



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Facultad de Ingeniería.**

Análisis de imágenes satelitales LANDSAT 8 por Componentes Principales para identificación de zonas con mineralización por carbonatos de cobre en la región de Jolalpan, Puebla.

Tesis

Presentada para obtener el título de
Licenciatura en Ingeniería Geofísica

Presenta:
Francisco Javier Ramos Organillo

Director y Asesor de la tesis:
M. en C. José Castillo Román

Puebla, Pue.

Febrero 2020

Contenido

Agradecimientos.....	5
Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Resumen	6
1.2 Introducción.....	6
1.3 Planteamiento del problema	9
1.4 Justificación.....	9
1.5 Objetivos.....	10
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.....	10
2.1 Percepción Remota	10
2.1.1 Breve historia	10
2.1.2 Espectro Electromagnético.....	12
2.1.3 Sensores y plataformas	15
2.1.4 Programa LANDSAT 8 OLI/TIRS.....	17
2.2 Análisis de Componentes Principales.....	18
2.2.1 Introducción	18
2.2.2 Teoría	19
2.2.3 Aplicación en Percepción Remota	23
Capítulo 3. Estudio de caso: Región Jolalpan.....	26
3.1 Localización.....	26
3.2 Marco Geológico.....	27
3.2.1 Geología Regional.....	27
3.2.2 Evolución tectónica	32
3.2.3 Geología Local	34
3.2.4 Descripción del Yacimiento	37
3.3 Técnicas de procesamiento.....	40

3.3.1 Corrección de imágenes	41
3.3.2 Realce de imágenes	42
3.3.3 Extracción de la información	45
Capítulo 4: Resultados y conclusiones	48
4.1 Análisis de Componentes Principales	49
4.2 Discusión de resultados	55
4.3 Conclusiones	58
4.4 Recomendaciones	59
Bibliografía	59

Desde lo más profundo de mí ser,
Este trabajo esta dedicado
A mis padres Porque no hay mayor error
que la ingratitud.

Agradecimientos.

A mis padres, Luis Ramos Capilla e Isabel Organillo Romero, por su paciencia, cariño y por todo su apoyo desde que comencé la carrera y durante la realización de esta tesis. Sin ellos la realización de este trabajo no se hubiera concluido.

Al maestro José Castillo Román por su apoyo y paciencia desde que comencé a trabajar con él en el servicio social, pasando por las prácticas profesionales y en la realización de este trabajo de tesis. Gracias por compartirme sus conocimientos y por brindarme su confianza dándome la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

A mi mamá Mago, porque fuiste mi pilar en mis primeros años de vida y parte de esta tesis también está dedicada a ti, por tu amor.

A mis hermanos, Ángel y José Luis, por ser mis hermanos mayores y mostrarme con su ejemplo el camino que debo seguir, por corregirme y darme todo su apoyo desde siempre. Muchas gracias.

A mi familia Estela y Jorge, Laura y Elías, Delia y Fabián, por siempre estar ahí, apoyándome y bríndame su cariño a pesar de todo.

A mis amigos: Armando, Nahúm, Enrique, Erik, Alejandro, Alfonso y Eder, por ser parte de todo este proceso, por su amistad y porque sin ustedes la universidad simplemente no hubiera tenido tan gratos momentos y tantas aventuras.

Gracias a todos los que formaron parte de este proceso.

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Resumen.

En el estado de Puebla, la minería metálica de elementos como el oro, plata, cobre, plomo y zinc en los últimos 50 años, solamente ha registrado actividad esporádica. El último año que se trabajaron las minas de la zona Jolalpan, en el sur del estado fue en 1897 (Servicio Geológico Mexicano, 2016). En fechas recientes, los trabajos de recuperación de minas antiguamente explotadas han abierto nuevas oportunidades de exploración y explotación en el sur del estado, por lo que el uso de nuevas técnicas que permitan reducir los costos en los procesos mineros se vuelven importantes. Muchos son los trabajos de investigación que sientan las bases para emplear estas nuevas técnicas, entre ellas la que se propone en este trabajo. El análisis de componentes principales aplicado a la percepción remota propone tratar las imágenes multiespectrales para eliminar información redundante entre bandas y así trabajar solamente en las componentes que contengan la información correspondiente a ciertas características del terreno estudiado.

1.2 Introducción.

En el año 1972, la NASA en conjunto con el USGS lanza a órbita el satélite ERTS que da inicio al programa Landsat 1, brindando así, la oportunidad de acceder a información sobre el territorio a gran escala, a bajo costo y con información sobre la reflectividad de la superficie en la Tierra, de esta forma se abre un nuevo panorama en el estudio territorial pues las aplicaciones serían muchas. Durante más de 40 años el programa Landsat ha ido evolucionando para aportar información más precisa del territorio, y en la actualidad cuenta con el satélite Landsat 8 OLI/TIRS, puesto en órbita el 11 de febrero de 2013, contando con 11 bandas que recogen información sobre las longitudes de onda del espectro electromagnético desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano. Con las nuevas mejoras en los sensores de cada uno de los satélites desde el programa Landsat 1 a la fecha, muchas han sido las aplicaciones que se les han dado a los datos obtenidos por estos satélites, como lo son la minería, estudios de contaminación, caracterización de zonas con potencial geotérmico, atlas de riesgo, vulcanología, hidrología e hidrogeología, entre otros. En este trabajo la aplicación de la percepción remota se hace a la minería de la región de Jolalpan, en el estado de Puebla.

El Servicio Geológico Mexicano ha dividido al estado de Puebla en 5 regiones mineras (Servicio Geológico Mexicano, 2016) siendo de nuestro interés la región minera de Izúcar de Matamoros debido a que abarca los municipios de Teotlalco y Jolalpan, que son los municipios donde se encuentra el área estudiada.

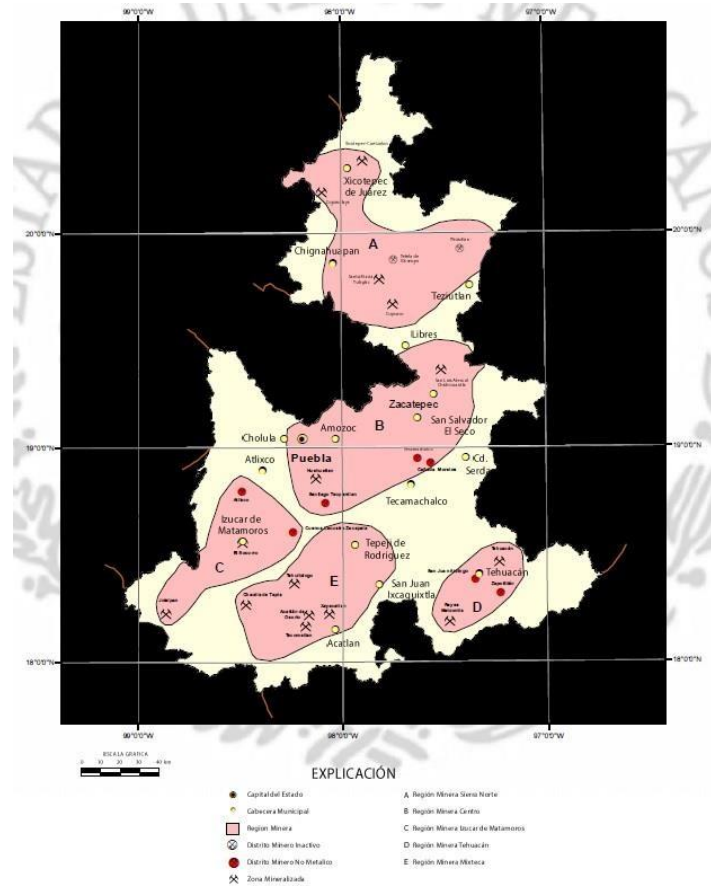


Fig. 1.1 Regiones mineras del estado de Puebla. Fuente: SGM, 2016.

Esta región se caracteriza por una minería no metálica, por poca actividad agrícola de pastizales y una ganadería caprina. El suelo no es apto para hacer agricultura, la mayoría es de tipo mecanizada, y para el aprovechamiento de pastizales destinados a ganado caprino (INEGI, 2009). La principal actividad económica de la población es el comercio, después está la industria manufacturera, dejando en cuarto lugar a la minería, según el INEGI (2009), solo 11 personas se dedican al ramo. Las primeras dos actividades se centran en la mancha urbana de la cabecera municipal, que es donde se aglomera la mayor población, el resto del territorio se encuentra sin urbanización y sin servicios básicos como agua y luz, ocasionando que la gente emigre en busca de mejores oportunidades. Con la industria minera

podría abrirse un nuevo panorama en el cual la minería sería una opción viable de trabajo para los locatarios del lugar, permitiéndoles quedar en su lugar de origen.

En el estado de Puebla, la actividad minera se centra en la extracción de materiales no metálicos, como arenas, gravas, travertinos, ónix, yeso, caliza, mármol, para diferentes usos como es la construcción y la elaboración de piezas ornamentales. En cuanto a la minería metálica solo se ha registrado en el estado, actividad esporádica desde 1897, cuando en la región de Jolalpan, se hicieron los últimos trabajos de extracción de cobre en la mina “San Juan Tlaucingo” (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

Recientemente, la minería metálica ha mostrado cierto interés en algunas zonas del estado, con pequeños proyectos que buscan reactivar minas antiguas que fueron abandonadas desde hace más de 100 años y que muestran gran potencial para continuar con la extracción del mineral. Estas iniciativas de exploración tienen información limitada acerca de la región debido a falta de investigación en la zona, lo que provoca que muchos de los trabajos de explotación sean costosos y no garantizan que los resultados obtenidos permitan que el proyecto sea viable y se continúen los trabajos de extracción.

En otras regiones del país y del mundo se hacen estudios previos que brindan información que sirve como argumento en la toma de decisiones que deben hacerse para definir si un proyecto minero tiene o no el potencial para ser explotado, apoyando en el uso de las herramientas tecnológicas que tenemos a nuestro alcance, como lo son los sensores remotos y las imágenes satelitales.

La utilización de imágenes satelitales como fuente de información del territorio tiene diversas aplicaciones y también son muchas las formas en las cuales se pueden trabajar estas imágenes para resaltar información específica del área estudiada.

El Análisis de Componentes Principales es una técnica estadística que se aplica en el procesamiento de imágenes satelitales con el objetivo de sintetizar la información contenida en las bandas utilizadas reduciendo la información redundante que hay entre ellas. Haciendo esto y apoyados en la firma espectral de algunos elementos presentes en el sitio de interés, se pueden seleccionar de un paquete de imágenes

multiespectrales LANDSAT 8, las bandas que contengan la información espectral que pueda resaltar la radiación emitida por estos materiales y de este modo identificar que puedan ser de interés.

1.3 Planteamiento del problema.

La minería en el estado de Puebla, no cuenta con suficientes trabajos de investigación y exploración para minería metálica. El distrito minero de Jolalpan – Tlaucingo, cuenta con zonas con evidencia de presencia de minerales metálicos económicamente explotables pero que no han sido estudiados a fondo, por esto no es posible definir zonas de potencial minero en la región, además de que la zona es de difícil acceso.

En la actualidad, la percepción remota en la fase de exploración minera permite dar un panorama regional de las características físicas con un alto grado de confiabilidad de una determinada región y con técnicas de procesamiento de la información obtenida con sensores remotos permite facilitar la ubicación de zonas con potencial minero, reduciendo la dimensión del área que se desea estudiar. Una de estas técnicas es el Análisis de Componentes Principales aplicada a la percepción remota, permite detectar zonas con potencial minero.

1.4 Justificación.

En la región de Jolalpan, se han encontrado evidencias de minerales económicamente importantes pero que a falta de trabajos de exploración, no ha sido posible cuantificar. Es por ello, que la percepción remota, es fundamental en las primeras etapas de exploración minera, juega un papel importante en la exploración geofísica, debido a que presentan un panorama regional de las características físicas del medio a estudiar, de manera rápida sin la necesidad de estar presente en la zona para recabar los datos que pudieran necesitarse para hacer el estudio. Es entonces, la percepción remota, una herramienta importante para llegar a zonas de difícil acceso geográfico, topográfico o social. Existen trabajos en México, como el de Ruiz Armenta & Prol Ledesma (2001), y el de Mata Castillo (2015), aplicados a exploración Geotérmica, en el que el uso de la técnica de Análisis de Componentes Principales como técnica procesamiento de imágenes satelitales, permite señalar las zonas que presentan la ocurrencia de minerales de alteración

hidrotermal que se pueden tomar como posibles yacimientos de importancia económica.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo General.

Aplicar la técnica de Análisis de Componentes Principales en Percepción Remota por medio del procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT 8 para la detección de prospectos mineros.

1.5.2 Objetivos Específicos.

Realizar la corrección atmosférica por valores de reflectancia y radiancia a las imágenes satelitales LANDSAT 8, para trabajar en imágenes con el menos error producido por factores externos al sensor, y resaltar la información que sea de nuestro interés.

Identificar la distribución de zonas de alteración hidrotermal asociado a mineralización por carbonatos de cobre por medio de mapas obtenidos mediante la técnica de Componentes Principales.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos.

2.1 Percepción Remota.

2.1.1 Breve historia.

Con el paso de los años la necesidad de obtener información sobre el territorio se ha vuelto menester en los diferentes campos de la ciencia. Desde el principio de la historia de la humanidad, el ser humano ha buscado tener información sobre el lugar que habita y el entorno cercano o lejano que lo rodea, es decir, tener un conocimiento espacial de su alrededor. Desde las técnicas más rudimentarias como mapas hechos a mano a partir de observaciones que hacía subiendo a algún punto

alto, hasta las primeras herramientas ideadas para formar las bases de la percepción remota moderna, como las fotografías aéreas, el ser humano siempre se ha preocupado por tener a su alcance datos que le permitan organizarse y expandirse espacialmente.

A partir del siglo XX, las tecnologías en la ciencia permitieron desarrollar herramientas que simplificaban trabajos que antes eran demasiado elaborados, y fue entonces que debido a los constantes eventos bélicos del siglo y un naciente y veloz desarrollo de las ciencias de la computación, hicieron de la Percepción Remota, un campo de estudio con bastantes aplicaciones (Lira, 2003). En un principio la única forma de tener información espacial y temporal de un determinado lugar era por medio de fotografías aéreas que se hacían mediante vuelos a baja altura y con cámaras especializadas. Si se quería abarcar un área extensa se tenían que tomar varias fotografías para que se lograra el objetivo. Esto suponía desventajas en el estudio de grandes áreas, por un lado estaba el costo de los vuelos y por otro la cantidad de fotografías que se necesitaban para abarcar la zona, además de que la información solo cubría lo “visible” para el ojo humano. Sin duda fue la fotografía aérea la precursora en percepción remota en el siglo XX, pues con sus limitantes abrió un nuevo panorama para la mejora del estudio del territorio.

La NASA en su preocupación por tener y brindar información que le permitiera tomar mejores decisiones frente a desastres naturales, lanza en 1962 el satélite TIROS, que tenía como objetivo hacer monitoreo meteorológico. A partir de entonces, la NASA busca mejorar sus satélites para poder así obtener información espacial, temporal y espectral. Con esto, en 1972 lanza a órbita el satélite ERTS 1 (Earth Resources Technology Satellites (Landsat 1)), precursor en el programa Landsat y que a partir de entonces sería referencia en cuanto a Teledetección (Arozarena Villar, 2009). El programa Landsat fue evolucionando en los siguientes años pero Estados Unidos no fue la única nación que busco obtener información con sensores remotos. En trabajo conjunto con Francia, Suecia y Bélgica, por medio del CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales Francés), se desarrolla el primer satélite de la familia SPOT (Systeme Pour l’Observation de la Terre), y fue lanzado a orbita en el año de 1986 (Martínez Muñoz, 2005). El programa SPOT, al igual que Landsat,

ha ido evolucionando con el transcurso de los años, llegando así a la cuarta generación de la familia con el satélite SPOT 6 que fue puesto en órbita el 09 de septiembre de 2012. Otra de las series de sistemas satelitales meteorológicos son los NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) que desde la década de 1960 ha venido monitoreando la atmosfera terrestre con el fin de brindar información precisa sobre eventos naturales de fuerza incontrolable, para ayudar a prevenirlos y salvar miles de vidas, Hoy en día está en órbita y en funcionamiento el satélite NOAA 19, así como los satélites JASON 3, GOES P y DSCOVR, todos pertenecientes al U. S. Department of Commerce (Martínez Muñoz, 2005).

2.1.2 Espectro Electromagnético.

Las ondas electromagnéticas cubren un espectro amplio de longitudes de onda y frecuencia. Dentro del espectro electromagnético están las ondas de radio, la luz visible, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma. Las ondas electromagnéticas difieren en frecuencia y longitudes de onda pero la relación en el vacío con la velocidad de la luz se cumple para todas ($c = \lambda f$).

Región	Límites
Rayos Gamma	<0.03nm
Rayos X	0.03-300 nm
Ultravioleta	0.3-0.38 μm
Luz visible	0.38-0.72 μm
Infrarrojo	
Cercano	0.72-1.3 μm
Medio	1.3-3.0 μm
Lejano	7.0-1000 μm
Microondas	1mm-30cm
Radio	>30cm

Fig. 2.1 Longitudes de onda para cada región del espectro electromagnético.

Fuente:

El ojo humano solo puede detectar una pequeña parte del espectro electromagnético al que conocemos como luz visible, con un intervalo de longitud de onda que va de 400 a 700 nm, con frecuencias de 7.5 a 4.3×10^{14} Hz. La luz blanca ordinaria incluye todas las longitudes de onda visibles. Sin embargo, con el

uso de fuentes o filtros especiales es posible seleccionar una banda angosta de longitudes de onda dentro de un intervalo de unos cuantos nm.

El espectro electromagnético es muy amplio, pero en Percepción Remota solo se utiliza una parte. Por lo general, solo se utiliza la región del ultravioleta hasta la región de las microondas, dependiendo de su aplicación.

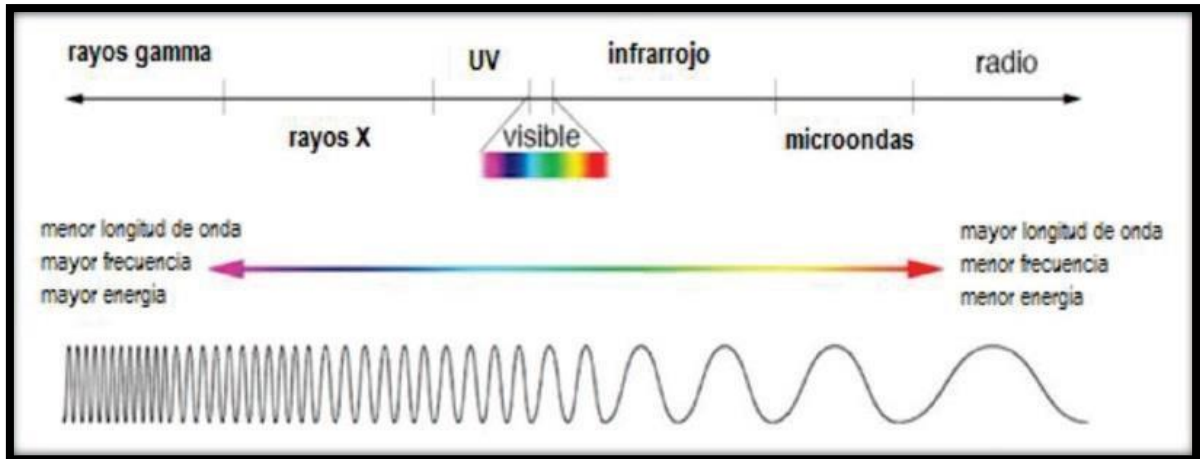


Fig. 2.2 Relación entre longitud de onda y la energía presente.

-Espectro ultravioleta

El espectro Ultravioleta se puede dividir en ultravioleta cercano, que va de 0.32-0.4 micrómetros; ultravioleta lejano, de 0.32-0.28 micrómetros; y ultravioleta externo, por debajo de 0.28 micrómetros (Ulaby , 2007).

La fluorescencia es debida a la radiación del ultravioleta cercano (Cheng, 1998). La fluorescencia es la emisión de radiación visible de algunos materiales, por esto es una herramienta potencial de uso en Percepción Remota, sin embargo no se utiliza comúnmente debido a que la radiación ultravioleta es absorbida por el ozono en la atmósfera.

-Espectro visible.

El espectro visible constituye una porción pequeña del espectro electromagnético, es de gran importancia para la Percepción Remota debido a que sus límites están en la región en la que el ojo humano es capaz de detectarlos. Este intervalo va de 0.4 hasta 0.7 μm de longitud de onda.

Isaac Newton en el siglo XVII, descubre por medio de un experimento con un prisma transparente, que la luz visible se puede separar en 3 segmentos, que hoy en día se conocen como colores primarios, que son azul (0.4-0.5 μm), verde (0.5-0.6 μm), y rojo (0.6-0.7 μm); estos tres colores combinados en una misma porción forman el color blanco.

Color	Long. De Onda
Violeta	400 a 440 nm
Azul	440 a 480 nm
Verde	480 a 560 nm
Amarillo	560 a 590 nm
Naranja	590 a 630 nm
Rojo	630 a 700 nm

Fig. 2.3 Colores de la luz visible y su longitud de onda. Fuente:....

Siguiendo esta misma lógica, los colores intermedios se forman a partir de una combinación de diferentes porciones de azul, verde y rojo. En los materiales, los colores intermedios indican que el objeto que se está observando refleja dos o más colores primarios en diferentes porciones.

Por otro lado, también existen los colores sustractivos que se caracterizan porque absorben un tercio del espectro visible. El amarillo absorbe luz azul y refleja el rojo y verde, el cian absorbe luz roja mientras refleja luz verde y azul, el magenta absorbe luz verde y refleja en rojo y azul. La mezcla de estos colores en mismas proporciones forma el color negro.

-Espectro Infrarrojo.

El espectro infrarrojo abarca de los 0.72 hasta los 15 micrómetros. Dentro de esta región se encuentra la radiación con propiedades muy variadas. Esta región se ha subdividido a su vez en dos categorías, la primera se compone de la radiación del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio. El nombre de cercano hace referencia a que es la región más próxima al espectro visible. Esta región del espectro electromagnético es de gran importancia en la Percepción Remota, ya que en ella se pueden observar diferencias espectrales importantes entre los materiales.

La segunda categoría del infrarrojo se conoce como infrarrojo lejano o térmico, consiste en longitudes de onda mucho mayores que las del espectro visible, y se extiende hasta el límite con la región de microondas.

-Región de las microondas.

La región de microondas es la región donde se encuentran las mayores longitudes de onda que se utilizan comúnmente para la Percepción Remota. Esta región abarca longitudes de onda de 1 micrómetros hasta 1 milímetro. Las longitudes de onda más pequeñas de esta región, tienen un comportamiento muy similar a la radiación del infrarrojo térmico

.

2.1.3 Sensores y plataformas.

Con el creciente desarrollo tecnológico de la ciencia, desde la segunda mitad del siglo XX, se han puesto en órbita muchos satélites de diferentes nacionalidades y con objetivos específicos. Algunos son de uso meteorológico, como los NOAA, otras brindan información Multiespectral del territorio como los Landsat y los SPOT, entre otros. Con esto, la selección de las herramientas se vuelve variada pues existen múltiples paquetes de imágenes satelitales que pueden ser escogidas dependiendo de sus propias características y de los alcances del usuario. En este caso, una de las características más visibles de un satélite, es el sensor, el cual se puede clasificar en pasivo o activo, según sea el caso (SIGMUR, 2018).

Un sensor activo es el que genera su propia radiación y después la reciben reflejada de los materiales que son del enfoque de dicho sensor. Dentro de estos sensores se encuentran los que están basados en tecnología láser como los lidar y radar. Dentro de los sensores pasivos se encuentran los óptico-electrónicos que combinan una óptica similar a la fotografía y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen y de antena (radiómetros de microondas).

En un sistema óptico-electrónico, la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en varias longitudes de onda, cada una de ellas se envía a un conjunto de detectores sensibles a esa región del espectro que la amplifican y la convierten en señal eléctrica y finalmente en un valor numérico conocido como Nivel

Digital (ND). Estos valores numéricos pueden convertirse otra vez a valores de radiancia, conociendo los coeficientes de calibrado. Existen dos grandes tipos de sistemas óptico-electrónicos: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje.

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiación). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizando la señal. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos con los que se trabaja en teledetección (Martínez Muñoz, 2005).

- **Resolución espacial.**- tamaño del pixel.
- **Resolución espectral.**- indica el número y anchura de las regiones del espectro para las cuales capta datos el sensor.
- **Resolución radiométrica.**- número de intervalos de intensidad que pueden captarse.
- **Resolución temporal.**- tiempo que transcurre entre dos imágenes.

En lo que se refiere a los satélites, existen dos tipos fundamentales, los geosíncronos o geoestacionarios y los heliosíncronos. Los primeros se sitúan sobre el Ecuador en una órbita a 36000 km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Es el caso de Meteosat, situando sobre la perpendicular entre el meridiano 0° y el Ecuador, desde el que se obtienen imágenes de la parte de la Tierra visible desde el punto en que se encuentra.

Los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que al aprovechar el movimiento de rotación terrestre se puede capturar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1500 km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local.

Actualmente existen múltiples plataformas que brindan paquetes de imágenes satelitales con diferentes características que a continuación se nombran con algunos de sus más relevantes atributos (SIGMUR, 2018).

Sistema	Capacidad espectral	Número de bandas visible	Número de bandas infrarrojo cercano	Tamaño de píxel (m)	Tiempo de solicitud y programación de adquisición
Quickbird	multiespectral	3	1	2,4	> 1 mes
Terra - ASTER	multiespectral	2	1	15	> 2 mes
Landsat - ETM+	multiespectral	3	1	30	Revisita c/16 días
EO1 - Hyperion	hiperespectral	44	46	30	> 4 meses
SPORH	hiperespectral	108	52	< 0,5	Según requerimiento

Fig. 2.4 Tabla comparativa de diferentes plataformas geoespaciales.

2.1.4 Programa LANDSAT 8 OLI/TIRS.

La misión Landsat 8 fue puesta en órbita el 11 de febrero de 2013 y es operado por la NASA y el USGS. Esta misión está compuesta por dos instrumentos para la toma de las imágenes satelitales. Por un lado tenemos al OLI (Operational Land Imager) que provee acceso a nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los $0.433 \mu m$ hasta los $1.390 \mu m$, y por el otro tenemos al TIRS que registra imágenes desde los $10.30 \mu m$ hasta $12.50 \mu m$.

Los productos generados por LANDSAT 8 son de acceso gratuito y están listos para su adquisición 24 horas después de su adquisición. La información brindada por los satélites es corregida en tierra y suministrada en escenas de aproximadamente 190 km de ancho y 180 km de largo.

Una imagen tomada por LANDSAT 8 está compuesta por 13 archivos: 11 archivos en formato GEOTIFF correspondientes a cada una de las 11 bandas registradas por los satélites, un archivo con metadatos MTL y uno más con una evaluación de la calidad de la escena QA.

A continuación se presenta una tabla donde se numeran las diferentes características del programa LANDSAT 8.

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fig. 2.5. Descripción de paquete de productos Landsat 8. Fuente:...

2.2 Análisis de Componentes Principales.

2.2.1 Introducción.

Es muy común encontrar en diferentes campos de la investigación científica, problemas que tengan contribución de múltiples variables, que aportan información, aunque sea de forma mínima, pero que sin ella el entendimiento y estudio de dicho problema sería incompleto. Por esto, cuando se hace un análisis de datos multivariantes se busca reducir la dimensión de todos estos datos, eliminando la información redundante y resaltando la información que de forma puntual resalta cada variable.

De esta forma, queda claro el objetivo del análisis de componentes principales: si se cuenta con un evento de p variables y que a su vez, se han hecho n observaciones de estas variables, se analiza la posibilidad de reducir el número variables sin que la pérdida de información sea considerable.

El Análisis de Componentes Principales es una técnica que contiene una doble utilidad (Peña, 2002):

1. Permite identificar posibles variables que no habían sido observadas antes del análisis y que están generando variabilidad en los datos.
2. Permite que las variables originales puedan ser transformadas de un sistema correlacionado de datos, a uno que contiene variables que no guardan correlación entre si y que permite una mejor interpretación de los datos.

En el siguiente apartado trataremos la metodología matemática que hay detrás de este método, desde un punto de vista más estadístico, para su mayor comprensión.

2.2.2 Teoría.

Supongamos que tenemos un caso en el que tenemos valores de p -variables en n elementos de una población, y que está dispuesta en una matriz \mathbf{X} de dimensiones $n \times p$, donde las variables se encuentran en las columnas y los elementos en las filas. Por tanto el problema que se desea resolver es encontrar un espacio reducido en dimensiones que aún contenga la mayor información.

Para apoyar, de manera clara, la idea de un cumulo de datos variables, nos apoyaremos en un gráfico (Fig. 2.6), tomado del libro de Peña (2002), en el cual se considera un subespacio de dimensión 1, es decir, una recta. Entonces, se pretende hacer que las proyecciones de los puntos en la recta permanezcan lo más posible. Si consideramos el caso de 2 dimensiones ($p=2$), podemos ver en el diagrama de la Figura 2.1 como se presenta la dispersión y una recta que da un resumen de los datos, ya que pasa cerca de todos los puntos y las distancias entre ellos se mantienen aproximadamente cerca de la recta. Retomando la idea de Peña (2002), si consideramos un punto x_i y una dirección $\mathbf{a}_i = (a_{11}, \dots, a_{1p})'$, definida por un vector \mathbf{a}_i de norma unitaria, la proyección del punto x_i sobre esta dirección es el escalar:

$$z_i = a_{11}x_{i1} + \dots + a_{1p}x_{ip} = \mathbf{a}'_i \mathbf{x}_i$$

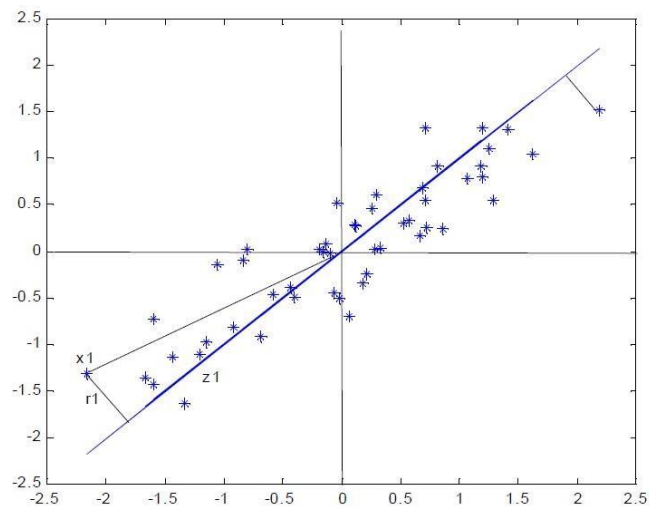


Fig. 2.6 Ejemplo de la recta que minimiza las distancias ortogonales de los puntos a ella. (Peña, 2002)

Haciendo énfasis en el enfoque estadístico de Peña (2002), representar p puntos con la mínima pérdida de información, es igual a cambiar las variables originales p por nuevas variables z_1 , que aún contengan la mayor información posible. Con esto, podemos decir que la nueva variable debe tener máxima correlación con las variables originales, utilizando la variable de máxima variabilidad.

Ahora el problema se centra en encontrar la nueva dirección de un nuevo vector unitario denominado a_2 , el cual, puede tomarse ortogonal al vector unitario a_1 , verificando que la proyección de un punto sobre este eje maximice las distancias entre los puntos proyectados. Por tanto será necesario definir una nueva variable llamada z_2 , que no tenga correlación con la anterior y que tenga máxima varianza.

Para calcular las primeras 2 componentes principales retomaremos los apuntes de Peña (2002), de forma que, con los conceptos ya tratados, sea más comprensible.

El *primer componente principal* es la combinación lineal de las variables originales y que tiene máxima varianza (Peña, 2002). Los valores en este primer componente de los n individuos se representará por un vector z_1 , dado por

$$z_1 = Xa_1$$

Como las variables originales tienen media cero también z_1 tendrá media nula. Su varianza será:

$$\frac{1}{n} z_1' z_1 = \frac{1}{n} a_1' X' X a_1 = a_1' S a_1$$

Donde S es la matriz de varianza y covarianza de las observaciones. Se puede maximizar la varianza sin límite aumentando el módulo del vector a_1 . Para que la maximización de la ecuación anterior tenga solución debemos imponer una restricción al módulo del vector a_1 , y, sin pérdida de generalidad, impondremos que $a_1' a_1 = 1$. Introduciremos esta restricción mediante el multiplicador de LaGrange:

$$M = a_1' S a_1 - \lambda (a_1' a_1 - 1)$$

Y maximizaremos esta expresión de la forma habitual derivando respecto a los elementos de \mathbf{a}_1 e igualando a cero. Entonces

$$\frac{\partial M}{\partial \mathbf{a}_1} = 2S\mathbf{a}_1 - 2\lambda\mathbf{a}_1 = 0$$

Cuya solución es:

$$S\mathbf{a}_1 = \lambda\mathbf{a}_1$$

Que implica que \mathbf{a}_1 es un vector propio de la matriz \mathbf{S} , y λ su correspondiente valor propio. Para determinar qué valor propio de \mathbf{S} es la solución de la ecuación anterior, multiplicando por la izquierda por \mathbf{a}'_1 esta ecuación

$$\mathbf{a}'_1 S \mathbf{a}_1 = \lambda \mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = \lambda$$

Y concluimos que λ es la varianza de \mathbf{z}_1 . Como ésta es la cantidad que queremos maximizar, λ será el mayor valor propio de la matriz \mathbf{S} . Su vector asociado \mathbf{a}_1 , define los coeficientes de cada variable en el primer componente principal.

Para el cálculo del segundo componente, se debe obtener el mejor plano de proyección de las variables \mathbf{X} . Lo calcularemos estableciendo como función objetivo que la suma de las varianzas de $\mathbf{z}_1 = \mathbf{X}\mathbf{a}_1$ y $\mathbf{z}_2 = \mathbf{X}\mathbf{a}_2$ sea máxima, donde \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 son los vectores que definen el plano (Peña, 2002). La función objetivo será:

$$\phi = \mathbf{a}'_1 S \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}'_2 S \mathbf{a}_2 - \lambda_1(\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 - 1) - \lambda_2(\mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_2 - 1)$$

Esta función incorpora las restricciones de que las direcciones deben tener módulo unitario ($\mathbf{a}'_i \mathbf{a}_i = 1$, $i = 1, 2$). Derivando e igualando a cero, tenemos que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{a}_1} = 2S\mathbf{a}_1 - 2\lambda_1\mathbf{a}_1 = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{a}_2} = 2S\mathbf{a}_2 - 2\lambda_2\mathbf{a}_2 = 0$$

La solución de este sistema es:

$$S\mathbf{a}_1 = \lambda_1\mathbf{a}_1$$

$$Sa_2 = \lambda_2 a_2$$

Que indica que a_1 y a_2 deben ser vectores propios de \mathbf{S} . tomando los vectores propios de norma uno y sustituyendo en ϕ , se obtiene que, en el máximo, la función objetivo es

$$\phi = \lambda_1 + \lambda_2$$

Donde es claro que λ_1 y λ_2 deben ser los dos valores propios mayores de la matriz \mathbf{S} y a_1 y a_2 sus correspondientes vectores propios. Podemos observar que la covarianza entre z_1 y z_2 , dada por $\mathbf{a}'_1 \mathbf{S} \mathbf{a}_2 = 0$ ya que $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_2 = 0$, y las variables z_1 y z_2 estarán sin correlación.

De manera general, se puede demostrar que el espacio de dimensión r que mejor representa a los puntos viene definido por los vectores propios asociados a los r mayores valores propios de \mathbf{S} . Estas direcciones se denominan *direcciones principales* de los datos y a las nuevas variables por ellas definidas *componentes principales* (Peña, 2002). En general, la matriz \mathbf{X} (y por tanto la \mathbf{S}) tiene rango p , existiendo entonces tantas componentes principales como variables que se obtendrán calculando los valores propios o raíces características, $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, de la matriz de varianzas y covarianzas de las variables, \mathbf{S} , mediante:

$$|S - \lambda I| = 0$$

Y sus vectores asociados son:

$$(S - \lambda_i I) a_i = 0$$

Los términos λ_i son reales, al ser la matriz \mathbf{S} simétrica, y positiva, ya que \mathbf{S} es definida positiva. Por ser \mathbf{S} simétrica si λ_h y λ_j son dos raíces distintas sus vectores asociados son ortogonales. Si \mathbf{S} fuese semidefinida positiva de rango $r < p$, lo que ocurriría si $p - r$ variables fuesen combinación lineal de las demás, habría solamente r raíces características positivas y el resto serían ceros.

Llamando \mathbf{Z} a la matriz cuyas columnas son los valores de los p componentes en n individuos, estas nuevas variables están relacionadas con las originales mediante:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \mathbf{A}$$

Donde $A'A = I$. Calcular los componentes principales equivale a aplicar una transformación ortogonal A a las variables X (ejes originales) para obtener unas nuevas variables Z que no están correlacionadas entre sí. Esta operación puede interpretarse como elegir unos nuevos ejes coordenados, que coincidan con los “ejes originales” de los datos.

2.2.3 Aplicación en Percepción Remota.

El análisis de componentes principales es una metodología ampliamente usada en teledetección multispectral. La transformación de los datos originales multispectrales mediante análisis de componentes principales puede resultar en un conjunto de nuevas bandas (componentes principales), más interpretables que las originales (Ferrero, Palacio, & Campanella, 2005). El análisis de componentes principales también es usado para comprimir datos, reduciendo la dimensión espectral de las bandas originales en unas pocas bandas transformadas en la imagen de componentes principales.

La aplicación del análisis de componentes principales sobre un conjunto de datos multispectrales da lugar a un nuevo conjunto de bandas no correlacionadas entre sí (ortogonales) ordenadas de acuerdo a la cantidad de varianza que cada una explica (Ruíz Armenta & Prol Ledesma, 1995).

El procedimiento puede conceptualizarse considerando la distribución de los píxeles en dos dimensiones definidas por dos bandas (x_1 y x_2), (Ferrero, Palacio, & Campanella, 2005). En la Fig. 2.7, podemos observar un esquema de la distribución de los píxeles en el espacio espectral definido por x_1 y x_2 , con medias μ_1 y μ_2 .

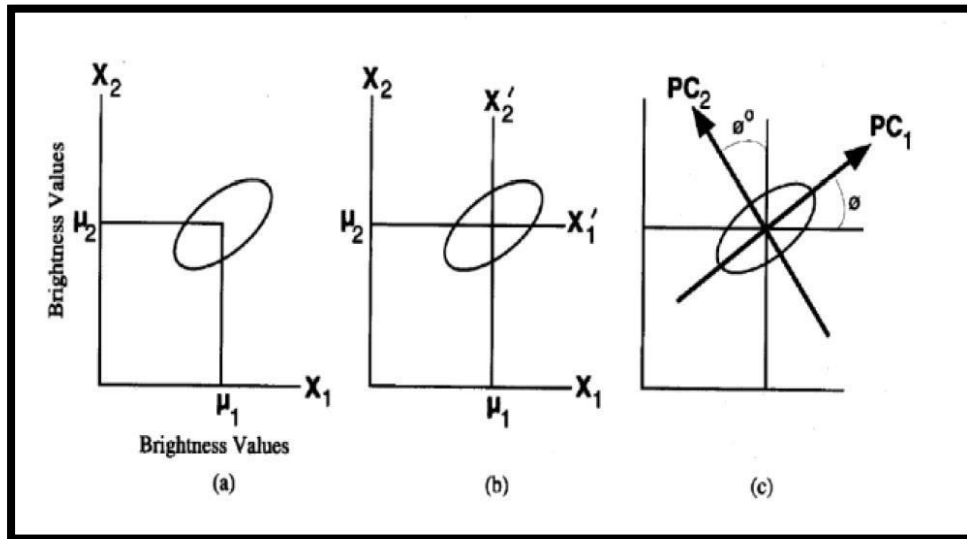


Fig. 2.7 Esquema que representa la distribución de pixel (a), la proyección de un nuevo sistema coordenado (b), y la rotación del nuevo sistema de ejes (c).

La dispersión (varianza) de los puntos alrededor de la media $\mu_1 - \mu_2$ es indicadora de la correlación y la calidad de la información asociada a ambas bandas. Sin embargo, el sistema de coordenadas en (a) no necesariamente es el que mejor representa el comportamiento de los datos satelitales en el espacio multiespectral definido por las bandas x_1 y x_2 .

El objetivo es aplicar el análisis de componentes principales para rotar los ejes originales, de tal forma que los valores de reflectancia originales sobre los ejes x_1 y x_2 sean proyectados en un nuevo sistema de ejes x'_1 y x'_2 (Ruíz, 2003). Como se ve en el gráfico (b) de la Fig. 2.7, esto se obtiene simplemente restando la media al valor original de cada pixel: $x'_1 = x_1 - \mu_1$ y $x'_2 = x_2 - \mu_2$.

El nuevo sistema de coordenadas puede ser rotado alrededor de su origen, un cierto ángulo ϕ de tal forma que el primer eje x'_1 quede asociado con la máxima cantidad de varianza de la distribución de pixeles en el espacio espectral. Este nuevo eje se denomina "primer componente principal" ($PC_1 = \lambda_1$) que puede verse en el gráfico (c). El segundo componente ($PC_2 = \lambda_2$) es perpendicular al primero y de esta forma, los ejes mayor y menor de elipsoide son respectivamente el primer y segundo componente principal del sistema. De forma general, existirán tantos componentes principales como dimensiones tiene el sistema de coordenadas originales y cada

uno contiene una menor cantidad de varianza (Ruíz Armenta & Prol Ledesma, 1995).

La proyección de los datos originales en nuevos ejes requiere de la obtención de ciertos coeficientes de transformación que son aplicados sobre los datos originales en forma lineal.

Esta transformación lineal de los datos se realiza a partir de la matriz de varianza y covarianza, o de la matriz de correlación, de los datos originales y por lo tanto se dice que este método es dependiente de los datos.

La transformación se calcula a partir de los datos originales de la siguiente forma:

- (1) $n \times n$ es la matriz de covarianza (Cov), de un conjunto de bandas de una imagen multiespectral.
- (2) Los valores propios, $E = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ y los vectores propios $EV = [a_{kp} \dots \text{para } k = 1 \text{ hasta } n = \text{bandas, y } p = 1 \text{ hasta } n = \text{componentes}]$ de la matriz de covarianza se calcula como:

$$\begin{array}{ccc}
 & & E \\
 EV & Cov & EV^T = (\lambda_{0,1,1} \quad \lambda_{0,2,2} \quad 0 \quad 0) \\
 [n \times n] & [n \times n] & [n \times n] \\
 & & 0 \quad 0 \quad \lambda_{n,n}
 \end{array}$$

Donde:

$EV^T =$ la matriz transpuesta de vectores propios.

$E =$ la matriz de covarianza de diagonal de valores propios $\lambda_{i,i}$

Hay tantos valores propios como componentes y tantas componentes como bandas originales. Los valores propios fuera de la diagonal valen 0 y se ignoran.

También, calculando la correlación que existe entre cada banda y cada componente, es posible determinar cuál es el aporte (peso factorial R_{kp}) de cada una de las

bandas originales a la información de cada componente (Mata Castillo, 2015), de forma tal que:

$$R_{kp} = \frac{a_{kp} * \sqrt{\lambda_p}}{\sqrt{Var_k}}$$

Donde

a_{kp} = vector propio para la banda k y el componente p

λ_p = valor propio p

Var_k = varianza de la banda k en la matriz de covarianza.

La interpretación de los pesos factoriales de cada banda en cada componente, es que permite conocer para cada componente principal cuales son las bandas originales que más información aportan (Mata Castillo, 2015). De esta forma, en las primeras componentes (de la 1 a la 3), se concentra la mayor variabilidad existente en el conjunto de la imagen multiespectral.

Capítulo 3. Estudio de caso: Región Jolalpan.

3.1 Localización.

El área de estudio se encuentra en la porción suroeste del estado de Puebla. El estudio se hizo en el predio denominado mina Andrea. Este predio tiene una extensión de 100 hectáreas, y se encuentra en el municipio de Teotlalco, Puebla. En la extensión de terreno estudiado en este trabajo se localizan los municipios de Jolalpan, Teotlalco y Huehuetlán El Chico (INEGI, 2009).

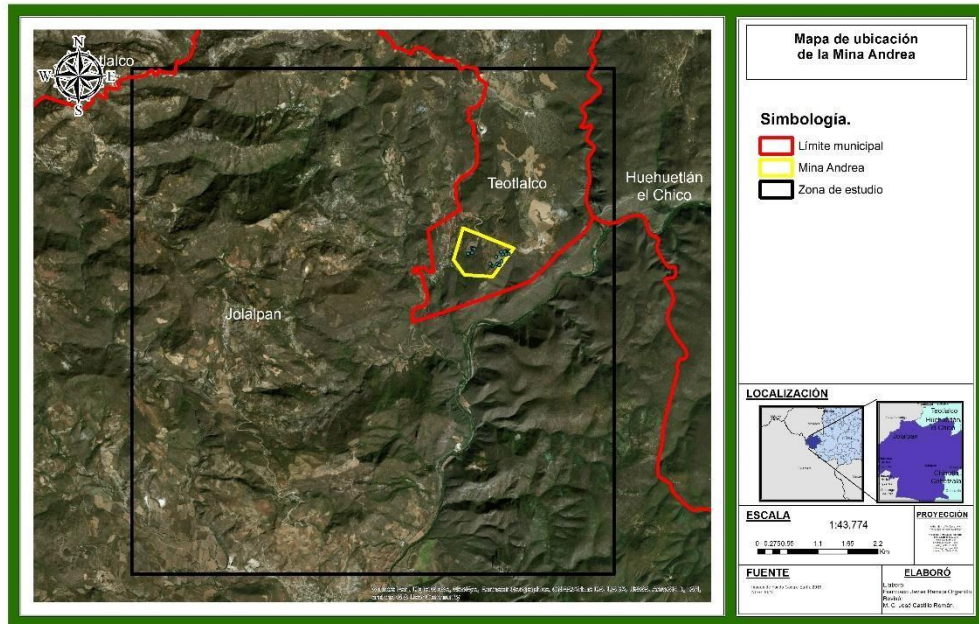


Fig. 3.1 Mapa de localización de la Mina Andrea.

3.2 Marco Geológico.

3.2.1 Geología Regional.

El territorio mexicano se puede dividir en provincias geológicas (Ortega, 1991), que dan un panorama regional de la geología del país dividido en zonas que comparten ciertas características geológicas o geomorfológicas, que permiten agruparlas. La figura 3.2 muestra la distribución de las provincias geológicas en toda la república mexicana.

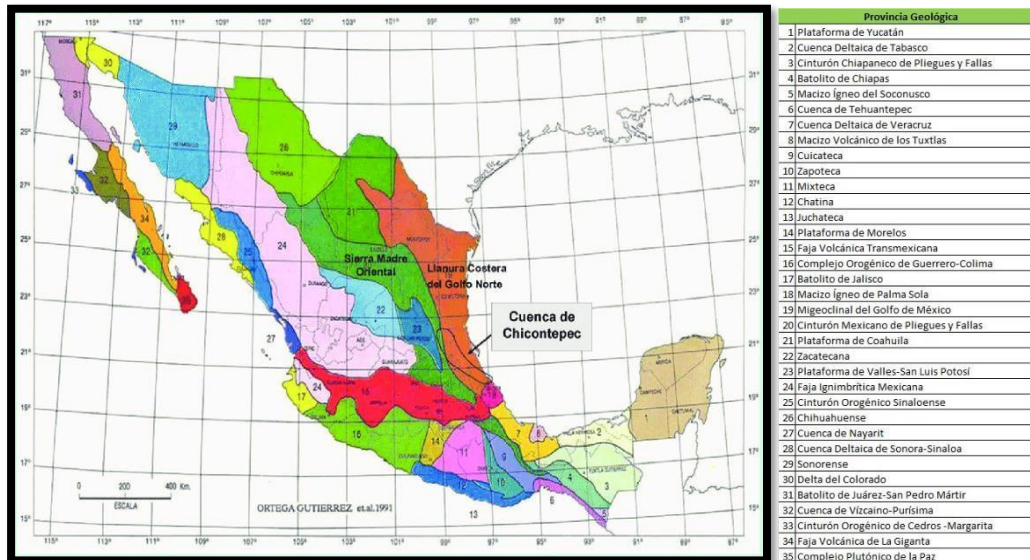


Fig. 3.2 Mapa de provincias geológicas, México. Fuente: SGM, 2015.

El Servicio Geológico Mexicano pone a disposición de todo público cartas Geológicas-Mineras que sirven como fuente de información para hacer un primer acercamiento a las formaciones y tipos de roca presentes en la zona de interés. Para este estudio se utilizó la carta E14-B71 que corresponde a Huehuetlán. Con esta carta se puede decir que el sitio de interés se encuentra en un afloramiento de conglomerados polímticos con presencia de areniscas del Paleógeno pertenecientes al Grupo Balsas. Alrededor de este afloramiento se encuentra la formación Morelos con calizas del Cretácico Inferior al Cretácico Superior. Gracias al perfil que proporciona la misma carta, se puede observar que debajo de los conglomerados del Grupo Balsas se encuentra un Pórfido Andesítico correspondiente al Mioceno. A continuación, se muestra la figura 3.3 que muestra la distribución de las formaciones en las cercanías a la mina Andrea.

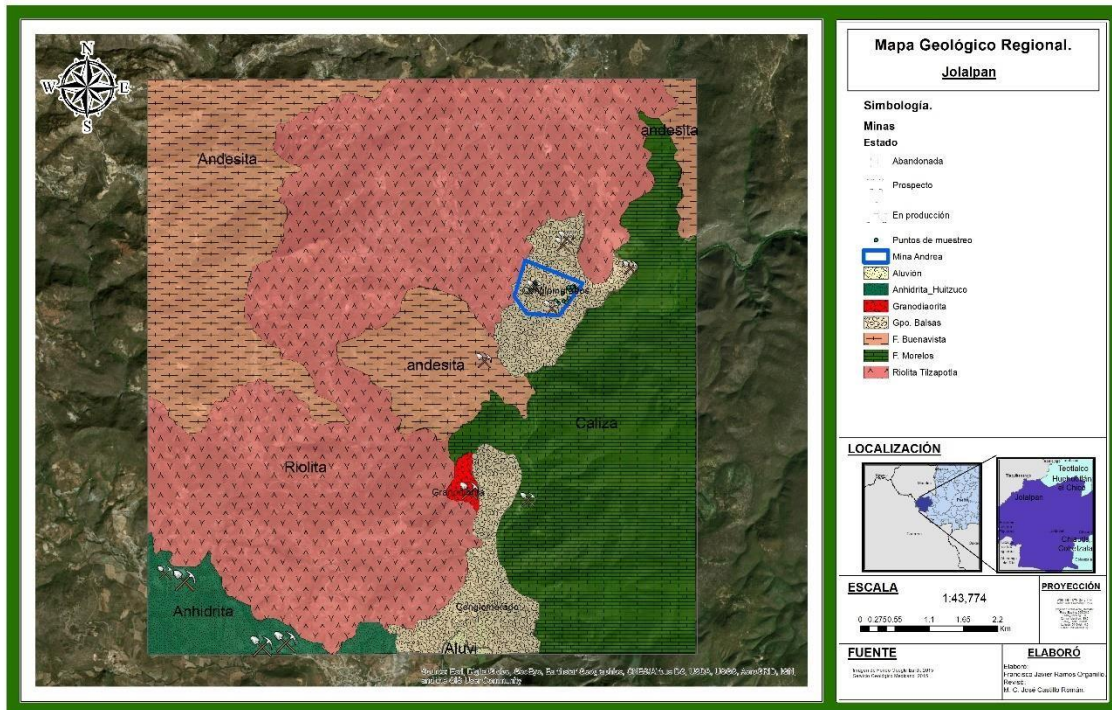


Fig. 3.3 Mapa de Geología Regional del estudio. Datos del SGM, 2015.

- Grupo Balsas.

El Grupo Balsas es un grupo de rocas de variedades litológicas locales de espesor variable, que se encuentran en la cuenca hidrológica del río Mexcala-Balsas (Fries, 1960). El grupo incluye rocas como yeso, caliza lacustre, conglomerados calizos, conglomerados volcánicos, areniscas tobáceas, limonita tobáceas, arcillas, brechas, tobas volcánicas y corrientes lávicas interestratificadas. Este grupo tiene 3 características principales: Primero, que representan a las rocas más antiguas que están depositadas encima de las formaciones cretácicas que están presentes. También son las rocas más antiguas en comparación con las rocas volcánicas que abundan y están ampliamente distribuidas en la zona y que son las más representativas de la parte intermedia del sistema terciario en la porción central de México. Otra de las características de este grupo es su grado de deformación que si bien es moderado contrasta con la deformación que presentan las unidades litológicas del Terciario medio y tardío, que es una deformación más ligera (Fries, 1960).

La litología más típica que caracteriza a la región corresponde a un conglomerado calizo de matriz calcárea, que varía en su grado de endurecimiento, de grano mediano a grueso y de estratificación masiva a gruesa. Estos conglomerados están compuestos por caliza, dolomita, pedernal, algunas veces de arenisca, todos ellos producto de la erosión de las formaciones Morelos, Cuautla y Mexcala, en la región de interés. También, estos conglomerados presentan una matriz de grano fino que está formada por arena, limo y arcilla, con presencia de óxidos de fierro y calcita como elementos cementantes, con color rojo oscuro, aunque algunas son capas de color parduzco o incluso amarillas. Estas diferentes tonalidades se discutirán en el apartado de geología local.

-Formación Morelos.

Esta formación se describe como una sucesión sedimentaria con una interestratificación de caliza y dolomita con granos y fragmentos de pedernal, así como fósiles silicificados. De esta formación, la parte más antigua corresponde al miembro de anhidrita laminada cuya coloración varía de blanco a gris oscuro, presente desde el lago de Tequesquitengo hasta Iguala (Guerrero) y de este último punto hacia el suroeste hasta la latitud del Río Balsas; en el resto de los afloramientos la capa basal corresponde a capas de caliza (Fries, 1960). La textura más común de la caliza es la calcarenita aunque pueden variar de calcilutita a calcirudita. También presenta una estratificación mediana a gruesa (20-60 cm de espesor) con capas que varían de gris a negro, las cuales están constituidas principalmente por carbonatos (98%) y prácticamente no contienen material terrígeno, el autor agrega que la dolomitización que afecta a esta unidad ocurrió en el fondo del mar antes y durante la diagénesis. Esta unidad también se describe como una caliza microcristalina ligeramente margosa, de gris a gris oscura, que presenta horizontes brechoides y ocasionalmente bandas de pedernal negro y algunos horizontes con rudistas y abundantes miliólidos. Las características litológicas de la formación Morelos son fuertemente alteradas al sur de Chilpancingo, por un fuerte brechamiento tectónico o bien, por una intensa karstificación.

Por último, esta formación aflora en los estados de México, Morelos, Oaxaca, al sur de Puebla y al noreste de Guerrero. Sus mejores afloramientos se encuentran en el estado de Morelos y existen buenas exposiciones de roca en los estados de México y Guerrero (Coney, 1983). La Formación Morelos aflora al norte a unos 60 km de la Ciudad de México, al este en los estados de Puebla y Oaxaca, mientras que algunos depósitos de Michoacán representan el límite oeste de esta formación.

-Formación Buenavista.

La formación Buenavista es descrita como una sucesión volcánica gruesa compuesta por corrientes lávicas, brechas y toba de composición andesítica que forma el alto montañoso situado al sur del río Amacuzac y al oriente de la carretera entre Amacuzac y Buenavista de Cuellar. La sucesión volcánica se extiende al oriente hasta unos pocos kilómetros más allá que la longitud de Tilzapotla, donde queda interrumpida por el río Amacuzac que corre hacia el sur, y vuelve a continuar hacia el oriente al lado oriental del río. Todas las rocas volcánicas que están estratigráficamente por encima de la Riolita Tilzapotla en dicha zona se incluyen en la Formación Buenavista. Otras rocas volcánicas comprendidas en la Formación Buenavista quedan en el macizo montañoso situado al norte y noroeste de Taxco, también encima de la Riolita Tilzapotla (Campa Uranga, 1984).

El tipo litológico que predomina en la formación Buenavista es la andesita, aunque las capas individuales varían en su composición desde basalto a dacitas y en la parte superior se presentan rocas riolíticas, e interestratificadas con las corrientes lávicas se encuentran capas de toba y brecha volcánica, así como estratos tobáceos clásticos depositados por aguas corrientes.

- Riolita Tilzapotla.

Las rocas volcánicas situadas en las cercanías de Tilzapotla son descritas como afloramientos extensos de brecha tobácica riolítica que se extienden una distancia de 8 km al oriente de Tilzapotla y casi la misma distancia al norte, antes de que la formación desaparezca como resultado de la erosión. La formación también se

extiende unos 8 km al poniente, donde está cubierta por la formación Buenavista que también la cubre a corta distancia al sur de Tilzapotla (Fries, 1960).

La Riolita Tilzapotla generalmente descansa en concordancia sobre las capas más jóvenes del Grupo Balsas y también pueden encontrar localmente capas delgadas de este grupo arriba de la base de la Riolita Tilzapotla. El contacto Balsas-Tilzapotla es ligeramente inclinado, excepto cerca de fallas donde el buzamiento es mayor. En algunos lugares la sucesión riolítica descansa directamente encima de la Formación Mexacala y en otros se encuentra encima de la Formación Cuautla o de la formación Morelos. La Riolita Tilzapotla es transgresiva, en un sentido estratigráfico, en relación con el Grupo Balsas. El terreno fue probablemente fue de relieve bajo, habiendo sido erosionados los altos topográficos para proporcionar el material depositado en los valles y cuencas.

-Anhidrita Huitzucu.

Esta unidad describe los afloramientos de anhidrita, dolomita y yeso (en algunos afloramientos) que son producto del reemplazamiento hidrotermal de la caliza. La anhidrita es laminada de color variable de blanco a gris oscuro y fuertemente retorcida por el escurrimiento. El material superficial contiene una mezcla considerable de yeso, pero la roca relativamente sin alterar es más densa, es decir es más pura. El yeso se supone como resultado de la hidratación de la anhidrita por las aguas subterráneas. Los afloramientos son demasiado pequeños para permitir un estudio comprensivo de la litología y las relaciones estratigráficas exactas del miembro. El efecto de la disolución por aguas subterráneas es obvio en todos los lugares donde aflora la anhidrita (Fries, 1960).

3.2.2 Evolución tectónica.

La zona de estudio tiene como basamento al Terreno Mixteco, que está representado por rocas metamórficas del Complejo Acatlán, que no afloran en la zona. Desde el Cretácico inferior, se tiene la influencia de la Plataforma Guerrero Morelos, caracterizada por rocas sedimentarias depositadas en ambientes marinos y continentales. Las emisiones volcánicas con intercalaciones sedimentarias ocurren en el Terciario. Tomando desde el Berrisiano y principios del Albiano, se

depositaron potentes espesores de lechos rojos, presentes en los conglomerados de la Formación Zicapa, con algunas lavas basálticas intercaladas. Las evaporitas (Anhidrita Huitzucó) cuya relación con otras unidades no está bien determinada, se ha interpretado en un ambiente de sabkha en la transición entre una planicie costera al oriente de la plataforma. Para el Albiano-Cenomaniano, el depósito es de carbonatos en un ambiente de plataforma abierta hacia el poniente. Las condiciones de subsidencia a partir del Albiano permitieron el depósito de más de 1000 m de caliza, interrumpido al final del Cenomaniano cuando la plataforma fue sumergida por los efectos combinados de un evento anóxico global y el aporte de sedimentos clásticos, que fueron provocados por la Orogenia Laramide. Durante este período, los potentes depósitos marinos de la Formación Mexcala y sus cambios de facies son consistentes con el desarrollo de una cuenca de antepaís cerrada hacia el poniente y una alta tasa de subsidencia. Al final del Cretácico e inicios del Terciario, el ambiente cambió de marino a continental, de forma abrupta en el poniente y gradual al oriente de la Plataforma Guerrero-Morelos. Entre el Eoceno- Oligoceno se depositan terrígenos en cuencas dando lugar a las formaciones Cuayuca y Tilzapotla. A finales del Eoceno, Principios del Oligoceno y hasta el Mioceno se tiene otro episodio magmático, en toda la Sierra Madre del Sur, representado por intrusivos, lavas riolíticas, andesíticas, e ignimbritas, episodio que coincide aproximadamente en edad con las emisiones de la Sierra Madre Occidental, limitada al norte del Cinturón Volcánico Trans-mexicano, e interpretada como continuación al sur de este arco (Servicio Geológico Mexicano, 2019).

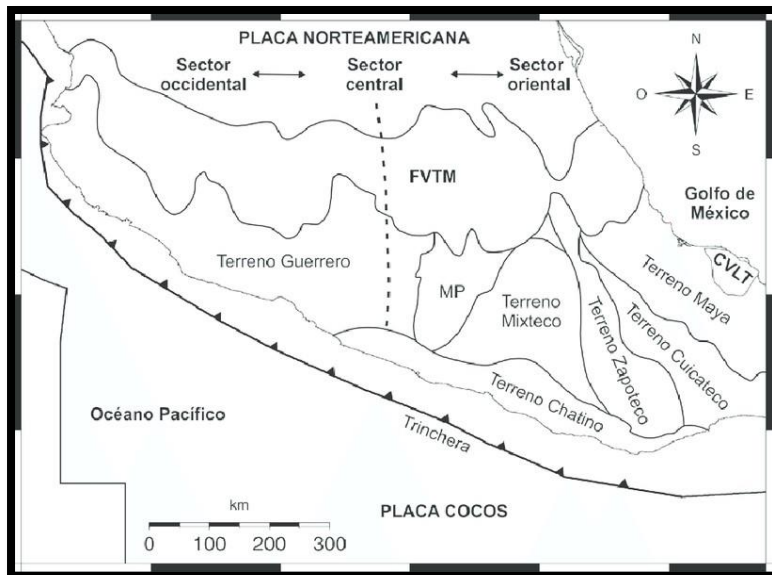


Fig. 3.4 Terrenos tectonoestratigráficos de la zona centro-sur de México. (Ortega-Gutiérrez et al., 2008).

3.2.3 Geología Local.

Se hizo el reconocimiento del área de estudio, en donde se hizo un recorrido del terreno y un muestreo en puntos determinados dentro del predio. En cuanto a la geología local, se destaca la presencia de conglomerados compuestos por fragmentos de caliza, y un cementante de sílice que hizo muy difícil los trabajos de extracción de las muestras requeridas para el análisis petrográfico en laboratorio. En la parte del cerro que comprende el predio, dirección noroeste, hay presencia de óxido de hierro, con abundantes hematitas y limonitas, de tonos rojizos y amarillentos.



Fig. 3.5 Muestra tomada del predio de la mina Andrea, presenta alto contenido de óxidos de hierro.

Existen diferentes tonalidades en los estratos del predio, estos pueden ser amarillos, rojos, cafés y negros. Estas tierras de color son de mucha importancia para el comercio local ya que se usan para colorantes, en especial el negro, el cual es muy raro de encontrar. Estas tonalidades se deben a la presencia de minerales como la goethita, hematita, calcita y dolomita para las tonalidades amarillas; y para las tonalidades rojas hay mayor presencia de minerales como la hematita, cuarzo, calcita, barita, caolinita y fluorita (Girón García, Lozano Santacruz, Corona Esquivel, Piedad Sánchez, & Levresse, 2011). Estas dos tonalidades, amarillo y rojo, son las que se encuentran en el predio de la Mina Andrea.

En la parte sureste, se encuentran pozos donde se hacían trabajos de minería, pero que en la actualidad se encuentran rellenos por restos vegetales y pedazos de roca. Como parte de los trabajos mineros de remediación, se inició con la limpieza de los pozos y se recuperaron algunas muestras para su análisis petrológico.



Fig.3.6 Muestra obtenida del pozo 1, se observan evidencias de malaquita.

Se estima que la profundidad de los pozos es de 10 m. En algunos pozos se pudo observar evidencia del mineral Malaquita (Figura 3.6), el cual es un carbonato de cobre, y se presenta de forma diseminada en la roca encajonante (toba riolítica). Se observó también una capa de sílice que envuelve a los conglomerados a una profundidad de 2 m, y un horizonte que pese a los tonos rojizos, probablemente causado por el deslave de la superficie, se identificó como caolinita, típica de una alteración argílica. Este tipo de alteración se presenta cuando los minerales arcillosos (caolinita) reemplazan a las plagioclasas y a los silicatos máficos de la toba riolítica, debido a un proceso de lixiviación ácida (CFE, 2016). En la figura 3.7, se presenta una muestra recolectada del pozo 1 en el cual se pudo identificar un horizonte de caolinita.

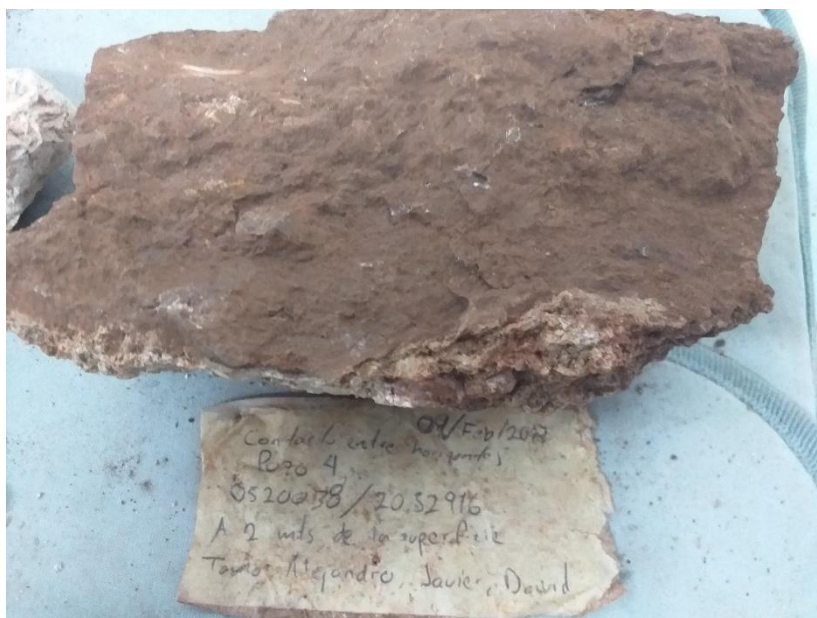


Fig. 3.7 Muestra tomada del horizonte de caolinita presente en los pozos de extracción.

3.2.4 Descripción del Yacimiento.

Se puede decir que en la zona hay presencia de yacimientos hidrotermales. La mineralización se deriva de líquidos magmáticos residuales con contenido de carbonatos de cobre y que presenta reemplazamiento metasomático en los conglomerados del Grupo Balsas y que se emplazó por medio de fracturas y cavidades en la roca, esto da idea de que la zona presenta un enriquecimiento supergenico a profundidad (Servicio Geológico Mexicano, 2019). Además en los mismos afloramientos del Grupo Balsas existen alteraciones como Oxidación y Silificación. Del muestreo hecho en la zona se obtuvieron muestras de mano con los minerales de Malaquita [$Cu_2CO_3(OH)_2$] y Azurita [$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$], ambos carbonatos de cobre. Estos minerales se emplazan en los conglomerados polícmíticos y en las tobas riolíticas presentes en el sitio, en ambos casos se observó alto contenido de óxidos de hierro, como hematita y limonita.

3.2.4.1 Alteración Hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un proceso complejo que involucra cambios mineralógicos, químicos y texturales en las rocas afectadas. Ocurre debido al desequilibrio físico-químico de las asociaciones mineralógicas producto de su interacción con fluidos calientes, resultando en la formación de nuevas asociaciones

minerales, estables a las nuevas condiciones. La alteración hidrotermal refleja la interacción del fluido, típicamente dominado por agua, con las rocas a temperatura desde 100 °C hasta mayores a 300 °C. Los principales factores que controlan el proceso de alteración son: la naturaleza de la roca encajonante y la composición del fluido (CFE, 2016). Existen diferentes tipos de alteración hidrotermal que a continuación se describen.

-Alteración Propilítica.

Se caracteriza por la adición de agua y dióxido de carbono a la estructura de los minerales. Los minerales típicos de este tipo de alteración son la epidota, la clorita, algunos carbonatos, albita, feldespato potásico y pirita.

-Alteración Fílica.

La alteración fílica o sericítica se caracteriza por la asociación mineral cuarzosericita-pirita. Otras fases minerales asociadas usuales son el feldespato potásico, la calcita, la biotita, la anhidrita y la apatita.

-Alteración argílica y argílica avanzada.

La alteración argílica está caracterizada por la formación de minerales arcillosos debido al intenso proceso de hidrólisis, producto de la gran acidez de los fluidos. Ocurre a temperaturas entre 100 °C y 300 °C. Los minerales arcillosos son producto de la alteración de plagioclasas, feldespatos y silicatos máficos. La alteración argílica se divide a su vez en argílica y argílica avanzada.

La alteración argílica se define por la presencia de montmorillonita y arcillas del grupo de la caolinita, y comúnmente, algunos sulfatos asociados. Por su parte la alteración argílica avanzada se produce cuando el ataque de fluidos ácidos es muy intenso y es acompañado por la lixiviación de cationes alcalinos, produciendo la destrucción total de los feldespatos y silicatos máficos. Los minerales típicos de este tipo de alteración a diferentes temperaturas son la caolinita, dickita, pirofilita, barita, alunita y diásporo.

3.2.4.2 Minerales guía.

-Malaquita.

Etimología: de la palabra latina *malachites* en alusión a su color verde. **Fórmula:** $Cu_2(OH)_2CO_3$. **Sistema cristalino:** Monoclínico. **Aspecto:** En masas botroidales o estalactíticas con capas concéntricas de diferente intensidad de color. También pseudomórfica de la cuprita por alteración de ésta. Los cristales no son frecuentes y, cuando aparecen, se presentan agrupados en forma radial. **Propiedades:** *Color:* verde, de claro a oscuro. *Raya:* verde claro. *Brillo:* de vítreo a adamantino. *Fractura:* concoidea. *Exfoliación:* perfecta. *Dureza:* 4. *Peso específico:* 4. **Yacimiento:** Es un mineral secundario en los yacimientos de minerales de cobre, y debido a este origen está muy extendida. El yacimiento más importante en la actualidad se encuentra en Shaba (Rep. Democrática del Congo). **Aplicaciones:** En la antigüedad se empleó como colorante. Hoy sólo se utiliza por su valor ornamental. (Dana, 1848).

-Azurita.

Etimología: del árabe *lazurd*, azul, por su color. **Fórmula:** $Cu_3[OH(CO)_3]_2$. **Sistema cristalino:** Monoclínico. **Aspecto:** En masas compactas, a veces de aspecto aterciopelado, y en agregados radiales esféricos; muchas veces formando pátinas. Los cristales poseen hábito prismático, con abundantes estrías. **Propiedades.** *Color:* azul intenso. *Raya:* azul blanquecino. *Brillo:* de adamantino a vítreo. *Fractura:* astillosa. *Exfoliación:* no presenta. *Dureza:* 4. *Peso específico:* 3,9. **Yacimiento:** Es un mineral secundario. Aparece asociado a yacimientos de sulfuro de cobre, a partir de los cuales se origina en ambiente carbonatado. Los cristales de mayor tamaño se han hallado en Marruecos; otras localizaciones de interés son Chessy (Francia), Tsumeb (Namibia), etc. **Aplicaciones:** Se utiliza principalmente como piedra ornamental. (Dana, 1848).

3.2.4.3 Pórfidos Cupríferos.

Los pórfidos cupríferos son yacimientos de gran tonelaje y baja ley de cobre, pero que además de cobre, estos yacimientos pueden presentar cantidades variables de molibdeno y/o minerales preciosos como Oro (Au) y Plata (Ag), que son de especial interés económico. Se asocian a rocas intrusivas generalmente félsicas de composición granodiorítica. Este tipo de yacimiento presenta un modelo zonal de

alteración hidrotermal con un núcleo de alteración potásica, que gradúa hacia afuera hacia una alteración filica. En su zona periférica encontramos facies argílicas y propilítica. La secuencia de alteración es la siguiente: 1) formación de las zonas de alteración potásica y propilítica; 2) desarrollo de la alteración filica; y 3) formación de facies de alteración argílica en la parte superior del sistema. Esta última puede ser avanzada implicando la presencia de minerales tales como caolinita y alunita. (Valencia, 2006)

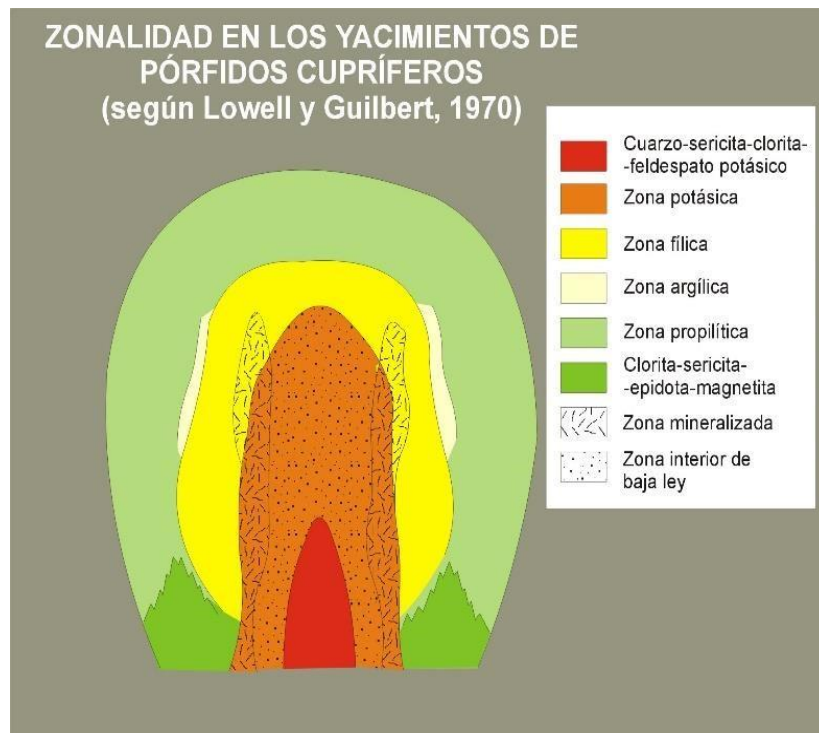


Fig. 3.8 Modelo zonal de pórfido cuprífero.

3.3 Técnicas de procesamiento.

Del paquete de imágenes satelitales LANDSAT 8 comprende imágenes que abarcan ciertas regiones del espectro electromagnético. En este estudio se utilizan solamente las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, dejando las bandas térmicas de lado, ya que no son de interés para este estudio. Por otro lado, la banda 8 Pancromática, también se utiliza para mejorar la resolución de las bandas.

Para hacer un correcto procesamiento de imágenes satelitales, es necesario seguir una metodología marcada para poder utilizar información correcta de la región estudiada y poder extraer la información que sea de nuestro interés. Para ello, se

proponen 3 fases que permitirán corregir, realzar y extraer la información útil para este estudio:

- Corrección de imágenes: en esta fase se harán las correcciones a las imágenes por radiancia y reflectancia.
- Realce de imágenes: las imágenes se someterán a un mejoramiento para que la visualización de las imágenes sea de mejor resolución.
- Extracción de información: las imágenes corregidas y mejoradas se procesaran por medio de Análisis de Componentes Principales para obtener la información necesaria para la elaboración de la cartografía.

3.3.1 Corrección de imágenes.

Se hicieron las correcciones de las bandas utilizadas para este estudio por medio del software QGIS 2.18 ®. Las correcciones por radiancia y reflectancia se hacen con el fin de corregir los errores por nubosidad y partículas presentes en la atmosfera que pudieran provocar la dispersión de la radiación electromagnética modificando la información grabada por el sensor. Por lo general, en estudios terrestres se escogen las imágenes que estén libres de nubosidad pero aun así es necesario hacer las correcciones debidas.

El software QGIS ®, utiliza una paquetería especializada para corregir estos efectos externos al sensor remoto que graba la información. Esta paquetería se encuentra en la opción de pre procesamiento de imágenes. En las figuras 3.9 y 3.10 se presentan, primero un catálogo ráster de las imágenes sin corrección y posteriormente un catálogo con las imágenes corregidas.

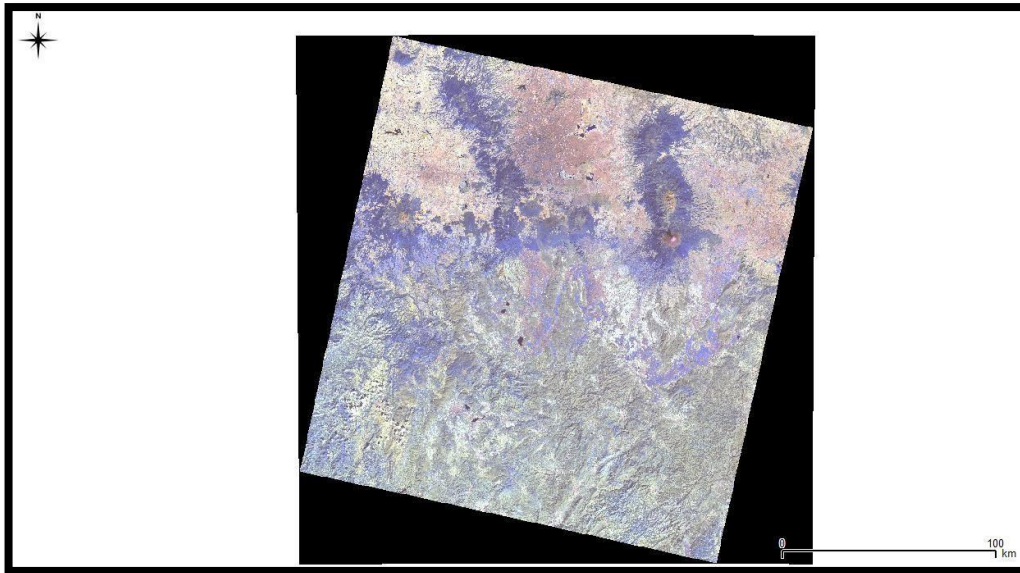


Fig. 3.9 Paquete de imágenes LANDSAT 8 sin corrección atmosférica.

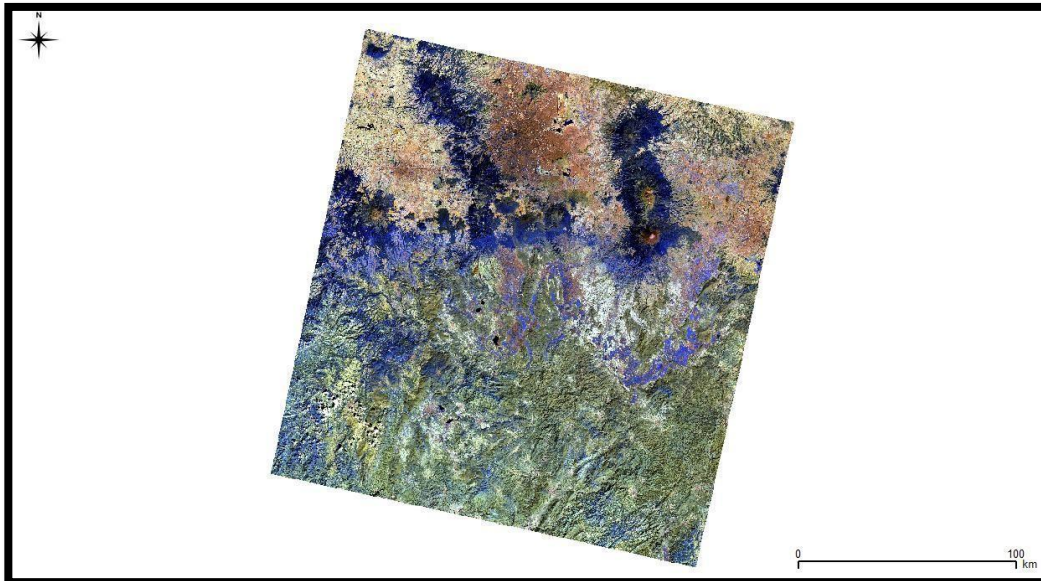


Fig. 3.10 Paquete de imágenes LANDSAT 8 con corrección atmosférica.

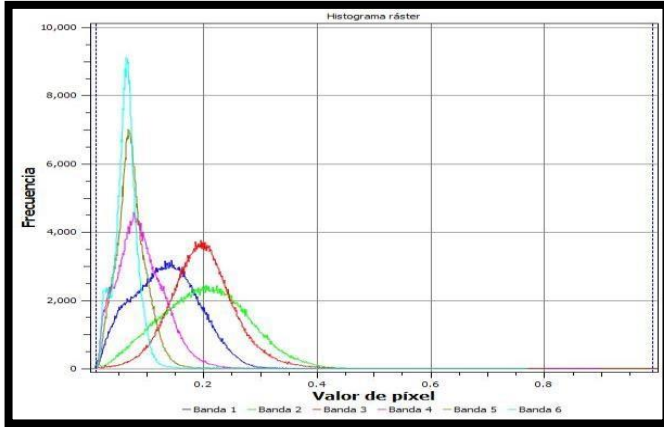
3.3.2 Realce de imágenes.

El realce de imágenes tiene como objetivo hacer que las imágenes utilizadas tengan una mejor visualización de la información, es decir, se trata de procesos que mejoran la calidad visual de las imágenes utilizadas. Existen diferentes técnicas para realizar este proceso pero para este estudio y con las herramientas que con

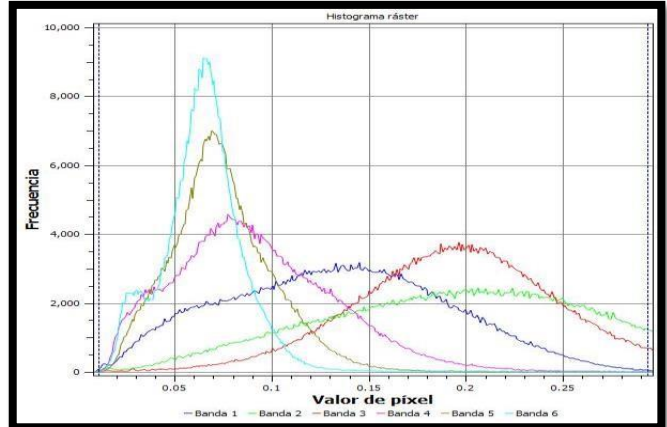
las que se cuenta, solamente se modificará el histograma de las imágenes corregidas y se hará un Pansharpering con la banda 8 para mejorar la resolución de los píxeles a un valor de 15 m. Cabe mencionar que las imágenes fueron recortadas para un mejor manejo y una mejor visualización de la información.

-Histograma de la información.

La información que guarda cada píxel de la imagen ráster se presenta dentro de una escala de color que representa los valores mínimos y máximos de reflectancia, esto quiere decir, que dependiendo de la distribución de los píxeles y sus valores de reflectancia la imagen puede presentar de una manera más brillante o más opaca. Para manipular esta forma de presentar la información es necesario modificar el histograma de los datos, el cual presenta dichos valores y su asignación en la escala de colores. Para una correcta modificación del histograma se recomienda, revisar que los efectos de datos muy pequeños afecten la distribución de la información, es decir, que si la gráfica del histograma se atenúa se debe marcar como mínimo el inicio del aumento de la gráfica del histograma y como máximo el comienzo de la atenuación de la gráfica para que así la distribución de los colores no se vea afectada. En la figura 3.11a) se muestran los histogramas de todas las bandas utilizadas sin modificar, se puede notar que los datos se atenúan y posterior a eso la gráfica sigue y sigue, por lo que la distribución de la escala de colores tomará valores mayores para representar esos datos modificando el resto de los datos que presentan mayor variación en sus valores asignados. La figura 3.11 b) muestra los histogramas modificados tomando como mínimo y máximo los valores cercanos a las curvas que representa la mayor variación de los valores de cada píxel.



a) Histograma del paquete de datos LANDSAT sin



b) Histograma del paquete de datos LANDSAT modificado.

Fig.3.11 a) Histograma sin modificar. b) Histograma modificado para una distribución normal.

-Recorte de imágenes.

Las imágenes satelitales descargadas de la plataforma del USGS tienen una dimensión de 180x180 km, lo cual hace regiones tan pequeñas como la que interesa a este estudio sean poco visibles, por lo que es mejor recortarlas para tener mejor visualización de la información. Las imágenes satelitales originales fueron recortadas con las siguientes coordenadas (5130201, 2036289), (522002, 2036297), (513208, 2027069), (52003, 2027077), dejando así, imágenes más pequeñas en dimensión (9x9 km) con las cuales se pudo trabajar mejor, no solo para la cuestión de edición si no para los cálculos hechos por la computadora ya que los datos son menores a los originales. La figura 3.12 muestra el resultado final del recorte de las imágenes.

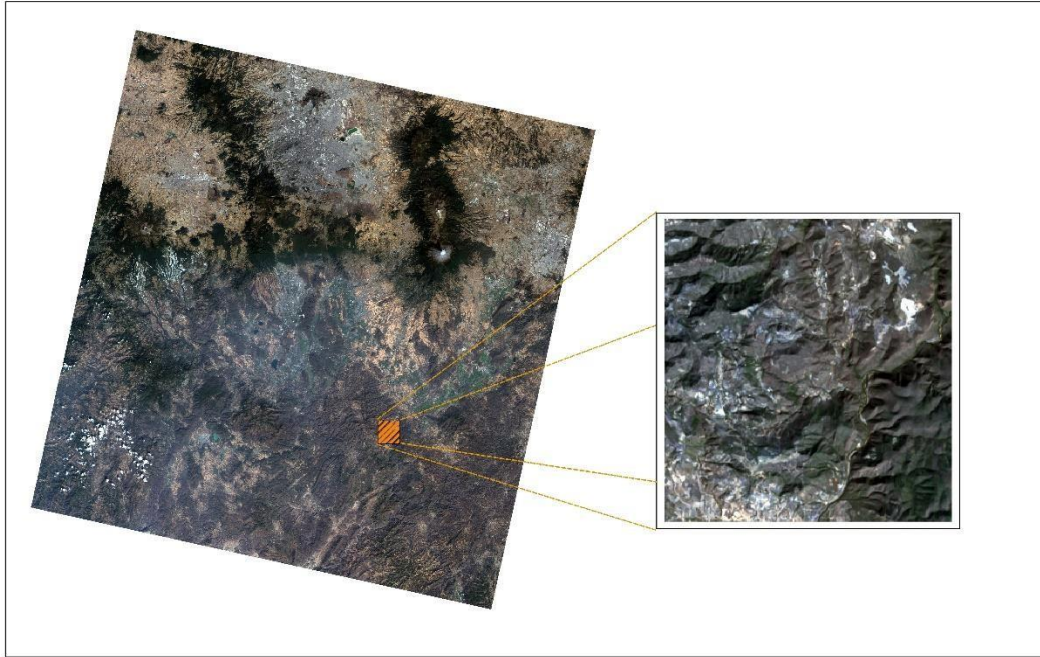


Fig. 3.12 Paquete de imágenes LANDSAT 8 recortado del tamaño original al tamaño de la zona de interés.

3.3.3 Extracción de la información.

Una vez que las imágenes se corrigieron por nubosidad y se mejoraron para que la resolución sea de 15 m, se procede a extraer la información por medio de 2 técnicas: la técnica de análisis de firmas espectrales, que nos será útil para asociar las firmas espectrales de los minerales encontrados en la zona con las bandas utilizadas para este estudio; y la técnica de Análisis de Componentes Principales, que servirá para construir las componentes principales y así reducir la información redundante en las bandas.

3.3.3.1 Análisis de firmas espectrales.

Los trabajos de muestreo en el predio denominado mina Andrea, dieron como resultado la obtención de muestras de mano que contenían minerales de cobre tales como la Azurita y la Malaquita, ambos de la familia de los carbonatos. Por otro lado, el reconocimiento de geología local hizo visible la presencia de estratos de caolinita, un mineral arcilloso común de zonas de alteración. Por último, el predio de la mina Andrea se ubica en unos terrenos dedicados al cultivo, las áreas de vegetación

presente pertenecen a vegetación de tipo pastizal, por ser una región muy seca la vegetación es típica de una área semidesértica.

Las firmas espectrales de los minerales encontrados, así como de la vegetación, fueron obtenidas del Digital Spectral Library del USGS, con las cuales se pudo observar los picos de mayor reflectancia para definir así las bandas de mayor interés en este estudio, que brindaran un contraste de información cuando se hicieran la construcción de imágenes RGB con las componentes principales.

Para tener un sistema de referencia en este trabajo se retomó la metodología usada por Mata Castillo (2015), utilizando solamente la firma espectral de la Malaquita que guarda una cierta tendencia con los minerales de la familia de los carbonatos. Con esta firma fue posible definir que el mayor pico de reflectancia se encuentra en un rango de 2.0-2.2 μm que corresponde a la región que abarca la banda 7, un pico de absorción en un rango de 0.75-0.90 μm que corresponde a la banda 5.

Para el caso de la Caolinita la metodología fue la misma. El pico de mayor reflectancia se encuentra en la banda 6, y su mayor pico de absorción se encuentra en la banda 7. Por último, la firma espectral de la vegetación de tipo pastizal arrojó un pico de mayor reflectancia en la banda 3 y su pico de absorción se encuentra en la banda 4 del paquete Landsat 8.

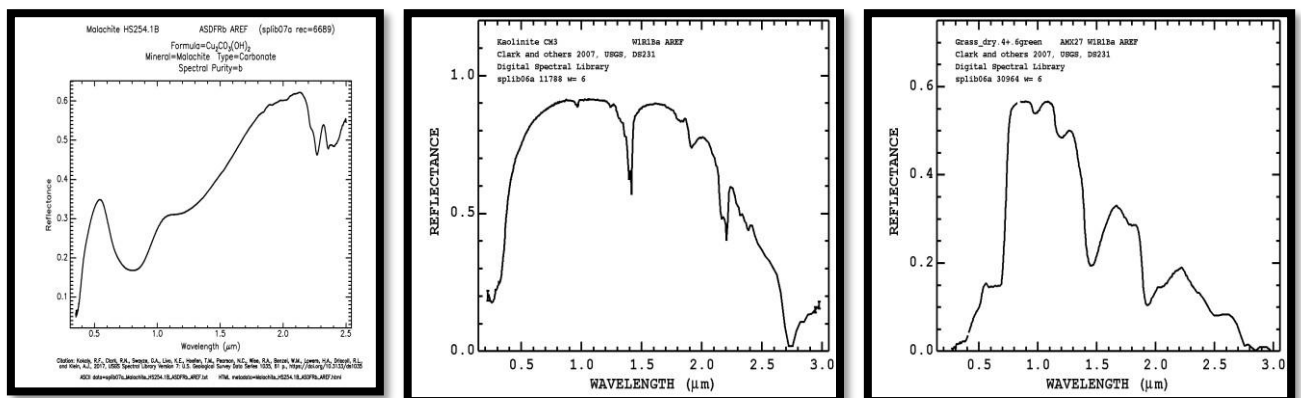


Fig. 13. Firmas espectrales de los materiales usados. De izquierda a derecha: Malaquita, Caolinita, Vegetación.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

(USGS, 2013)

Fig. 3.14 Tabla de rangos de longitud de onda para las bandas de LANDSAT 8.

3.3.3.2 Análisis de Componentes Principales.

Para el análisis de componentes principales se utilizaron las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, que tienen las mismas características de resolución original de píxel (30x30 m), y se procesaron en el software QGIS®, que contiene un complemento para construir las componentes principales llamado PCA (Principal Component Analysis).

El Análisis de Componentes Principales, consiste en procesar las bandas mediante estadística multivariante y realizar un cambio de sistema coordinado para obtener matrices que relacionen las bandas con las componentes obtenidas del cambio de sistema, las cuales contienen información que de otro modo no es visible (Ruíz, 2003). La transformación a componentes principales es utilizada para sintetizar la información contenida en las imágenes multiespectrales, permitiendo reducir la redundancia de la información en las distintas bandas que conforman una imagen multiespectral, maximizando la varianza de la información contenida en las distintas bandas espectrales (Ruíz Armenta & Prol Ledesma, 1995) La proporción de variabilidad espectral contenida en cada componente está dado por el eigen-valor, y la contribución de cada banda a la componente es definida por el eigen-vector (Ruíz, 2003).

Las componentes principales que se obtengan en el proceso representan en forma decreciente la variabilidad que existe entre las bandas utilizadas. Esta variabilidad se define como la mayor cantidad de información que hay en las bandas, por lo que

las primeras componentes resultantes tendrán la mayor variabilidad. Entonces las primeras 2 componentes de este estudio contienen la información más representativa de toda la escena, como suelo, agua, vegetación y topografía, mientras que las otras 4 agrupan información espectral de materiales menos visibles como algunos minerales como las malaquitas, la caolinita y algunos otros. Para el análisis de componentes principales se utilizaron las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, que tienen las mismas características de resolución original de píxel (30x30 m), y se procesaron en el software QGIS®, que contiene un complemento para construir las componentes principales llamado PCA (Principal Component Analysis).

Después de obtener las componentes principales y hacer el análisis de firmas espectrales y de carga factorial, se confecciono un mapa en imagen RGB donde se utilizó la componente CP3 (rojo) para resaltar a los carbonatos de cobre, la componente CP5 (azul) para definir los minerales arcillosos y por último la componente CP4 (verde) para la vegetación.

Capítulo 4: Resultados y conclusiones.

En este último capítulo, se presentarán los resultados obtenidos por el Análisis de Componentes Principales, asociado al análisis de firmas espectrales y la matriz de carga, todo esto se presentara en una imagen compuesta por las componentes más

significativas que guardan la mayor contribución de las bandas representativas previamente definidas.

4.1 Análisis de Componentes Principales.

Con el objetivo de resaltar la presencia de carbonatos de cobre sobre la respuesta de la vegetación y los minerales arcillosos, se aplicó la técnica de ACP, con la cual se obtuvieron las siguientes matrices.

Tabla 4.1 Matriz de correlación entre bandas.

Correlación Matriz	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda6	Banda7
Banda 2	1	0.976	0.941	0.823	0.858	0.877
Banda 3	0.976	1	0.982	0.899	0.909	0.911
Banda 4	0.941	0.982	1	0.898	0.931	0.928
Banda 5	0.823	0.899	0.898	1	0.92	0.87
Banda 6	0.858	0.909	0.931	0.92	1	0.985
Banda 7	0.877	0.911	0.928	0.87	0.985	1

La tabla 4.1 muestra la matriz de correlación del paquete de imágenes satelitales usado para este estudio. Esta matriz nos muestra la relación que existe entre todas y cada una de las bandas utilizadas. En la diagonal principal se observa que todos los valores son 1 lo cual significa que todas las bandas están relacionadas unas con respecto a otras debido a que fueron tomadas el mismo día a la misma hora, en el mismo lugar.

Tabla 1Tabla 4.2 Matriz de varianza-covarianza entre bandas.

Covarianza	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda6	Banda7
Banda 2	0.00017	0.00025	0.0004	0.00061	0.00082	0.00056
Banda 3	0.00025	0.00038	0.00062	0.00099	0.00129	0.00086
Banda 4	0.0004	0.00062	0.00105	0.00165	0.0022	0.00146
Banda 5	0.00061	0.00099	0.00165	0.00321	0.00379	0.00239
Banda 6	0.00082	0.00129	0.0022	0.00379	0.0053	0.00348

Banda 7	0.00056	0.00086	0.00146	0.00239	0.00348	0.00236
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

La matriz de varianza-covarianza es la representación de la distribución de la variabilidad de la información que existe en las imágenes utilizadas para el análisis de componentes principales (tabla 4.2)

Tabla 4.3 Tabla de vectores propios que representa las Componentes Principales.

Eigenvectores	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Banda 2	0.401	0.62	-0.048	0.528	-0.306	-0.282
Banda 3	0.416	0.347	0.15	-0.083	0.445	0.692
Banda 4	0.416	0.182	0.027	-0.808	-0.181	-0.328
Banda 5	0.396	-0.426	0.749	0.203	0.094	-0.224
Banda 6	0.411	-0.443	-0.28	0.062	-0.605	0.432
Banda 7	0.408	-0.291	-0.578	0.129	0.548	-0.312

La tabla 4.3 muestra la matriz de Eigenvectores (vectores propios) para cada componente principal. Los valores de cada eigenvector son los coeficientes de contribución de cada banda a la componente, es decir, que para construir las componentes se debe multiplicar la banda por el valor del eigenvector que le corresponde y después todas deben sumarse, así se obtendrá la componente.

Tabla 4.4 Eigenvalores de cada componente principal y porcentaje de contribución.

Componentes	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Eigenvalores	5.571	0.234	0.144	0.04	0.008	0.004
Porcentajes (%)	92.8	96.7	99.1	99.8	99.9	100

Los Eigenvalores representan el porcentaje de información total que contienen de toda la información utilizada. Por ejemplo, en la tabla 4.4, se muestra que la componente 1 contiene un 92.8 % de toda la información que está presente en todas

las bandas utilizadas para el análisis de componentes principales. La última componente es la que menor porcentaje de información contiene, con tan solo el 0.05 % de la información total.

Con los resultados anteriores obtenidos del Análisis de Componentes Principales, fue posible construir la matriz de carga factorial, la cual sirvió para determinar las componentes que tenían la mayor contribución de las bandas escogidas en el Análisis de firmas espectrales.

Tabla 4.5 Matriz de carga factorial.

Carga Factorial	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Band2	72.5916204	18.9683526	-0.91073597	4.27561902	-0.95578342	-0.7536767
Band3	62.0997577	8.6108417	2.28600229	-0.52758263	1.1081796	1.49240558
Band4	49.0941691	3.53576565	0.31619162	-3.97831699	-0.34515346	-0.54290946
Band5	37.8439838	-6.5493761	6.99714851	0.71659458	0.13656935	-0.28978711
Band6	33.8767294	-5.96646091	-2.26531154	0.20141976	-0.74329709	0.46315262
Band7	40.69422	-4.80011555	-5.74027444	0.5277409	0.83087546	-0.4061894

Se muestra la tabla 4.5 con la matriz de carga factorial. Esta matriz muestra la contribución de cada banda en la construcción de cada componente principal. La columna que corresponde la componente 1 (CP1) tiene los valores más altos con respecto al resto de elementos de la matriz, esto porque la componente 1 tiene la mayor concentración de la información total utilizada (tabla 4.4), por lo que se puede decir que la componente 1 tiene máxima contribución de todas las bandas. El resto de las columnas de la matriz de carga factorial tiene valores más aleatorios porque la contribución de cada banda a cada componente es diferente.

En el apartado 3.3.3.1, se definió que las bandas 5 y 7 nos servirán para identificar la contribución de los carbonatos de cobre (malaquita); las bandas 3 y 4 para definir la vegetación; y las bandas 6 y 7 para visualizar la contribución de los minerales arcillosos (caolinita), y con esta información se buscó en la matriz de carga factorial (tabla 4.5) la mayor diferencia entre las bandas mencionadas en cada componente

para definir la componente que se utilizaría para resaltar cada material. El primer componente principal (CP1) tiene un 92.8% de la información y como se dijo, la contribución de las bandas es máxima en esa componente, por lo que se decidió no considerarla debido a que siempre tendríamos la mayor diferencia entre bandas en esa componente y la información que nos proporcione podría estar disfrazada por toda la información que contiene.

Las componentes que se eligieron después del análisis fueron CP3 para resaltar los carbonatos, CP5 para resaltar minerales arcillosos y la definir la vegetación se utilizó la componente CP4.

Para visualizar los resultados se construyó una imagen RGB con las componentes seleccionadas en el siguiente orden: CP3-CP4-CP5 (rojo-verde-azul), para que las zonas con mayor presencia de carbonatos de cobre resalten en color rojo, mientras que las zonas con mayor presencia de vegetación y minerales arcillosos se puedan visualizar en colores verde y azules (figura 4.1).

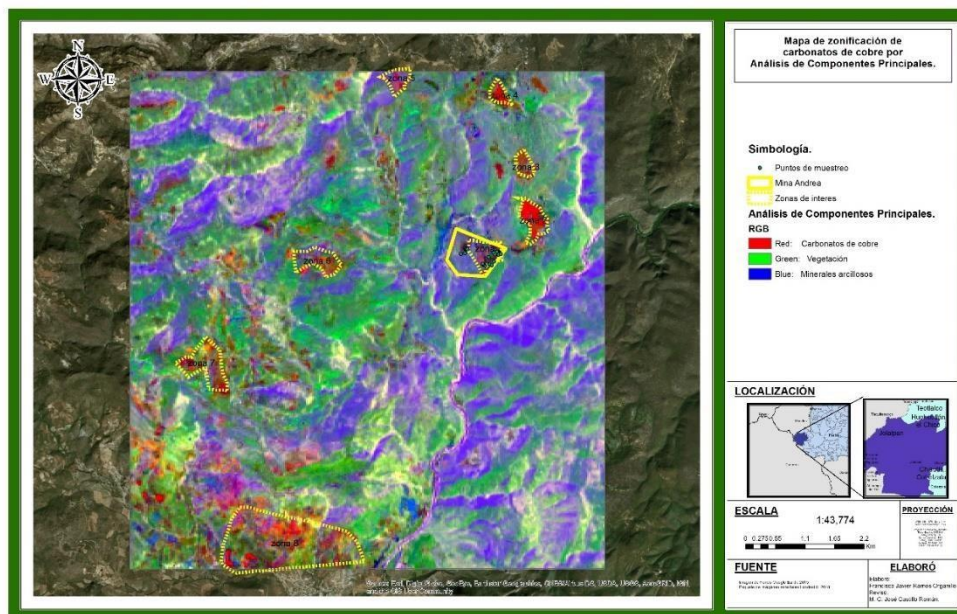


Fig. 4.1. Mapa de Análisis de Componentes Principales para detección de carbonatos de cobre.

En la figura 4.1 se muestra el mapa de resultados del análisis de componentes principales, del cual podemos decir que las zonas en color rojo muestran posibles áreas con presencia de minerales de cobre. Es importante notar que los puntos de

muestreo (en color amarillo) en el predio de la mina, coinciden con una zona de color rojo, por lo que se verifica que las muestras tomadas en esos puntos sirvieron para correlacionar las zonas probables con presencia de carbonatos de cobre con los puntos de muestreo.

Además de la mina Andrea existen zonas con tonos rojos que se marcan como polígonos amarillos en la Fig. 4.1, ubicadas al NE del mapa y que bien pueden tener una alta probabilidad de contener minerales de cobre. Hacia el SO del mapa se observa una zona de colores variados entre rojos y verdes, esta zona corresponde propiamente al municipio de Jolalpan; es en esta zona donde se ha extraído más minerales metálicos, incluido el cobre y por lo que la respuesta es muy parecida a la de la mina y las zonas ubicadas al norte, denotadas por líneas punteadas. En total, en toda el área estudiada se ubican 8 zonas de interés y se pueden agrupar en dos regiones características, región A y región B.

La región A se encuentra en la parte NE del área estudiada y abarca las zonas 1, 2, 3, 4 y 5, incluida la mina Andrea (zona 1). La región B, abarca la porción SO del área estudiada, y comprende las zonas 6, 7 y 8.

El mapa también nos muestra muchas zonas en tonos azules – púrpuras que determinan zonas con presencia de minerales arcillosos, propios de la acción del intemperismo en la zona, ya que la topografía es muy abrupta.

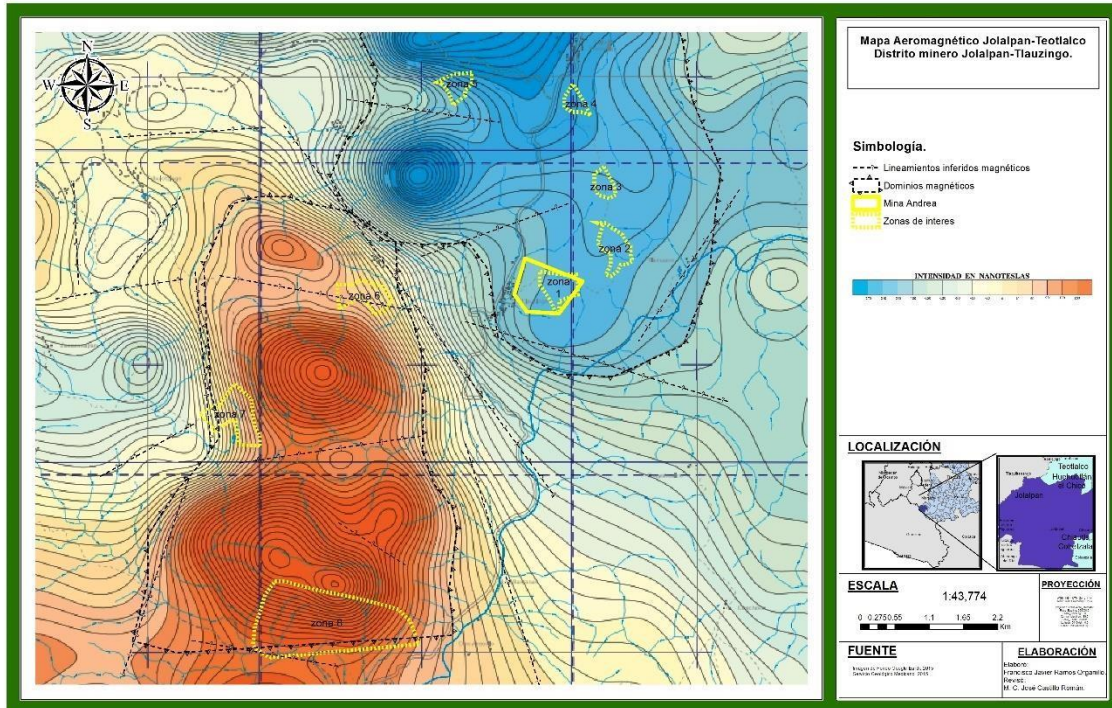


Figura 4.2 Mapa Aeromagnético de la zona Jolalpan-Teotlalco.

En la figura 4.2 se muestra las 2 regiones definidas por el Análisis Componentes Principales que se trasladaron al mapa de anomalía magnética del sitio y dio como resultado que la región A se encuentra en un dominio magnético con anomalías magnéticas del orden de -240 a -180 nT; y la región B se ubica en un dominio magnético de 60 a 150 nT. En ambos casos, se infieren de la carta aeromagnética algunos lineamientos magnéticos, que pueden asociarse a fallas inferidas, que rigen la mineralización del lugar.

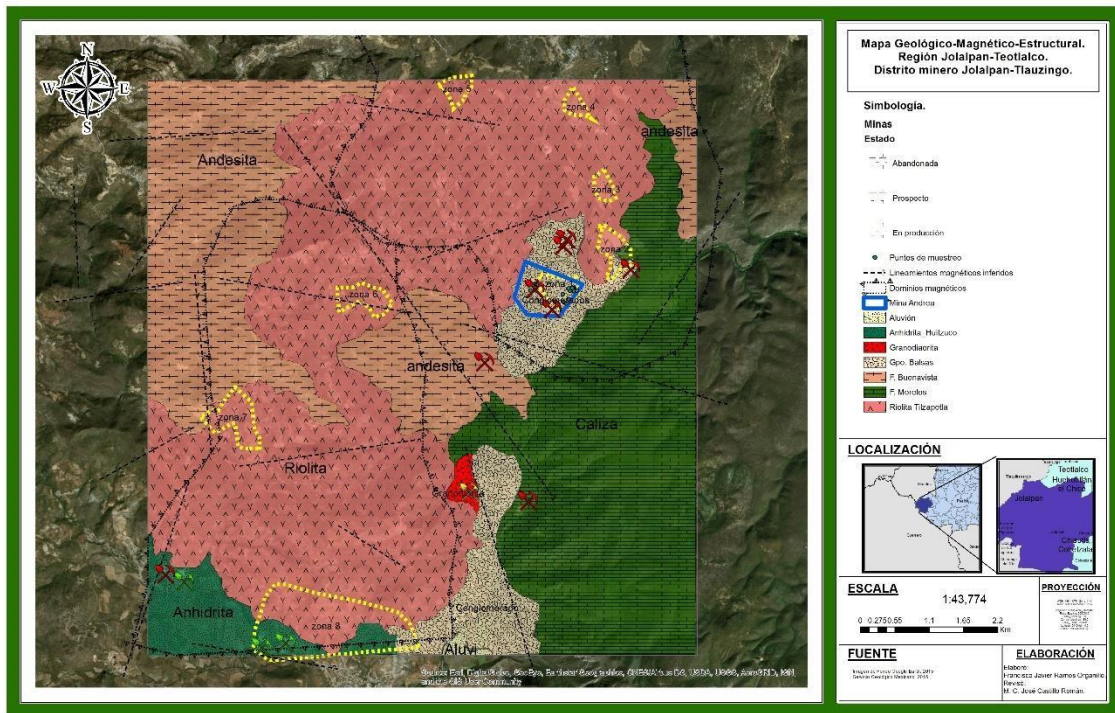


Figura 4.3 Mapa Geológico-Magnético-Estructural de la región Jolalpan-Teotlalco.

En la figura 4.3 se muestra el mapa Geológico-Magnético-Estructural, el cual asocia los resultados del Análisis de Componentes Principales, la interpretación de anomalías magnéticas y la geología regional, del que se obtiene que las zonas de interés se alojan en la Riolita Tilzapotla, que se caracteriza por ser una toba riolítica depositada en el paleógeno, que hace pensar que esta toba riolítica sea la roca encajonante. También se infiere que los lineamientos magnéticos podrían tratarse de estructuras geológicas que rigen la mineralización de la zona, motivo por el cual la respuesta magnética no es la misma en las regiones definidas como A y B.

4.2 Discusión de resultados.

Para empezar la discusión de los resultados, es importante hacer notar que el uso de las tecnologías de la información se convierte en una herramienta muy útil en la actualidad, sin ellas la recopilación de datos, el procesamiento de estos y la obtención de fuentes de información confiable sería un trabajo más arduo y los resultados podrían variar en gran medida. Es por ello que, en este trabajo, se

utilizaron diferentes softwares para el procesamiento de los datos. Por un lado, tenemos al software ArcGis ® que, siendo un software de licencia, brinda herramientas muy variadas y extensas que permiten manipular los sistemas de información geográfica de manera amplia. La desventaja del software es obtener la licencia, que muchas veces es difícil de conseguir para usuarios que apenas comienzan en el mundo del manejo de sistemas de información geográfica. Del otro lado de la balanza, tenemos software de licencia libre que pueden descargarse directamente de la plataforma de su diseñador, tal es el caso de QGIS ® y MultiSpec ®, que sirven para el procesamiento de imágenes satelitales y manejo de SIG, respectivamente. Ambos softwares están en constante cambio de sus procesos ya que, en el caso de QGIS ® el código de los algoritmos que gobiernan el software es libre y cualquiera con conocimiento en lenguaje de programación Python puede apoyar en el mejoramiento de los códigos para dar una mejor versión del software a todos sus usuarios. Cualquiera que sea el caso de uso, ya sea de software de licencia o libre, existen múltiples fuentes de información que ayudan en el mejor manejo del software para lograr buenos resultados.

En este trabajo se optó por utilizar el software libre, debido a que son más fáciles de obtener, y si bien los datos varían un poco entre el software libre y los de licencia, la diferencia no es significativa en los resultados del trabajo.

Es importante mencionar que la minería es una actividad productiva que puede hacer detonar la economía de una región dependiendo del potencial minero con el que se cuente. Los municipios de Jolalpan y Teotlalco se caracterizan por un alto índice de migración de la población debido a la falta de oportunidades de trabajo en la zona, por lo que la minería es una opción que permitiría hacer que la población permanezca en su lugar de origen y puedan progresar económicamente.

Con este trabajo fue posible determinar que el potencial minero de la zona es alto, ya que existen múltiples zonas con potencial presencia de mineralización por carbonatos cobre, por lo que es posible que estas zonas sean explotadas y se pueda generar empleo por actividades mineras permitiendo que los pobladores se empleen en los proyectos mineros y evitar así la migración de la población.

Por otro lado, los resultados nos llevan a pensar que la zona es una cuenca rellenada, esto por el tipo de litología encontrada en la mina. El Servicio Geológico Mexicano, en su carta E14B71 correspondiente a Huehuetlán, indican que en la zona existen conglomerados polícmiticos de caliza del Paleógeno. También identificaron depósitos de la formación Morelos que en esa zona se caracteriza por materiales de tipo caliza, en el Terciario, cuando comenzaba a levantarse el Eje Neovolcánico, los esfuerzos provenientes del movimiento de las placas tectónicas hicieron que esta zona en un principio de baja altura se elevara hasta tener la altura que hoy en día podemos apreciar. No es difícil pensarlo, ya en la zona de estudio se encuentra la Anhidrita Huitzucó que es un vestigio de lo que alguna vez fue ambiente marino somero y por las altas temperaturas y la baja recarga de agua precipito esta roca. Otra prueba de esto es la misma caliza de la formación Morelos que fue formada entre el cretácico inferior y el cretácico superior, y que se piensa es la principal fuente de suministro de cantos de caliza que relleno lo que ahora es el grupo Balsa que define la geología predominante de la mina Andrea. Los minerales metálicos se piensan que es debido a los eventos ígneos sucedidos desde el Oligoceno hasta el Mioceno, que fueron intrusionando los estratos y que por medio del hidrotermalismo propició la aparición de los minerales polimetálicos tan comunes en la zona.

En cuanto a la percepción remota, es importante decir que las limitantes de utilizar imágenes multispectrales tienen bastante peso en los resultados. Primero, la resolución de pixel, limita el estudio a hacerlo a una escala ya que, si se quisiera hacer de manera puntual en las 100 hectáreas de la mina Andrea, los 15x15 m de resolución impedirían ver los cambios en la respuesta espectral de la región, por eso se optó por tomar una región más amplia que permitiera visualizar de mejor manera la respuesta espectral. Después está el rango de longitud de onda que detecta cada banda de LANDSAT, si bien fue de mucha ayuda para determinar las zonas probables con presencia de mineral, también dejó algunos picos de mayor reflectancia que puede detectar debido a que en ese rango no tiene una banda que le permita detectar tal o cual elemento. Los puntos de muestreo ayudaron mucho a

acotar los resultados y poder definirlos con mayor facilidad como zonas probables, de otra forma si no se hubiese contado con estos puntos los resultados jamás habrían podido relacionarse con la respuesta espectral de un mineral.

Por último, el análisis de componentes principales es una herramienta de mucha utilidad en este tipo de estudios, ya que las variables incluidas en una imagen satelital son muchas. Las coberturas de materiales que detecta el sensor son demasiadas, van desde roca desnuda, vegetación, áreas de cultivo, zonas urbanas, carreteras, agua, etc., por lo tanto, una herramienta que permita discriminar la información y que la presente en conjuntos de datos separados para su acotación e interpretación es muy útil. La desventaja de este método está en no hacer correctamente el proceso; si las bandas no guardan correlación o si no están bien corregidas, los resultados perderán credibilidad.

4.3 Conclusiones.

La percepción remota, es de suma importancia en las primeras etapas de exploración minera, pues permite identificar y ubicar prospectos en grandes áreas de terreno, a bajo costo.

El análisis de componentes principales es un método estadístico que se aplica a la percepción remota para concentrar la información espectral y espacial, de forma que pueda ser visible con un número menor de componentes.

El análisis de componentes principales permitió identificar 8 prospectos con posible presencia de carbonatos de cobre, que se agruparon en 2 regiones A y B. La región de mayor interés es la región A, ya que cuenta con los tonos rojizos más intensos que sirvieron para identificar los carbonatos de cobre, incluido el predio de la mina Andrea.

Las observaciones de campo se correlacionan con los resultados obtenidos del análisis de componentes principales, para el prospecto de la mina Andrea.

El Análisis de Componentes Principales permitió definir a la mina Andrea como una zona de alto potencial para presentar mineralización de carbonatos de cobre.

4.4 Recomendaciones.

- Realizar un muestreo en las zonas identificadas con el análisis de componentes principales, principalmente en las zonas de mayor intensidad (zona NE).
- Realizar un levantamiento geológico a detalle en ambas regiones, A y B, para definir si los lineamientos magnéticos corresponden a estructuras geológicas, como fallas o fracturas.
- Realizar estudios de Potencial Natural, Polarización inducida y magnetometría terrestre, en el predio de la mina Andrea para definir la geometría del yacimiento (dirección y profundidad de las vetas).
- Ampliar la zona de estudio con percepción remota a todo el distrito minero Jolalpan-Tlaucingo, para la detección de óxidos, sulfuros y carbonatos de cobre, asociado con la interpretación de las anomalías magnéticas de la región.

Bibliografía.

Arozarena Villar, A. (2009). *Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes*. Madrid: Open Course Ware.

- Campa Uranga, M. F. (1984). *Interpretación tectónica continental de la Región Mixteca*. PEMEX.
- CFE. (2016). *Descripción de las alteraciones hidrotermales*. Gerencia de estudios de Ingeniería Civil.
- Cheng, D. (1998). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Syracuse University: Pearson Education.
- Coney, P. (1983). *Un modelo tectónico de México y sus relaciones con América del norte, América del sur y el Caribe*. Instituto Mexicano del Petróleo.
- Dana, J. (1848). *Manual of mineralogy*. Nueva York.
- Ferrero, S. B., Palacio, M. G., & Campanella, O. (2005). *Análisis de Componentes Principales en Teledetección*. Universidad Nacional del Río cuarto. Argentina.
- Fries, C. (1960). *Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*. Instituto de Geología. UNAM.
- Girón García, P., Lozano Santacruz, R., Corona Esquivel, R., Piedad Sánchez, N., & Levresse, G. (2011). Origen de las diferentes coloraciones que se presentan en los yacimientos ferruginosos del área Jolalpan-Tlahuitzingo, Estado de Puebla. *Actas del INAGEQ, vol. 17*.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Jolalpan, Puebla*.
- Lira, J. (2003). *La Percepción Remota: Nuestros ojos desde el espacio*. La ciencia para todos.
- Martínez Muñoz, J. (2005). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. CONAGUA.
- Mata Castillo, C. (2015). *Mapeo de Lineamientos y Alteraciones Hidrotermales en Sierra San Francisco Borja, B. C.* Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Ortega, G. F. (1991). *Geological provinces of México - A new proposal and bases for their definition*. Pachuca, Hidalgo.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Universidad Carlos III de Madrid: McGraw Hill.
- Ruíz Armenta, J. R., & Prol Ledesma, R. M. (1995). *Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal*. Instituto de Geofísica. UNAM.
- Ruíz, L. Á. (2003). *Análisis de Componentes Principales. Aplicaciones en teledetección*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

- Servicio Geológico Mexicano. (2016). *Panorama Minero del Estado de Puebla*. Oaxaca,Oax.: Coordinación regional.
- Servicio Geológico Mexicano. (2019). *Carta Geológico-Minera Huehuétlan E14-B71*. Cartas impresas, por nombre o por clave de la carta.
- SIGMUR. (2018). *Plataformas, sensores y canales*. Universidad de Murcia.
- Ulaby , F. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*. University of Michigan: Pearson Education.
- Valencia, M. (2006). Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.