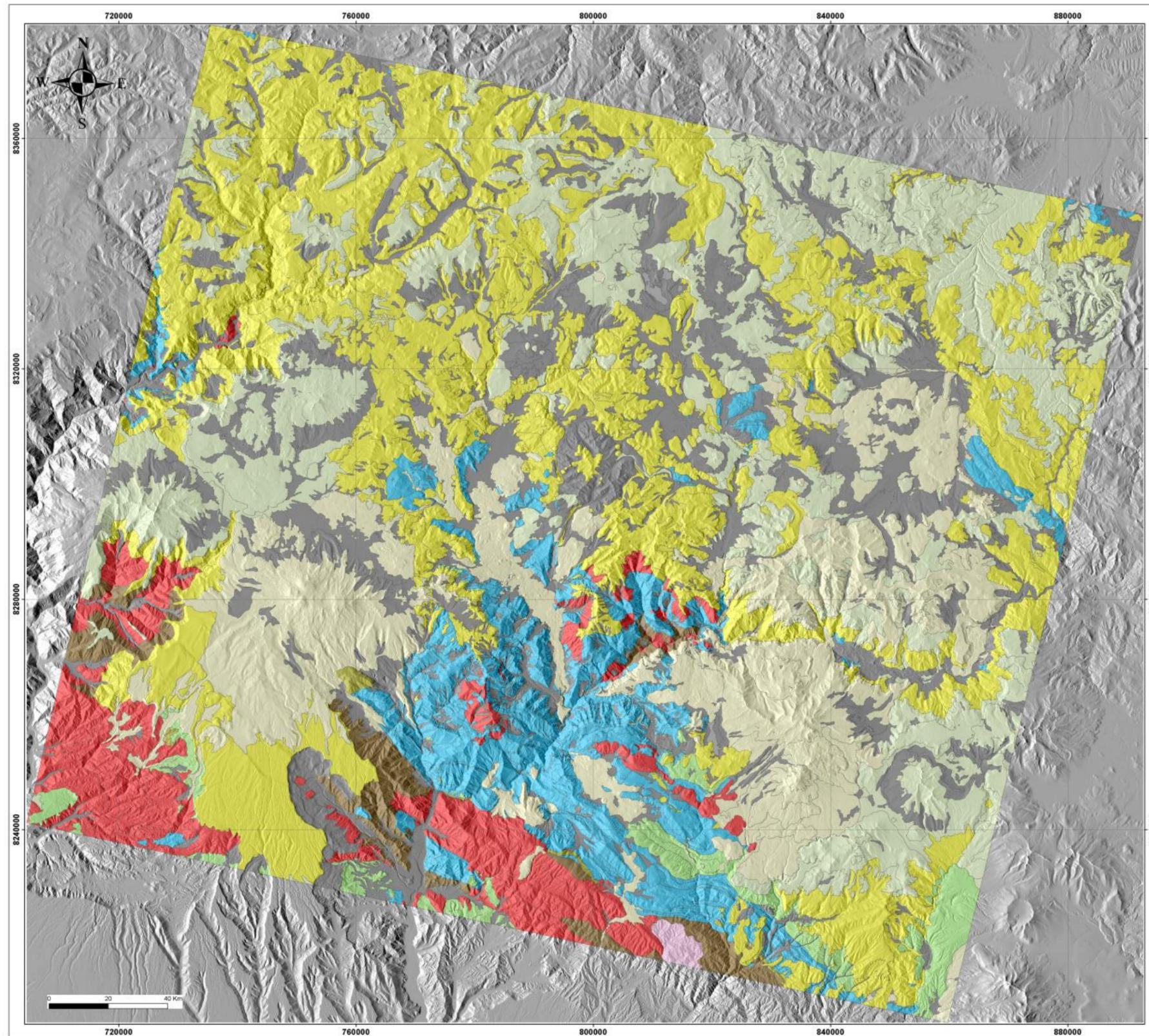


Figura N° 6: Distribución de la Ag.

Mapa N° 3: Ambientes geológicos definidos



AREQUIPA
 AREA DE TRABAJO

LEYENDA	ÁMBIENTES
	Depósitos Cuaternarios
	Intrusivo Cretácico-Paleogeno
	Intrusivo Paleozoico
	Metamórfico Proterozoico-Paleozoico
	Sedimentario Jurásico-Cretácico
	Sedimentario Paleógeno-Neógeno
	Volcánico Cuaternario
	Volcánico Jurásico-Cretácico
	Volcánico Neógeno-Cuaternario
	Volcánico Paleógeno-Neógeno


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN
 FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLOGICA

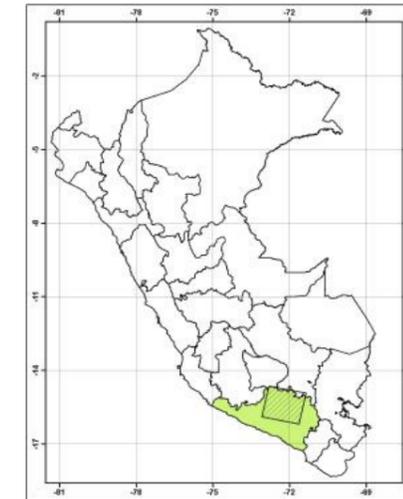
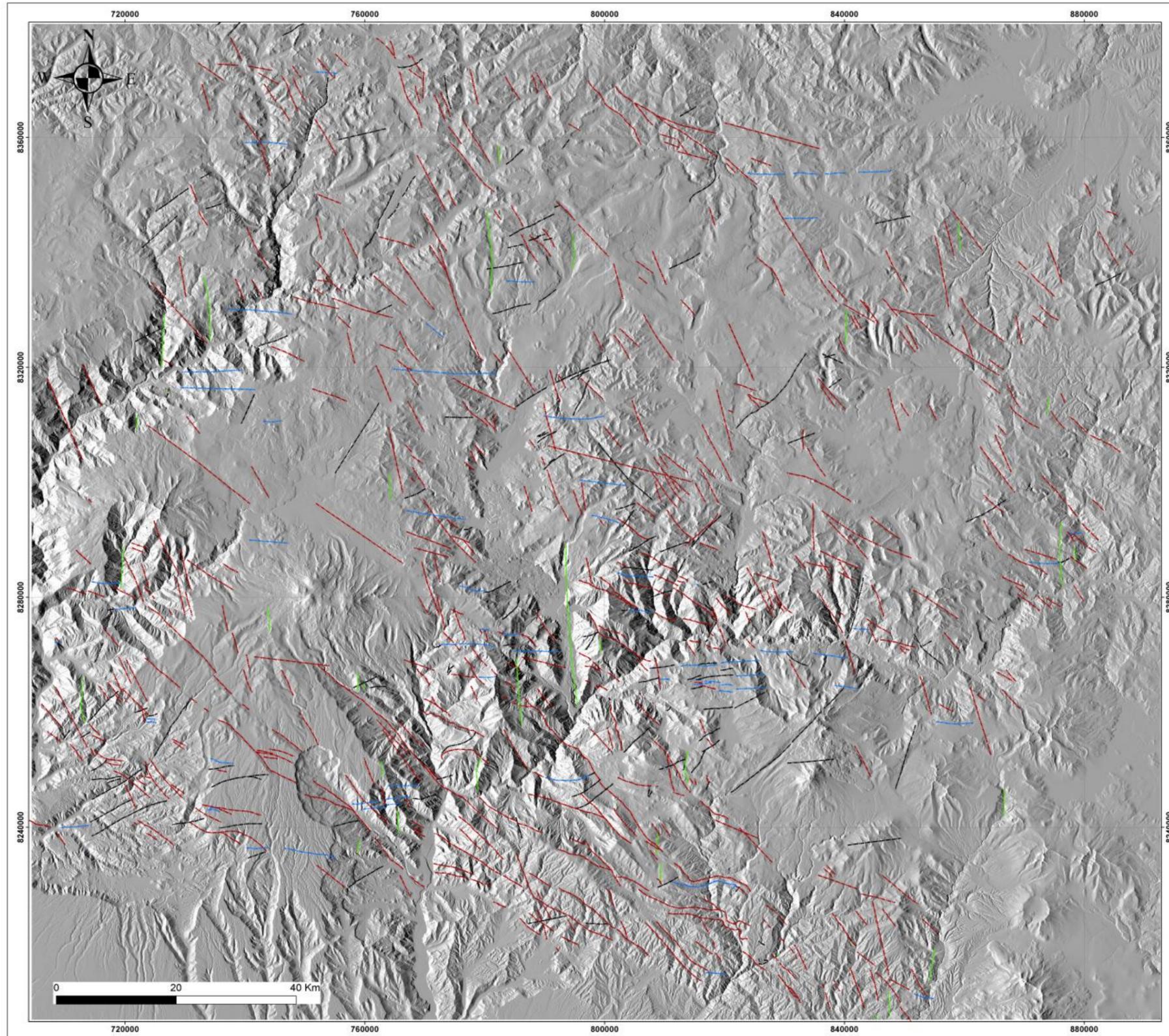
INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO
 DIRECCIÓN DE LABORATORIOS

Plano: **Ambientes geológicos**

Elaborado por: **Yngrid Greysi Orozco Yaulli**

Proyección: UTM WGS-84 18S Escala: 1/250000 Fuente: Elaboración Propia

Mapa N° 4: Estructuras geológicas seleccionadas según su orientación.

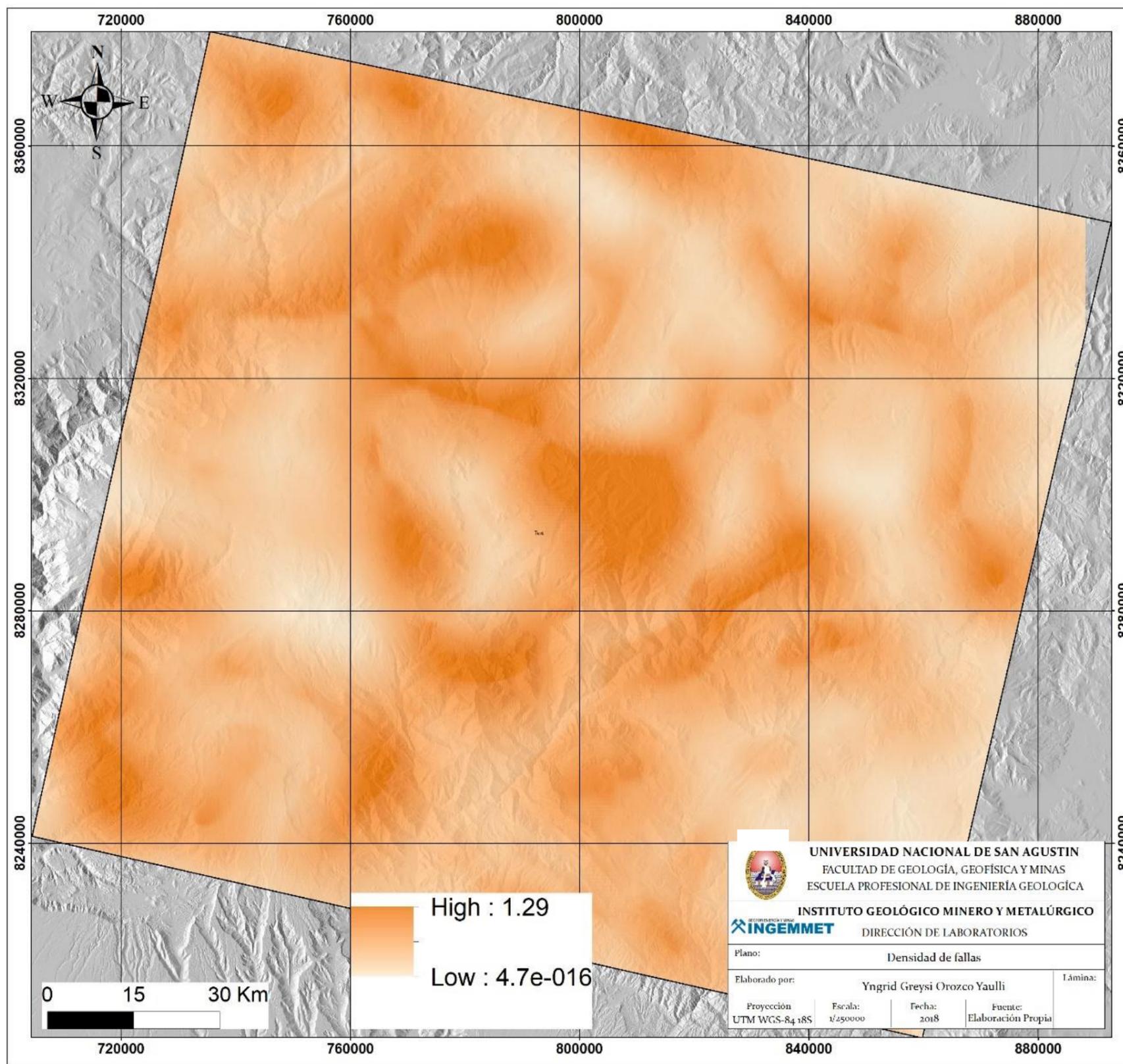


AREQUIPA
 AREA DE TRABAJO

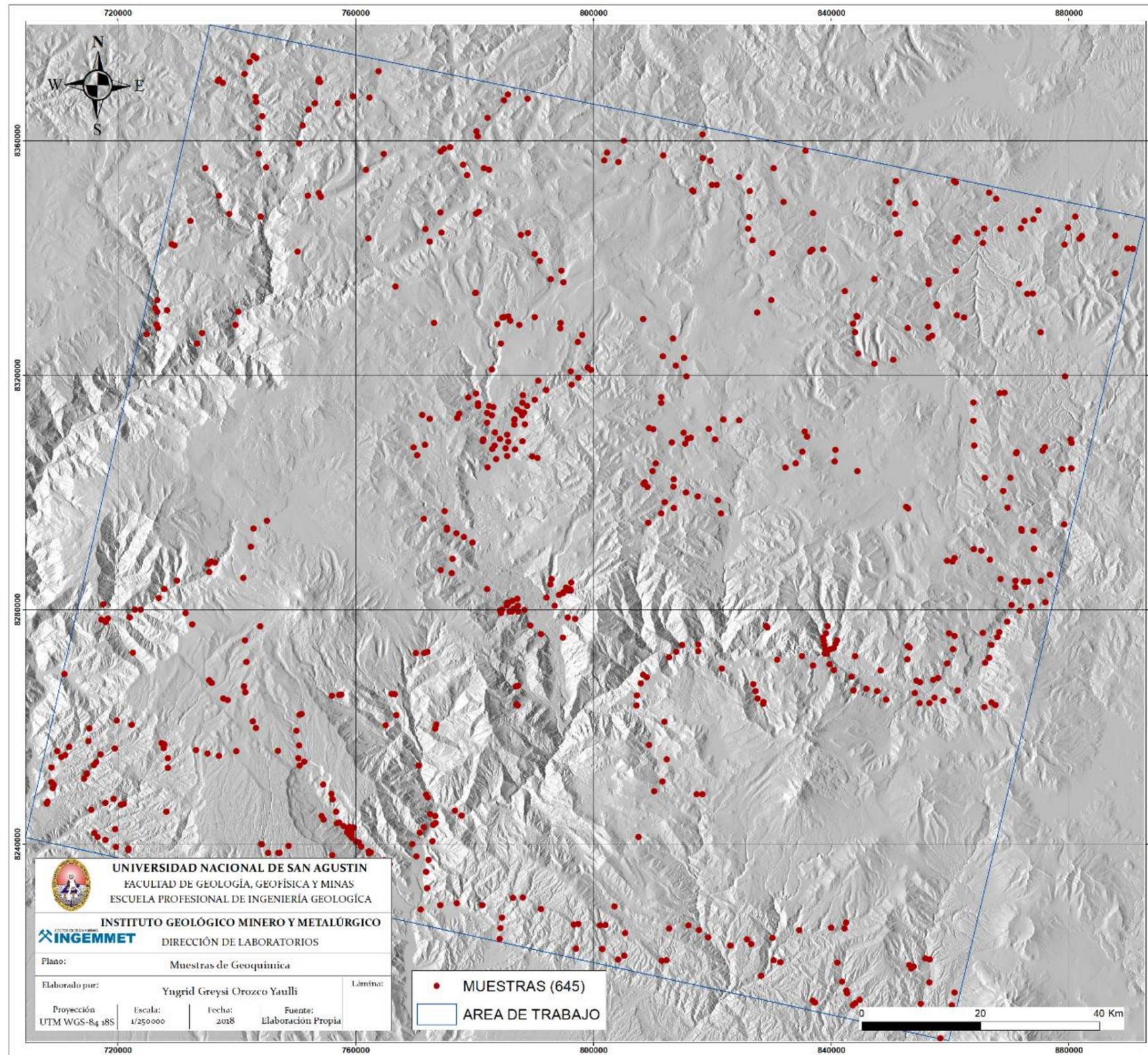
ORIENTACIÓN	
	EW
	NE
	NS
	NW

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLOGICA	
INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO DIRECCIÓN DE LABORATORIOS	
Plano: Orientación de estructuras	
Elaborado por: Yngrid Greysi Orozco Yaulli	
Proyección: UTM WGS-84 18S	Escala: 1/250000
Fuente: Elaboración Propia	

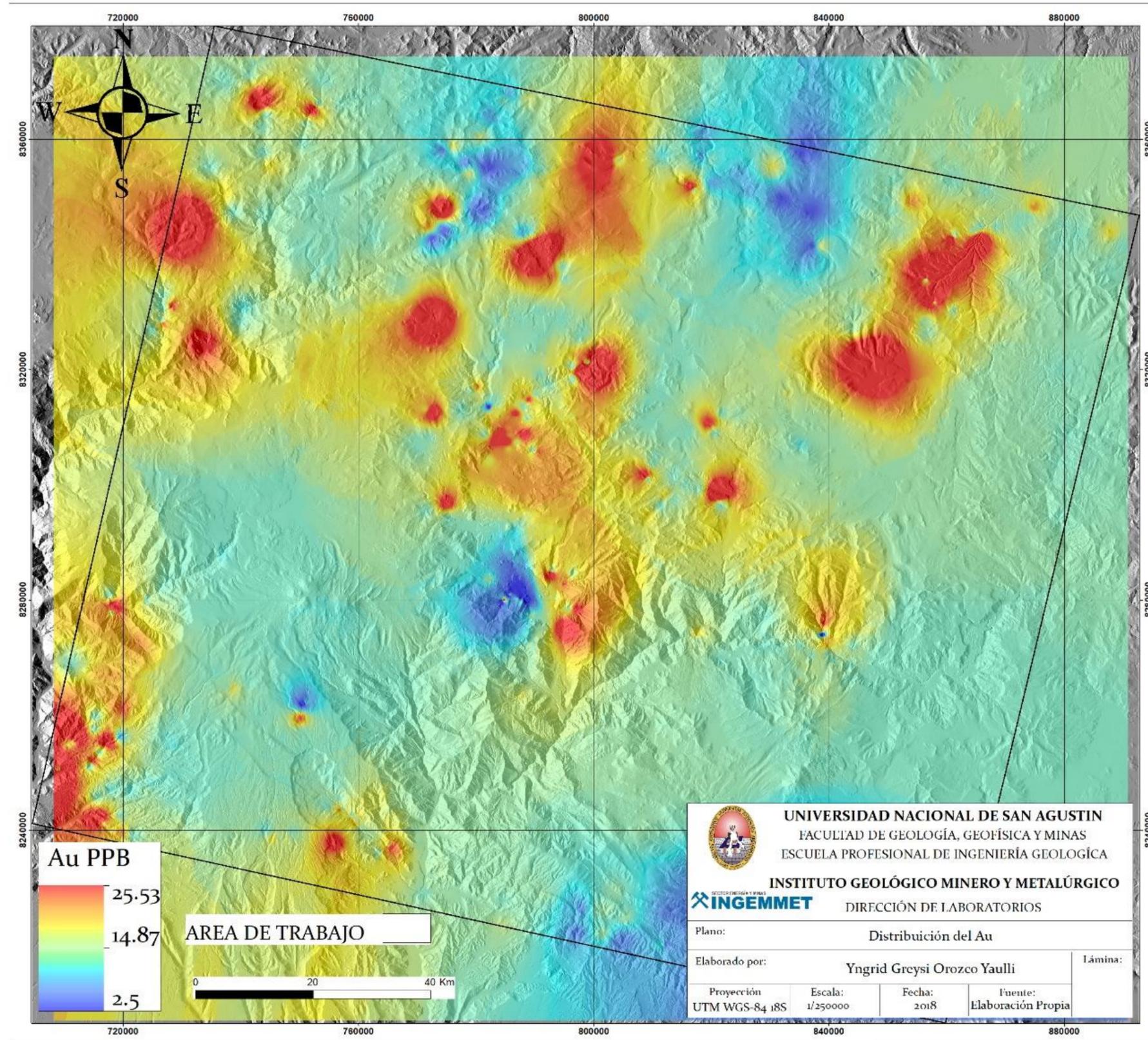
Mapa N°4: Densidad de estructuras (Fallas y lineamientos).



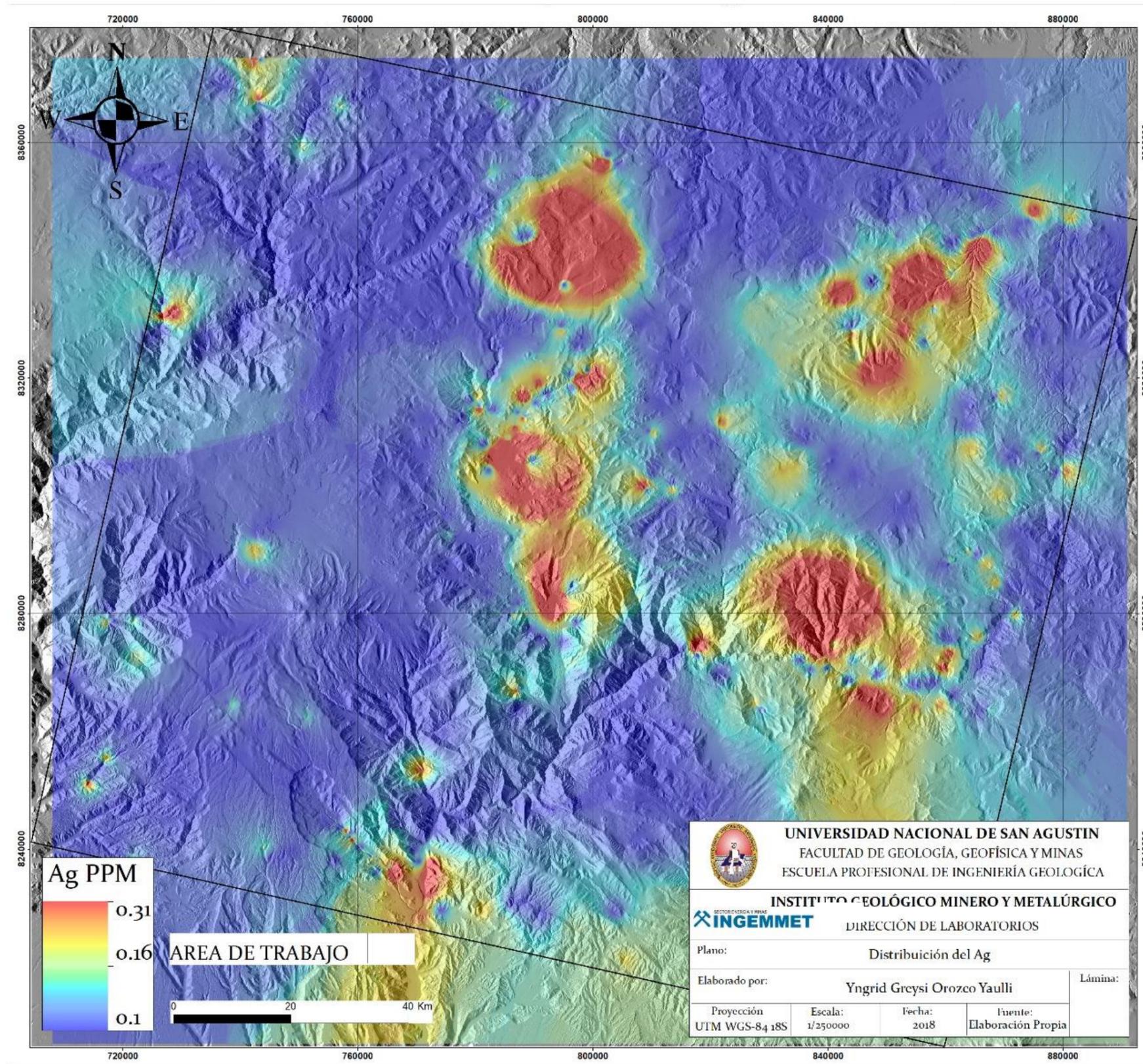
Mapa N° 5: Distribución de datos geoquímicos.



Mapa N° 6: Anomalias geoquímicas del Au.



Mapa N° 7: Anomalías geoquímicas de la Ag.



4.5. Teledetección

Técnica que puede obtener información de un objeto sin estar en contacto directo con él, obteniendo imágenes captadas por sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvienco, 1995), mediante una interacción a través de flujo energético, para posteriormente ser almacenarla y tratarlas para diferentes aplicaciones. Un sistema de teledetección está constituido por varios elementos (Figura N°7):

- Fuente de energía: origen del flujo energético o energía radiante detectado por el sensor, el cual puede ser activo (Energía solar) y pasivo (Fuente artificial).
- Superficie terrestre: constituida por diferentes coberturas como la vegetación, suelo, agua, nieve que reflejan o emiten energía captada de acuerdo a sus características físicas, químicas y de rugosidad.
- Atmósfera: medio que existe entre el sensor y la superficie terrestre, donde interactúa la energía.
- Sensor: recibe la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera, influye en la geometría de la toma y la calidad de los datos.
- Receptor: fuente de recepción.
- Sistema de almacenamiento: recibe la energía grabada por el sensor, aquí los datos se procesan y son convertidos a imágenes digitales.

4.5.1. Espectro Electromagnético

Flujo radiante o radiación electromagnética que es detectado por los sensores en las plataformas espaciales. La energía electromagnética ha sido definida tanto como onda (Teoría ondulatoria) y como fotón (Teoría cuántica) cuyas características están definidas por la frecuencia y la longitud de onda (Figura N°8). Cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia puede ser descrita

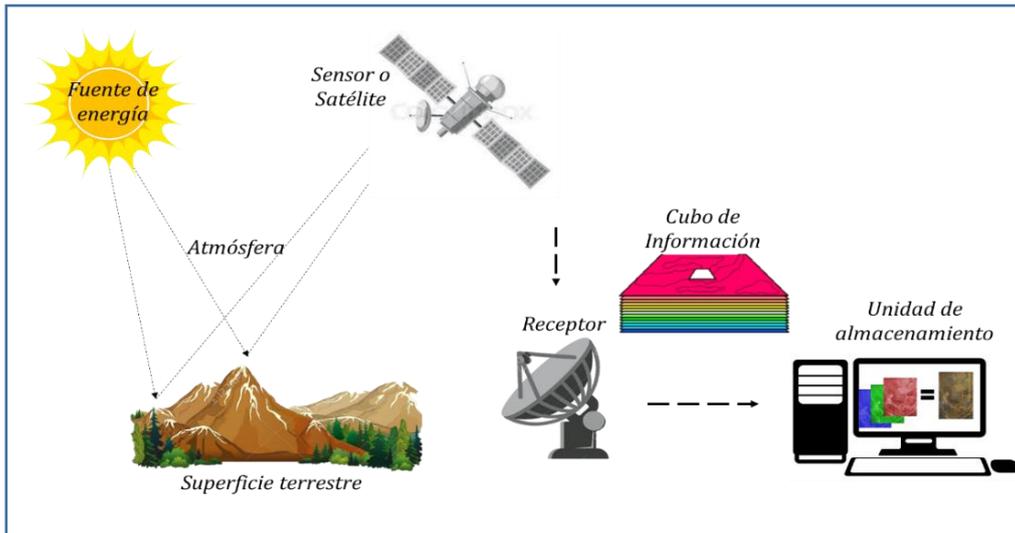


Figura N° 7: Elementos de la Teledetección.

como una sucesión de valores continuos, estableciendo bandas donde la radiación electromagnética tiene un comportamiento similar, a esta organización la denominan espectro electromagnético (Chuvienco, 1995).

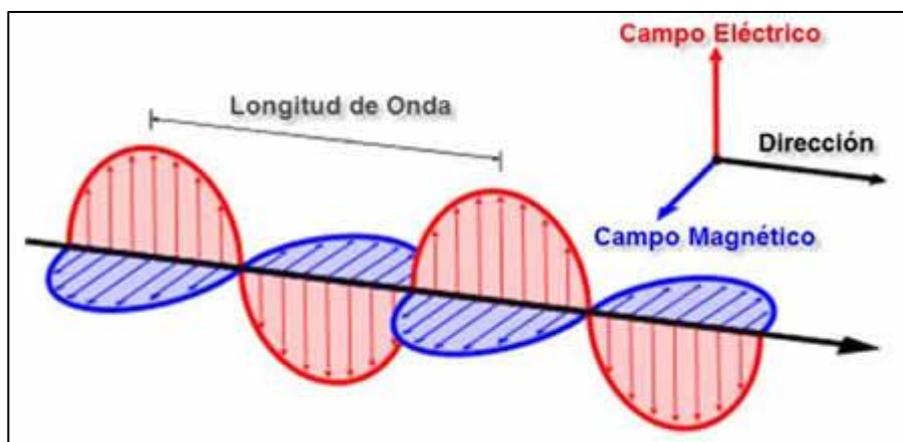


Figura N° 8: Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético (Figura N°9) constituye una gama de diversos tipos de radiación electromagnética que corresponden a distintos niveles de energía, dividido en regiones como:

- La región visible (VIS 0.4- 0.7 μm): corresponde a las energías observadas

por ojo humano coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar, siendo una pequeña región del espectro.

- Infrarrojo próximo (0,7-1,3): Se puede discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3-8): se entremezclan procesos de reflexión de la luz y la emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (8-14): se detectan los procesos de emisión de la superficie terrestre.
- Micro – ondas (1mm-1m), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

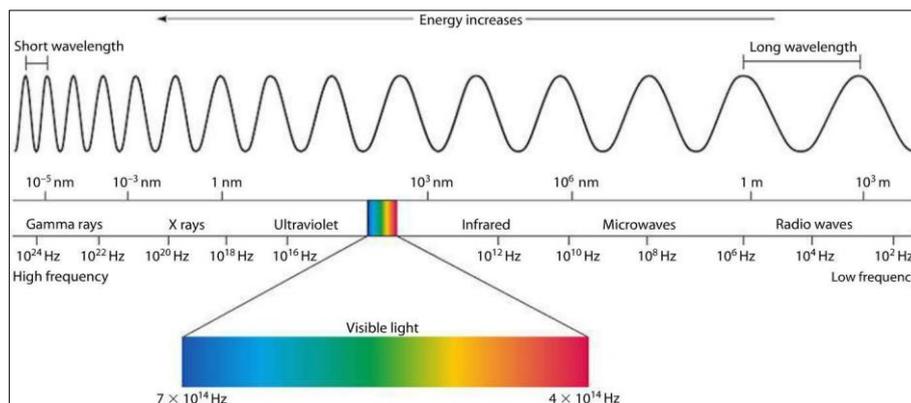


Figura N° 9: : Región del Visible en el espectro electromagnético, sacado de https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html.

4.5.1.1. Interacción del Espectro Electromagnético con la Atmósfera

El espectro electromagnético debe pasar atreves de la atmósfera que contiene oxígeno, nitrógeno y cantidades significativas de vapor de agua, ozono y dióxido de carbono; todos estos son absorbentes eficientes de la radiación solar en longitudes de onda específicas. Aproximadamente el 50% del espectro electromagnético se pierde, porque ninguna de las energías correspondientes puede penetrar la atmósfera a la superficie y regresar. Las bandas que pasan relativamente intactas a través de la

atmósfera se denominan "ventanas atmosféricas", donde se pueden adquirir datos de teledetección (Lillesand & Kiefer, 1994). Otra interacción entre el EM y la atmósfera es la dispersión, como resultado de la difusión de la radiación por la materia.

4.5.1.2. Interacción del Espectro Electromagnético con la roca

Una roca se puede considerar como el ensamble de varios minerales, y a la vez los minerales como un conjunto de compuestos químicos definidos por los elementos, que se disponen en 6 clases cristalográficas. Los componentes más comunes de rocas y minerales son O₂, Si y Al, junto con diferentes proporciones de Fe, Mg, Ca, Na y K, y cantidades más pequeñas de otros elementos. Los átomos de O₂, Si y Al tienen electrones cuyos niveles de energía son tales que las transiciones entre ellos tienen poca o ninguna influencia en el rango de Infrarrojo cercano a visible, los espectros de los minerales están dominados por los efectos de los iones menos comunes y las estructuras moleculares en las que están unidos. Las características espectrales de los minerales (absorción y reflexión de energía) están controladas por características químicas y físicas de la misma, su composición y la distribución de átomos en la estructura cristalina. La absorción es causada por la transición entre los distintos niveles de energía y diferencias de composición. La región de VIS/NIR detecta los efectos debido a varios procesos electrónicos (transición electrónica) que muestran mecanismos tales como: efectos de campo de cristal (energía atómica) y transferencia de carga (transiciones electrónicas entre elementos) y los fenómenos de cambios de color (Hunt & Salisbury, 1971).

En la región del SWIR (Infrarrojo de onda corta) se detectan los procesos vibracionales que están en función de la composición mineral, debido a la absorción de energía dentro de la red cristalina que proviene de las transiciones entre diferentes

estados de vibración, todos estos tipos de interacciones muestran las características espectrales de varios minerales típicos que contienen hierro (Fe), minerales que contienen hidroxilo (OH) y minerales de carbonato (CO₃²⁻) y enlaces del catión OH como Al-OH, Mg-OH, Fe-OH (Goezt & Rock, 1985; Hunt & Salisbury, 1971) etc.

4.5.2. Imágenes ASTER

- Fuente de datos: Plataforma de descarga de imágenes ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) de la página web: <https://earthdata.nasa.gov/> .
- Desde el 1 de abril de 2016, el centro LP DAAC de la NASA comenzó a distribuir imágenes ASTER a todo el mundo sin costo alguno.
- La distribución global de estas imágenes sin cargo es el resultado de un cambio de política hecha por la NASA y Japón.

ASTER es un sistema avanzado de imágenes multiespectrales lanzados a bordo del satélite TERRA lanzado en el año de 1999, con el objetivo de mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmósfera. Cubre una amplia región espectral con 14 bandas desde el visible al infrarrojo térmico.

Adicionalmente presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral (Banda 3B) que permite realizar modelos digitales de terreno (ASTER User Handbook, 2000). Presenta 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno con características que varían en resolución espacial y espectral como muestra en la Tabla N°11:

4.5.2.1. ASTER aplicado a la geología

Debido a su alta sensibilidad de los minerales de alteración, ha propiciado el incremento de usuarios y búsqueda de aplicaciones a lo largo de los años. En general la comunidad geológica utiliza los sensores multiespectrales para cartografiar estructuras (Fallas, pliegues, fracturas) e identificación de mineralogía que se encuentra en la superficie cuyas relaciones entre bandas sirven para identificar conjuntos minerales o grupos minerales (Van der Meer F. , y otros, 2012).

Las aplicaciones van desde el mapeo litológico hasta la identificación de minerales de alteración utilizando los sub sistemas VNIR, SWIR y TIR, aplicado por Rowan & Mars (2003), Ninomiya (2002, 2004), Corrie & Ninomiya,(2010), Castro Godoy (2007) entre otros.

Tabla N° 11: Numero de bandas y rango espectral y espacial de las imágenes ASTER.

SUBSISTEMA	N° BANDA	RANGO ESPECTRAL (µM)	RESOLUCIÓN ESPACIAL	NIVELES DE CUANTIFICACIÓN
VNIR	1	0.52-0.60	15 metros	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30 metros	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475	90 metros	12 bits
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

4.5.2.2. Procedimiento

Se descargaron 12 imágenes ASTER L3 DEM (Mapa N°9) producto AST14OTH (ASTER User Handbook, 2000) que contiene: un modelo de elevación (DEM) y 14 bandas en formato TIFF orto rectificadas es decir transformadas a una perspectiva ortogonal con proyección UTM y vista casi vertical, proporcionando radiancias verdaderas con respecto al terreno.

Se procuró que las imágenes descargadas sean de un mismo Path y tengan la misma fecha para que no haya muchas variaciones en los valores de radiancia.

a. Calibración VNIR-SWIR

Los sensores captan la información de intensidad de radiación electromagnética en superficie de la tierra y lo almacenan como números digitales (ND) por cada banda espectral. En la Figura N°10 se muestra el procedimiento para calibración de las imágenes y en la Figura N°12 la modificación de la firma espectral con las correcciones aplicadas:

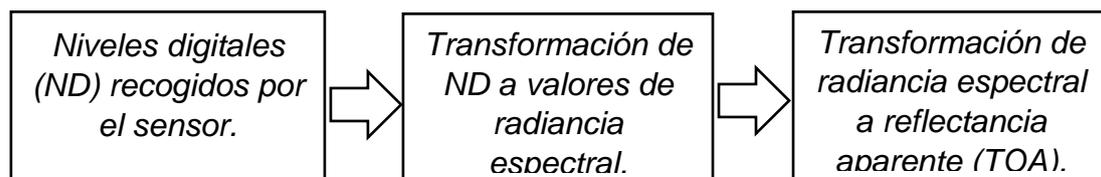


Figura N° 10: Procedimiento para la calibración de imágenes ASTER: Subnivel VNIR-SWIR.

a. Corrección radiométrica VNIR-SWIR

Los valores ND se transforman a Radiancia (Radiación espectral) multiplicando un coeficiente de conversión expresado en unidades de $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ (Figura N°11), estos factores son propios de cada sensor. Antes del lanzamiento de un sensor se determina la relación entre la radiación espectral medida y ND, conocida como la

calibración del sensor. Inicialmente las 14 bandas poseen una calibración radiométrica que es afectada por el redimensionamiento de las bandas siendo necesario aplicar nuevamente la Ecuación 22 y obtener los valores de radiancia (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014).

$$Radiancia = (Niveles\ digitales - 1) \times Coeficiente\ de\ conversion \quad (22)$$

a. Corrección atmosférica VNIR-SWIR

Se realiza la transformación de radiancia a reflectancia aparente o exo atmosférica, relaciona la radiancia calculada anteriormente con la irradiancia solar en la parte superior de la atmósfera, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos(sz)} \quad (23)$$

ρ : Reflectancia aparente sin unidades

π : 3.141593

L: Radiancia espectral

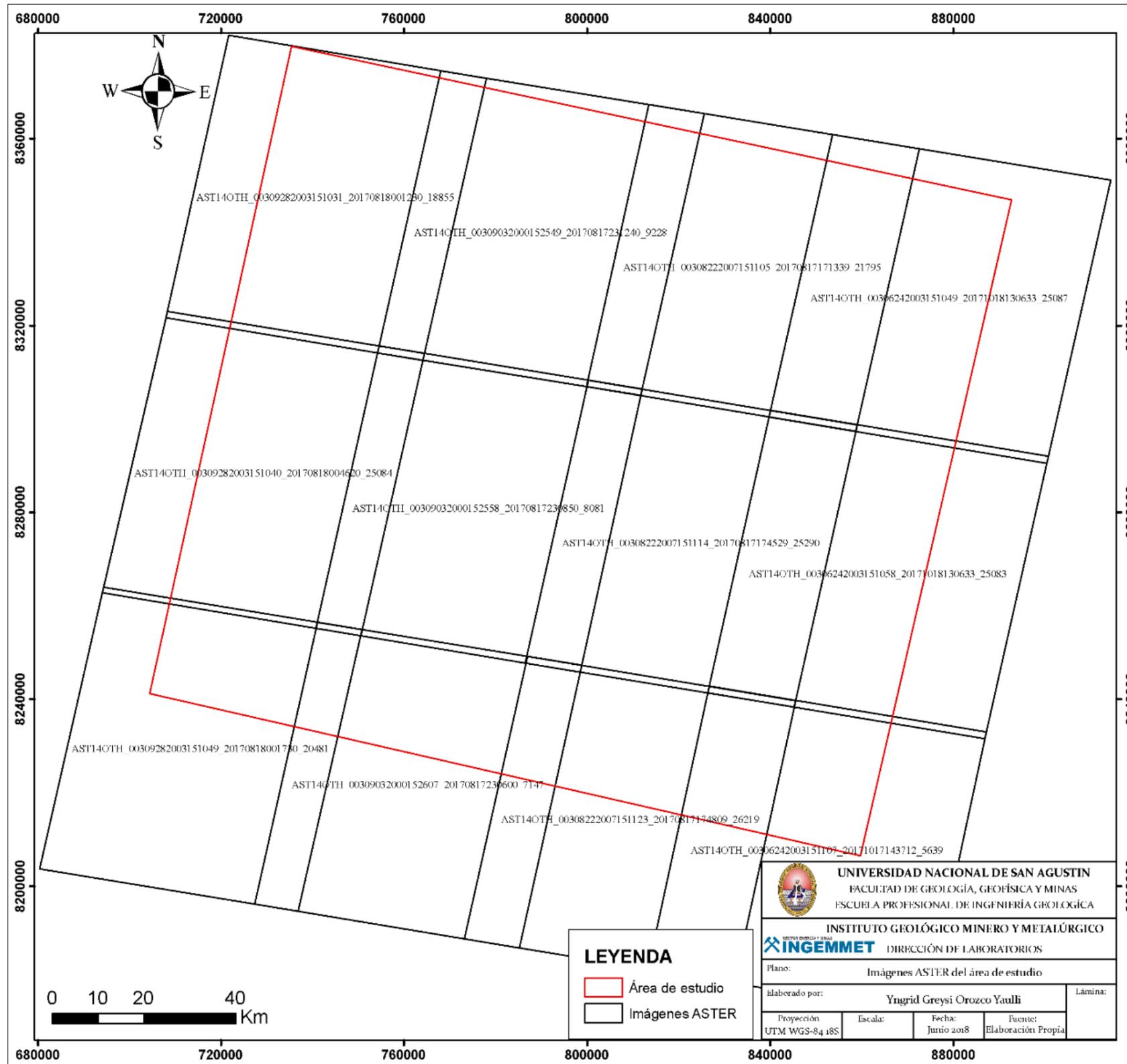
d^2 : Distancia de la tierra al sol en unidades atmosféricas = $(1 - 0.01674 \cos(0.9856 (JD - 4)))^2$. JD es el día Juliano, es decir el número de días transcurridos hasta el día de la adquisición de la imagen.

ESUN: Irradiancia solar, estos parámetros se obtienen de la siguiente Tabla N°12.

SZ: Angulo del Zenith del sol en radianes.

Al corregir las imágenes se procede a realizar un mosaico total, inicialmente con las imágenes de una misma fecha (Figura N°13), para que los valores radiométricos

Mapa N° 8: Distribución de las imágenes ASTER en la zona de estudio.



tengan mayor correlación entre sí, disminuyendo los problemas ocasionados por condiciones atmosféricas a la hora de toma de las imágenes, el ángulo de la luz solar en el mismo momento y el estado de los instrumentos en el satélite (su

Band No.	Coefficient (W/(m ² *sr*um)/DN)			
	High gain	Normal Gain	Low Gain 1	Low gain 2
1	0.676	1.688	2.25	N/A
2	0.708	1.415	1.89	
3N	0.423	0.862	1.15	
3B	0.423	0.862	1.15	
4	0.1087	0.2174	0.290	0.290
5	0.0348	0.0696	0.0925	0.409
6	0.0313	0.0625	0.0830	0.390
7	0.0299	0.0597	0.0795	0.332
8	0.0209	0.0417	0.0556	0.245
9	0.0159	0.0318	0.0424	0.265
10	N/A	6.822 x 10 ⁻³	N/A	N/A
11		6.780 x 10 ⁻³		
12		6.590 x 10 ⁻³		
13		5.693 x 10 ⁻³		
14		5.225 x 10 ⁻³		

Figura N° 11: Valores de Ganancia para las diferentes bandas de ASTER.

calibración varía con el tiempo).

Tabla N° 12: Valores de Irradiancia solar para cada banda de ASTER ((Smith, 2004).

BANDA ASTER	ESUN
B1	1848
B2	1549
B3	1114
B4	225.4
B5	86,63
B6	81,85
B7	74.85
B8	66.49
B9	59.85

Finalmente se realizó el mosaico global de los 4 bloques y obtener uno solo, debido a que se trata de series multitemporales (de diferentes fechas) se realizó una normalización radiométrica de los datos con en transformaciones lineales de los

histogramas de las imágenes, este procedimiento es propio del Laboratorio de Teledetección -INGEMMET.

a. Calibración TIR

Se transforman los valores de ND a radiancia, La Figura N°14 muestra el procedimiento para la calibración. Se aplica la Ecuación 22 con los valores de la Figura N°10. Posteriormente se aplica unos coeficientes de recalibración usando la Ecuación 23, los valores de los coeficientes de recalibración radiométrica (RCC) se obtienen por el retraso en la actualización del RCC y la fecha de observación de la tierra (Tonooka, Sakuma, Kudoh, & Iwafume, 2004), la modificación de la firma espectral en el subnivel TIR se puede observar en la Figura N°16.

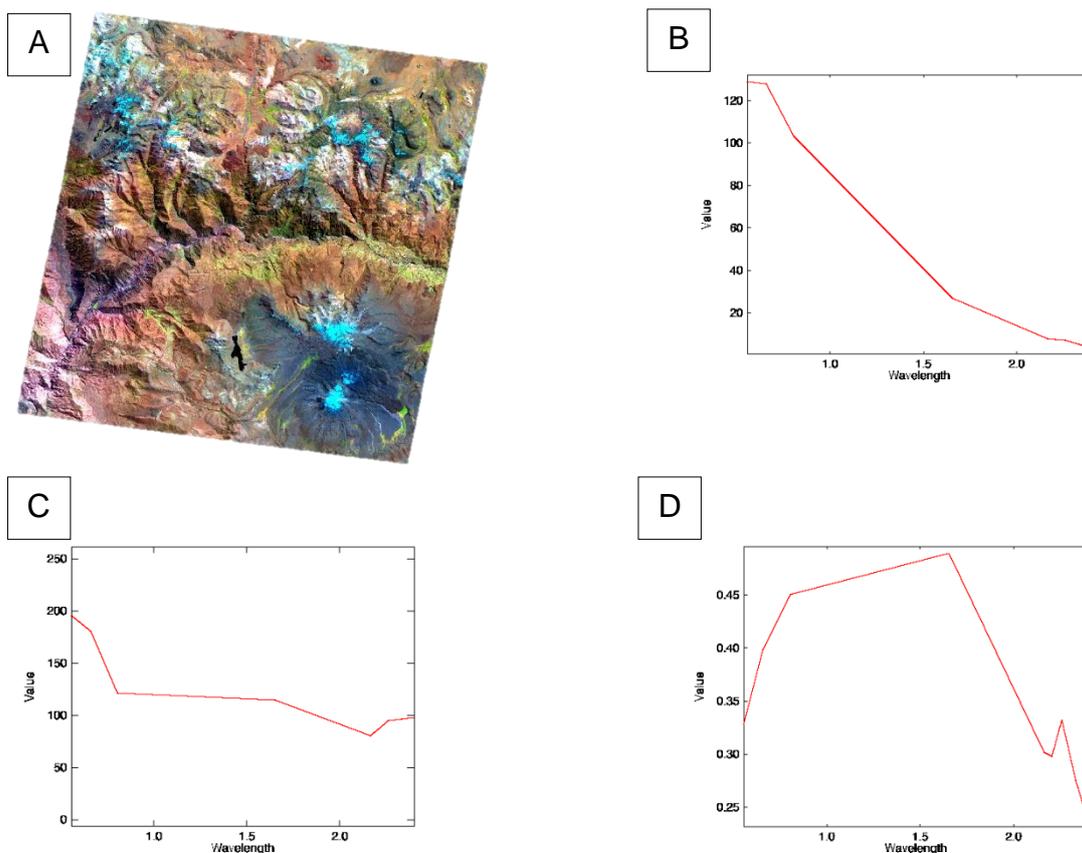


Figura N° 12: Modificación de las firmas espectrales debido a la corrección de las Imágenes ASTER, A) Imagen a corregir, B) Firma espectral en niveles digitales, C) Firma digital en Radiancia, D) Firma digital en Reflectancia.

a. Corrección atmosférica

Se aplica para aproximar y eliminar las contribuciones atmosféricas de los datos de radiación infrarroja térmica, para esto se aplica la herramienta de ENVI:

Thermal Atm Correction: Este algoritmo es similar al propuesto por (Ninomiya , 2002); asume que la atmósfera es uniforme sobre la escena de datos y que existe una superficie cercana al cuerpo negro dentro de la escena. La ubicación de la superficie del cuerpo negro no es necesaria para esta corrección (Harris Geospatial Solution)

Se utiliza una sola capa de aproximación de la atmósfera.

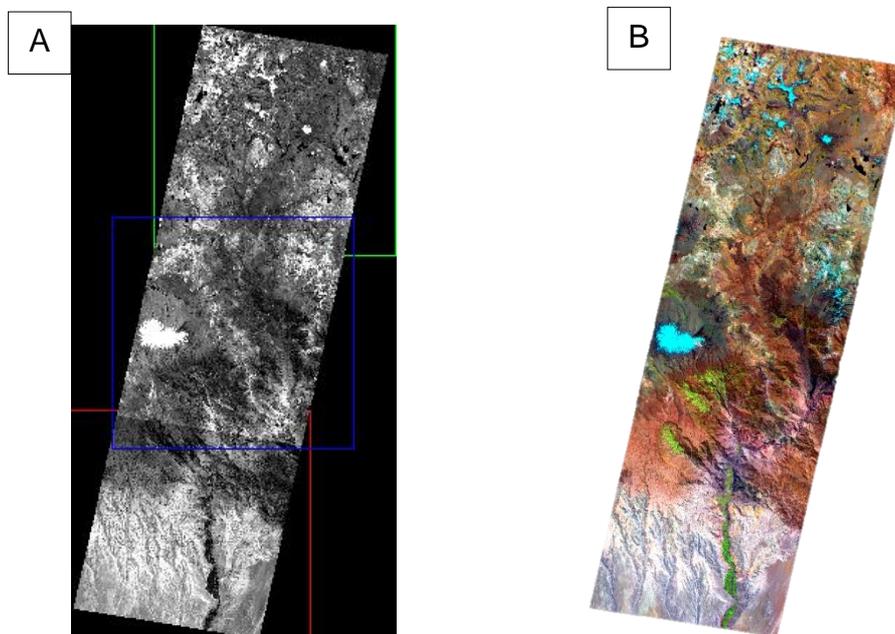


Figura N° 13: A) Imágenes de una misma fecha para realizar el mosaico, B) Mosaico obtenido.

Finalmente, los datos obtenidos se convierten a valores de emisividad con el algoritmo de emisividad normalizada presente en el ENVI (Carrino, Crosta, Bemfica, Silva, & Lambert, 2014), ya que la radiación emitida de una superficie en longitudes de onda del infrarrojo térmico es una función de la temperatura y la emisividad se relaciona con la composición de la superficie.

Las bandas TIR se aplicaron en muchos casos de estudio para hacer una discriminación litológica debido a que se conoce que la sílice y los minerales de silicato son los mayores componentes de la corteza terrestre, junto al cuarzo y los carbonatos presentan características espectrales por sus fuertes absorción dentro de la ventana atmosférica de 8–14 μm que corresponden a las longitudes de onda relacionado a las vibraciones asimétricas fundamentales (Salisbury & D’Aria, 1992) de los enlaces del Si-O y C-O relacionado a la abundancia y química de los silicatos, sulfuros y carbonatos (Ninomiya , 2004)

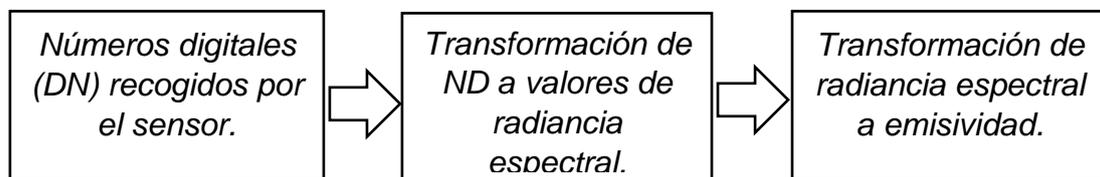


Figura N° 14: Procedimiento para la calibración de imágenes ASTER subnivel TIR.

$$\text{Nueva Radiancia} = (A \times \text{Radiancia Original}) + B$$

Band	A	B	Estimated Changes (Upper: Radiance, Lower: Temperature)			
			@270K	@300K	@320K	@340K
10	0.962593	0.1845	+0.000 +0.00K	-0.167 -0.91K	-0.320 -1.39K	-0.510 -1.81K
11	0.925287	0.3888	+0.000 +0.00K	-0.332 -1.84K	-0.633 -2.81K	-1.001 -3.69K
12	0.871840	0.7024	+0.000 +0.00K	-0.562 -3.20K	-1.059 -4.92K	-1.659 -6.48K
13	0.933752	0.3892	+0.000 +0.00K	-0.257 -1.74K	-0.472 -2.72K	-0.721 -3.63K
14	0.920263	0.4658	+0.000 +0.00K	-0.285 -2.10K	-0.518 -3.30K	-0.784 -4.42K

Figura N° 15: Coeficientes para la recalibración de las bandas del subnivel TIR en base a la fecha de observación y el RCC.

Ninomiya (2002) propone índices para calcular el Qz ya que las longitudes de onda van cambiando sistemáticamente a medida que el tipo de roca va cambiando de félsico a ultramáficas. Las rocas félsicas presentan alta emisividad en las longitudes

de las bandas 13 y 14, mientras las rocas máficas y ultramáficas presentan alta emisividad en las bandas 10 a 12 (Rockwell & Hofstra, 2008). Cabe destacar que el índice de cuarzo no es un identificador de Qz en la roca, sino a zonas de puro cuarzo o cuarcita y menos sensible a rocas silíceas.

4.5.3. Imágenes SENTINEL

- Fuente de datos: Plataforma de descarga de las imágenes SENTINEL de la página web de la ESA (Agencia espacial europea) <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Sentinel-2 es una misión desarrollada por la ESA dentro del programa Copérnico para las observaciones del planeta Tierra y brindar servicios como el seguimiento de evolución de bosques, cambios en la corteza terrestre y gestión de los desastres naturales. Está compuesto por dos satélites idénticos: Sentinel-2A y Sentinel-2B.

Sentinel-2 es una misión desarrollada por la ESA dentro del programa Copérnico para las observaciones del planeta Tierra y brindar servicios como el seguimiento de evolución de bosques, cambios en la corteza terrestre y gestión de los desastres naturales. Está compuesto por dos satélites idénticos: Sentinel-2A y Sentinel-2B.

El Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio de 2015 en el cohete espacial Vega, tiene una cámara multispectral (MSI) de alta resolución con 13 bandas espectrales, su rango espectral va desde el visible al infrarrojo de onda corta.

Tiene 4 bandas con una resolución de 10 metros garantizan la continuidad con misiones como SPOT-5 o Landsat-8 y satisfacen los requisitos del usuario, en particular, para la clasificación básica de la cubierta terrestre. Las bandas con una resolución espacial de 20 metros satisfacen los requisitos para una mejor clasificación de la cubierta terrestre y para la recuperación de parámetros geofísicos. Las bandas

a 60 metros están dedicadas principalmente a las correcciones atmosféricas y nubes de cirros (SUHET, 2015).

4.5.3.1. SENTINEL aplicado a geología

Las imágenes se han empleado en su mayoría para realizar estudios de estimación de parámetros biofísicos y bioquímicos (índice de área foliar, clorofila y nitrógeno, y

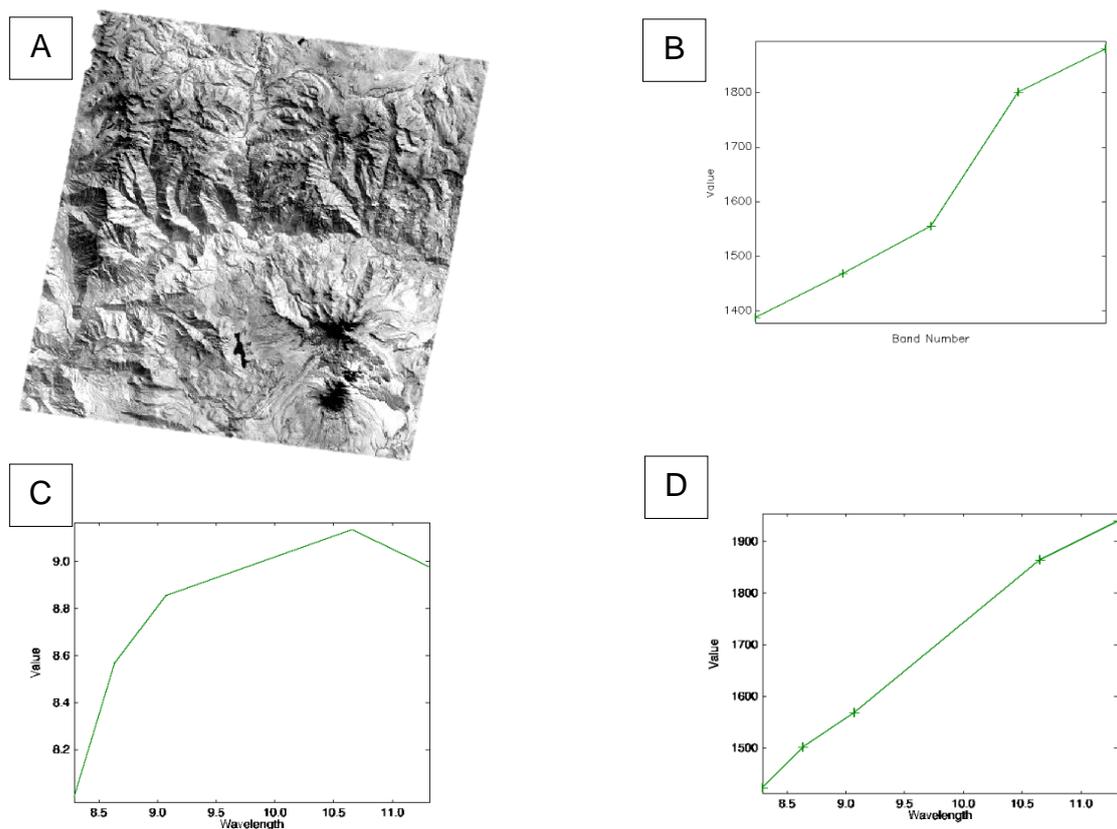


Figura N° 16: Modificación de las firmas espectrales debido a la corrección de las Imágenes ASTER, A) Imagen a corregir, B) Firma espectral en niveles digitales, C) Firma digital en Radiancia, D) Firma digital en Emisividad.

productos espectrales, series temporales y NDVI), además de proporcionar una continuidad de datos en comparación con otros sensores operacionales (Van der Meer y otros, 2014).

El potencial de estas imágenes ha sido evaluado por Van der Meer, quien simula datos espaciales y espectrales SENTINEL-2 a partir de datos Hyperspectrales-Hymap

redimensionados, en el cual nos muestra la ventaja de tener varias bandas cercanas a la longitud de 0.9 μm (longitud de onda donde próximas a la absorción del Hierro) con respecto a las imágenes LANDSAT y ASTER quienes poseen una o dos bandas cercanas a esta región.

En general, la comunidad geológica utiliza datos de sensores remotos multiespectrales, similares a SENTINEL-2, para cartografiar litologías, estructuras (fallas, pliegues, fracturas) y mineralogía de superficie.

Desde la sedimentología y la petrología metamórfica, los minerales clave para describir las zonas mineralizadas son conocidos y podrían ser perceptibles espectralmente con los sensores remotos. Hunt & Salisbury (1971) y Rowan (2003) entre muchos otros utilizaron las imágenes LANDSAT para obtener mapas de óxido de Hierro.

Tabla N° 13: Bandas espectrales, resolución espacial de SENTINEL-2.

BANDAS ESPECTRALES	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCION ESPACIAL
Banda 2: Blue	490 nm	10 m
Banda 3: Green	560 nm	
Banda 4: Red	665 nm	
Banda 8A : vegetation red edge	842 nm	
Banda 5: vegetation red edge	705 nm	20 m
Banda 6: vegetation red edge	740 nm	
Banda 7: vegetation red edge	783 nm	
Banda 8_NIR	865 nm	
Banda 11: SwIR	1610 nm	
Banda 12: SwIR	2190 nm	
Banda 9: wáter vapour	443 nm	60 m
Banda 10: SwIR -Cirrus	940 nm	
Banda 1: Coastal aerosol	1375	

4.5.3.2. Procesamiento

Se descargaron imágenes SENTINEL-2 de la plataforma de la ESA, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

El nivel de procesamiento descargado fue el nivel C (L1C). Posteriormente se corrigió la imagen utilizando el programa SNAP de distribución gratuita, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

a. Corrección Atmosférica

La imagen se corrigió con la herramienta de Sen2cor desarrollada por la Agencia espacial europea (ESA), que se encuentra en el software SNAP, de distribución gratuita. Se realiza un procesamiento a la imagen en nivel 1C (L1C) con una reflectancia TOA (Top of Atmosphere) para determinar las variables de interés en la corrección atmosférica (vapor de agua) y el uso de libRadtran para determinar el efecto sobre la señal medida por SENTINEL-2 y obtener un producto en nivel 2A (L2A)

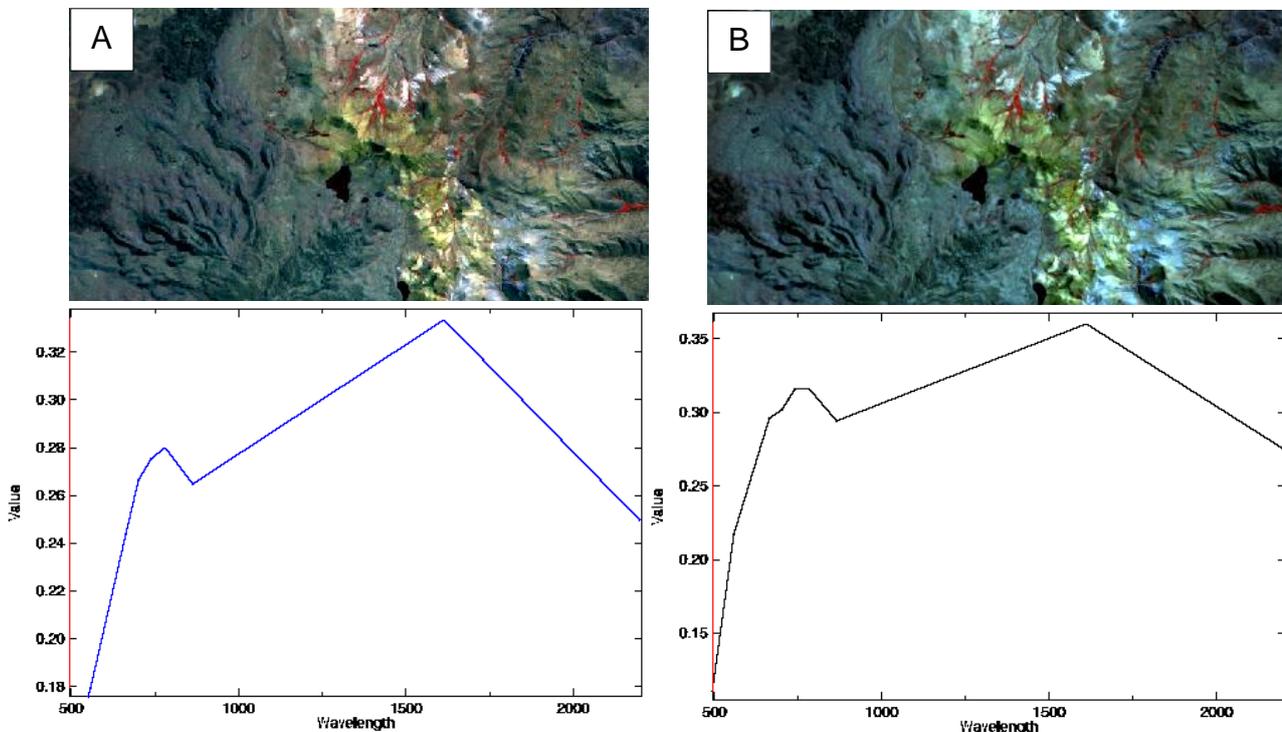


Figura N° 17: Firma espectral de la reflectancia al tope de la atmosfera (TOA); B) Firma espectral en superficie (BOA).

reflectancia en superficie BOA (Bottom-Of-Atmosphere) como se observa en la figura N°17, mejorando la respuesta espectral de la imagen, El producto de nivel 2A (L2A) se vuelven a dimensionar con una constante de 10 m, 20 m y 60 m de acuerdo con la resolución nativa.

4.5.4. Análisis De Componentes Principales (PCA) para ASTER y SENTINEL

Las imágenes tienen bandas con valores digitales que contienen información de regiones espectrales altamente correlacionables. El análisis de componentes principales (PCA) es una técnica que se utiliza para eliminar información espectral redundante (Chuvieco, 1995) resaltando sus similitudes y diferencias mediante la reducción dimensional de un conjunto de datos, esta técnica estadística multivariante selecciona combinaciones lineales no correlacionadas (cargas de vectores propios) de las variables de tal forma que cada combinación lineal extraída sucesivamente tiene variaciones menores (Singh & Harrison, 1985).

Crosta y McM-Moore (1989) aplican una metodología para decidir cuál de las imágenes del componente principal concentrará información directamente relacionada con las firmas espectrales teóricas de objetivos específicos. Un aspecto importante de este enfoque es que predice si el tipo de superficie objetivo está resaltado por píxeles oscuros o brillantes en la imagen del componente principal. La varianza estadística de las imágenes multiespectrales se relaciona con la respuesta espectral de varios materiales superficiales tales como rocas, suelos y vegetación, influenciados por la dimensionalidad estadística de las imágenes.

Esta técnica se aplicó a imágenes LANDSAT de los sensores TM y ETM, en imágenes ASTER, aprovechando las características de la región VIS y SWIR.

4.5.5. Productos de alteración de imágenes ASTER-SENTINEL

Mediante la técnica se halla un componente con máxima reflexión y una con máxima absorción aplicado a un subgrupo de 4 bandas seleccionados en base a la posición de los rasgos de absorción más característico para cada alteración de acuerdo a los minerales que lo componen.

4.5.5.1. Alteración Argílica-ASTER

Los minerales más representativos son la Caolinita, Alunita, Dikita entre otras, los principales rasgos de absorción para estos minerales están en la banda 4 y 6 de ASTER (Figura N°18A).

El subgrupo de bandas a utilizar son 1467. Los valores resultantes nos muestran que el componente 4 (Figura N°18B) contiene la información relacionada a la alteración al tener los valores máximos negativa y positivos (Tabla N°14).

Tabla N° 14: Componentes principales.

ESTADÍSTICA	MIN	MAX
PCA1	-2.755892	13.505660
PCA2	-1.395654	6.853204
PCA3	-34.183697	12.116564
PCA4	-39.985519	27.361300

4.5.5.2. Alteración Fílica-ASTER

Los minerales más representativos son la Sericita y la Esmectita, los principales rasgos de absorción para estos minerales están en la banda 5 y 6 de ASTER (Figura N°19A). El subgrupo de bandas a utilizar son solo 3 bandas: 567, obteniendo mejores resultados. Los valores resultantes nos muestran que el componente 3 (Figura N°19B)

contiene la información relacionada a la alteración al tener los valores máximos negativa y positivos

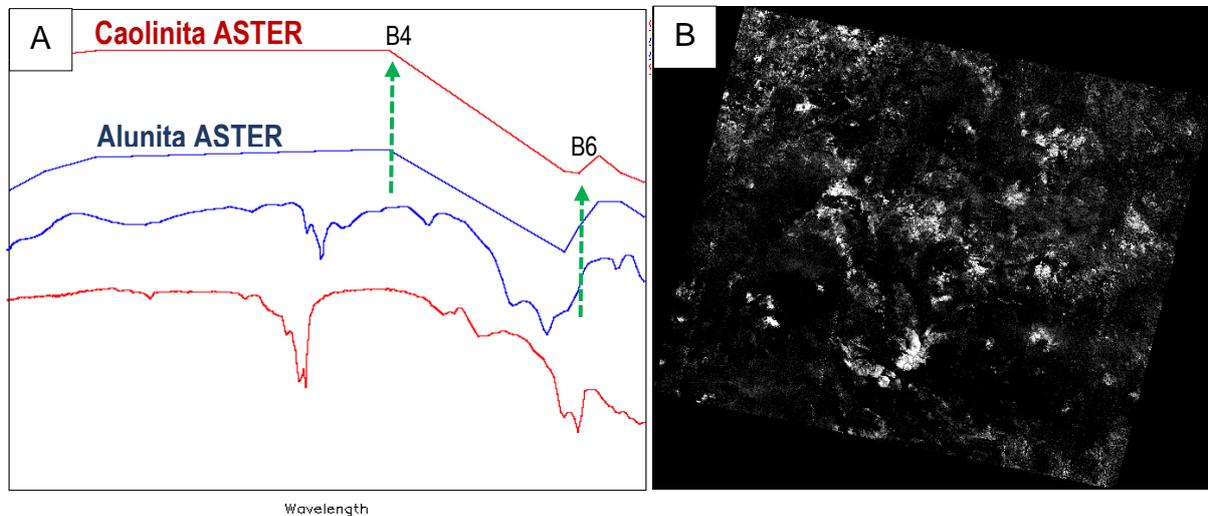


Figura N° 18: A) Minerales representativos para la Alteración argílica, bandas características 4 y 6. B) Imagen con la componente 4, los valores más altos están representado por el color blanco

Tabla N° 15: Componentes principales

ESTADÍSTICA	MIN	MAX
PCA1	-14.569449	4.902126
PCA2	-18.849958	11.599130
PCA3	-38.809261	15.822005

4.5.5.3. Alteración Propilítica-ASTER

Los minerales más representativos son la Clorita, Epidota y Calcita, los principales rasgos de absorción para estos minerales están en las bandas 5 y 8 de ASTER (Figura N° 20A).

4.5.5.4. Índices de Sílice (SI)

A pesar de su utilidad potencial, las capacidades de mapeo de minerales de los datos ASTER TIR a menudo no se utilizan en estudios científicos, debido a la falta de características de absorción de diagnóstico en la región espectral del térmico. Para

este estudio se utilizó el índice de SI (Figura N°21A y B) propuesta por Ninomiya (2002) basándose en formas de los espectros en referencia en laboratorio y aplicados a productos de emisividad de ASTER (Ecuación 24). El subgrupo de bandas a utilizar son solo 3 bandas: 567, obteniendo mejores resultados. Los valores resultantes nos muestran que el componente 3 (Figura N°20B) contiene la información relacionada a la alteración al tener los valores máximos negativa y positivos

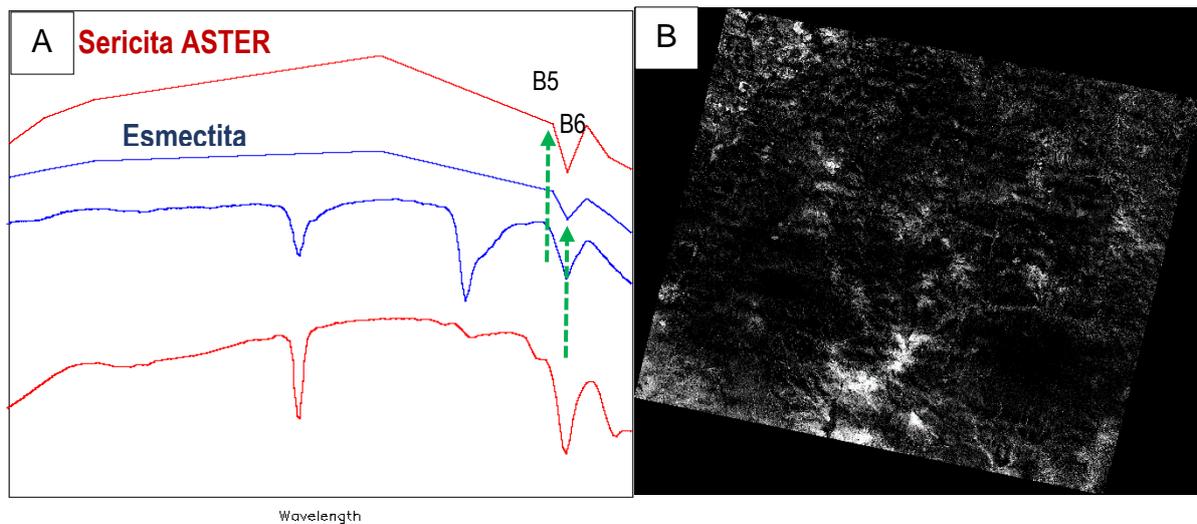


Figura N° 19:A) Minerales representativos para la Alteración fílica, bandas características 5 y 6. B)Imagen con la componente 3, los colores blancos representan los valores más altos.

Tabla N° 16: Componentes principales

ESTADÍSTICA	MIN	MAX
PCA1	-0,531519	0.200011
PCA2	-0.130831	0.172484
PCA3	-0.332824	0.179086

4.5.5.5. Óxidos SENTINEL-2

Se consideró utilizar las bandas espectrales que guarden relación con las bandas empleadas de ASTER (Banda 1 y 2) y se adicionó bandas próximas relacionadas a

las firmas espectrales de óxido férrico y ferroso (Figura N°22A) para obtener una componente de óxidos, es así que se consideró utilizar las bandas 2378.

El resultado nos muestra que el componente 3 (Figura N°22B) contiene la información de su presencia.

(24)

$$SI = \frac{Band12 * Band14^3}{Band14^3}$$

Tabla N° 17: Componentes principales para Oxidos

ESTADÍSTICA	MIN	MAX
PCA1	-2391.0686	1021.7099
PCA2	-2187.5722	3919.6228
PCA3	-954.9498	9650.1716
PCA4	-1445.3701	1042.7917

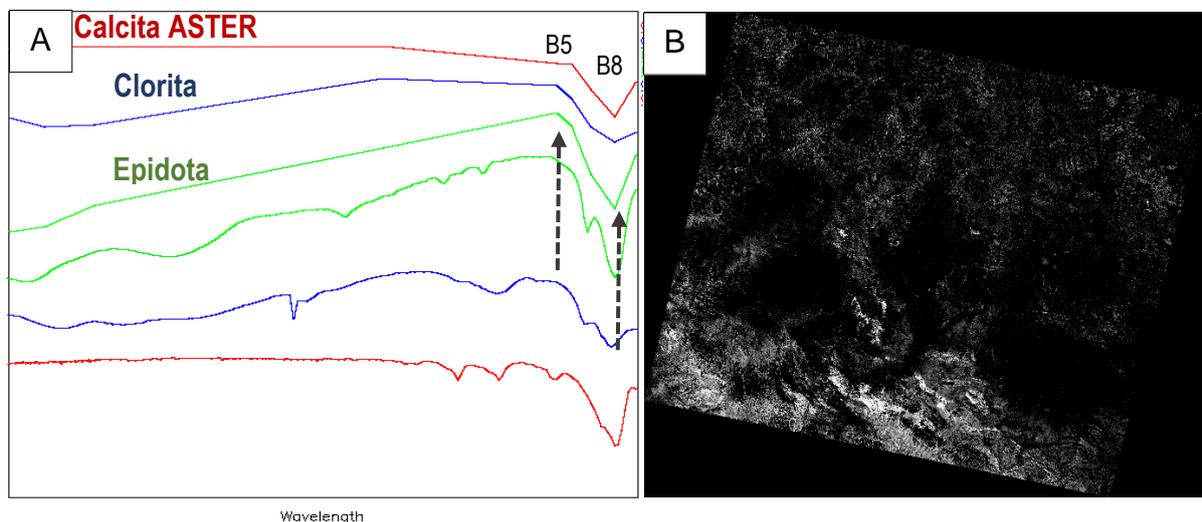


Figura N° 20:A)Minerales representativos para la Alteración propilítica, bandas características 5 y 8.B) Imagen con la componente 3, los valores más altos están representados por los colores blancos.

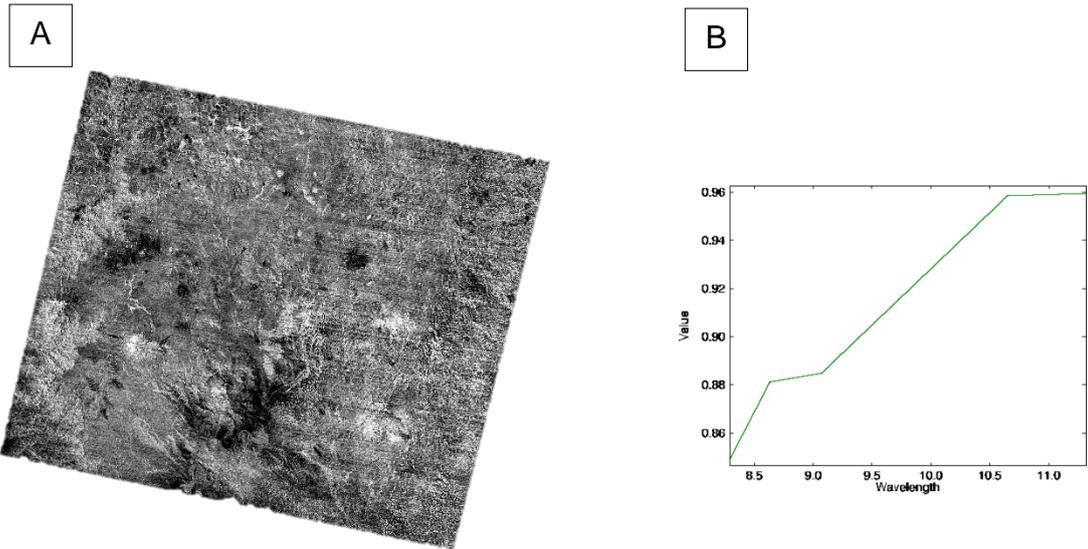


Figura N° 22:A) Imagen con el Índice de Sílice, los valores más oscuros resaltan su presencia, B) Firma espectral de un Granito dimensionada a la resolución espectral de la imagen ASTER.

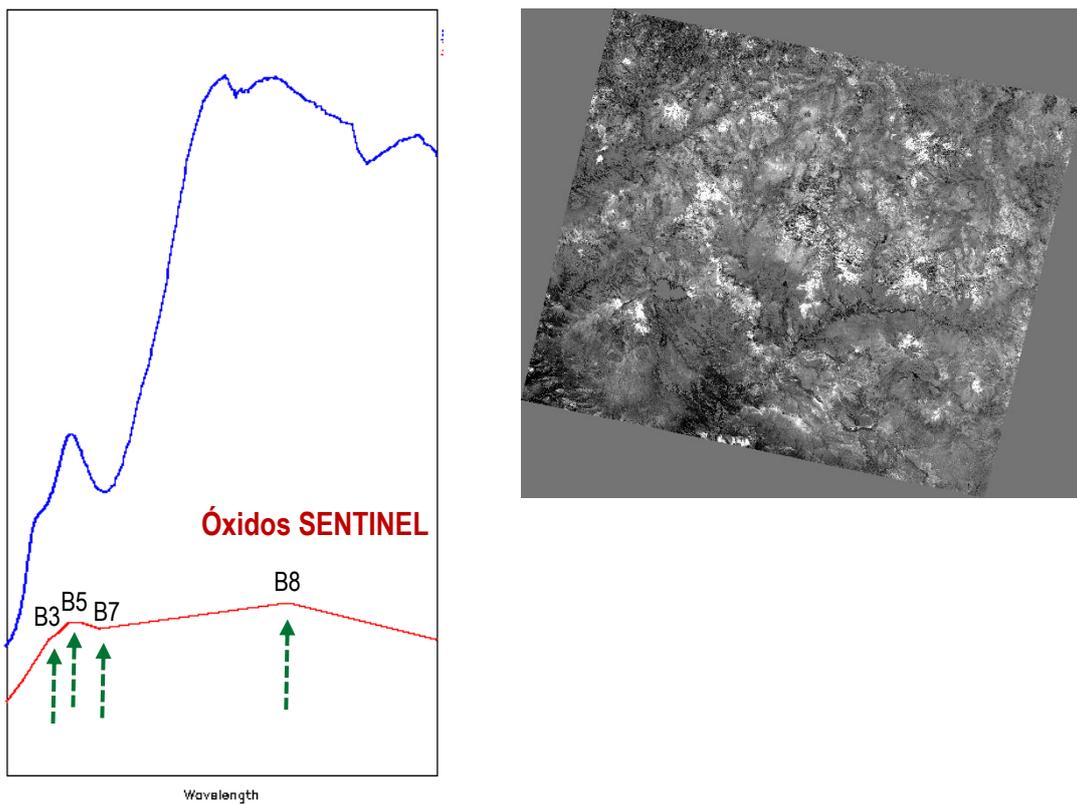


Figura N° 21:A) Firma espectral de óxidos (férrico y ferroso) dimensionada a resolución espectral de la imagen SENTINEL. B) Imagen con la componente 3, los valores altos (Blancos) representan las zonas con presencia de óxidos.

CAPITULO V

ASOCIACION ESPACIAL Y VALIDACIÓN

Las diferentes evidencias se relacionan utilizando los sistemas de información geográfica (SIG) para asegurar la correlación espacial entre ellas. Estas asociaciones se aplicarán tanto para el modelo de Peso por evidencias y de Regresión Logística, con el primero se obtendrá mapas dicotómicos para cada evento y obtener el mapa final, mientras que para el segundo se obtendrán valores que se aplican a una suma ponderada para cada variable y obtener el mapa final.

5.1. Peso por evidencia (Weight of evidence)

Cada evidencia se analizó, con herramientas de ArcGis, para cuantificar las relaciones espaciales entre estos y los puntos de entrenamiento, se consideraron 132 ocurrencias de depósitos minerales (Tabla N°18), con la finalidad de obtener mapas binarios de probabilidad posterior que representan áreas evaluadas con alta correlación.

Para trabajar con los datos ya obtenidos en el Capítulo IV, se deben considerar que cada evidencia tenga un formato que el software ArcGis pueda ejecutar; la litología, geoquímica, estructuras y datos obtenido de teledetección deben ser uniformizados en formato Raster (Grid).

Para guardar la correlación de los datos, es decir que coincidan en coordenadas y grillado, se siguió los siguientes pasos:

- Se realizó una transformación de todos los datos en formato Raster (extensión tif) en ArcGis, luego se realizó una convolución (uniformizar el tamaño de los datos) en el software ENVI; el resultado son Rasters con dimensiones de los pixeles iguales de 30x30 y coordenadas coincidentes (Grid).
- Cada Raster se importó, en escala de grises, tener en cuenta que no poseen ningún atributo, por lo que se necesita crear una columna de atributos para cada Raster. Se realiza una reclasificación a cada uno de los datos, obteniendo nuevas clases basados en una distribución de rangos (Quantiles y Natural Break) que mejoren la visualización, obteniendo un nuevo Raster en formato Grid, el cual ya contiene atributos (Tabla N°19).
- La evaluación de las evidencias en base a su clasificación, con los puntos de entrenamiento (Ocurrencias de minerales) se realizó con la herramienta Tabulate área, que calcula la intersección entre el Raster reclasificado y la ocurrencia de depósitos (Puntos de entrenamiento), como resultado se obtiene una tabla con el conteo de las entidades que se intersecan (Tabla N°20).

Tabla N° 18: Total de ocurrencias minerales.

OCURRENCIAS MINERALES (OC)	
Evaluación	Validación
102 OC	30 OC

Tabla N° 19: Columnas que debe tener la tabla de atributos

OID	VALUES	COUNT
Asociado al campo o dominio	Valor asignado a cada campo	Numero de pixeles asociados al campo

Tabla N° 20: Tabla de intersección con el conteo de entidades.

OID	PNT_COUNT	PERCENTAGE
Asociado al campo	Conteo de puntos en la intersección por clase	Porcentaje del conteo de puntos

El cómo se realiza este procedimiento se puede explicar de manera gráfica como se muestra en la Figura N°23, la intersección de los puntos con los diferentes dominios (Clases) generadas.

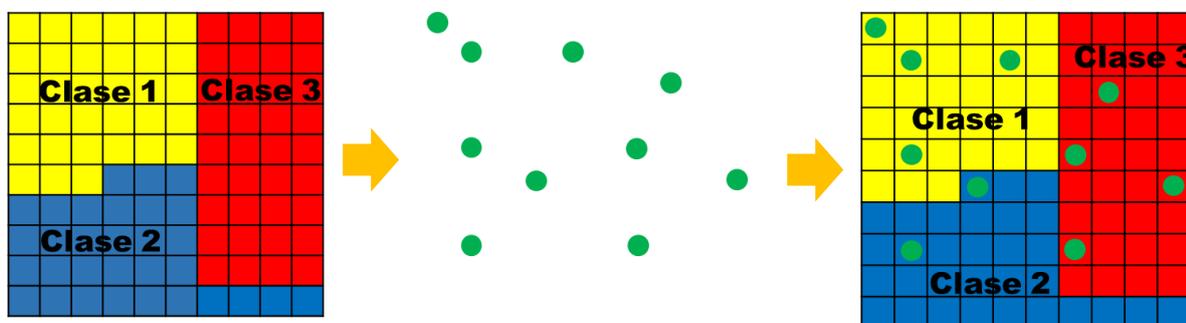


Figura N° 23: Evaluación de clases con los puntos de entrenamiento, cada clase representa los valores de la reclasificación del Raster y los puntos verdes representa las ocurrencia o puntos de entrenamiento.

- Los datos obtenidos en cada clase (por cada evidencia o evento), se sometieron al cálculo de las ecuaciones mostradas en la Tabla N°21 (Desarrollado en el Capítulo III).

- Al realizar el cálculo se observa cada una de las clases por cada evidencia evaluada, se selecciona los valores W+ y W- de las clases que tengan valores altos en la relación del contraste (C) y la desviación del contraste (S(C)) ya que estos demuestran que existe alta correlación entre los puntos y la clase.
- Se realiza la reclasificación de los mapas con los valores de W+ y W-, el valor W+(Presencia) seleccionado se asigna a la clase con mayor correlación espacial, el valor de W-(Ausencia) se asigna a las clases restantes, constituyendo una sola clase para cumplir con el nivel de confianza. Cuando una clase no contiene ningún sitio de entrenamiento, el programa encuentra un error de división por cero, pero los patrones aún se pueden usar en el modelo.
- A partir de la reclasificación anterior se obtienen los mapas de probabilidad posterior que muestran ocurrencia dada la presencia (W+) o ausencia (W-) del predictor binario (Capítulo III).

Todos los mapas obtenidos se combinan para obtener un mapa final de favorabilidad de ocurrencia de depósitos epidermales.

Tabla N° 21: Tabla de cálculos.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W(+)	W(-)	C	S(C)	C/S(C)
Dato geoespacial (Evidencia)	Numero de dominios	Conteo de puntos de intersección	% de puntos de intersección	Numero de pixeles por cada dominio	% del número de pixeles	Ecuac. 7	Ecuac. 8	Ecuac. 13	Ecuac. 14	Ecuac. 15

5.2. Geología

La reclasificación de la geología se hizo en base a los ambientes geológicos, definidos anteriormente (Capítulo IV) en 10 clases o dominios. Como ya se explicó al exportar

e importar los datos, pierden los atributos iniciales, al reclasificar se asocia a un campo RowID y un Values (Tabla N°19), este último se agrupa las características de atributo iniciales (nombre de ambientes), al realizar la correlación se observa que los números representan un código aleatorio de los datos nominales iniciales (Tabla N°22).

Después de la reclasificación, se realizó la evaluación de cada ambiente con los puntos de entrenamiento. En la Tabla N°23 se observa los diferentes contrastes calculados para cada ambiente geológico y los valores obtenidos por cada clase.

Tabla N° 22: Ambientes definidos inicialmente y código asociado después de la reclasificación.

AMBIENTE DEFINIDO	VALUE
Volcánico Cuaternario	1
Volcánico Paleógeno-Neógeno	2
Volcánico Neógeno-Cuaternario	3
Deposito Cuaternario	4
Volcánico Jurásico-Cretácico	5
Sedimentario Jurásico-Cretácico	6
Sedimentario Paleógeno-Neógeno	7
Intrusivo Cretácico-Paleógeno	8
Metamórfico Proterozoico-Paleozoico	9
Intrusivo Paleozoico	10

De la evaluación se observa que la clase 2, los volcánicos del Paleógeno-Neógeno que podría ser considerado un metalotecto importante, tiene alta correlación espacial, la relación de C/S(C) es alta por depender del área y el número de puntos de entrenamiento. Se observa que existe un valor muy cercano de la clase 8, Intrusivo Cretácico – Paleógeno, debido al número abundante de depósitos en relación al área.

Los valores de W (+) y W (-) de la clase 2 se seleccionan para realizar la nueva reclasificación, asignando el valor negativo de -0.268 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 2 que se le asigna el valor positivo de 0.446 (asociación espacial optima). En la Figura N°24 se muestra los mapas con las clases iniciales (A), seguido de un mapa evaluado (B) con los puntos, y un mapa final binario para la evidencia de la geología.

Tabla N° 23: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para la geología.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S (C)
GEOLOGIA	1	9	8.82	3916786	15.46	-0.561	0.076	-0.637	0.349	-1.824
	2	47	46.08	7468170	29.48	0.446	-0.268	0.715	0.199	3.598
	3	2	1.96	4939679	19.50	-2.297	0.197	-2.494	0.714	-3.493
	4	12	11.76	4255806	16.80	-0.356	0.059	-0.415	0.307	-1.351
	5	1	0.98	40241	0.16	1.820	-0.008	1.828	1.005	1.819
	6	9	8.82	2109353	8.33	0.058	-0.005	0.063	0.349	0.181
	7	3	2.94	551069	2.18	0.301	-0.008	0.309	0.586	0.528
	8	15	14.71	1516131	5.99	0.899	-0.097	0.996	0.280	3.563
	9	4	3.92	480526	1.90	0.726	-0.021	0.747	0.510	1.464
	10	0	0.00	51182	0.20	#¡NUM!	0.002	#¡NUM!	#¡DIV/0!	#¡NUM!

5.3. Estructuras

El mapa de estructuras representa datos ordinales distribuidos de acuerdo a la intensidad de las estructuras siendo los valores altos aquellos que corresponden a las zonas de máxima densidad. Se clasifico en 5 clases acuerdo a la distribución por cuantiles con la finalidad de realizar una distribución más estadística.

Al reclasificar nuevamente en 5 clases, se asocia a campos RowID y Values, este último agrupa las características de atributos iniciales, no pierde la correlación ya que son datos ordinales. Se realizó la evaluación de cada clase con los puntos de entrenamiento, el resultado nos indica que la clase 5 posee el valor de C/S(C) más

alto como se muestra en la Tabla N°24, que indica la alta correlación espacial con los puntos de entrenamiento.

Los valores W (+) y W (-) de la clase 5 se toma para realizar una nueva reclasificación, se asigna el valor negativo de -0.316 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 5 que se le asignará el valor positivo de 0.737 (asociación espacial optima), como se muestra en la Figura N°25.

Tabla N° 24: Valores calculados para cada clase definida de las estructuras.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S (C)
ESTRUC TURAS	1	3	2.97	4933812	19.45	-1.879	0.186	-2.065	0.586	-3.523
	2	10	9.90	5265327	20.75	-0.740	0.128	-0.868	0.333	-2.607
	3	16	15.84	5040874	19.87	-0.227	0.049	-0.276	0.273	-1.011
	4	30	29.70	5082240	20.03	0.394	-0.129	0.523	0.218	2.401
	5	42	41.58	5048768	19.90	0.737	-0.316	1.053	0.202	5.214

5.4. Geoquímica

Se utilizaron 2 elementos relacionados directamente a los depósitos que se quiere encontrar: el Oro, Plata. Los mapas de los 2 elementos representan datos ordinales, distribuidos de acuerdo a los valores del: Background, Threshold ordenados de manera ascendente.

Los atributos de la distribución inicial realizada por el interpolador IDW no se pierden completamente, al reclasificar el campo Values se asocia a las características de atributos iniciales, por ser datos ordinales ascendentes. Los mapas se reclasificaron en 3 clases mediante una distribución en cuantiles.

5.4.1. Oro (Au)

La evaluación de cada clase son los puntos de entrenamiento, como se muestra en

la Tabla N°25 que nos indica que la clase dos tiene el valor de C/S(C) más alto su alta correlación espacial.

Tabla N° 25: Valores calculados para cada clase definida del Oro.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S(C)
AU	1	64	63.37	21264454	84.06	-0.292	0.849	-1.141	0.207	-5.527
	2	24	23.76	2755714	10.89	0.770	-0.153	0.923	0.234	3.948
	3	13	12.87	1276408	5.05	0.927	-0.085	1.011	0.297	3.403

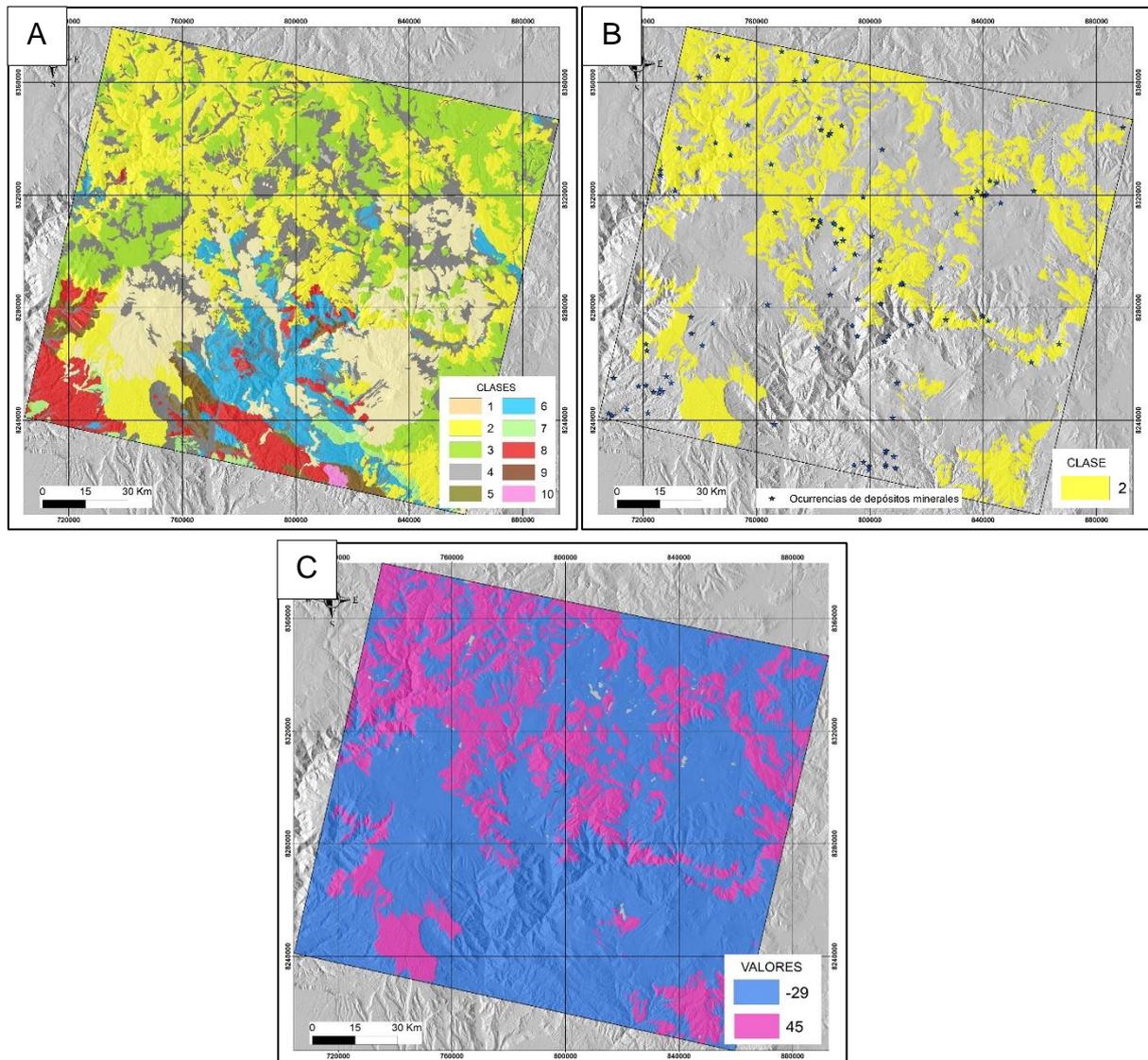


Figura N° 24: A) Clases iniciales en base a los ambientes definidos para la geología, B) Clase evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta representa la sociación espacial positiva y el Azul la asociación espacial negativa.

Los valores de W (+) y W (-) para la clase 2 se usa para la reclasificación, asignando el valor negativo -0.153 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 2 que se le asigno el valor positivo 0.927 (asociación espacial optima), como se muestra en la Figura N°26.

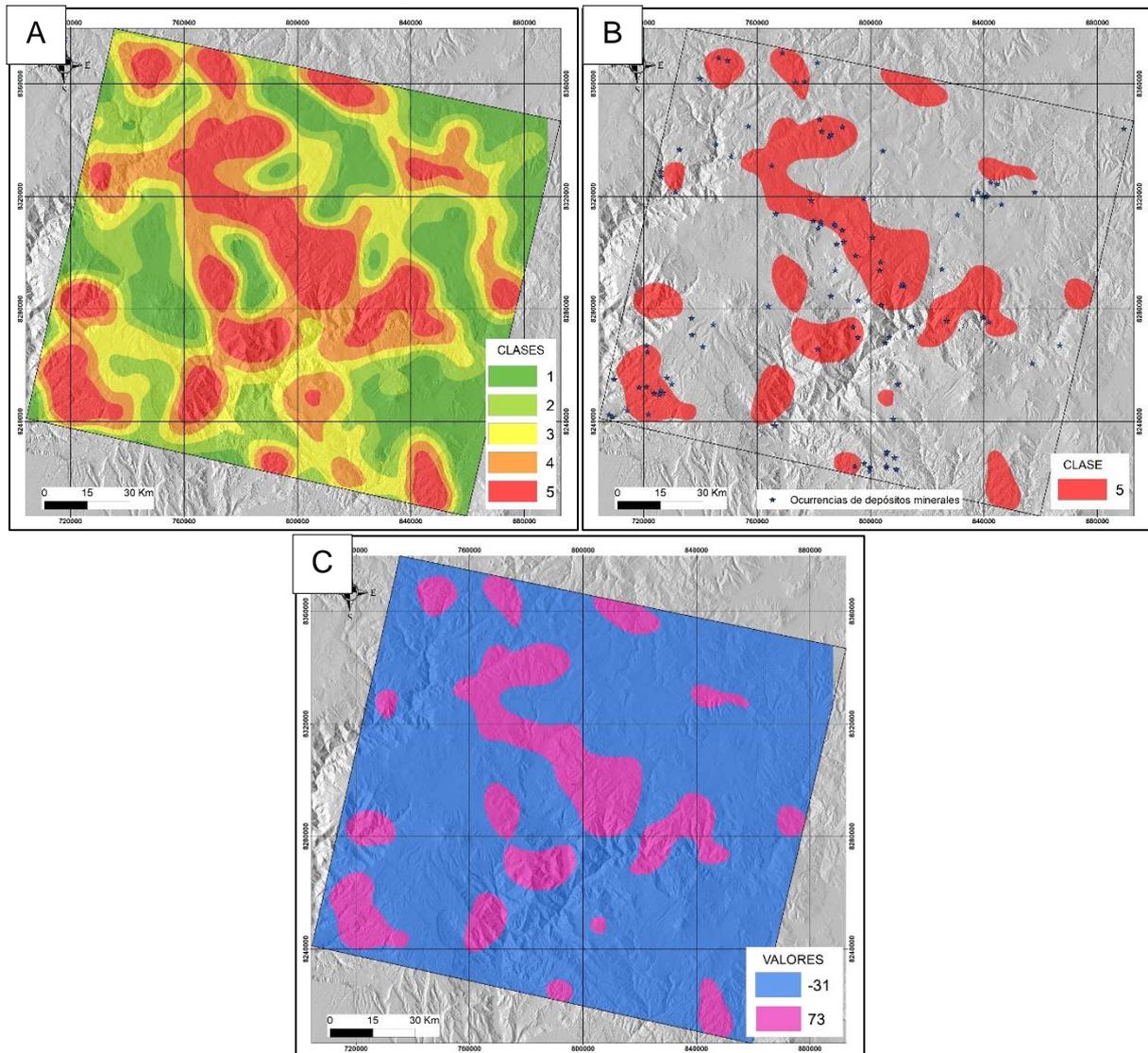


Figura N° 25: A) Clases iniciales reclasificados para las estructuras, B) Clase 5 evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta representa la asociación espacial positiva y l Azul la asociación espacial negativa.

5.4.2. Plata (Ag)

La evaluación de cada clase con los puntos de entrenamiento, como se muestra en la Tabla N°26, nos indica que la clase 3 tiene el valor de C/S(C) más alto, indicando la alta correlación espacial.

Se asignó el valor negativo de -0.098 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 3 que se le asigna el valor positivo de 0.811 (asociación espacial optima) por tener más relación con los datos de ocurrencia mineral

Tabla N° 26: Valores calculados para cada clase definida de la Plata.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S (C)
Ag	1	56	55.45	17444876	68.96	-0.228	0.374	-0.602	0.200	-3.005
	2	29	28.71	6088285	24.07	0.167	-0.059	0.226	0.220	1.027
	3	16	15.84	1763415	6.97	0.811	-0.098	0.909	0.273	3.337

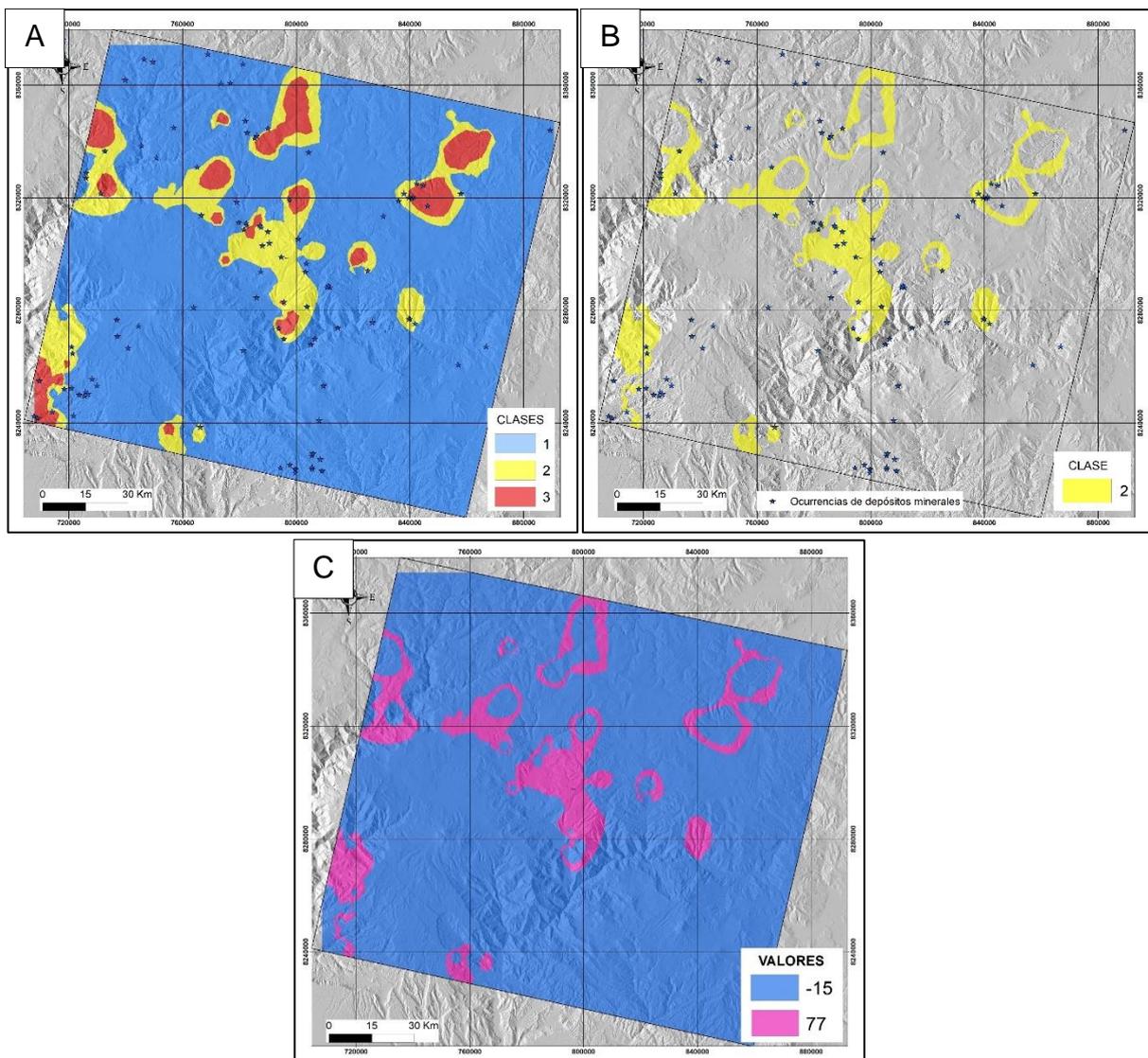


Figura N° 26:A) Clases iniciales reclasificados para el Au, B) Clase 2 evaluada con las ocurrencias minerales, C) Mapa binario final, el Magenta representa los valores con alta correlación espacial y el Azul la baja correlación espacial.

5.5. Teledetección

Los datos al ser de origen Raster, guardan el valor de cada uno de los pixeles distribuidos en una escala de grises. Estos datos al ser importados en el software se clasifican con el interpolados Natural Break que conservan las agrupaciones naturales inherentes de los datos ya que agrupan mejor los valores similares maximizando las diferencias entre clases. Con estos valores se reclasifican obteniendo mapas que representan datos ordinales ascendentes ya que se asocia a un campo RowID y un Values este último se asocia a las características de atributos iniciales.

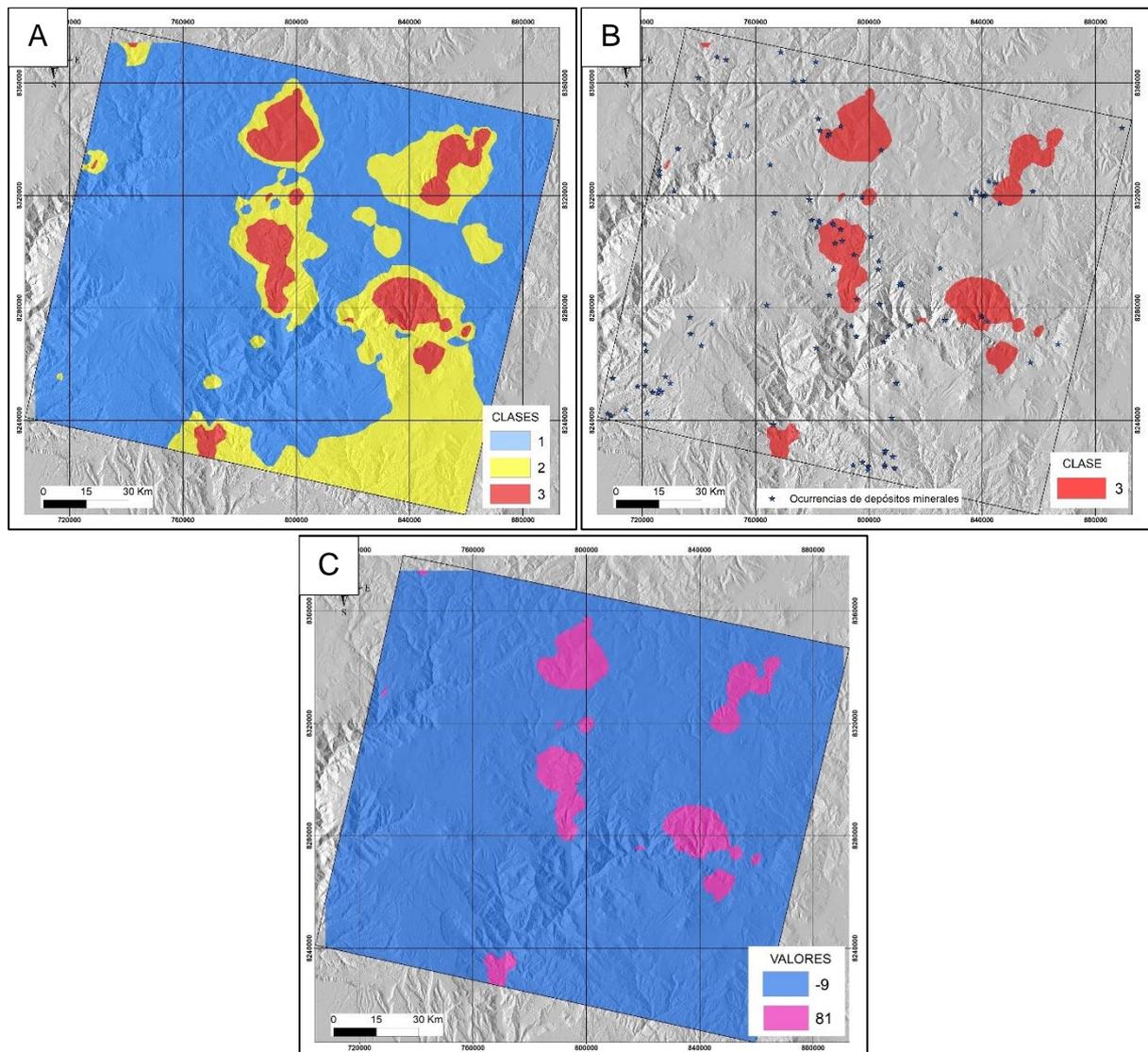


Figura N° 27: A) Clases iniciales reclasificadas para la Ag, B) Clase 3, evaluada con las ocurrencias minerales, C) Mapa binario final, mostrando los valores positivos como las zonas con alta correlación espacial y los negativos como las zonas con baja correlación espacial.

5.5.1. Alteración Argílica

Se clasificó en 6 clases, se realiza la evaluación con los puntos de entrenamiento, el resultado nos indica que la clase 6 posee el valor C/S(C) más alto, indicando la alta correlación espacial con los puntos de entrenamiento. La Tabla N°27 muestra los valores calculados.

Los valores W (+) y W(-) de la clase 6 se tomaron para realizar una nueva reclasificación, asignando el valor negativo de -0.236 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 3 que se le asigna el valor positivo de 2.761 (asociación espacial óptima) por tener más relación con los datos de ocurrencia mineral.

Tabla N° 27: Valores calculados para cada clase definida en la Alteración Argílica.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S (C)
ARCILLAS	1	6	6.32	1665132	7.13	-0.122	0.009	-0.131	0.422	-0.310
	2	20	21.05	5924988	25.38	-0.187	0.056	-0.243	0.252	-0.968
	3	17	17.89	8750781	37.49	-0.740	0.273	-1.012	0.268	-3.782
	4	24	25.26	5167365	22.14	0.132	-0.041	0.173	0.236	0.733
	5	7	7.37	1507329	6.46	0.132	-0.010	0.142	0.393	0.361
	6	21	22.11	326234	1.40	2.761	-0.236	2.997	0.247	12.120

5.5.2. Alteración Filica

Se clasificó en 5 clases, se evaluó cada clase con los puntos de entrenamiento como se muestra en la Tabla N°28, el resultado indica que la clase 5 posee el valor C/S(C) más alto.

Los valores de W (+) y W (-) para la clase 5 se tomó para realizar una nueva reclasificación, se asignó el valor negativo de -0.181 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase 5 que se le asigna el valor positivo de 1.121

(asociación espacial optima) por tener más relación con los datos de ocurrencia mineral.

5.5.3. Alteración Propilítica

Se clasifica en 5 clases, se realizó la evaluación de cada clase con los puntos de entrenamiento como se muestra en la Tabla N°29, el resultado de la evaluación nos indica que la clase 5 posee el valor C/S(C) más alto, indicando la alta correlación espacial.

Tabla N° 28: Valores calculados para cada clase definida en la Alteración Filica.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S(C)
FILICA	1	3	3.80	862885	4.37	-0.140	0.006	-0.146	0.589	-0.248
	2	11	13.92	4448832	22.52	-0.481	0.105	-0.586	0.325	-1.803
	3	20	25.32	8150536	41.25	-0.488	0.240	-0.728	0.259	-2.814
	4	27	34.18	4758359	24.08	0.350	-0.143	0.493	0.237	2.077
	5	18	22.78	1467223	7.43	1.121	-0.181	1.303	0.268	4.856
	6	0	0.00	70284	0.36	#¡NUM!	0.004	#¡NUM!	#¡DIV/0!	#¡NUM!

Tabla N° 29: Valores calculados para cada clase definida en la alteración Propilitica.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W(+)	W(-)	C	S(C)	C/S(C)
PROPII TICA	1	3	3.75	1353673	7.18	-0.650	0.036	-0.686	0.588	-1.166
	2	17	21.25	3522944	18.69	0.128	-0.032	0.160	0.273	0.586
	3	15	18.75	4305880	22.85	-0.198	0.052	-0.249	0.286	-0.870
	4	30	37.5	6510075	34.54	0.082	-0.046	0.128	0.231	0.556
	5	13	16.25	2550849	13.53	0.183	-0.032	0.215	0.303	0.709
	6	2	2.5	604122	3.21	-0.249	0.007	-0.256	0.716	-0.357

Los valores de W (+) y W (-) para la clase 5 se seleccionó para realizar una nueva reclasificación, se asignó el valor negativo de -0.032 (asociación espacial negativa) a todas las clases a excepción de la clase que se le asigna el valor positivo de 0.183 (asociación espacial optima).

5.5.4. Índice de Sílice

Se clasifica en 1 clases, representan datos ordinales descendentes, se evaluó cada clase con los puntos de entrenamiento como se muestra en la Tabla N°30. El resultado de la evaluación nos indica que la clase 1 posee el valor más alto de C/S(C) que indica la alta correlación espacial con los puntos de entrenamiento.

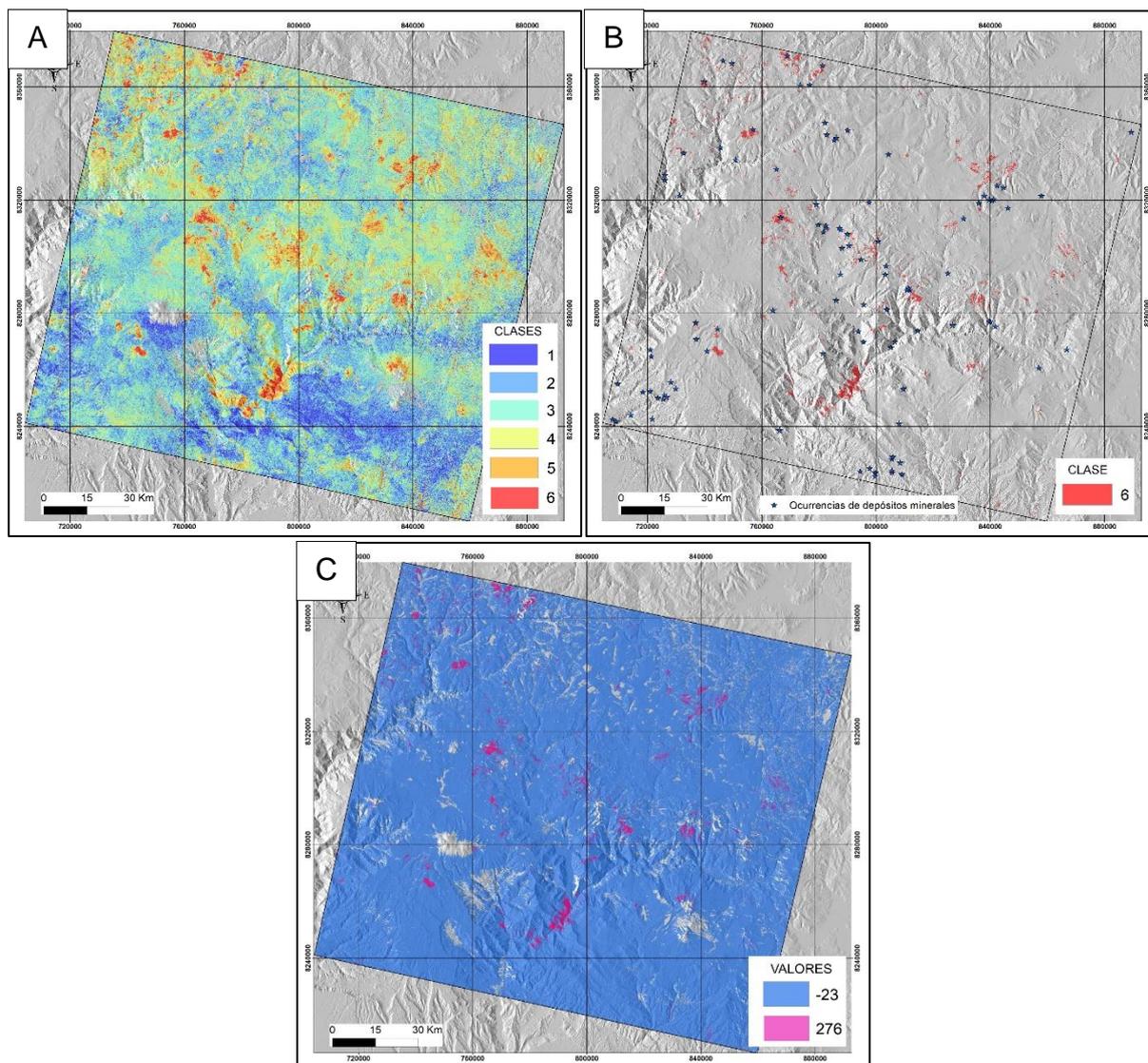


Figura N° 28: A) Clases iniciales clasificadas de la Alteración Argilica, B) Clase 6, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa.

Con los valores W (+) y W (-) de la clase 1 se realiza una nueva reclasificación, se asigna el valor negativo de -0.058 (asociación espacial negativa) a todas las clases

menos a la clase 1 que se le asigna el valor positivo de 0.305 (asociación espacial optima).

5.5.5. Óxidos

Se reclasifica en 6 clases, pero estas representan datos ordinales descendentes, se realiza la evaluación de cada clase con los puntos de entrenamiento.

El resultado de la evaluación nos indica que la clase 6 posee el valor de C/S(C) es el más alto, indicando la alta correlación espacial con los puntos de entrenamiento.

Tabla N° 30: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para el índice de Silice.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W(+)	W (-)	C	S(C)	C/S(C)
SI	1	19	18.63	3476486	13.73	0.305	-0.058	0.363	0.254	1.429
	2	17	16.67	4533744	17.91	-0.072	0.015	-0.087	0.266	-0.327
	3	21	20.59	5070296	20.03	0.028	-0.007	0.035	0.245	0.142
	4	13	12.75	4684055	18.50	-0.373	0.068	-0.441	0.297	-1.485
	5	12	11.76	3785325	14.95	-0.240	0.037	-0.276	0.307	-0.900
	6	20	19.61	3767802	14.88	0.276	-0.057	0.333	0.249	1.335

Tabla N° 31: Valores obtenidos y calculados para cada clase definida para los óxidos.

FACTOR	CLASE	OCM	OCM %	Dominio pixel	% Dominio	W (+)	W (-)	C	S(C)	C/S(C)
OXIDOS	1	12	14.63	3494498	16.67	-0.130	0.024	-0.154	0.312	-0.494
	2	18	21.95	7415534	35.37	-0.477	0.189	-0.666	0.267	-2.496
	3	15	18.29	6652608	31.73	-0.551	0.180	-0.731	0.286	-2.558
	4	8	9.76	2640594	12.60	-0.255	0.032	-0.287	0.372	-0.772
	5	20	24.39	601202	2.87	2.141	-0.250	2.391	0.257	9.298
	6	9	10.98	159675	0.76	2.668	-0.109	2.777	0.353	7.859

Los valores W (+) y W (-) de la clase 6 se consideran para ser asignados como valor negativo de -0.109 a todas las clases, menos a la clase 6 que se le asigna el valor positivo de 2.668 (asociación espacial optima).

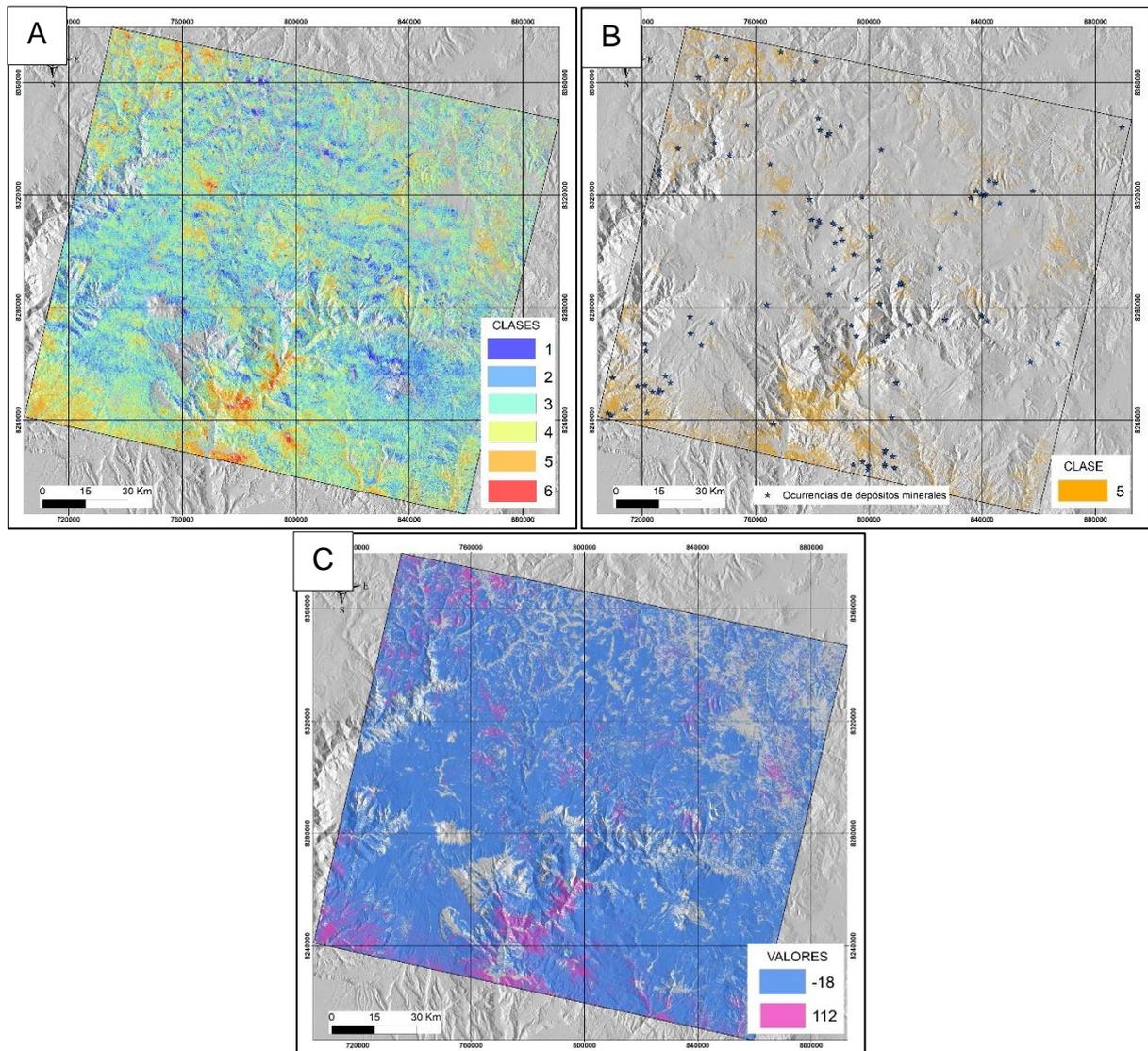


Figura N° 29: A) Clases iniciales, clasificadas de la Alteración Fílica, B) Clase 5, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa

5.6. Modelo final

El modelo predictivo final para la ocurrencia de depósitos minerales final, se calculó al unir todos los mapas binarios, de acuerdo a la ecuación 25, con ayuda de la herramienta Raster Calculator de ArcGis se combinan los mapas

$$WOE_{total} = WOE_1 + WOE_2 + WOE_3 + \dots + WOE_n \quad (25)$$

Donde WOE_{total} es el modelo que representa al mapa de favorabilidad, $WOE_{1,2,n}$ de ocurrencia de depósitos epitermales (Mapa N°10).

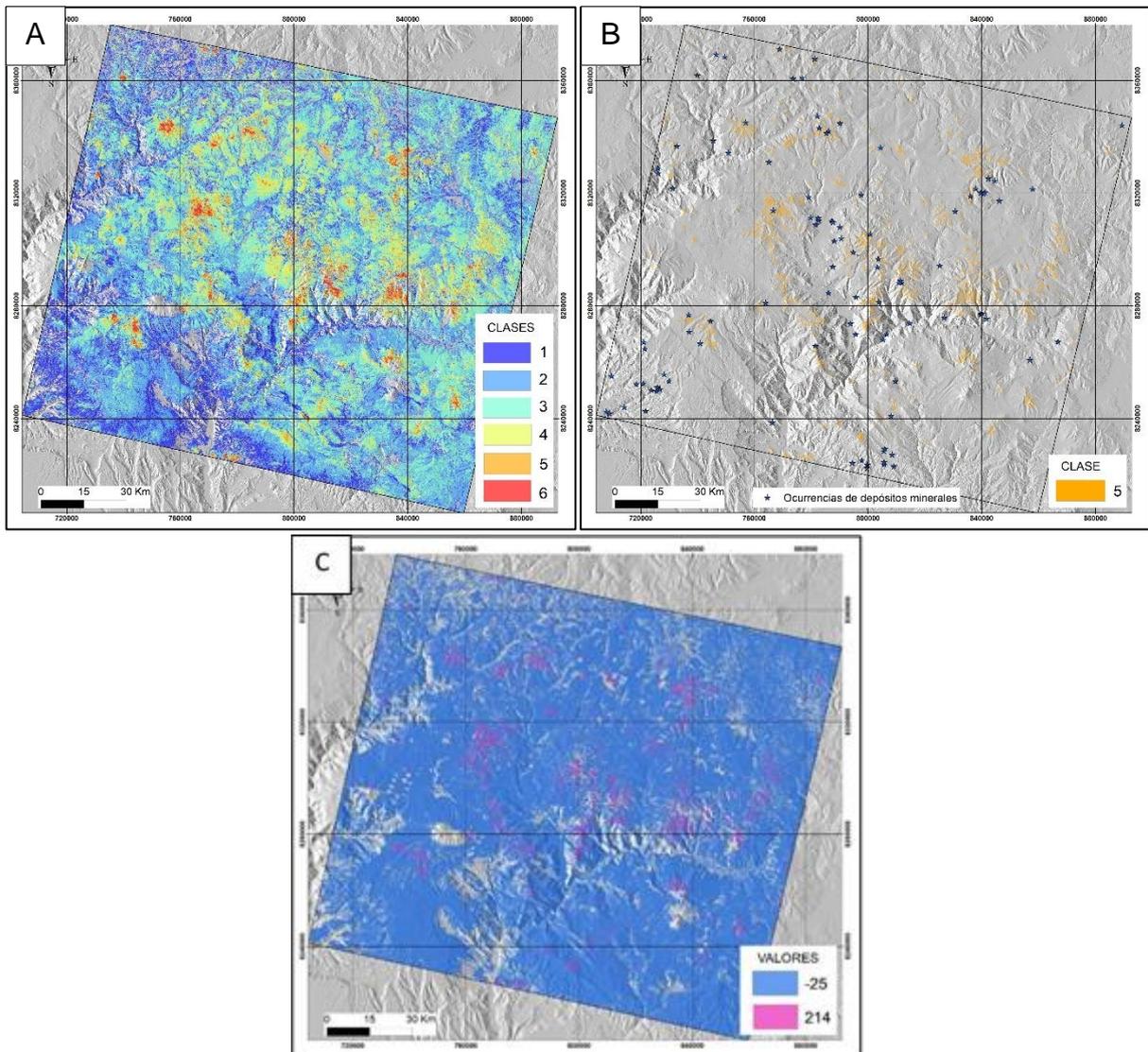


Figura N° 30: Clasificación inicial para los Óxidos, B) Clase 5, evaluada con los puntos de entrenamiento, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa.

5.7. Regresión logística

La regresión logística es un método de análisis multivariado con ventajas sobre la regresión lineal, donde las variables pueden ser continuas o discretas, o una combinación de ambos (Carranza, 2012). El método permite realizar una regresión

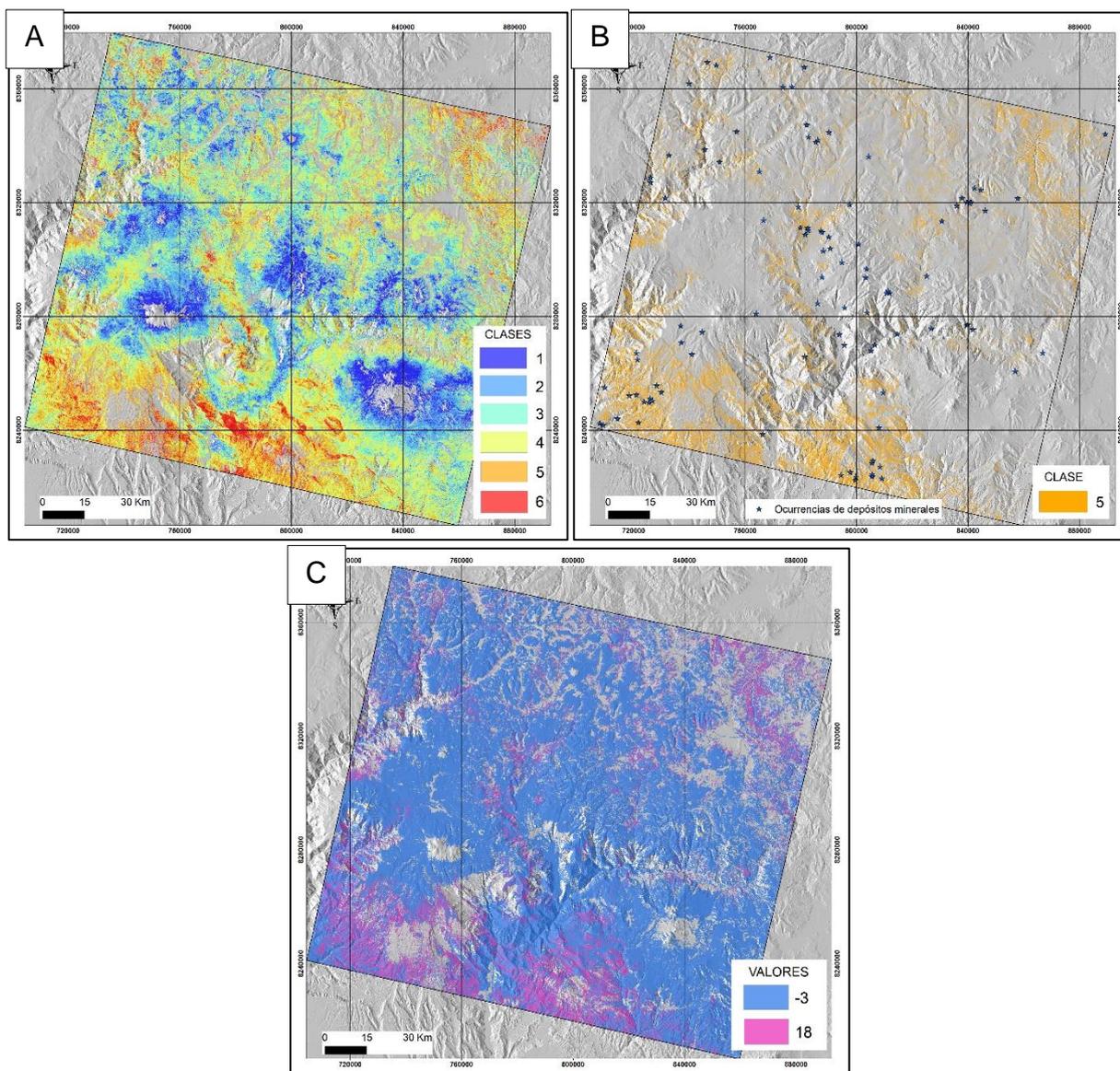


Figura N° 31: Alteración Propilítica, A) Clases iniciales B) Clase evaluada C) Mapa binario final

multivariada entre una variable dependiente dicotómica; representada por una probabilidad que puede tomar el valor de 1 (presente) y 0 (ausente); y variables independientes que pueden tomar cualquier forma, ya que en regresión logística las variables independientes no necesariamente tienen que tener una distribución normal o suponer que tienen una distribución, de tal manera que puedan predecir depósitos cuantitativamente a partir del conjunto de variables.

Para este trabajo el cálculo de la relación espacial con regresión multivariada entre la ocurrencia de minerales, y las evidencias como: unidades litológicas, alteraciones

definidas con la teledetección, densidad de fallas y geoquímica, es fundamental considerar que el tamaño de las celdas sea igual para cada variable (Bonham-Carter, 2002).

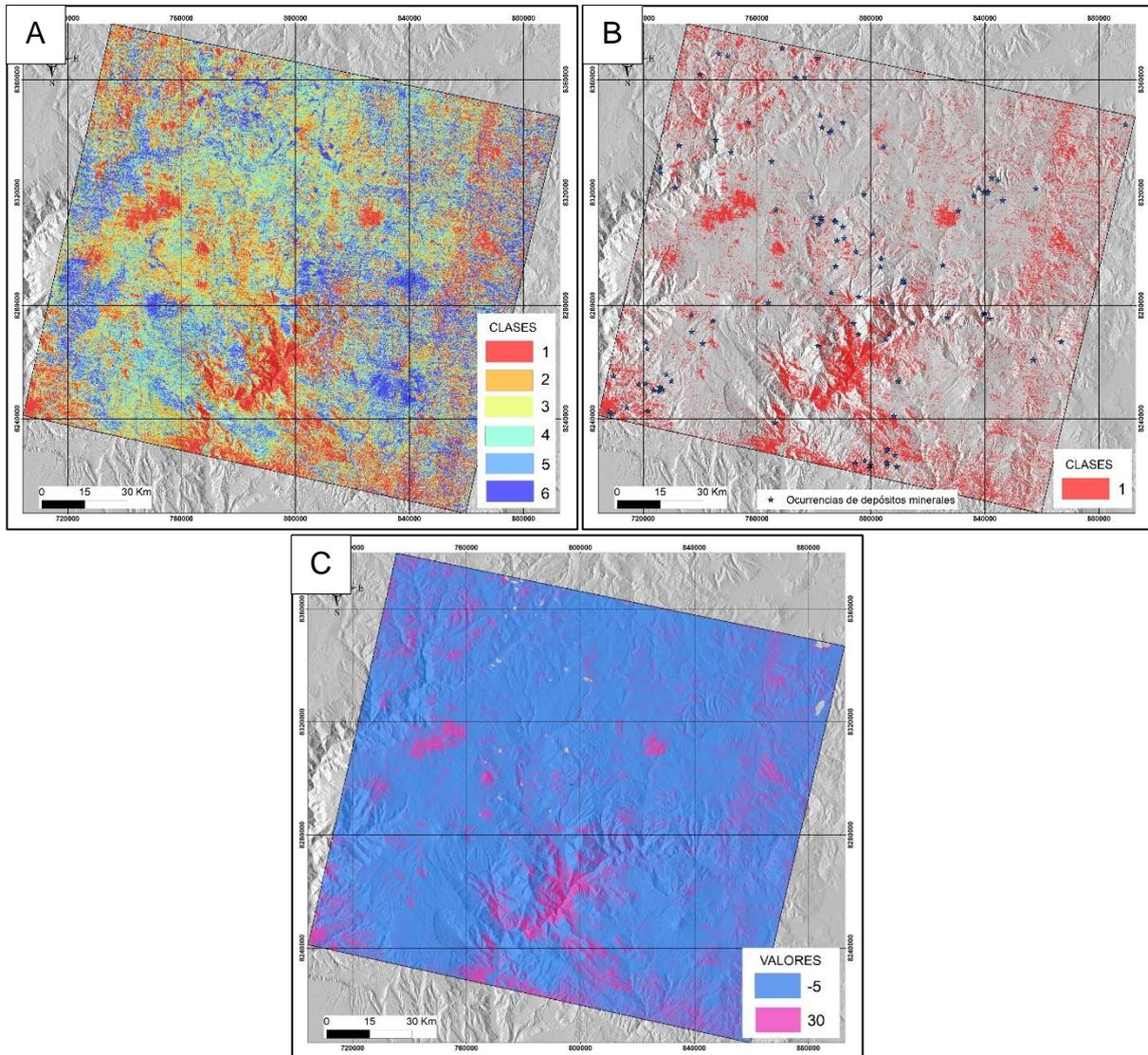


Figura N° 32:A) Mapa de Índice de Sílice B) Clase 1, evaluada con las ocurrencias de los minerales iniciales, C) Mapa binario final, Magenta resalta la correlación espacial positiva y el Azul la correlación espacial negativa.

La Tabla N°32 muestra que tipo de variables que se consideran para este método.

Este modelo no es afectado por la independencia condicional de los patrones, pero si puede ser importante en la eliminación de datos redundantes para otros modelos basado en el manejo de datos sin dejar de lado el criterio geológico.

Los datos utilizados en el método anterior, es decir los datos reclasificados en diferentes clases son considerados para este método. Los datos de cada variable se convirtieron en archivos ASCII o un archivo de texto (Txt) para que se pueda importar en el software estadístico SPSS, previamente a la importación el archivo de texto tener en cuenta que este archivo presenta datos en su cabecero como: el número de filas, columnas, tamaño de celda entre otros, esta información se elimina y se guarda nuevamente el archivo. Al importar se debe considerar que se crea un archivo único por variable, posteriormente se combinó en un solo archivo. Se establece los valores perdidos, al que se le asigna valores de -9999 y/o 0, según sea el caso.

Tabla N° 32: Variables a considerar en la Regresión Logística.

PARAMETROS	
Variable dependiente	Ocurrencias minerales
Variable Independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de fallas • Geoquímica • Alteraciones detectadas por la teledetección • Geología

La variable dependiente que representa la presencia o ausencia de los depósitos y tiene los valores de 1 o 0 respectivamente, son valores que se codifican nuevamente en el software, si existe un valor distinto de cero reasigna al valor de cero. La medida es nominal para los valores categóricos y escalar para valores numéricos (Tabla N°33).

Las variables independientes (evento) se seleccionan considerando que estos resultados observados sean más "probables" ya que la relación entre las variables independientes y la probabilidad no es lineal, para esto es necesario realizar varios algoritmos iterativos (pasos) para calcular los parámetros, agregando en cada

interacción una variable. El cálculo de los coeficientes de regresión se estimó utilizando el modelo de máxima verosimilitud para las variables relacionadas.

El procedimiento es sencillo ya que el cálculo lo hace el propio software. Finalmente se obtiene el resultado, la Tabla N°34 muestra las interacciones realizadas.

Tabla N° 33: Distintas medidas para cada evidencia

NOMINALES	ESCALARES
<ul style="list-style-type: none"> • Geología (indicador) • Ocurrencias 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de fallas • Geoquímica • Alteraciones detectadas por la teledetección

El procedimiento es sencillo ya que el cálculo lo hace el propio software. Finalmente se obtiene el resultado, la Tabla N°34 muestra las interacciones realizadas.

Los coeficientes de las variables se muestran en la tercera columna de la tabla, esta depende de la codificación de cada variable, el error estándar del estimador en la 4ta columna, en la 5ta columna el estadístico de Wald que se distribuyen de acuerdo al Chi2, la última columna es el exponencial del coeficiente que les da valor a las variables cualitativas.

5.8. Modelo final

El modelo predictivo final se calcula aplicando la ecuación 26, a las variables codificadas se le multiplica por un el coeficiente respectivo. En el caso de la geología al considerarla como indicador, se realiza una reclasificación, colocando a cada clase el nuevo valor de la Tabla N°34.

$$Z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (26)$$

Tabla N° 34: Variables evaluadas

VARIABLES							
		B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
Paso 1ª	Ag	,322	,185	3,030	1	,082	1,380
	Argílica	,493	,053	86,495	1	,000	1,638
	Au	,378	,262	2,092	1	,148	1,460
	Fallas	1,834	,589	9,699	1	,002	6,258
	Fílica	28,771	7,608	14,301	1	,000	3,127
	Óxidos	4,080	1,067	14,623	1	,000	59,118
	Propilítica	8,260	5,992	1,900	1	,168	3864,683
	Sílice	3,832	8,737	,192	1	,661	46,161
	Geología			20,785	9	,014	
	Geología (1)	7,886	187,713	,002	1	,966	2659,868
	Geología (2)	8,339	187,713	,002	1	,965	4183,430
	Geología (3)	5,509	187,715	,001	1	,977	246,858
	Geología (4)	7,941	187,713	,002	1	,966	2810,616
	Geología (5)	-,001	350,575	,000	1	1,000	,999
	Geología (6)	7,942	187,713	,002	1	,966	2813,166
	Geología (7)	8,889	187,714	,002	1	,962	7252,270
	Geología (8)	9,309	187,713	,002	1	,960	11040,966
Geología (9)	9,584	187,713	,003	1	,959	14533,268	
Constante	-35,926	187,949	,037	1	,848	,000	

$$Z_{lr} = \text{Geologia} + \text{Fallas}(1834.0) + \text{Au}(378.0) + \text{Ag}(322.0) + \text{Arcillas}(493.0) \\ + \text{Oxidos}(4080) + \text{Filica}(28771.0) + \text{Propilitica}(8260.0) \\ + \text{Silice}(3832)$$

Donde Z_{lr} es el modelo predictivo final que representa al mapa de favorabilidad para el modelo de Regresión Logística de ocurrencia de depósitos epidermales (Mapa N°11).

5.9. Validación de los Modelos Probabilísticos (Peso por evidencias) y Estadísticos (Regresión Logística)

La validación del resultado obtenido con cada uno de los modelos es necesaria, para demostrar que los mapas obtenidos de favorabilidad de ocurrencias son efectivos para encontrar futuras áreas de prospección.

El total de los datos en el área de estudio son 25328943 pixel de 30m por 30m que representan el 100%. Se considera una distribución por percentiles para definir mejor los datos obtenidos de la población generada (Mapas de favorabilidad), es decir que teniendo en cuenta la distribución ordinal, como en los procedimientos anteriores, se da umbrales en base a los percentiles 75, 85 y 95, para generar 4 categorías y darle clasificación categórica: Bajo, Medio y Alto y Muy alto.

Para la evaluación se consideró 30 puntos de entrenamiento aleatorios que representan aproximadamente el 30% de los datos que se muestra en la Tabla N°18.

5.9.1. *Peso por Evidencias (Weight for evidence)*

Con los percentiles definidos se establecen las 4 categorías o clases (Tabla N°35) se calculó la cantidad de ocurrencias que se intersecan con cada una (Tabla N°36). En la evaluación, 4 de las 30 ocurrencias, que representa el 13.3%, se encuentran fuera de las clases obtenidas, ya que el mapa final es una combinación de todos los eventos participantes, suprimiendo zonas que no contienen información, consideradandolas como nulas. La Tabla N°36 muestra la cantidad de pixeles por cada categoría, la zona

considerada como nula representa el 22.5% de la totalidad de datos. En la categoría BAJO recae 3 ocurrencias que representan el 10%, esta posee una mayor área, en la categoría MEDIO Y ALTO recaen 1 (3.3%) y 4 (13.3%) ocurrencias respectivamente, para estas ya el área se ha restringido, pues representan valores mayores al percentil 85 pero menores al percentil 95.

En la categoría MUY ALTO recae la mayor cantidad de ocurrencias, un total de 18 que representa el 60%, las zonas representadas por esta categoría serian áreas con alto potencial de favorabilidad de ocurrencias minerales. Más del 50% de las ocurrencias minerales se encuentran entre las categorías ALTO y MUY ALTO, empíricamente se podría decir que el modelo es válido.

Tabla N° 35: Distribución de los pixeles por categoría propuesta y percentiles

CATEGORIA	PERCENTIL	NUMERO DE PIXEL
1	<75	12028097
2	<85	4650628
3	<95	1873419
4	>95	1074619
NULO		5702180

Tabla N° 36: Intersección de ocurrencias con las clases para el Peso por evidencias

CATEGORIA	NUMERO DE OCURRENCIAS	PORCENTAJE
BAJO (1)	3	10.0%
MEDIO (2)	1	3.3%
ALTO (3)	4	13.3%
MUY ALTO (4)	18	60.0%

5.9.2. Regresión Logística

La distribución de este modelo para su validación también se realizó por percentiles, estableciendo las mismas categorías (Tabla N°37), siendo la principal diferencia que no hay áreas consideradas como nulas ya que no suprime información, estima el 100% del área total y las 30 ocurrencias. La clase o categoría BAJO esta representado por 3 ocurrencias que representan el 10% (Tabla N°38), esta clase representa una mayor área. En la categoría MEDIO recae 2 ocurrencias, ALTO recae 5 ocurrencias, que representan el 6.6% y 16.7% respectivamente, en ambos casos el área va disminuyendo, así como el número de pixeles. La categoría en la que recae la mayor cantidad de ocurrencias es la MUY ALTA, con 20 ocurrencias que representan el 66.7%, siendo el área más pequeña podemos considerarla con mayor potencial para la favorabilidad de ocurrencias minerales.

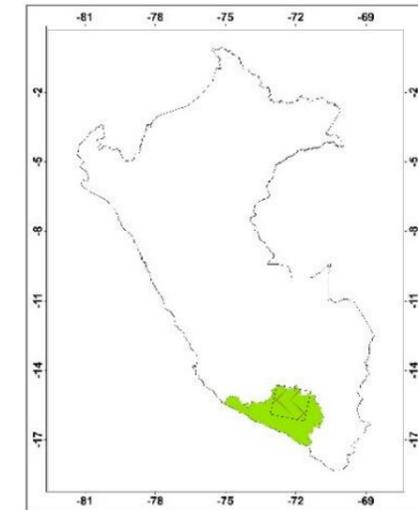
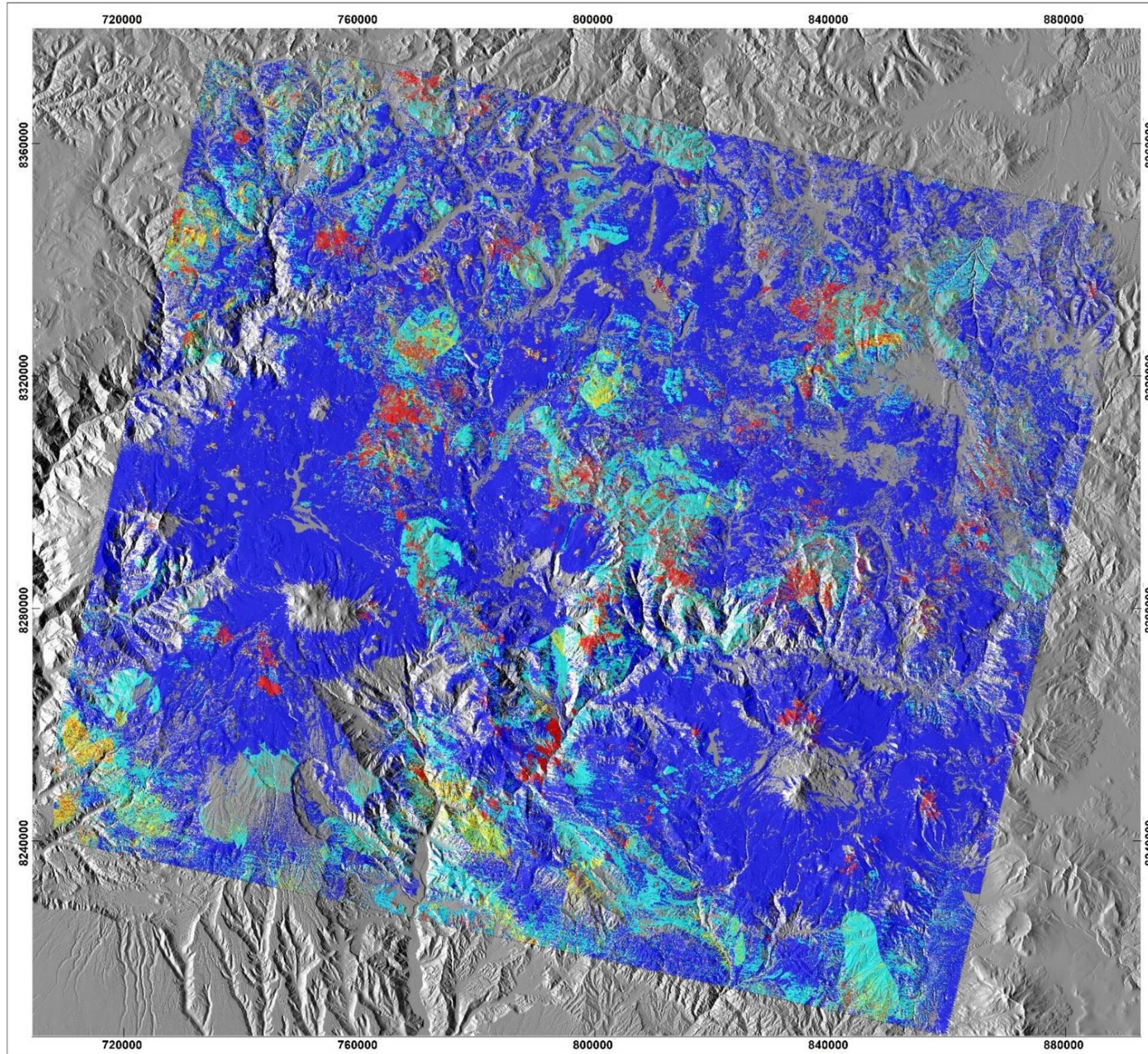
Tabla N° 37: Distribución de los pixeles por categoría propuesta y percentiles

CATEGORIA	PERCENTIL	NUMERO DE PIXEL
1	<75	17730277
2	<85	4650628
3	<95	1873419
4	>95	1074619

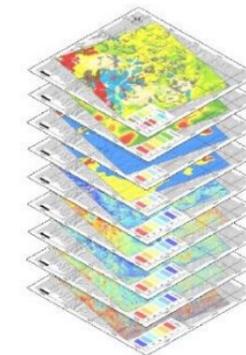
Tabla N° 38: Intersección de ocurrencias con las clases para la Regresión Logística.

CLASES	NUMERO DE OCURRENCIAS	PORCENTAJE
BAJO (1)	3	10.0%
MEDIO (2)	2	6.6%
ALTO (3)	5	16.7%
MUY ALTO (4)	20	66.7%

Mapa N° 9: Mapa de Favorabilidad: Peso por Evidencias



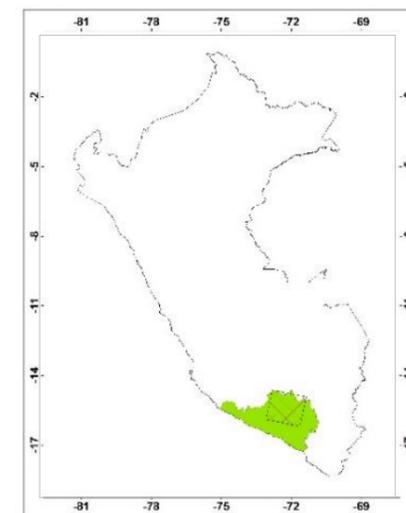
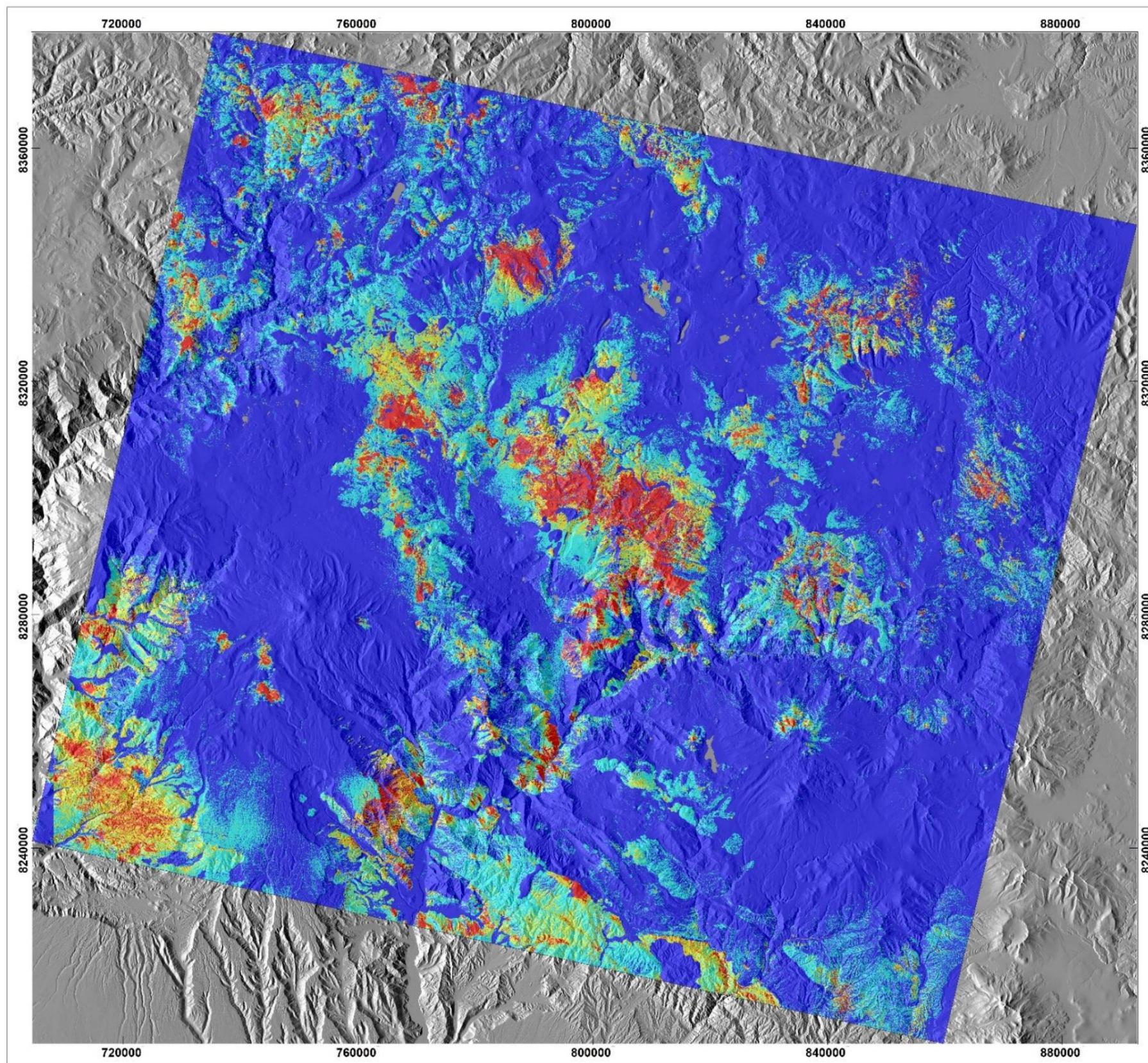
 AREA DE TRABAJO
 AREQUIPA



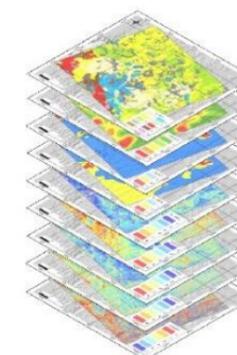
COLOR	PROBABILIDAD	PERCENTIL
	BAJA	<75
	MEDIA	<85
	ALTA	<95
	MUY ALTA	>95

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLOGICA		
 INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO DIRECCIÓN DE LABORATORIOS		
Plano: MAPA FINAL CON PESO POR EVIDENCIAS		
Elaborado por: Yngrid Greysi Orozco Yauilli		Lámina:
Proyección: UTM WGS-84 18S	Escala: 1/100000	Fuente: Elaboración Propia

Mapa N° 10: Mapa de Favorabilidad: Regresión Logística



 AREA DE TRABAJO
 AREQUIPA



COLOR	PROBABILIDAD	PERCENTIL
	BAJA	<75
	MEDIA	<85
	ALTA	<95
	MUY ALTA	>95

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLOGICA		
INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO  DIRECCIÓN DE LABORATORIOS		
Plano: MAPA FINAL CON REGRESIÓN LOGÍSTICA		
Elaborado por: Yngrid Greysi Orozco Yauilli		
Proyección UTM WGS-84 18S	Escala: 1/100000	Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

- ❖ (1) La base de datos utilizados en este trabajo es libre y provienen de diversas fuentes, abarca una superficie de 22878 km² distribuidos en 18 cuadrángulos; dicha data fue georeferenciada en programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), particularmente, se evaluaron los datos considerados como indicadores litológicos, estructurales, geoquímicos de minerales de Au y Ag, alteraciones detectadas en imágenes de satélite para evaluar la ocurrencia de depósitos epitermales.
- ❖ (2) A partir de la integración de la data, se obtuvo tres modelos: (1) Un modelo de la relación espacial entre los diferentes datos o indicadores y se realizaron clasificaciones en base a cortes naturales para obtener diversas clases para cada evento: En geología se determinaron 10 clases, siendo el más propicio el ambiente de rocas del Neógeno - Paleógeno. En geología estructural, las clases definen muy bien estructuras mineralizadas. En los datos geoquímicos de Au y Ag se interpolaron con el algoritmo de inverso a la distancia. En teledetección, se clasificaron 6 clases para obtener una mayor distribución de los pixeles, el número de clases dependerá mucho del grado de procesamiento y quien lo realice.
 - ❖ El modelo de Peso por Evidencias, determina las clases favorables influenciadas por el tamaño de las áreas, es decir, si el área es menor y recaen mayor número de ocurrencias, se convierte en una clase favorable. Este modelo permite evaluar cada clase y evento favorable bajo un criterio según sea el fin para él que se usa.
 - ❖ Finalmente, el modelo de Regresión Logística hace una evaluación estadística de todos los datos, obteniendo resultados según los valores inicialmente asignado, es decir si son escalares o nominales, la

clasificación de grupos se realiza en base a la variable considerada como dependiente (predictora).

- ❖ (3) La validación de los modelos arriba mencionados, y en particular para validar los dos últimos se realizó una clasificación en base a la posición estadística de los percentiles 75, 85 y 95, los que interceptan con las ocurrencias de evaluación. Siendo la clase más alta para mayos modelos la que contiene más del 50% de las ocurrencias.
- ❖ (4) Del análisis y comparación de los modelos obtenidos, la ventaja de usar el modelo de peso por evidencias radica en la experimentación de integración de diferentes datos, mientras que el modelo de regresión logística es favorable para evaluar datos que tengan redundancia, es decir aquellos que nosotros podemos considerar como favorables bajo un criterio, podrían enmascarar áreas o zonas que presenten mayor favorabilidad, por lo que si se cree conveniente eliminar una variable o combinarla de otra manera.

RECOMENDACIONES

- ❖ En la creación de base de datos se debe tener en cuenta la escala en donde se va a desarrollar el trabajo, ya que su disponibilidad sea regional o local, estará relacionada con el manejo y cantidad de datos disponibles.
- ❖ En la integración de otras fuentes de datos como geofísica y geoquímica de libre disponibilidad pueden ayudar a una mejor comprensión de las investigaciones geológicas y mineras, de tal manera que se puede desarrollar trabajos a escala de mayor detalle, siempre y cuando el trabajo se realice en zonas más pequeñas.
- ❖ Es necesario realizar las validaciones de los resultados y los modelos establecidos a través de observaciones de campo.

BIBLIOGRAFIA

- Abrams, M., & Hook, S. (2000). *ASTER User Handbook*. Estados Unidos: Jet Propulsion Laboratory.
- Acosta, H., Alvan, A., Hillebrandt, A., Riegral, W., & Oviedo, M. (2009). Nuevos aportes en la sedimentología y laeontología de las formaciones Chocolate y Socosani (Jurásico inferior a medio) en el distrito de Yura, Arequipa (Sur del Perú). *Volumen Especial N° 7 Víctor Benavides Cáceres*.
- Acosta, H., Alvan, A., Hillerbrandt, V., Riegraf, W., & Oviedo, M. (2011). Nuevos aportes en la sedimentología y paleontología de las Formaciones Chocolate y Socosani (Jurásico inferior a medio) en el distrito de Yura, Arequipa (sur de Perú). *ResearchGate*, 62.
- Acosta, J., Quispe, J., Santisteban, A., & Acosta, H. (2008). Epocas metalogeneticas y tipos de yacimientos metalicos en la margen occidental del sur del Perú: Latitudes 14S-18S. *INGEMMET*.
- Acosta, J., Rodriguez, I., & Huanacuni, D. (2011). *Memoria sobre la geologia economica de la región Arequipa*. Lima: INGEMMET.
- Agterberg, F. (1974). Automatic contouring of geological maps to detect target areas for mineral exploration. *Mathematical Geology vol. 6*, 373-395.
- Agterberg, F. (1989). Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. *Proceedings of the 21st APCOM Symposium, Las Vegas*, 165-178.
- Agterberg, F., & Cheng, Q. (2002). *Conditional Independence Test for Weights of evidence Modeling Natural Resources Research*. Natural Resources Research, Vol. 11, N°4.
- Agterberg, F., Bonham-Carter, G., & Wright, D. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. *Computer Applications in Resource Estimation, Pergamon Press, Oxford*, 1-21.
- Agterberg, F., Bonham-Carter, G., Cheng, Q., & Wright, D. (1993). Weights of evidence modeling and weighted logistic regression in mineral potential mapping. *Computers in Geology, Oxford University Press, New York*, 13-22.
- Aguilar, H., Mora, Z., & Vargas, C. (2014). Metodología para la correccion atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el módulo FLASSH del software ENVI, Centro Nacional de alta Tecnologia. *Revista Geografica de América Central*, 39-59.
- Aguilar, J., & Arellano, G. (2011). *La probabilidad del exito geologico en exploracion petrolera aplicando conocimiento de ciencias basicas y de ciencias de la tierra*. Mexico.

- ArcGis Pro. (s.f.). Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/kernel-density.htm>.
- Arenas , M. (1975). Geología de la Mina Orcopampa Arequipa. Bol. Soc. Geol. del Perú, 46:9-24.
- Arequipa Perú.org. Recuperado de <https://www.arequipaperu.org/flora-y-fauna-de-arequipa>
- Aspinall, P., & Hill, A. (1983). Clinical inferences and decision – Part I. Diagnosis and Bayes' Theorem. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 295-304.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Pergamon, Ontario.
- Bonham-Carter, G., & Agterberg, F. (1999). *Arc-WofE: a GIS tool for statistical integration of mineral exploration datasets*. Ottawa-Canadá.
- Bonham-Carter, G., & Chung, C. (1983). Integration of mineral resource data for Kasmere Lake area, Northwest Manitoba, with emphasis on uranium. *Computers and Geosciences*, 25-45.
- Bonham-Carter, G., Agterberg, F., & Wright, D. (1989). Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical Applications in the Earth Sciences*, 171-183.
- Cabos, R. (2009). *Potencial minero de la region Arequipa, CIA de minas Buenaventura*.
- Caldas, J. (1993). *Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa 32-r, 31-r*. Lima: INGEMMET.
- Camprubi, A., González, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración:. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 10-18.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodriguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Jaimes, F. (2009). Dominios Tectonicos
- Carranza, J. E. (2002). *Geologically-constrained mineral potential mapping (Examples from the Philippines)*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Philippines: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Carranza, J., & Hale, M. (2000). Geologically constrained probabilistic mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research*, 237-253.
- Carranza, J., & Hale, M. (2001). Logistic regression for geologically-constrained mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Exploration and Mining Geology Journal*.

- Carranza, J., Mangaoang, J., & Hale, M. (1999). Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines. *Natural Resources Research*, 165-173.
- Carrino, T., Crosta, A., Bemfica, C., Silva, A., & Lambert, J. (2014). Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets. *Economic Geology*, 73-90.
- Castro Godoy, S. (2007). Discriminación Litológica con ASTER. *Unidad Sensores Remotos y SIG, Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)*.
- Ccallo, W. (2015). *Magmatismo y tectónica del Cretáceo inferior y su relación con la mineralización de yacimientos IOCG en el segmento Acari y San Juan de Marcona, Dpto de Ica*. Puno: Título profesional, Universidad Nacional del Antiplano.
- Cerpa, L., Aguilar, R., Quintanilla, I., Muñoz, L., Rodríguez, F., & Torres, D. (2011). Geología del cuadrángulo de Condorama hoja 31-t, escala 1: 50 000. INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional 143. 83.
- Chung, C. (1978). Computer program for the logistic model to estimate the probability of occurrence of discrete events. *Geological Survey of Canada*.
- Chung, C., & Agterberg, F. (1980). Regression models for estimating mineral resources from geological map data. *Mathematical Geology*, 472-488.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A.
- Cobbing, E., & Snelling, N. (1977). Reconnaissance geochronology of the crystalline basement rocks of the coastal cordillera of Southern Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 241-246.
- Cobbing, J., Pitcher, S., & Taylor, P. (1977). Segments and Super-Units in the Coastal Batholith of Peru. *Journal of Geology*, Vol. 85.
- Corrie, R., & Ninomiya, Y. (2010). Applying Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) spectral indices for geological mapping and mineral identification on the Tibetan Plateau. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Science, XXXVIII (2010)*, 464-469.
- Crosta, A., & Moore, J. (1989). *Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain*. Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology.
- Davila, M. (1988). *Geología de los cuadrángulos de Caylloma 31-s; Boletín N°40 Serie A: Carta Geológica Nacional*. Lima: INGEMMET.
- De la Cruz, B. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azángaro 30-s, 30-t, 30-u, 30-v – Boletín A N°58*. Lima.

- Demouy, S., Paquette, J., Saint Blanquat, M., Benoit, M., Belousova, E., & O'Reilly, S. (2012). Spatial and temporal evolution of Liassic to Paleocene arc activity in Southern Peru unraveled by zircon U-Pb and Hf in-situ data of plutonic rocks. *Lithos* 155. 83-200.
- Dirección de Geología Económica y Prospección . (2002). *Estudio de los recursos minerales del Perú: Franja N°2*. Lima: INGEMMET.
- Dirección de Recursos Minerales y Energéticos. (2013). *Manual de evaluación de recursos y potencial minero*. Lima.
- Fernandez, M. (1993). *Geología de los cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova 28-k, 28-l, 29-k, 29-l, 29-m - Boletín A N° 47*. Lima.
- GEOCATMIN. (s.f.). <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>.
- Goezt, A., & Rock, B. (1985). Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 1147-53.
- Guizado , J. (1968). *Geología del cuadrángulo de Aplao 33-r- Boletín N°20*. Lima: INGEMMET.
- Harris Geospatial Solution. (s.f.). Recuperado de *Atmospheric Correction*, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/AtmosphericCorrection.html>.
- Hedenquist, J., & Henley, R. (1985). The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology* v.80, 1379-1406.
- Hunt, G., & Salisbury, J. (1971). Visible and near infrared spectra of minerals and rock: III Silicates. *Modern Geology*, 283-300.
- Klinck, B., Elison, R., & Hawkins, M. (1986). *The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano west of Lake Titicaca Southern Peru*. Lima: British Geological Survey & Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 353 p. Lima.
- Leon, W., & Palacios, O. (2000). *Memoria explicativa del mapa geológico del Perú Escala 1:100,000. 1999 - [Boletín A 136]*. Lima: INGEMMET.
- Lillesand, T., & Kiefer, R. (1994). Remote Sensing and Image Interpretation. *Geological Magazine*, 248-249.
- Mamani, M., Navarro, P., Carlotto, V., Acosta, H., Rogriguez, J., Jaimes, F., . . . Cereceda, C. (2010). Arcos Magmaticos Meso-Cenozoicos del Perú. XV Congreso Peruano de Geología. *Resúmenes Extendidos*, 563-570.
- Martínez , W., & Cervantes, J. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Pausa (31-p), Escala 1:100 000*. Lima: INGEMMET.
- Mitchell, A., & Garson, M. (1981). *Mineral Deposits and Global Global*. Academic Press.

- Ninomiya, Y. (2002). Mapping quartz, carbonate minerals, and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- Noble, D. (1974). Episodic cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 213-220.
- Olchanski, E., & Dávila, D. (1994). *Geología de los cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi 32-q, 31-q*. Lima: INGEMMET.
- Palacios, M. (1994). *Geología del cuadrángulo de Chulca y Cayarani 30-q, 30-r - Boletín A N° 51*. Lima.
- Pecho, V. (1983). *Geología del Cuadrangulo de Pausa y Caraveli*. Lima: INGEMMET Bol N° 37, Serie A.
- Pitcher, W. (1985). A multiple and composite batholith. In Magmatism at a plate edge. The Peruvian Andes Edited by W. Pitcher, M. Atherton, E. Cobbing, R. Beckinsale. John Wiley and Sons Inc. New York. 243-249.
- Pino, A., Sempere, T., Jacay, J., & Fornani, M. (2004). Estratigrafía, paleogeografía y paleotectónica del Paleozoico superior-Cretáceo Inferior en el área de Mal Paso-Palca (Tacna), Nuevas contribuciones de IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú. *Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial.*, 15-44.
- Pueblo, E. (2016). Crecimiento de producción de Cu, Au y Ag en Arequipa.
- Quispe, J., Carlotto, V., Acosta, J., Macharé, J., Chirif, H., Rivera, R., & Rodríguez, R. (2008). *Mapa Metalogenético de Perú*. Lima: INGEMMET.
- Quispesivana, L., & Navarro, P. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí(32-p), Chuquibamba(32-q), Chivay(32-s), Caylloma(31-s), Velille(30-s), Livitaca(29-s) y Pacapausa(30-p)*. Lima. Lima: INGEMMET.
- Raines, G. (1999). Evaluation of Weights of Evidence to Predict Epithermal-gold Deposits in the Great Basin of the Western United States. *Natural Resources Research*, 257-276.
- Reddy, R., Agterberg, F., & Bonham-Carter, G. (1991). Application of GIS-based logistic models to base metal potential mapping in Snow Lake area, Manitoba. Proceedings of the Canadian Conference on GIS. *Proceeding of the Canadian Conference on GIS*, 607-618.
- Rivera, H. (2007). Introducción a la geoquímica general y aplicada. Lima.
- Rockwell, B., & Hofstra, A. (2008). *Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data-*

Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. Geosphere.

- Rodriguez, J. (2011). *Magmatismo Meso-Cenozoico de la cordillera de la costa y borde oeste de la cordillera occidental del sur del Perú*. Arequipa: Tesis de grado Universidad Nacional de San Agustín.
- Romero, D., & Ticona, P. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huambo 32-r, Serie A, Carta Geologica Nacional*. Lima: INGEMMET.
- Rowan, L., & Mars, J. (2003). lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 350-366.
- Salas, G., Chávez, A., Aguilar, E., Chávez, E., Lajo, J., Díaz, J., . . . Barreda, M. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Chulca (30-q), Cayarani (30-r), Cotahuasi (31-q) y Orcopampa (31-r), Escala 1:100 000*. Lima. Lima: INGEMMET.
- Salisbury, J., & D'Aria, M. (1992). infrared (8-14 microns) remote sensing of soil particle size. *Remote Sensing of Environment*, 345-361.
- Sanchez, A., & Zapata, A. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Sicuani (29-t), Nuñoa (29-u), Macusani (29-v), Limbani (29-x), Sandía (29-y), San Ignacio (29-z), Yauri (30-t), Azángaro (30-v), Putina (30-x), La Rinconada (30-y), Condoroma (31-t)*. Lima: INGEMMET, 2003.
- Santos, A., Weimin, G., Tassinari, C., Soberon, D., & Ccallo, W. (2016). *Geocronología U-Pb sobre zircones en la contrastación de la evolución espacial-temporal del magmatismo y la metalogenia del Batolito de la costa "Segmento Arequipa*. Lima: Congreso Peruano de Geología.
- SENAHMI. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=arequipa>
- Shahi, H., & Kamkar-Rouhani, A. (2014). *A GIS-based weights-of-evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat e Heydarieh area*. Iran: University of Shahrood .
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 3-41.
- Singh, A., & Harrison, A. (1985). *Standardized Principal Components, International Journal of Remote Sensing*. En <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168508948511>.
- Smith, A. (2004). *How to Convert ASTER Radiance Values to Reflectance*. En *University of Idaho*, <http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>. 3 p.
- Steinmuller, K. (2001). Modern hot springs in the southern volcanic Cordillera of Peru and their relationship to Neogene epithermal precious-metal deposits. *ournal of South American Earth Sciences*, v. 14, n. 4.

- Stoffregen, R. (1987). Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Economic Geology*, 1575-1591.
- SUHET. (2015). *SENTINEL-2 User Handbook*. European Space Agency.
- Survey, U. S. (s.f.). <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Estados Unidos.
- Swanson, K., Noble, D., Connors, K., Mayta, O., Mckee, E., Sanchez, A., & Heizier, M. (2004). *Mapa geológico del Cuadrángulo de Orcopampa (Sur del Perú), Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, n. 137, 20, 19 p.* Lima: INGEMMET.
- Thouret, J., Worner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., & Souriot, T. (2007). Geochronologic and stratigraphic constraints on Neogene incision and Miocene uplift of the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 263, 151–166.
- Tonooka, H., Sakuma, F., Kudoh, M., & Iwafume, K. (2004). (<http://tonolab.cis.ibaraki.ac.jp/ASTER/RECAL/>). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Torres. (1991). *Apecttos estratigraficos del area Orcopampa-Arequipa*. Sociedad Geologica del Perú.
- Tosdal, M., Farrar, E., & Clark, H. (1981). Chronology of late Cenozoic Volcanism in the Cordillera Occidental, Southernmost Peru. *Jour. Volcanology Geotherm. Research v 10*, 157-173.
- USGS. (s.f.). Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Van der Meer, F., Van der Werff, H., & Van Ruitenbeek, F. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing Enviroment*, 124-133.
- Van der Meer, F., Van der Werff, H., Van Ruitenbeek, F., Hecker, C., Bakker, W., Noomen, M., & Carranza, J. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112-128.
- Vargas, L. (1970). *Geologia del cuadrangulo de Arequipa 33-s*. Lima: INGEMMET.
- Velarde, L. T. (2006). *Geología y estratigrafía de la zona de Chivay-río Condoroma, Tesis de Grado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ingeniería Geologica y Geografica*.
- Vicente, J. (1989). *Early late Cretaceous overthrusting in the Western Cordillera of Southern Perú*. Energy and Mineral Resources Earth Sciences .
- White, N., & Hedenquist, J. (1995). Epithermal gold deposits. Styles, characteristics and exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 87-136.