



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE GEOGRAFÍA



**“DISCRIMINACIÓN DE UNIDADES VOLCÁNICAS A PARTIR DE
ÍMAGENES ÓPTICAS Y RADAR: ESTUDIO DE CASO VOLCÁN DE
COLIMA, PERIODO 2004-2014.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADO EN GEOINFORMÁTICA

PRESENTA

CIRINO GARCÍA MALVAÉZ

DIRECTORA

DRA. NORMA DÁVILA HERNÁNDEZ

REVISORES

MTRO. RAÚL EDUARDO MURILLO OLVERA

DR. HÉCTOR CABADAS BÁEZ

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO. DICIEMBRE DEL 2014

Agradecimientos

A mi asesora Dr. Norma Dávila Hernández por el apoyo brindado durante la elaboración de este trabajo, el creer en mí y por la dedicación brindada para lograr esta gran meta en mi vida.

A mis revisores Mtro. Raúl Eduardo Murillo Olvera y Dr. Héctor Cabadas Báez, en verdad no pude haber tenido mejores revisores. Mtro. Murillo a usted un agradecimiento especial ya que siempre estuvo a mi lado en el transcurso de toda la licenciatura no solo como profesor, si no como amigo. Gracias.

A mis papas con la mayor gratitud por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi tesis profesional siendo para mí la mejor herencia y a ellos les dedico este trabajo ya que son mi más grande estímulo e inspiración.

Gracias por guiar mi vida, esto ha hecho que sea quien soy en la vida. LOS AMO

A mis hermanas porque siempre me apoyaron, me alentaron, estimularon y me alegraron en momentos difíciles.

A Mary que fue mi acompañante en toda la licenciatura, que siempre me apoyo, me ayudo a dar el máximo y me oriento.

INDICE

1.0 INTRODUCCIÓN	3
2.0 ANTECEDENTES	5
3.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	8
4.0 OBJETIVO GENERAL:.....	9
4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	9
5.0 MARCO TEORICO.....	10
5.1 MARCO TECTONICO-GEOLOGICO	14
5.2 ACTIVIDAD RECIENTE DEL VOLCÁN DE COLIMA	20
5.3 INTRODUCCIÓN A IMÁGENES ÓPTICAS Y RADAR	22
5.3.1 IMÁGENES ÓPTICAS.....	22
5.3.2 IMÁGENES DE RADAR.....	22
6.0 METODOLOGÍA.....	27
6.1 ETAPA 1-PRE-PROCESAMIENTO.....	31
6.2 ETAPA 2-PROCESAMIENTO	33
6.2.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SPOT	33
6.2.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE RADAR.....	36
7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
7.1 VALIDACIÓN DE LA DISCRIMINACIÓN ESPECTRAL DE UNIDADES VOLCÁNICAS Y SUS TRANSFORMACIONES VECTORIALES.	42
7.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROCESO ECC.....	72
7.3 EVALUACION DE CAMBIO A PARTIR DE LAS TRANSFORMACIONES VECTORIALES PARA EL PERIODO 2004-2014	82
8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
9.0 BIBLIOGRAFÍA	89

1.0 INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas constituyen algunos de los riesgos más importantes para la sociedad humana, debido al crecimiento de población en las faldas de los volcanes, las estadísticas muestran que 50 volcanes en el mundo hacen erupción cada año (Gutiérrez, 2008).

El Volcán de Colima forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), es un estratovolcán ubicado entre los límites de los estados Jalisco y Colima (Figura 1), dicho Volcán es considerado el más activo en la República Mexicana ya que ha presentado más de 50 periodos eruptivos en los últimos 500 años, (De la Cruz, 1993). En los últimos 15 años la actividad del Volcán se ha caracterizado por ser efusiva-explosiva dando lugar a una recurrente emanación de ceniza, coladas de lava y flujos piroclásticos derivados del colapso del domo extruido; todos ellos de composición andesítica-dacítica. Las coladas de lava han llegado a alcanzar distancias de 2.3 kilómetros, por 300 m de ancho y espesores de hasta 20 m. Los flujos piroclásticos han llegado a alcanzar una distancia de 5 km del domo, en cuanto a lahares llegan a recorrer 15 km sobre las laderas del Durazno, Montegrande Del Muerto, San Antonio, La Lumbre, Cordobés, y Arena al sur del Volcán provocando daños en comunidades como Quesería (8611 habitantes) y San Marcos (3550 habitantes) (Capra et al. 2002; Cortés et al. 2002; Macías et al. 2006; Dávila et al. 2007; Sulpizio et al. 2010; Franco et al. 2013) .

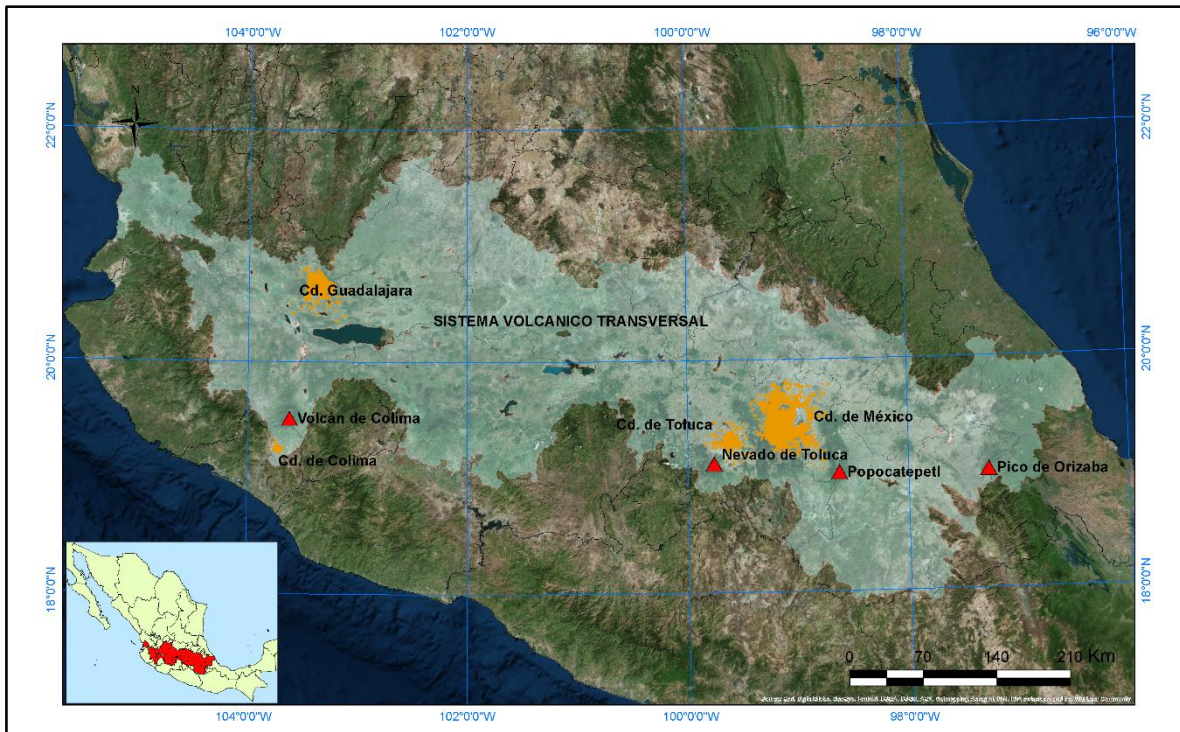


Figura 1. Localización de Cinturón Volcánico Transmexicano Fuente: Elaboración propia con base en cartografía de INEGI 1:250,000 y Mapa base de ESRI.

Por otro lado, las técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica en las últimas dos décadas, han destacado en términos de la predicción, monitoreo y gestión de riesgos volcánicos, a través del monitoreo de actividad volcánica, evaluaciones de deformación de suelo, mapeos de depósitos volcánicos y lahares, diferenciaciones de las superficies de las rocas volcánicas en cuanto a su composición mineralógica y de texturas; esto debido a la relativa prontitud en la adquisición de información y procesamiento de datos para obtener resultados inmediatos. (Zeineb et al. 2014). El objetivo del presente trabajo radica en la caracterización de cambios superficiales asociados a la reciente actividad del Volcán de Colima considerando una temporalidad de 2004 a 2014 empleando imágenes ópticas SPOT 5 y 6 y radar TerraSAR-X de muy alta resolución. Así, los cambios superficiales se asocian a unidades de depósito (principalmente caídas de ceniza, flujos piroclásticos, coladas de lava y depósitos de lahar). De igual forma, la identificación de cambios topográficos asociados a la reciente actividad que

modifique la configuración de las barrancas que conforman las laderas del edificio volcánico.

2.0 ANTECEDENTES

El estudio de peligros en el Volcán de Colima ha sido analizado a partir de estudios correlacionados con enfoques estratigráficos, sedimentológicos, geoquímicos y cronológicos de las principales erupciones, reconstrucciones de eventos, etc. Los principales estudios de peligros volcánicos están dirigidos a la estimación del volumen de ceniza emitido, flujos piroclásticos, coladas de lava, lahares y avalanchas de escombros. Elizarrarás (et al. 1995), desarrollaron dos mapas de peligros volcánicos del Colima a partir de la correlación estratigráfica en campo, en el primer mapa agrupó flujos piroclásticos, lahares y corrientes de lodo, y los depósitos de caída; en el segundo mapa se representaron los derrames de lava. Saucedo (et al. 2002), desarrolló la cronología de las etapas eruptivas que antecedieron a la erupción del 20 de noviembre de 1998 a partir de la identificación de características estratigráficas y sedimentológicas. Por su parte, Cortés et al. (2002), desarrollaron un mapa geológico a partir de 500 puntos de muestreo geoquímico y correlación en campo (Figura 3). Macías et al. (2006), generaron un mapa de peligros para flujos piroclásticos mediante el análisis de las erupciones que han generado flujos a partir de 1576 con el cual estimaron que con erupciones como las de los años 1818 y 1913 se pondría en riesgo a 300, 000 habitantes asentados a 30 km de distancia del cráter, incluyendo ciudades como Colima y Ciudad Guzmán.. Por otra parte Capra et al. (2010), menciona mediante un análisis de inestabilidad relativa que el proceso de avalanchas de escombros del Volcán de Colima es cíclico con una recurrencia de 2698 años, teniendo un rango de incertidumbre de 180 años; utilizando intervalos de recurrencias de las avalanchas, el análisis de déficit de masa, y limitó un método de equilibrio con el cual se evaluó un posible escenario, el cual mencionan que la masa total removida del edificio sería

cerca de 1 km³. Velázquez et al. (2013), a través de un geófono, una cámara de video y un pluviómetro, realizaron un monitoreo de un lahar que tuvo lugar el 15 de septiembre del 2012 en la barranca Montegrande, con los datos obtenidos de textura y sedimentología permitió describir la anatomía de este lahar el cual duró 40 minutos; provocado por 20 mm de lluvia acumulada con una intensidad máxima de 95 km/h.

Por otro lado, existen numerosos trabajos a nivel mundial en el uso de sensores remotos para el monitoreo de ambientes volcánicos activos; en específico monitoreo asociado a su grado de peligrosidad. Dicco et al. (2009), quien realizaron una recopilación de imágenes de volcanes en erupciones del primer cuatrimestre del 2009 de todo el planeta, hace mención de los sensores que capturaron las imágenes y menciona el proceso que le aplico a cada imagen así como la explicación del tipo de erupción representada. Zeneib et al. (2014), realizaron una clasificación orientada a objetos a una imagen spot 5 pancromática, con la cual identifico unidades geológicas, estructuras, formas del relieve y depósitos del Volcán Semeru, localizado en Indonesia; cabe destacar que los resultados de la clasificación fueron validados con datos del visualizador Google Earth, imágenes aéreas y observación de campo obteniendo así un nuevo mapa geológico y morfológico. Capra et al. (2002), realizaron un estudio de los volcanes del cinturón volcánico transversal en dónde surgieron casos de depósitos por avalanchas o colapsos y describiendo sus dimensiones (distancia, área y volumen), sus características morfológica y su distribución; calculándolos a través de imágenes Landsat Thematic Mapper con las bandas 3,4 y 7. Dávila (2007), realizó un realice espectral para a los depósitos de lahar con respecto al resto de los objetos o depósitos que conforman el Volcán de Colima, a través de transformaciones como Componentes Principales, Expansión Canónica y Tasseled Cap, con el cual obtuvo un mapa de distribución de lahares. Otro autor que utilizó herramientas de percepción remota fue De Sulpizio et al. (2010), realizaron una simulación de posibles flujos de bloques y ceniza futuras en el Volcán de Colima del tipo Merapi y del tipo Soufriere, a través de una MDE; desarrollo un mapa de peligro donde

determino que las laderas sur y oestes con un radio de 7.5 km son las zonas de alto riesgo por inundación de flujos de bloques y ceniza.

Para el monitoreo de la actividad volcánica con radar se pueden enunciar diversos trabajos previos. Matthew (et al. 2003), quienes a partir de técnicas de interferometría radar utilizó datos JERS-1 para evaluar la trayectoria de flujos piroclásticos. Por su parte Terunuma (et al. 2004), utilizó los satélites SAR (JERS-1 y ERS-1) con el cual detectó cambios en la superficie asociado al emplazamiento de flujos piroclásticos y lahares a partir de tres enfoques: 1) Aproximación de retrodispersión; 2) El enfoque de coherencia y 3) Enfoque Interferométrico. Saepuloh et al. (2009), utilizaron radar de apertura sintética (SAR), clasificación SAM y métodos geoestadísticos para realizar una detección detallada de flujos piroclásticos de la zona de Torrida, en cuanto a la clasificación SAM detectó los flujos nuevos, viejos y domos de lava viejos, mientras que con SAR detectó el tamaño de grano de los depósitos por medios de su rugosidad. Se menciona el trabajo de Meyer et al. (2014), donde presentan un procedimiento para poder acceder a datos SAR casi en tiempo real y así generar un muestreo temporal en los sistemas volcánicos activos, pretendiendo así mejorar los sistemas de monitoreo para la detección de zonas de riesgo, alertas y capacidad de gestión del riesgo. Hopper (et al. 2012), utilizaron series de tiempo en SAR con la cual demostró que se mejora la precisión, tomo como muestra la erupción del Eyjafjallajökull en Islandia del 2010, la zona de subducción en Guerrero, y la deformación tectónica en el oeste Anatolia-Turquía; en las cuales obtuvo un precisión de 1 mm/año en el mejor de los casos. McAlpin (2012), realizó una demostración general de las mejoras para el control remoto de imágenes de detección con múltiples sensores y fusionó datos multitemporales. La zona donde realizó dicha demostración fue en el volcán de Ridoubt y el río Drift. Fusión de datos multitemporales ópticos y de radar. Obtuvo interferogramas con los cuales demostró la deformación superficial y delimito los lahares con alta precisión; obteniendo así un mapa de cambio. Mayorga (2013), realizó un histórico de interferogramas con tomas del sensor ALOS PALSAR para el monitoreo de los deslizamientos de Tumba-San Francisco en el Ecuador, con el

cual determino los lugares de hundimiento y los lugares de elevación. Finalmente Pinel et al. (2011), mencionan que la aplicación de radar de apertura sintética (SAR) para estratovolcanes sigue siendo limitada por la gran concentración de vegetación en los alrededores de los volcanes, lo cual induce a baja coherencia de la señal, así como el ruido de la toma. Lo que propone es una forma de mitigar estas dificultades y mejorar las mediciones con SAR. Las zonas de estudio fueron los estratovolcanes Popocatepetl y Volcán de Colima, el análisis se centró en utilizar un método que combina ambos dispersogramas y pequeños enfoques en la línea de base. Como resultado obtuvo que el Popocatepetl no tuvo deformación y el Volcán de Colima mostraba una deformación constante de más de 1 cm/año en la cumbre, pero mejorado se obtuvo una deformación promedio de 2 cm/año.

Con estos trabajos mencionados anteriormente, referentes a la aplicación de imágenes de satélite en ambientes volcánicos activos en México, se demuestra su potencial al obtener datos en un periodo de tiempo relativamente corto. Por ello la necesidad de seguir aplicando técnicas de percepción remota que guardan una gran utilidad en la prevención de desastres volcánicos.

3.0 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En los últimos 20 años se ha registrado un aumento en los asentamientos humanos ubicados en laderas de volcanes potencialmente activos, por lo que el número de personas afectadas incrementa cuando hay actividad volcánica (Franco et al. 2013). Ante un erupción del Volcán de Colima se estima que cerca de 4 millones de personas serían afectadas (Yarsa, et al. 1992). De acuerdo con datos históricos del Volcán de Colima, flujos de escombros han sido reconocidos a más de 100 km de distancia respecto a la cima; evidenciando así su capacidad de transporte y potencial afectación a las comunidades circundantes (Franco et al. 2013). Por ello, es indispensable el uso de geotecnologías que nos permiten evaluar de manera inmediata los productos volcánicos asociados a una actividad explosiva del Volcán

y que los resultados obtenidos permitan tener una visión generalizada de la emergencia para poder realizar en una segunda fase estudios de campo específicos. De esta forma, el monitoreo volcánico es de importancia primaria en la evaluación de peligros y riesgos volcánicos por lo que el uso de las geotecnologías es elemental para cuantificar y modelar los procesos físicos asociados a eventos volcánicos extraordinarios; siendo de potencial uso para la toma de decisiones de las autoridades en situaciones de emergencia.

Por otra parte, en términos del uso de imágenes satelitales para la discriminación de depósitos volcánicos asociados a distintas etapas de actividad, resulta un ejercicio detallado, esto debido que el comportamiento espectral de los depósitos es similar debido a que provienen de la misma composición mineralógica o tipo de roca. Por ello resulta un ejercicio interesante tratar de discriminar las distintas unidades a partir de transformaciones vectoriales aplicadas a la imagen.

4.0 OBJETIVO GENERAL:

Caracterizar cambios superficiales topográficos asociados a la reciente actividad del Volcán de Colima utilizando imágenes ópticas y radar, considerando la temporalidad 2004 a 2014.

4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Utilizando imágenes Spot 5 y Spot 6 se realizó una descomposición vectorial utilizando 3 variables: Componentes Principales, Componente Independiente e Inversa de la Componente.
- Con las imágenes TerraSar-X por medio de técnicas de InSAR detectaremos cambio en los depósitos de materiales volcánicos al igual que una imagen resultado RGB. Para las técnicas de InSAR utilizamos un par de imágenes a los cuales se les aplicara una co-registración, generamos un interferograma y se calcula la coherencia interferométrica a partir del método Estimación de Cambio en Coherencia (ECC).

- Se genera un mapa de detección de cambios superficiales del Volcán de Colima con procesos de sinergismo entre procesos ópticos y técnicas InSAR

5.0 MARCO TEORICO

Alrededor del mundo existen 700 volcanes activos y 50 hace erupción al año. En el centro de la República Mexicana se encuentra el Sistema Volcánico Transversal que tiene una extensión aproximada de 1,200 kilómetros, en él se encuentran los principales volcanes activos, como el Pico de Orizaba, Popocatépetl y el Volcán de Colima (Capra et al. 2002). Debido al aumento de la población cercana a las laderas de dichos volcanes ha incrementa el riesgo y el número de desastres.

Una **erupción volcánica** ocurre cuando en un volcán se acumulan materiales magmáticos con temperaturas entre $300^{\circ} > 900^{\circ}\text{C}$ (magma) (Carmichael et al. 1974), la presión y la temperatura pueden hacer que salgan en forma de productos como lava, ceniza, rocas, vapores y gases, produciéndose erupciones de tipo efusivas o explosivas.

Erupciones efusivas, es una erupción magmática (en su mayoría de tipo fisural) en la cual el magma de composición básica a intermedia que permite el comportamiento fluido del magma y es extruida en forma de flujos de lava, con la presencia de vesículas al enfriamiento; lo que evidencia la liberación de concentración de gas. Cabe destacar que por su fluidez se adapta a la morfología del terreno (Araña, 1993).

Erupción explosiva, están asociadas a magmas de medio a alto contenido de sílice, lo que provoca que el comportamiento del magma sea viscoso, permitiendo que al ascender el magma se fragmente y la liberación de gases sea abrupta. La erupción más característica es de tipo pliniana asociada a rocas ignimbríticas. Este tipo de actividad es más explosiva generando columnas entre 10 y 50km. (Araña, 1993; Sigurdsson, 2000).

Existen dos tipos principales de volcanes: 1) **Monogenéticos** el cual es un edificio volcánico formado por el ascenso continuo hacia la superficie terrestre, pero en un

intervalo de tiempo limitado. Consiste en una corriente de lava basáltica y un cono pequeño de escoria. 2) **Poligenéticos** que son de forma cónica, surge por diversas erupciones que alternan con periodos de quietud.

Algunos volcanes según su anatomía son:

1) Los **volcanes en escudo**: Producidos por la acumulación de lavas basálticas fluidas y adoptan la forma de una estructura en forma de domo, la mayoría de volcanes en escudo crecen en suelo oceánicos profundos lo que ocasiona la formación de islas, tal es el caso de las islas Hawaianas, Islandia y las Galápagos.

2) Los **conos de ceniza**: Están constituidos por fragmentos de lava proyectada que adoptan el aspecto de cenizas o escoria, tienen pendientes empinadas, con laderas entre 30 y 40 grados, exhiben cráteres grandes y profundos en relación con el tamaño total de la estructura; normalmente tienen una altura entre 30 y 300 metros y rara vez superan los 700 metros de altura. (Tarbuck, 2005)

3) **Conos de escoria**: Tienen cónica, constituido por es escoria, bombas y material volcánico finos, son de una composición basáltica y adesítico.

4) **Conos de tobas**: Son pequeños volcanes cónicos constituidos por material endurecidos de piroclástos y depósitos de nubes ardientes.

3) Los **estratovolcanes**: también denominados **volcanes compuestos** o **poligenéticos**, están conformados por sucesivas erupciones de lavas y piroclástos con estratos de lapilli y ceniza. Su cráter es muy cambiante ya sea por demolición o acumulación de materiales. Llegan a tener pendientes mayores a los 40°. Las etapas de erupción son intercaladas por etapas de quietud, en sus etapas de erupción al expulsar materiales volcánicos genera una modificación de su topografía, tardan algunos miles de años para formarse, (Strahler, 1982; Tarbuck, 2005; Gutiérrez, 2008). Algunos ejemplos de| estratovolcanes en México son: el Volcán Popocatepetl, el Pico de Orizaba, Nevado de Toluca, El Parícutín, Iztaccíhuatl (Yarza, 1992).

El concepto de **peligrosidad volcánica** engloba todo el conjunto de eventos que se pueden esperar en un determinado un volcán y que pueden provocar daños a personas o bienes expuestos. Estos eventos pueden ser muy diversos. Estos peligros principalmente son, **caída de ceniza, flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares** (Sigurdsson et al., 1999; Schimnke, 2006); Los cuales se enlistan en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Descripción de acontecimientos. (Descripción hecha por SGM)

<p>Colada de Lava</p>	<p>Las coladas de lava son derrames de roca fluida, pueden ser emitidos desde el cráter superior principal, un cráter secundario, una fisura en el suelo o sobre los flancos de un volcán y son impulsados por la gravedad. Se distribuyen sobre la superficie según la topografía del terreno.</p> <p>Existen diferentes tipos de coladas de lava; Pahoehoe que tiene una textura suave, en el desarrollo la superficie de se enfría hasta un estado semisólido lo que provoca que en su inferior siga fluyendo la lava líquida.</p> <p>Otro tipo de colada es la hawaiana “aa” la cual su superficie es extremadamente áspera, cortante y por un avance irregular de los gruesos flujos de lava.</p> <p>Por ultimo esta la lava en bloques la cual es común en volcanes con productos más ácidos y viscosos. Su interior es incandescente, descienden por las pendientes de un Volcán en forma de pequeñas avalanchas, formando unas lenguas de lava similares la de flujos líquidos, cabe mencionar que esto se ven reflejados en el Volcán de Colima.</p>
<p>Flujos Piroclásticos</p>	<p>Son una mezcla de partículas sólidas o fundidas con gases a alta temperatura que se pueden comportar como líquidos de gran movilidad y poder destructivo. Se pueden distinguir tres tipos de flujos de acuerdo al tipo de erupción que los produce (Wirms, 1979): flujos relacionados con domos o con desmoronamientos de los frentes de lava; flujos producidos directamente de cráter de cumbre y flujos descargados desde fisuras.</p> <p>Estos flujos se desplazan a una velocidad hasta de los 300 Km/h; de igual manera es llamado oleada piroclástica.</p>
<p>Ceniza</p>	<p>Esta se deposita en la superficie terrestre es la que cae lentamente de alturas considerables, y está formada de fragmentos piroclásticos muy pequeños, que son productos de la fragmentación extrema de lava fresca. La ceniza volcánica forma depósitos, conocidos como capas de ceniza, que al consolidarse se llaman tobas. Puede llegar a cientos de kilómetros por acción del viento.</p>
<p>Lahares</p>	<p>También conocido como flujos de escombros, son eventos secundarios que generalmente acompañan a una erupción volcánica; contienen fragmentos de roca volcánica y el producto de la erosión de las pendientes de un volcán. Estos se mueven pendiente abajo y pueden incorporar suficiente agua, de tal manera que forman un flujo de lodo. Pueden llevar escombros volcánicos fríos o calientes. La distancia que puede alcanzar un lahar depende de su volumen, contenido de agua y la pendiente del Volcán a partir de donde se genera.</p>

5.1 MARCO TECTONICO-GEOLOGICO

La subducción de la placa de Rivera y placas de Cocos por debajo de la placa de Norte-América desde el Plioceno, han sido responsable de la formación del cinturón Volcánico Transversal (CVT). El CVT es un arco volcánico continental, tiene una extensión de 1,200 km, el cual pasa por centro de México desde las costas del Pacífico al oeste de Nayarit, con el Volcán San Juan, hasta el Golfo de México como lo muestra la Figura 1 (Yarsa, 1992; Cortés, 2002).

En el oeste del CVT existen tres sistemas de Rift: rift de Chapala, rift de Tepic-Zacoalco y el rift de Colima. El rift de Colima se limita por un sistema de fallas normalmente N-S y el río Tuxpan al este, al oeste por el río Almería. (Figura 2), (Cortes, 2002).

El Complejo Volcánico del Colima se conforma por tres estratovolcanes alineados norte-sur debido al fallamiento regional N-S del rift de Colima. Los 3 volcanes son: Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima. En este complejo comenzó la actividad volcánica en el Volcán Cántaro hace 1.7 Ma y terminó 0.95 Ma, está formado por una composición andesítica y dacítica. Después emigro la actividad Volcánica al Nevado de Colima el cual empezó su actividad hace 0.53 Ma, su composición es dacítico-andesítica de igual forma.

El Volcán de Colima se emplazó dentro y ligeramente al sur de la caldera del Paleofuego. Se encuentra a 3820 msnm aproximadamente, inició su actividad volcánica hace 50,000 años. Es considerado el Volcán más activo de México ya que en los últimos quinientos años ha presentado más de 50 erupciones (Elizarrarás, 1995; Dávila, 2007). Tienen pendientes de 30° a 45 ° por arriba de 2,200 msnm provocando gran erosión en estas pendientes máximas, las pendientes de las laderas son máximo de 15°. (Dávila, 2011).

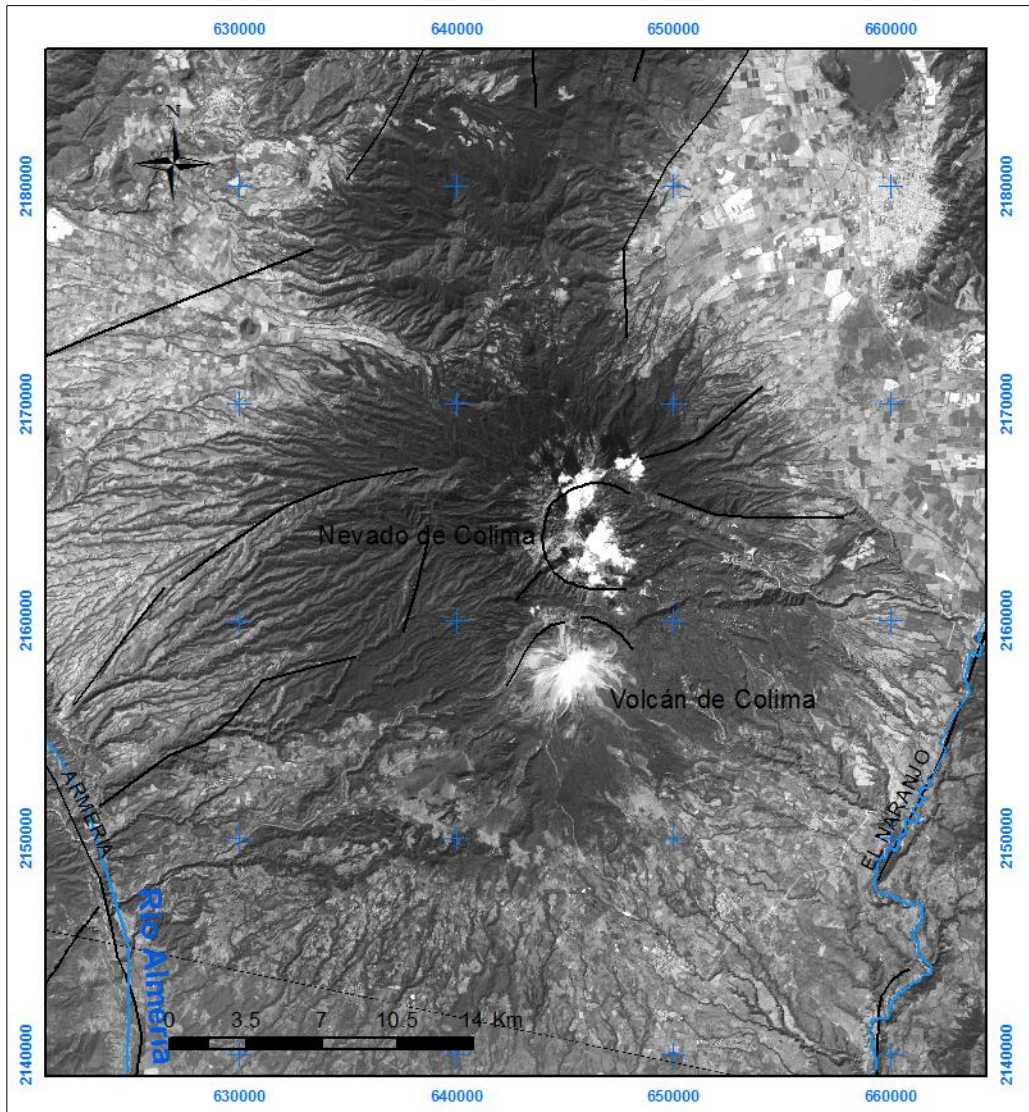


Figura 2: Rift de Colima con imagen Landsat (banda Pancromática) y estructuras tomadas del servicio (geológico mexicano 2010).

De acuerdo con el mapa de Cortés (2002) (ver Figura 3), una columna estratigráfica representativa elaborada sin escala (Figura 4), se describe a continuación su secuencia geológica. Es importante mencionar que para poder leer el siguiente apartado se debe considerar los números entre paréntesis los cuales se asocian a la secuencia de la columna estratigráfica de la Figura 4. El Complejo Volcánico de Colima, se desarrolló sobre basamento Cretácico-Terciario, caracterizado por la formación Tecalitlán (1) caracterizada por antiguos depósitos de origen

sedimentario y volcánico, cubiertos por material de origen fluvial, al cual subyace una serie de flujos de lavas de diversas composiciones. Los depósitos de Cretácico Medio –Superior están agrupados en la formación Los Encinos (2), conformada por formaciones depósitos fluviales intercalados con arenisca, conglomerados calcáreos y depósitos de flujos piroclásticos. Esta formación se ve afectada por dos episodios intrusivos de composición granodiorita (3) y diorita (4) el primero de 70 Ma y 66Ma.

De acuerdo con Macías (2005) y Cortés (et al. 2005) mencionan un cono ancestral conocido como paleofuego a unos cinco kilómetros al sur del actual, representado por una caldera hacia el sur de unos cinco kilómetros de diámetro (robin y baudal 1989; macias), mencionan el Volcán de Paleofuego reporto al menos 5 colapsos, generando depósitos de avalancha. El más antiguo (5), data de 16650 +/- 135 años AP, con un espesor de 20 m y un volumen 8.9 Km³ el cual se cubrió por lahares y depósitos lacustres. El segundo deposito (6) se encuentra emplazado al oeste del Volcán fechado en 7380 años (Komorowski et al. 1997). El tercer depósito, (7) se encuentra al sur, con un volumen de 30 Km³ y una área de 586 km², fechado 6990+/- 130 años y tiene una topografía abrupta de montículos (Cortes, 2002; Macías 2005). El cuarto depósito (8) Cortés (2002) y Macías (2005), lo definen como depósitos que se extiende 25 Km al SW del actual Volcán de Colima fechado 3600 años AP. Finalmente el quinto depósito (9) corresponde a un evento hace 2500 años AP (Macías et al. 2005).

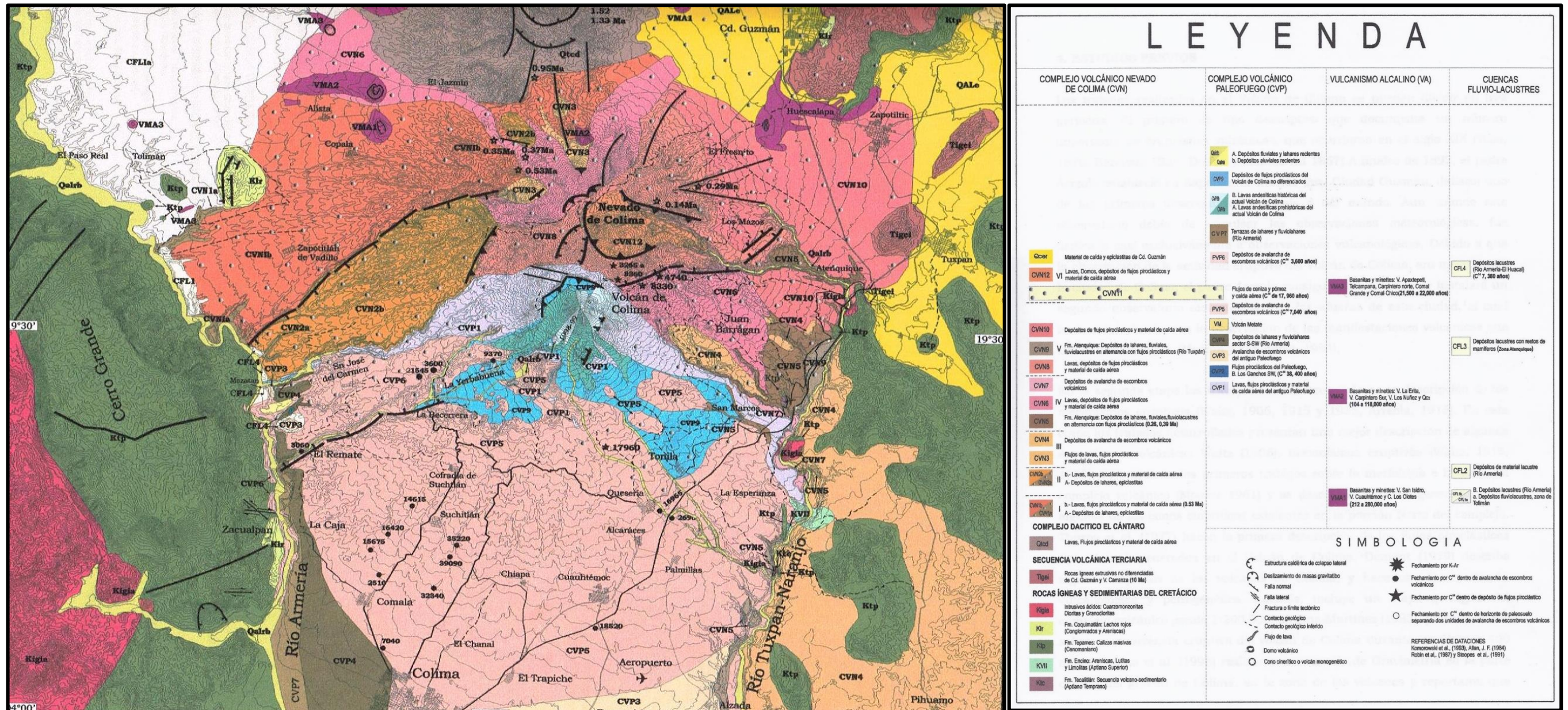


Figura 3: Mapa Geológico del Complejo Volcánico del Colima elaborado por Cortés, 2002.

En el Volcán de Colima se observa en la cumbre lavas andesítica, lavas andesítica antiguas extendiéndose por el este, oeste y sureste del Volcán de Colima, al norte y noroeste se encuentran coladas de lavas y flujos piroclásticos y materiales de caída del Paleofuego. En las faldas al sur, sureste y suroeste del Volcán de Colima se localizan depósitos de avalanchas de escombros, depósitos de lahares y fluviolahares. Al norte del Volcán de Colima se encuentran flujos piroclásticos, coladas de lavas y materiales de caída del Volcán Nevado de Colima.

Por su parte, la geología superficial del Volcán de Colima se caracteriza por una recurrente actividad explosiva; siendo considerado el más activo en la República Mexicana; ya que ha presentado más de 50 periodos eruptivos en los últimos 500 años (De la Cruz, 1993). Así, encontramos coladas de lavas andesítica históricas (10) que datan de 1869, 1872 y 1962. Para 1998 Macías (et al. 2006) menciona unas coladas de lava, flujos piroclásticos (11) que viajaron al suroeste con un espesor aproximado de 6 m. Macías (et al. 2006) y Cortés (2002) hacen referencia a la actividad del 2004-2005 en donde se generó una colada de lava de espesor de 20 m, 2.3 km de longitud y 330 m de anchura al norte, otras menores al este emplazadas sobre la barranca La Lumbre, y flujos piroclásticos a 2.5 km aproximadamente al sur. Como procesos secundarios asociados a remobilización de depósitos superficiales, efecto de periodos extremos de lluvia, destacan los depósitos de lahares y aluviones (12) en las zonas distales al cráter, en las barrancas próximas de la ladera sur del Volcán de Colima.

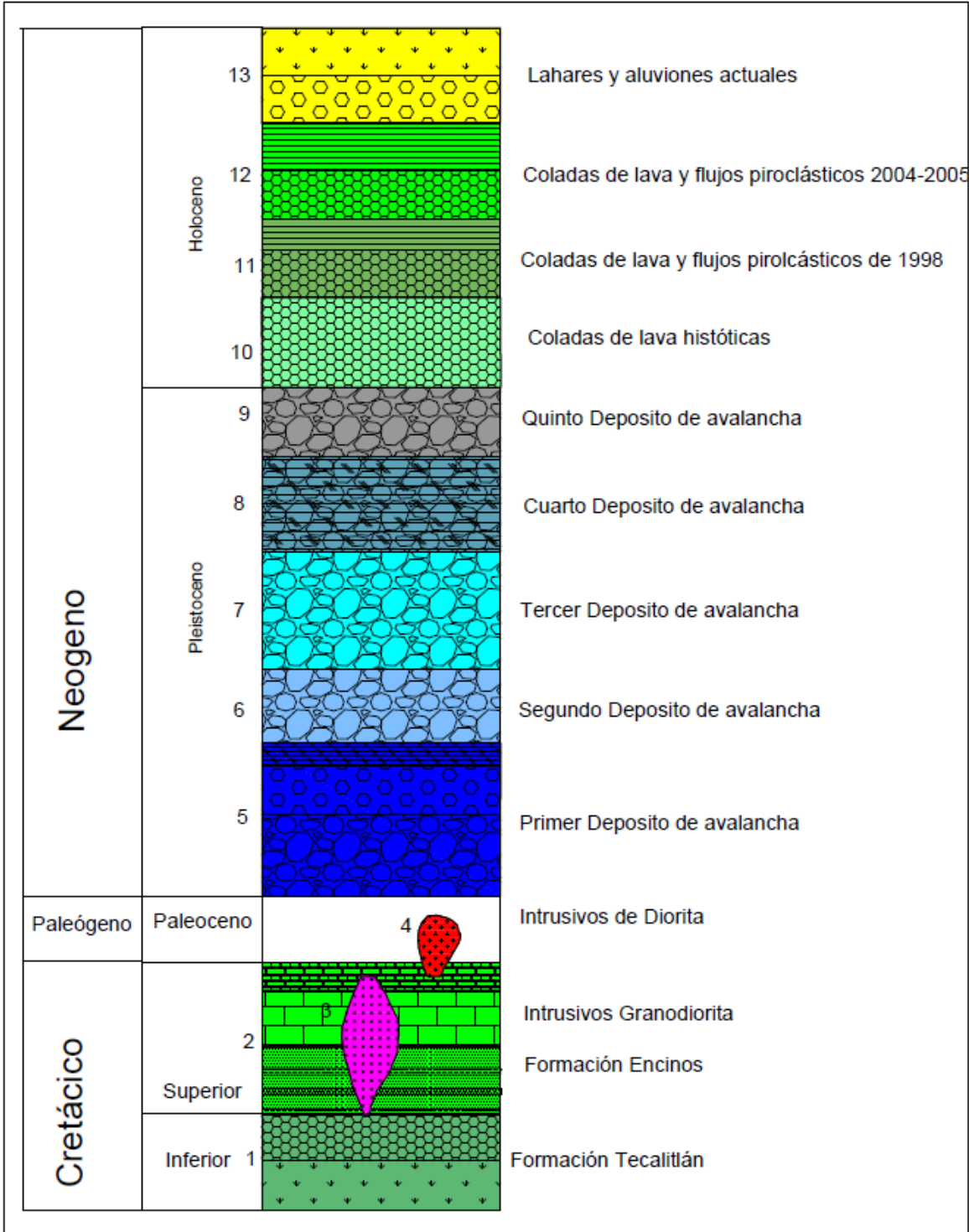


Figura 4: Columna estratigráfica representativa y sin escala del Volcán de Colima (Cortez, 2002; Elaboración propia)

5.2 ACTIVIDAD RECIENTE DEL VOLCÁN DE COLIMA

EL Volcán de Colima es considerado de los más activos de Norteamérica por sus 50 periodos eruptivos en los últimos 500 años (De la Cruz, 1993). En sus últimos episodios eruptivos se caracterizó emisiones vulcanianas, flujos de lava y crecimiento del domo, produciendo depósitos de flujos, ceniza, así como colapsos gravitatorios de escombros emplazados principalmente en barrancas al surponiente del Volcán. (Saucedo et al. 2002; Sulpizio et al. 2010; Dávila, 2011).

Las erupciones más violentas ocurrieron 1818 y 1913 asociadas a columnas eruptivas plinianas y subplinianas. En la erupción de 1913 los flujos generados recorrieron 15 km de distancia del cráter sobre la ladera sur del cráter con espesores máximos de hasta 40 m. (Saucedo, 1997; Dávila, 2007). Después de esto hubo un periodo de reposo. En 1958 donde se generó un nuevo domo durante los siguientes 30 años predominó actividad efusiva de derrames de lava con flujos piroclásticos menores. (Macías et al. 2006) hasta noviembre del 1998 donde se manifestaron actividades efusivas y explosivas.

En noviembre 1998 la actividad comenzó con un emplazamiento de un domo que rebasó el cráter, lo cual originó bloques de lava, ceniza y flujos piroclásticos que se emplazaron en las barrancas La Lumbre y El Cordobán, alcanzando una distancia máxima de 4.5 Km de la cima en la barranca El Cordobés. En el año siguiente una fuerte explosión destruyó el domo, generando columnas eruptivas de 10 km de altura, dando lugar a flujos piroclásticos y lluvia de ceniza emplazados a 3.3 km a lo largo de la barranca San Antonio y Montegrande. (Saucedo et al. 2002; Dávila et al. 2007; Sulpizio et al. 2010). En el 2001 debido a la formación de un nuevo domo provocó que se originaran flujos de lava emplazados en las barrancas Montegrande y San Antonio llegaron a desplazar hasta 6 Km del origen. En septiembre y octubre del 2004 se inició la formación de un domo, el cual se desbordó al norte y noroccidental del cráter formando dos flujos de lava. El flujo más al norte fue de 300m de largo, 10 de espesor y 150 m de ancho, días después al sur de la cima del Volcán se derrumbó parte del domo lo cual produjo bloques de lava, ceniza y flujos piroclásticos emplazados en la barranca La Lumbre, llegando a una distancia de

más de 6 km. (Gavilanes, 2004; Cortés et al. 2005; Dávila et al. 2007; Sulpizio et al. 2010).

En diciembre de 2004 y enero, febrero de 2005, al menos 15 explosiones de hasta 3 km de altura generaron un indeterminado número de bloques de lava, ceniza y flujos piroclásticos, los cuales se emplazaron en la barranca Montegrande y La Arena de 3 a 5.4 km de distancia al cráter. En el 2007 se observó un nuevo domo donde su crecimiento fue lento hasta 2010 (Sulpizio et al. 2010; Cortés et al. 2010). El 7 de enero de 2013 se presentó una explosión que generó una columna de ceniza volcánica que se elevó a más de 3 Km de altura que arrojó ceniza y materiales piroclásticos que se fue para la barranca de La Lumbre. (Vázquez et al. 2014).

En cuanto a depósitos secundarios como lahares, se registran eventos importantes en 1991-1992, 1994-1995, 2000, 2003, 2007, 2011 y el más reciente 2012, (Franco et al. 2013; Vázquez et al. 2014). Estos son un fenómeno común en el Volcán, generado principalmente en temporadas de lluvias y huracanes (junio-octubre), llegan a alcanzar distancias mayores a los 15 km. Las barrancas más activas donde se originan los lahares son: La Lumbre, El Cordobán, San Antonio, Montegrande, Del Muerto y la Arena todas ubicados en el sector sur del Volcán. Estos lahares pueden afectar potencialmente a la población de Quesería (8611 habitantes) y San Marcos (3350 habitantes) (Dávila et al. 2007; Sulpizio et al. 2010; Roveratto et al. 2011; Franco et al. 2010; Vázquez et al. 2014).

5.3 INTRODUCCIÓN A IMÁGENES ÓPTICAS Y RADAR

5.3.1 IMÁGENES ÓPTICAS

Las imágenes ópticas son un sistema pasivo ya que se limitan a recoger la energía electro- magnética procedente de la superficie terrestre, ya sea reflejada de los rayos del sol o emitida en virtud de su propia temperatura, siendo el sol la principal fuente de energía (Chuvieco, 1995).

Las imágenes se define como una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra, están compuesta de elementos individuales llamados pixeles, agrupados en líneas y columnas; cuando se generan estas imágenes adquieren varias bandas o imágenes representadas en escalas de grises, cada banda corresponde a una parte del espectro electromagnético, las imágenes operan en el dominio óptico y térmico. Las bandas generadas en tonalidades grises al combinarlas por medio de cañones RGB se mezclan, lo cual le da color a la imagen.

La resolución de las imágenes ópticas se divide en cuatro parámetros; resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal. La resolución espacial es el objeto más pequeño que se puede observar en la imagen; mientras que la resolución espectral es el número y anchura de las bandas espectrales que discrimina el sensor. La resolución radiométrica se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Mientras que la resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que se adquiere unas imágenes de la misma porción de la superficie (Chuvieco, 1995).

Las principales aplicaciones de las imágenes ópticas son: identificar vegetación, suelo, rocas, etc.

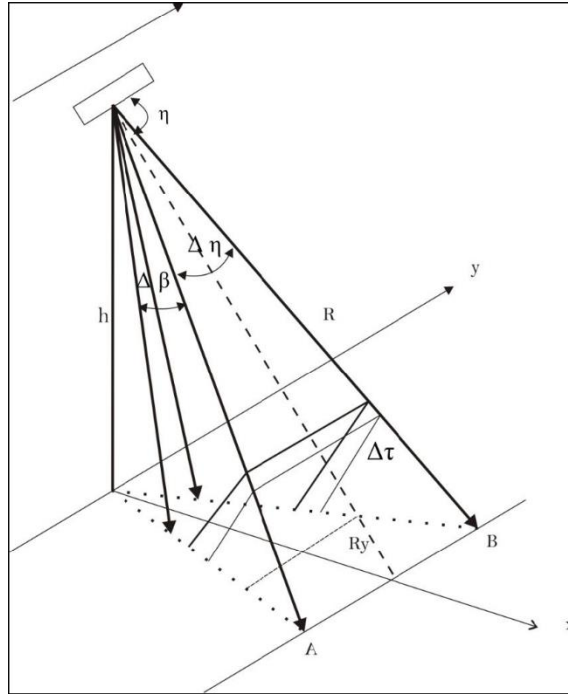
5.3.2 IMÁGENES DE RADAR

Las imágenes de radar son sistemas activos que emplean radiación coherente, la cual es una emisión de pulsos (De longitud de onda), con tienen un frecuencia, y longitud de onda. Estas controlan su propia fuente de iluminación para la generación

de la imagen, estos mandan una serie de pulsos electromagnéticos emitidos en la región del microondas, en esta región la radiación solar atraviesa la atmósfera sin ninguna distorsión y opera en cualquier condición atmosférica. Dicha radiación es coherente porque contiene la misma longitud de onda y la fase.

El término Radar corresponde a las iniciales en inglés “Radar Detection And Ranging”. Consiste en medir el tiempo en que tarda la señal al ser emitida y retrodispersada, con esto mide la distancia de la antena a un objeto detectado y cuantificar sus características físicas y texturales (Hanssen, 2001). La antena de radar emite un haz de radiación que conforma un tren de pulsos de corta duración Δt y una alta frecuencia de repeticiones (Lira, 2010).

Dependiendo de su forma de operar se dividen en Radar de Apertura Real (RAR) y Radar de Apertura Sintética (SAR). Radar de apertura real (Figura 5) mide los pulsos retrodispersados de la zona de interés pero está condicionado por dos parámetros que se controlan debido a la antena: 1) el haz de la radiación de la antena que se asocia a la dirección en azimut R_y , la cual es paralela a la trayectoria del vuelo de la antena de radar; 2) la longitud del pulso a lo largo de la dirección en rango R_x , esta es perpendicular a la dirección del azimut. Por lo tanto la apertura del haz de la antena es directamente proporcional a la longitud de la onda empleada y proporcional a la antena (Ketelar, 2009, Lira, 2010, Dávila, 2011).



h : Altura del satélite radar con respecto a la superficie terrestre; R_x : Resolución en la dirección del rango; R_y : Resolución en la dirección acimutal; $\Delta\beta$ Apertura del haz en dirección del rango, $\Delta\eta$, apertura del haz en dirección de azimut; $\Delta\tau$, ancho del pulso.

Figura 5: Geometría de un sistema radar (Lira, 2002)

Radar de apertura sintética, utiliza radiación coherente donde el pulso parte de la amplitud y fase iniciales en función del tiempo. Debido al desplazamiento de la antena a lo largo del vuelo permite medir N veces el rango y azimut hacia un mismo objeto de la superficie durante un determinado tiempo a través de señales sucesivas y coherentes. De esta forma SAR se basa en el desplazamiento relativo entre la antena y un punto dado en la escena, midiendo así la variación de rangos y el corrimiento Doppler. De esta forma el corrimiento de la antena aparenta una dimensión infinita lo cual permite obtener N mediciones para un solo punto considerando un cierto ángulo de observación, permitiendo así obtener un historial de rangos y de corrimiento Doppler; los cuales en su conjunto permiten estimar la razón de cambio de la posición de un objeto con respecto al sensor para un periodo de tiempo (Figura 6)

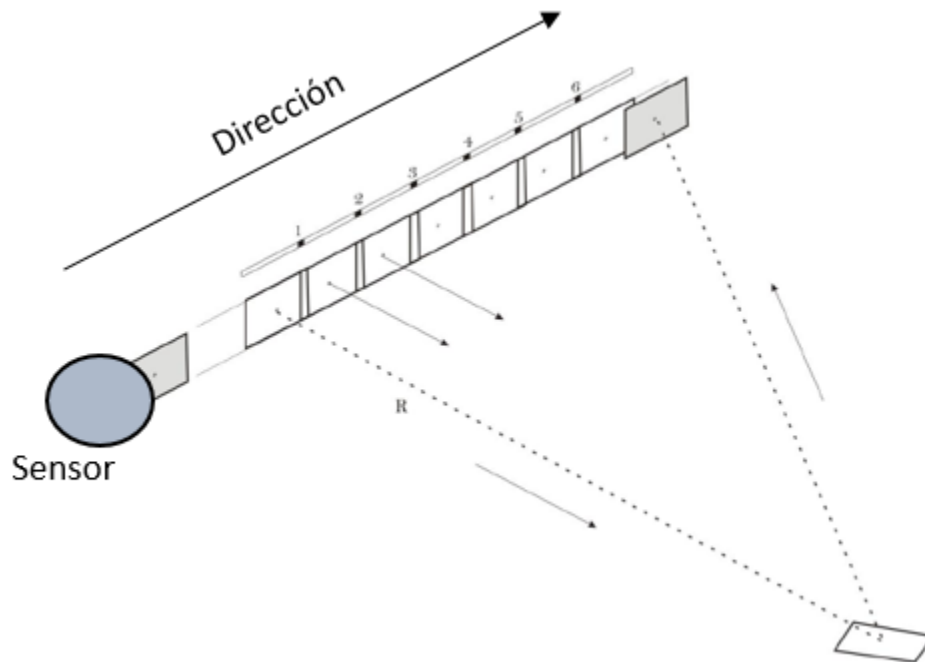


Figura 6: Efecto en el aparente incremento de la longitud de onda de la antena SAR.

Por consiguiente, el corrimiento Doppler es una razón de cambio de movimiento asociado al corrimiento de frecuencias (Dávila, 2011).

El Corrimiento doppler (Figura 7) se representa como:

$$\Delta v = \frac{2v}{\lambda \text{sen}\theta}$$

Dónde: v es la velocidad relativa entre el haz de radar, λ es la longitud de onda y θ es el ángulo formado por el rango (R) es la distancia entre el radar y el objeto.

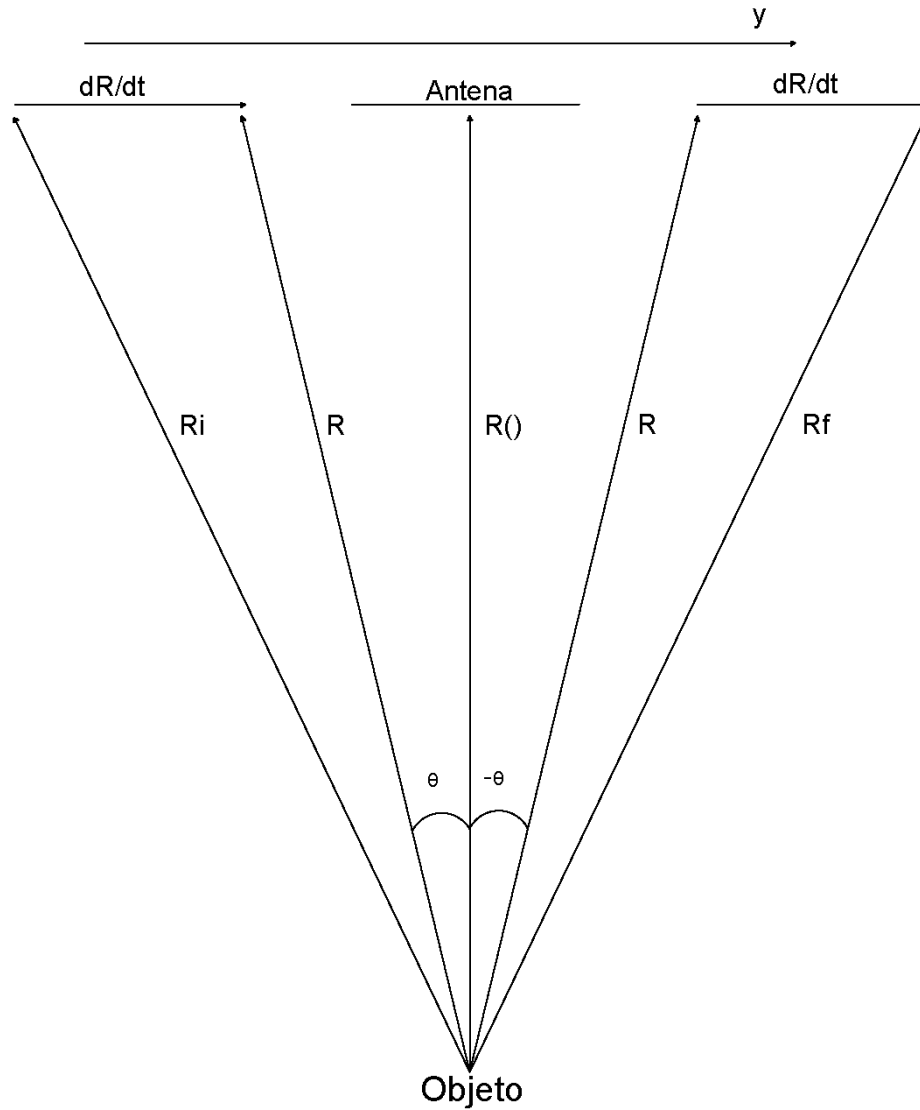


Figura 7: Corrimiento Doppler (Lira, 2002)

Por otra parte, al trabajar con radiación coherente, al adquirir las imágenes de radar producen un ruido inherente a la formación de la imagen llamado **speckle**, el cual se describe en el siguiente capítulo.

6.0 METODOLOGÍA

Con base en el diagrama de flujo de la Figura 9 se describe la metodología a continuación. Se utilizaron 6 imágenes SPOT 5 y 6 adquiridas a partir de convenios estatales SIAP SAGARPA. Las características técnicas del sensor se muestran el cuadro 2. También se utilizaron 6 imágenes TerraSar-X adquirida mediante propuesta científica sometida a la agencia espacial alemana (German Space Agency-DLR), sus características técnicas del sensor se muestran en el cuadro 3. Cabe destacar, y como se menciona en apartados posteriores, se realizó una selección de las imágenes que arrojaran los mejores resultados para realzar y discriminar tanto las unidades volcánicas como los cambios; por lo que no todas las imágenes fueron útiles para la presentación final de los resultados.

Cuadro 2: Características de las imágenes Spot

SPOT		
Imágenes requeridas	6 imágenes	
Numero de Bandas	4 bandas	
Resolución espectral	Spot 5	Spot 6
	P: 0.48 a 0.71 μ m	P: 0.48 a 0.71 μ m
		Banda (azul) 455 – 525 μ m
	B1 (verde) 0.50 - 0.59 μ m	Banda (verde) 0.53 – 590 μ m
	B2 (rojo) 0.61 – 0.68 μ m	Banda (roja) 625 – 695 μ m
	B3 (infrarrojo cercano) 0.78 a 0.89 μ m	Banda (Infrarrojo cercano) 760 - 890 μ m
	B4 (infrarrojo medio) 1.58 a 1.75 μ m	
Resolución del Pixel	Spot 5 a 5 mts Spot 6 a 1.5 mts	
Resolución espacial	60 x 60 Km	
Resolución temporal	26 Días	
Resolución radiométrica	8 bits	

Cuadro 3: Características TerraSar-X

TERRASAR-X			
Año de lanzamiento	2007		
Resolución temporal	11 Días		
Altura de la plataforma	512 Km		
Resolución espacial	10-100 KM		
Modo de adquisición		Resolución del pixel	Tamaño de la escena
	SpotLight	2 m	10 x 10 km
	StripMap	3 m	30 x 50 km
	ScarSar	18	100 x 150 km

Con base en el diagrama, se pueden mencionar 3 etapas principales en su desarrollo:

1. Pre-procesamiento.
2. Procesamiento.
3. Resultados y segmentación.

DIAGRAMA METODOLOGICO

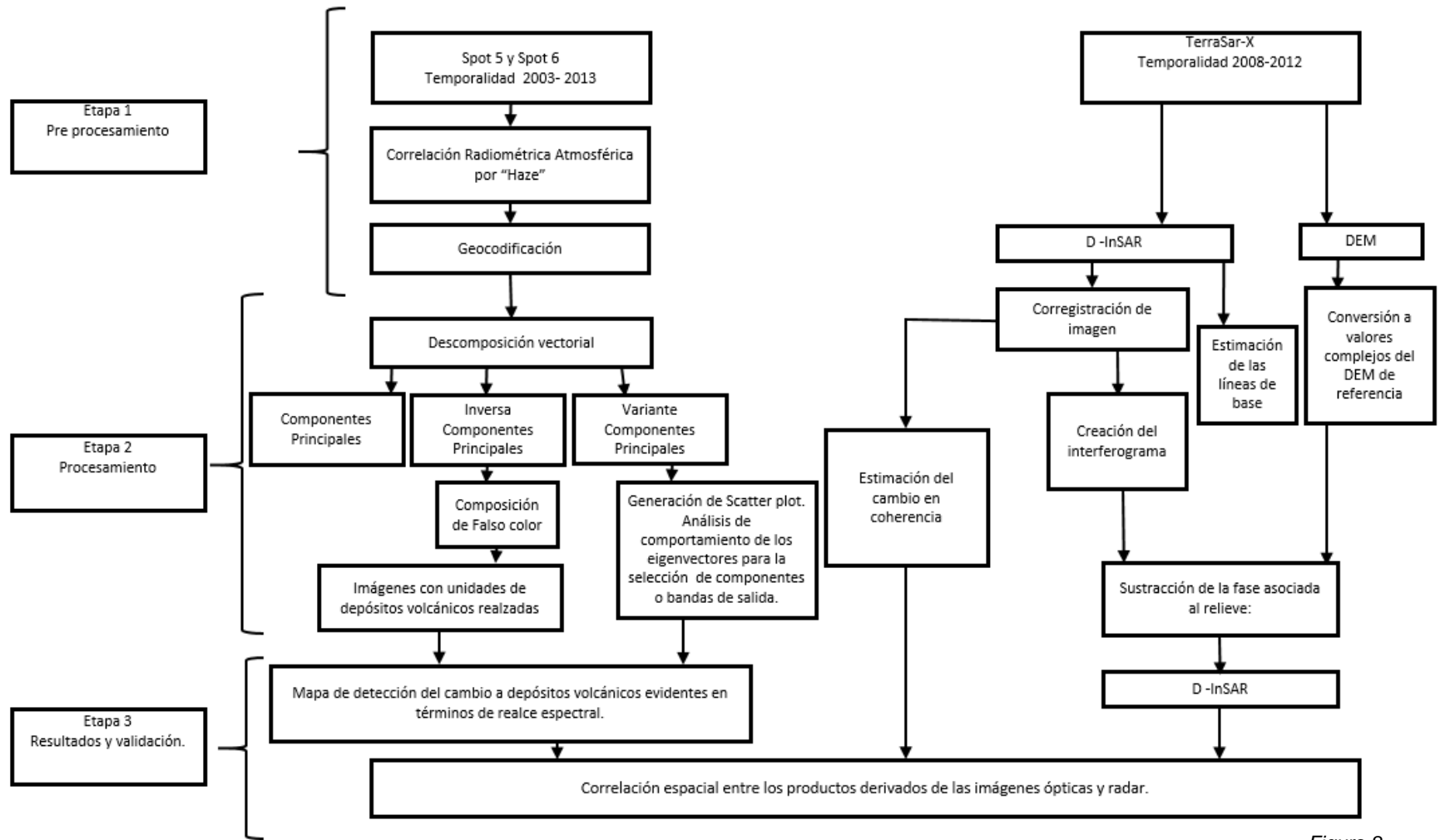


Figura 8

6.1 ETAPA 1-PRE-PROCESAMIENTO

El pre-procesamiento de las imágenes se realizó a través una serie de correcciones geométricas y radiométricas, las cuales tuvieron como objetivo corregir las distorsiones originadas en el momento de la toma de la imagen; obteniendo así datos sin ambigüedades de cada una de las escenas utilizadas. Se aplicaron 2 tipos de correcciones; las correcciones geométricas y radiométricas-atmosféricas. Las imágenes satelitales se consiguieron en nivel 1A.

La corrección geométrica o geocodificación se realizó para todas las imágenes (radar y ópticas) el cual fue necesario para poder realizar mediciones de área, direcciones y distancias, así obteniendo una mayor aproximación en el sistema de referencia real, para sobreponerlas, modificando las coordenadas de cada pixel y asignándoles el sistema real de coordenadas métricas UTM, datum WGS 84 zona 13, (Figura 9) así como también redujo los errores de desplazamiento aparente del relieve. Esta ortorectificación se hizo con ayuda de un modelo digital de elevación, obtenido del sensor ASTER con una resolución a 30 m, en el caso de las imágenes spot se utilizaron ortofotos obtenidas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con una resolución de dos metros; mientras que para las imágenes de radar se utilizaron imágenes TerraSar-X orto rectificadas. Estas se utilizaron como base para ingresar entre 15 y 20 puntos de control, estos asociaron una coordenada real del terreno a un punto de las imágenes sin geocodificación generando una relación pixel a pixel entre las dos imágenes, obteniendo un error medio cuadrático no mayor a .2 (siendo 1 el pixel). Con los puntos de control se realizó una rectificación que transformó la geometría de la imagen para que cada pixel corresponda a una posición real de coordenadas de acuerdo a un sistema de proyección, utilizando el método de interpolación bilineal, el cual calcula el valor de cada pixel de la imagen corregida, promediando los 4 pixeles más cercanos sin distorsionar los valores lineales de la imagen (Figura 8). Se utilizaron un polinomio de tercer orden para la calibración geométrica. Cabe mencionar que en las imágenes de radar, la geocodificación se realiza al final aunque se considera parte del pre-procesamiento.

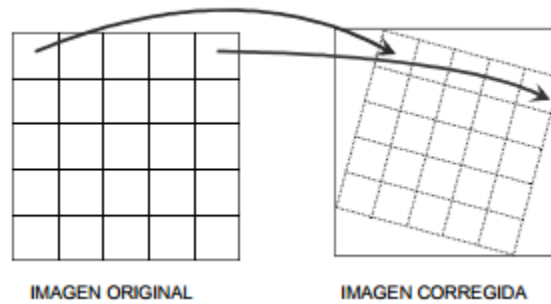


Figura 9: Ejemplo de imagen original e imagen corregida

La **corrección radiométrica** se realizó debido a que la radiación electromagnética captada por los sensores es modificada al tener interacción con las moléculas y partículas de la atmosfera. Existen varios factores asociados al valor de radianza o radiométrico como las condiciones atmosféricas, la iluminación del sol, cambios estacionales, errores sistemáticos del sensor (Lira 2002). La corrección atmosférica está inmersa dentro de la corrección radiométrica, ya que corrige y modela la cantidad de vapor de agua, aerosoles, para esto se debe conocer la fecha y hora de la toma, el sensor, el lugar de la toma, tipo de lugar (rural, urbano, marítimo) y el centro de la escena. Para el presente trabajo se utilizó un algoritmo para modelar el ruido radiométrico por “**haze**”, también llamada dispersión de Mie, el cual es un efecto que ocurre cuando las partículas atmosféricas son de menor tamaño que la longitud de onda. (Lira, 2010). Esta corrección por haze produjo un componente que se correlaciona con la neblina y posteriormente este componente lo modela, ayudando a afinar la visualización de la imagen. (Erdas, 2013).

Por otra parte, siguiendo el diagrama de flujo metodológico, en términos de pre-procesamiento de una imagen de radar se utilizó el proceso de multi-looking cuyo principal objetivo es modelar o aminorar el ruido producido por un fenómeno físico inherente a la adquisición de una imagen SAR conocido como **Speckle**. Es un fenómeno físico inherente a la adquisición de una imagen SAR, es causado por la interferencia de ondas electromagnéticas dispersadas por los objetos o la superficie, que se genera en la toma de la imagen debido a las fluctuaciones que puede tener la señal después de ser retrodispersada, esta señal puede ser alta o baja

dependiendo de la interferencia constructiva o destructiva e influye directamente en la calidad de la imagen provocando que la interpretación de la imagen sea más complejo (Jacob, 2010). Por su parte el proceso de multilooking es un algoritmo de los más efectivos para aminorar o disminuir el speckle inherente a la toma de una imagen, así el proceso multi-looking consiste en utilizar el promedio de pixeles de una imagen, modelando y eliminando el speckle, para mejorar la resolución radiométrica emplea looks que se encuentran asociados a la resolución espacial, es decir a mayor un aumento en el número looks equivale a aminorar a la mitad la resolución de la imagen original. De manera simultánea para la modelación del ruido se utilizaron procesos de filtrado, el cual consistió en la aplicación de un kernel de dimensiones 3x3 utilizando el Filtrado de Lee y Lee multiplicativo que a diferencia del multi-looking, emplean la media y la varianza. En el filtro de Lee supone un ruido blanco aditivamente sobrepuesto a la imagen, no requiriendo el conocimiento del ruido ya que supuso un modelo de auto correlación para estimó la media y la varianza así calculando el ruido de la escena. Mientras que en el segundo filtro está diseñado para filtrar ruido multiplicativo, se calculó multiplicando el factor de ganancia por la imagen con ruido más la media de la imagen; lo cual provocó que se eliminara parte del ruido, afectado un segmento del contenido de la información de la imagen (Ketelaar, 2009; Lira, 2010; Hooper et al., 2012).

6.2 ETAPA 2-PROCESAMIENTO

La etapa de procesamiento hace referencia tanto para imágenes ópticas como de radar.

6.2.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SPOT

En las imágenes ópticas aplicamos tres descomposiciones vectoriales: componentes principales (CP), Inversa de Componentes (IndC) y Componente Independiente (InvC).

6.2.1.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Componentes principales implicó compactar los datos redundantes en menos bandas, reduciendo la dimensión de los datos, es decir, considerando todos los

elementos que conforman la escena, transformando el conjunto de bandas que componen la imagen; obteniéndose una imagen multiespectral con un realce total de la imagen con prioridad a la primera componente principal ya que su representación es con la varianza máxima de los datos, mientras el ruido se representó en la última componente. (Jensen, 1996; Lira, 2002). Lo anterior puede tener una interpretación geométrica, ya que la imagen de salida se encuentra referida a un espacio generado por vectores base, cuyas direcciones son las componentes principales de la imagen original. Definiéndolo de la forma:

$$g(s) = A[f(r)]$$

Donde $g(s)$ es la imagen resultante de la descomposición vectorial, $f(r)$ fue la imagen multiespectral compuesta por las n bandas, A opera sobre los valores del campo que forman los píxeles de la imagen multiespectral de entrada para producir el campo vectorial $g(s)$ de la misma dimensión que el original.

6.2.1.2 INVERSA DE COMPONENTES PRINCIPALES

La inversa de la componente principal parte de componentes principales ya que para calcularse necesita la información de sus vectores. Esta se utilizó para compactar los datos y la reducción del ruido, Para la reducción del ruido lo que hizo fue omitir la varianza representativa del ruido del conjunto de datos. Generó la misma dimensión de la imagen de componentes principales. (Jensen, et al. 2005)

6.2.1.3 COMPONENTE INDEPENDIENTE

El componente independiente generó una descomposición de la imagen en varios rasgos, los cuales se refieren a objetos de la escena con características espectrales similares. Por lo tanto esta técnica realizó una transformación lineal de las bandas espectrales de tal manera que con un vector aleatorio (X) genera una componente que se resuelve por medio de:

$$x_1 = a_1s_1 + a_2s_2 + \dots a_ns_n$$

Donde: a_1, \dots, a_n son los vectores base y s_1, s_n, \dots son las variables fuente, así la transformación lineal empleada $S=W\chi$, donde W el factor de la transformación

lineal y S es la componente decorrelacionada e independiente tanto como sea posible (Commond, 1994; Payam, 2009).

Cada componente de salida es independiente donde cada una contiene información asociada a una característica específica de la imagen (Shah, 2003). Para optimizar la independencia de S o aminorar la información se aplicó entropía que se define:

$$entropyx = - \sum_{K=0}^{G-1} P(k) \log_2 (P(k))$$

Donde:

G es el número de niveles de grises, K es nivel de gris y P es la probabilidad.

Cabe señalar que a diferencia de Componentes Principales, la Componente Independiente no separa el ruido o lo reduce a la última componente de salida, en este caso, el ruido es repartido en todas las componentes de salida de manera aleatoria.

6.2.1.4 INTEGRACIÓN DE LAS TRASFORMADAS VECTORIALES APLICADAS A LAS IMÀGENES SPOT

Teniendo estas tres imágenes (CP, InvC, IndC) se realiza una selección de bandas a cada una de las imágenes; las bandas que se seleccionan son las que contienen una mayor dispersión de datos según la construcción de su dispersograma que se basa en una función lineal. Se realizó un sumatoria de las bandas seleccionadas tanto de CP, IC, VCP, con la cual se generó una imagen que realiza los depósitos volcánicos seleccionados. La fórmula que representa dicha suma es la siguiente:

$$G = \Delta (sC + sInv + sInd)$$

Dónde: G es la imagen con los depósitos volcánicos seleccionados realizados, sC es la imagen de componentes principales con las bandas seleccionadas, sInv es la imagen de inversa de componentes principales solo con las bandas seleccionadas

y s_{Ind} es la imagen de independiente de componentes principales con las bandas seleccionadas.

6.2.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE RADAR

Como se menciona en el apartado metodológico, las aplicaciones con imágenes de radar para el monitoreo de fenómenos naturales y antrópicos son diversas; a continuación se detalla una de las técnicas utilizadas para la discriminación de depósitos volcánicos. Así, dentro de las aplicaciones de las imágenes de radar se debe hacer mención al principio conocido como Interferometría radar (InSAR). El cual permite la estimación de cambio de base que puede ser asociada con la superficie del terreno. Esta técnica requiere de dos imágenes complejas constituidas por la magnitud y la fase de la señal, pero con temporalidad diferente. (Dávila, 2010). La información que se extrajo fue la topografía asociada al cambio en la superficie del terreno. Dentro del principio InSAR se pueden mencionar diversas técnicas empleadas para la estimación del cambio de fase. Para el presente trabajo se empleó la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR) y Estimación de Cambio en Coherencia (ECC) las cuales se mencionan a detalle en los párrafos siguientes.

Como se observa en el diagrama se calculó la línea de base, esta se define como la distancia existente entre dos adquisiciones de distinta temporalidad, esta distancia no excedió los 1000 metros ya que se corría el riesgo de perder coherencia entre las señales (Figura 10).

Con la línea de base calculada entre las dos imágenes se asociaron a valores de altura en el terreno que permitieron evaluar el cambio en valores de una toma u otra. Para poder realizar estas técnicas necesariamente las dos tomas SAR se sometieron a un proceso de co-registración que es localizar dos pixeles comunes en las dos tomas para la visualización en dirección del rango y azimut; el cual se encuentra en función de la línea de base (anteriormente descrita).

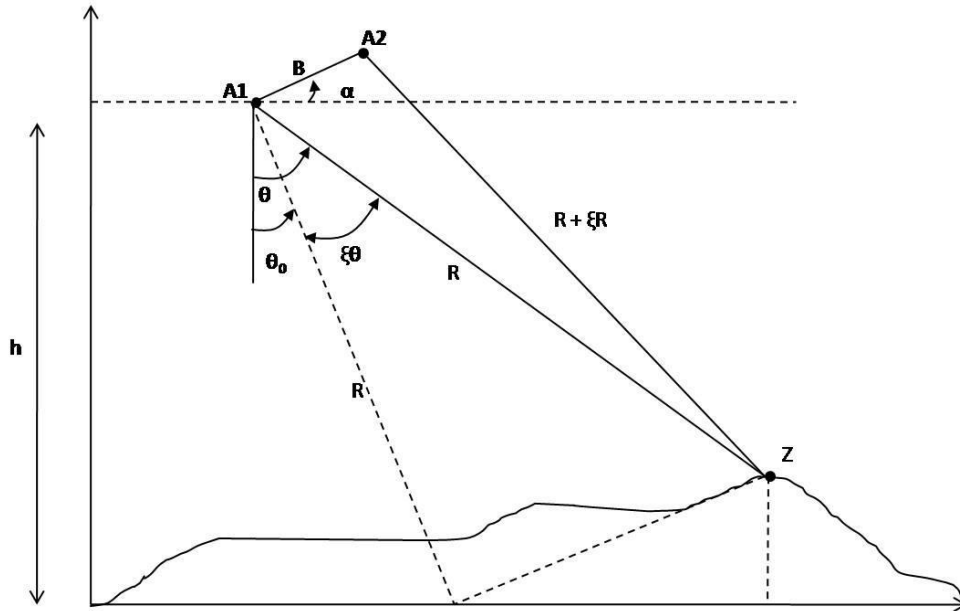


Figura 10: Muestra la línea de base (B) la cual es la distancia de la primer toma (A1) a la segunda toma (A2)

El cambio de fase puede ser estimado a partir de diversas técnicas conocidas en términos generales como Interferometría diferencial (DinSAR), así como sus variantes tal como Estimación de Cambio en Coherencia (CCD).

A partir de DinSAR se evaluó la diferencia en fase asociada al residual diferenciado del resto de factores que conforman la fase en su totalidad, tal como lo describe la fórmula:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$

Dónde: $\Delta\varphi$ se le conoce como la fase interferométrica, ΔR es el cambio en el rango debido a un desplazamiento del terreno ocurrido entre la primera y la segunda observación, y λ es la longitud de onda. La ecuación nos indica la diferencia de fase de dos imágenes radar adquiridas desde dos posiciones diferentes. De manera gráfica la generación de un interferograma a partir de dos tomas SAR es la suma de contribución de los distintos elementos que conforman la fase:

$$\Delta\phi_{int} = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{diff} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise}$$

Dónde: $\Delta\phi_{int}$ representa el interferograma, $\Delta\phi_{topo}$ es la topografía irregular del terreno y está en función de la línea base, $\Delta\phi_{diff}$ es la parte diferencial que implica que tanto se aleja o se acerca el sensor de una escena a otra, $\Delta\phi_{atm}$ es la contribución de la atmosfera, debidos a cambios en la troposfera y la ionosfera, $\Delta\phi_{noise}$ es el ruido por perturbaciones de la señal. (DLR, 2010).

El interferograma es la extracción de la diferencia de fase entre dos pixeles corregistrados en dos imágenes; esto se calcula con una multiplicación compleja de la imagen principal y la observación del segundo conjugado complejo. (Ketelaar, 2009) El interferograma se observa con patrones complejos cada 2π , lo que implica que la fase fue resuelta.

Para realizar la sustracción de la fase que se asocia al relieve se sustrae del interferograma original la fase asociada al relieve empleando un modelo digital de elevación (DEM), cuyos valores deben ser convertidos a complejos para poder estimar la diferencia.

Finalmente esa diferencia obtenida de la resta del interferograma con el DEM con valores complejos, se genera el interferograma diferencial, que permite evaluar el cambio de fase en valores complejos que en términos de valores de coherencia demostrando cambios topográficos a nivel centimétricos.

Por otra parte, el cálculo derivado de CCD calculó la diferencia de fase asociada a la razón de cambio entre objetos o fenómenos, a partir de dos imágenes interferométricas de una misma escena y con las mismas características, pero con diferente temporalidad. Por lo tanto la disminución de la coherencia en el pixel es debido a cambios entre las dos imágenes, mostrando pixeles en tonalidades claras asociados a alta coherencia y los pixeles en tonalidades oscuras se asocian a baja coherencia (Erdas, 2013).

7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

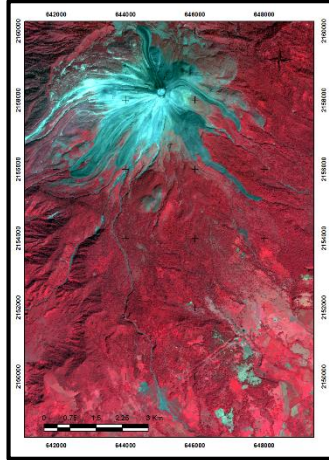
Como se mencionó en la metodología, se realizó la combinación lineal de tres transformaciones inversas aplicadas a las imágenes originales SPOT para los distintos años: (CP, InvC, IndC). En la Tabla 1 se muestra las bandas de salida derivadas de las transformaciones aplicadas para cada uno de los años estimados. Es importante señalar que la selección de bandas de salida no fueron las mismas para todos los años considerados, esto debido a que el comportamiento vectorial no es el mismo a pesar de cubrir la misma área; ya que las condiciones atmosféricas de la zona puede variar dependiendo del mes y la hora en la que fueron adquiridas. Como se puede observar en la Tabla, no hay una selección homogénea de las bandas de salida, sin embargo predominan las bandas 1-2 para CP, 1-3 y 2-3 para InvC; y banda de salida 1 para IndC.

Tabla 1: Bandas de Componentes utilizadas para la imagen de salida asociada al realce espectral.

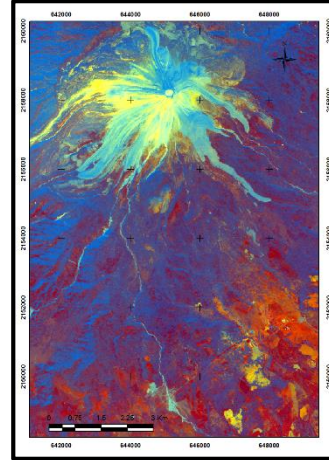
Proceso/Imagen	2004	2007	2008	2011	2013	2014
Componentes Principales	1-2	1-2	1-2	1-3	1-3	1-2
Inversa de Componentes Principales	2-3	1-2	1-4	1-3	1-3	2-3
Componente Independiente	1-4	1	1	1	1	4

En la Figura 11 se muestra el comparativo entre las imágenes originales (imágenes del margen izquierdo) y los compuestos de las transformadas vectoriales aplicadas a las imágenes SPOT 5 y 6 (imágenes del margen derecho), en donde se realiza un comparativo entre el compuesto de la imagen original con respecto a las imágenes resultantes para cada año. En términos cualitativos se observa un mayor realce y discriminación de las unidades volcánicas recientes respecto a las

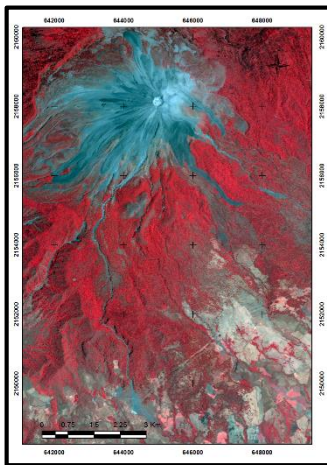
imágenes originales; en específico se observa una mayor discriminación de los objetos que determinan la escena para los años 2004, 2007, 2008 y 2014 respectivamente.



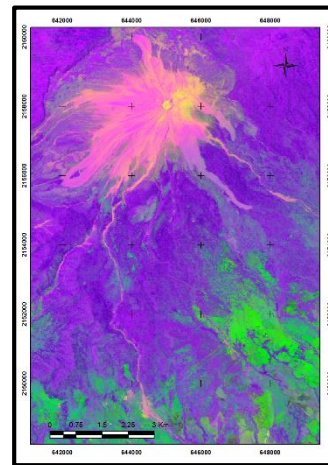
2004 Imagen Original (**R, G, B: 4,3,2**)



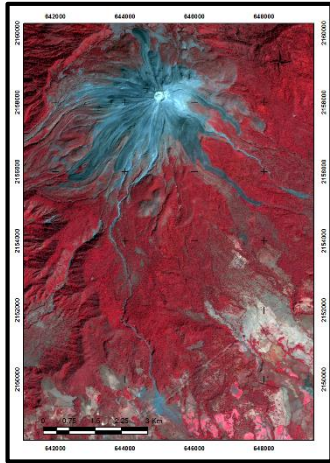
2004 Imagen Compuesta (**R, G, B: 1CP,2CP,4InvC**)



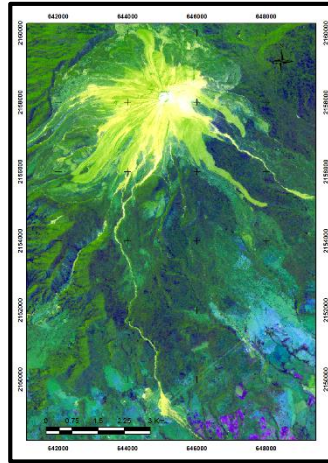
2007 Imagen Original (**R, G, B: 4,3,2**)



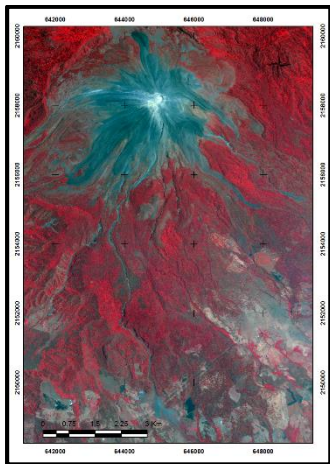
2007 Imagen Compuesta (**R, G, B: 4 InvC,3 InvC,5 IndC**)



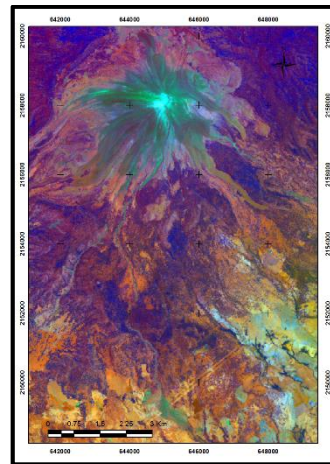
2008 Imagen Original (R, G, B: 4,3,2)



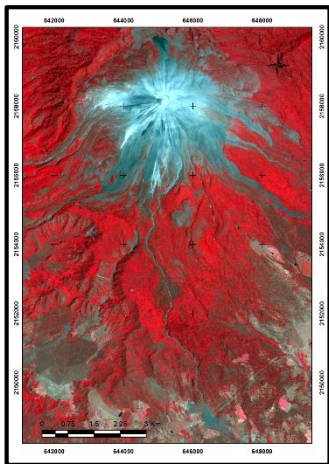
2008 Imagen Compuesta (R, G, B: 5 IndC,2CP,4 InvC)



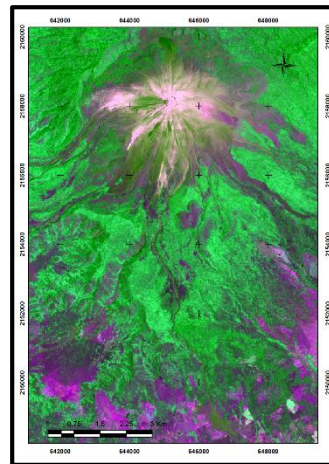
2011 Imagen Original (R, G, B: 4,3,2)



2011 Imagen Compuesta (R, G, B: 2CP,3InvC,5IndC)



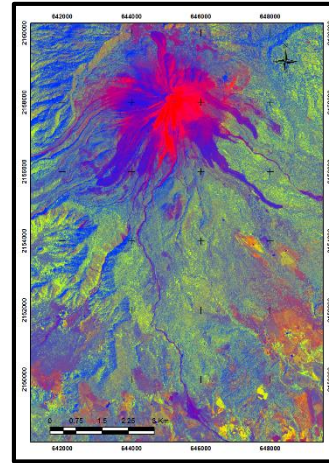
2013 Imagen Original (R, G, B: 4,3,2)



2013 Imagen Compuesta (R, G, B: 1CP,2CP,3 InvC)



2014 Imagen Original (R, G, B: 3,2,1)



2014 Imagen Compuesta (R, G, B: 1CP,2CP,3 InvC)

Figura 11: Se muestra un comparativo entre las imágenes originales e imágenes transformadas.

7.1 VALIDACIÓN DE LA DISCRIMINACIÓN ESPECTRAL DE UNIDADES VOLCÁNICAS Y SUS TRANSFORMACIONES VECTORIALES.

Con la intención de correlacionar la discriminación de los depósitos a partir de su realce espectral con respecto a verificaciones en campo, se utilizó el trabajo realizado por Dávila (2011), donde se realizó trabajo de campo a detalle a partir de la toma de muestras y descripción *in situ*. De esta forma, se seleccionaron 16 puntos de control cercanas a las unidades de depósitos discriminadas. Se dividieron en 3 áreas: la primera al norte de Volcán en la Zona el Playón corresponde a las muestras C85, C86, C87 y C88 asociadas unidades de depósito no diferenciados, flujos piroclásticos y coladas de lava. Se calculó una correlación del 25% con respecto a las áreas tomadas como depósitos para el presente trabajo como se observa en la Figura 12. Respectivamente, las muestras C87 y C88 asociadas a unidades de depósitos no diferenciados se observan que están dentro del rectángulo que se tomó con unidades de depósitos de ceniza, lo cual demuestra la dificultad de identificar los depósitos de ceniza.

La segunda área de puntos de control se encuentra al sur del Volcán aproximadamente 2800 metros del cráter sobre la barranca Monte Grande, se observan siete puntos de control asociados a unidades de depósitos no diferenciados, depósitos de flujos de escombros y flujos piroclásticos, en esta zona

observó una correlación del 53%, ya que esta zona se asociaba a flujos piroclásticos y lahares.

La tercera área ubicada también al sur del Volcán emplazada a 8500 metros del cráter sobre la barranca Monte Grande se calculó una correlación del 60%, ya que de los cinco puntos de control de la zona, se asociaron a lahares y Dávila (2011) muestra dos puntos asociados a depósitos de avalancha. Con esta validación observamos que las zonas que se tomaron como unidades de depósitos en esta investigación, fueron acertadas debido a que coinciden con los puntos de control verificados por Dávila (2011).

Tabla 2: Esta tabla es de Puntos de control tomados en campo por Dávila, 2011,

ID	PUNTO DE CONTROL	LATITUD	LONGITUD	ZONA	DESCRIPCIÓN
C33	CO0515	2155465	644305	B. Monte Grande	UND
C34	CO0516	2155340	644286	B. Monte Grande	UND
C35	CO0517	2155272	644315	B. Monte Grande	FP
C36	CO0518	2154255	644172	B. Monte Grande	FP
C37	CO0519	2154414	644287	B. Monte Grande	FP
C38	COL10-1	2150469	644799	B. Monte Grande/Zona Distal	DL
C39	COL10-2	2149327	645588	B. Monte Grande/Zona Distal	DL
C40	COL10-3	2149216	645768	B. Monte Grande/Zona Distal	DL
C76	COL_10_MG_20	2155104	644495	B. Monte Grande	DFE
C77	COL_10_MG_19	2154659	644384	B. Monte Grande	DFE
C79	COL_10_MG_5	2149949	645476	B. Monte Grande	DFE
C80	COL_10_MG_3	2149706	645575	B. Monte Grande	DFE
C85	COP	2159746	644301	El Playón	FP
C86	COP-1	2159945	644529	El Playón	FL
C87	COP-2	2159745	645783	El Playón	UND
C88	COP-3	2159730	646096	El Playón	UND

*Simbología de la columna "Descripción": DFE, Depósito de Flujo de Escombros; DL, depósito de Lahar; FL, coladas de lava; FP, depósitos de Flujos piroclásticos; UND, Unidades de depósitos no Diferenciadas.

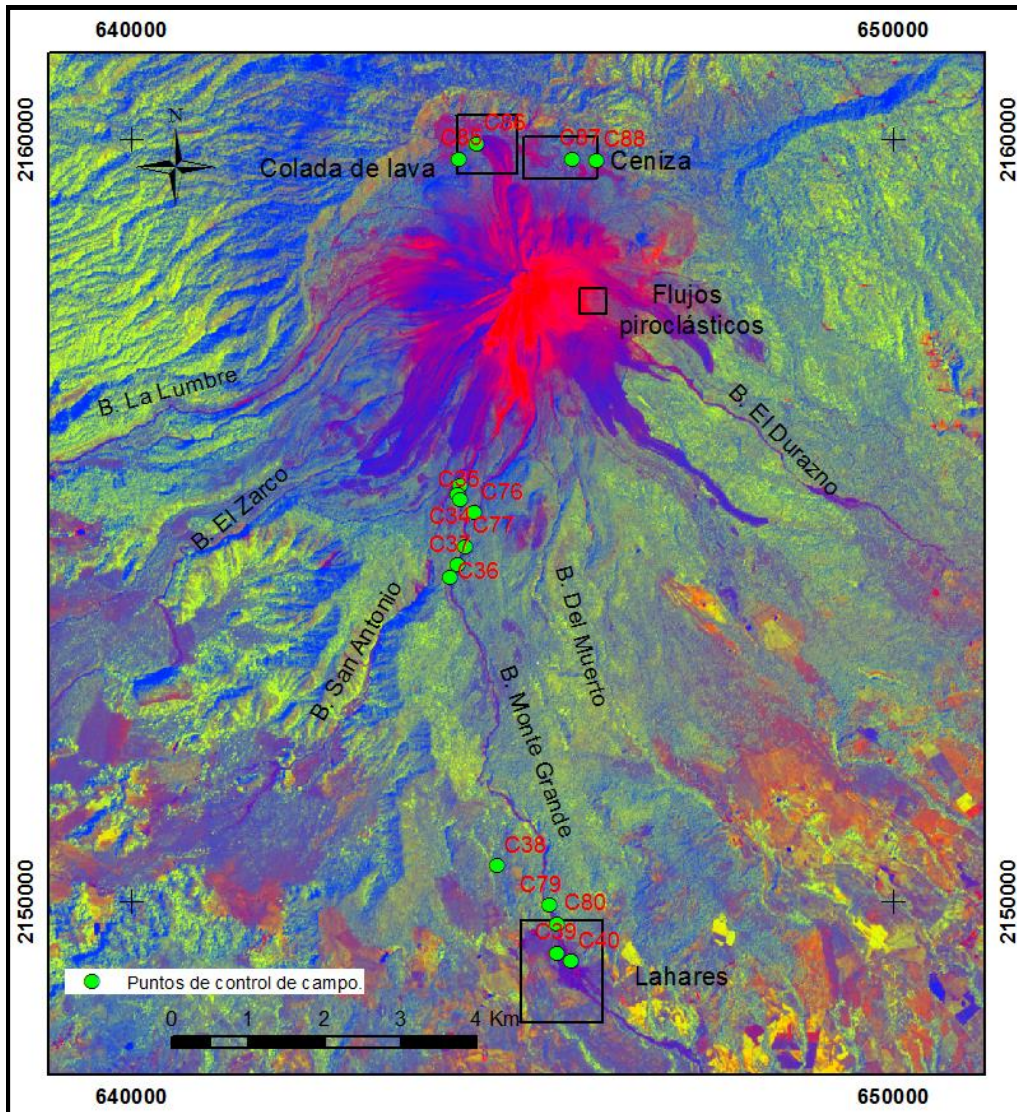


Figura12: Imagen Spot 6 realizada del 2014 (R,G,B; 1CP,2CP,3 InvC), áreas seleccionadas como unidades de depósitos, barrancas al sur de Volcán de Colima y puntos de control tomados de Dávila 2011.

Con base el diagrama metodológico presentado en el capítulo anterior, se emplearon dispersogramas (“Scattergrams”) bivariados que demuestran la tendencia o el comportamiento de los pixeles en términos de realce espectral. Para ello, los dispersogramas fueron generados tanto para las imágenes SPOT 5 y 6 originales (considerando su respectiva corrección radiométrica-atmosférica) como de las imágenes SPOT realizadas (a partir de las transformaciones vectoriales), considerando así las siguientes unidades volcánicas: cenizas, coladas de lava, flujos piroclásticos y lahares; para los años 2004, 2007, 2008, 2011, 2013 y 2014.

Las áreas seleccionadas para la generación de los dispersogramas se muestran en el mapa de la Figura 12, el cual también muestra la localización de los puntos de control utilizados para la validación del presente trabajo.

De acuerdo con la Figura 13 se describe los resultados obtenidos. Cabe señalar que la combinación de variables que conforman los dispersogramas incluyen todas las bandas; sin embargo se muestran los más representativos para este trabajo.

En términos generales los depósitos de ceniza son los que presentan un comportamiento más aleatorio en términos de la distribución de sus píxeles, no importando la combinación de las bandas de la imagen original o de realce. Así, su distribución es siempre similar o aleatoria (ya que su emplazamiento depende de la dirección del viento), lo cual puede ser asociado a su condición de formación (es decir que la ceniza se define como fragmentación de material volcánico, dando lugar a partículas muy pequeñas menor a dos milímetros); permitiendo así la interacción de píxeles asociados a ceniza con otros objetos del campo instantáneo de vista. Cabe destacar que, en este sentido el resto de las unidades volcánicas consideradas presentan un comportamiento más homogéneo para la temporalidad seleccionada.

El la Figura 13-B se muestra el comparativo de imágenes originales y realce para la unidad volcánica “coladas de lava”, como se puede observar en el dispersograma original muestra un comportamiento lineal (asemejándose a la pendiente de la recta); lo mismo ocurre para el resto de los años. Mientras que para la imagen realizada espectralmente, la formación de dos nubes de datos es evidente, asociados a la vegetación y a las coladas de lava; siendo evidente para los años 2004, 2007, 2008, 2011, 2013 y 2014. En términos generales y realizando una síntesis con base en la Tabla 1 y el comportamiento de los dispersogramas se muestra que, la componente 1 derivada de CP es la que permite en primera instancia generar estos dos grupos de píxeles, seguido por la componente 2 y 3 derivada de CP e InvC respectivamente.

Del mismo modo, la unidad “flujos piroclásticos” se muestran en la Figura 13-C, donde se realizó una comparativa de la imagen original y la imagen realzada. Los dispersogramas muestran claramente para los años 2014, 2008, 2007 y 2004 una separación de los datos en dos nubes, las cuales no guardan un orden; La primera nube orientada en su mayoría al eje de la vertical que están relacionados a los flujos piroclásticos y la segunda nube de datos que tiende hacia el eje horizontal se asocia a vegetación; mientras que para los años 2013 y 2011 presenta una elongación de los datos pero no propiamente una discriminación de los mismos. La componente que nos permitió realizar una mayor discriminación de los datos fue la número 2 de CP, mientras que en segunda instancia las CP 1 y 4; que corresponden a CP y InvC respectivamente.

En la figura 13-D se muestran las unidades de “lahares”, observamos una mayor dificultad para poder discriminar las unidades de lahar respecto al resto de los objetos, esta dificultad de muestra para las imágenes de los años 2013, 2011, 2008 y 2007 donde los dispersogramas muestran un comportamiento similar, pero en cuanto a distribución de los pixeles muestran una elongación de los datos de las imágenes originales y las imágenes realzadas, para las imágenes 2004 y 2014 se observa una separación de la vegetación y depósitos de lahares; los dispersogramas de las imágenes realzadas para los años 2004 y 2014 no muestran una tendencia lineal. En este caso los lahares específicamente no se pueden seleccionar una componente que genere la separación de los pixeles de vegetación y los de depósitos de lahares propiamente.

El Figura13-A se muestra la comparación de las imágenes originales y las realzadas de las unidades de depósitos de ceniza, como se mencionó anteriormente debido a su poco espesor de esta unidad muestra un comportamiento más aleatorio en sus pixeles, al realizar la comparación de los dispersogramas de las imágenes para los años 2004, 2007, 2011, 2014 de las imágenes originales y realzadas, muestra un comportamiento muy parecido, el cual tiende a ser lineal, pero en la imagen realzada se observa una elongación en los pixeles; para las imágenes de 2008 y

2013 a diferencia de las anteriores muestran una elongación mínima en el comportamiento de los datos.

Figura 13-A: Se muestra un comparativo entre las imágenes y los dispersogramas para unidades de depósitos de ceniza.

2004-11-07

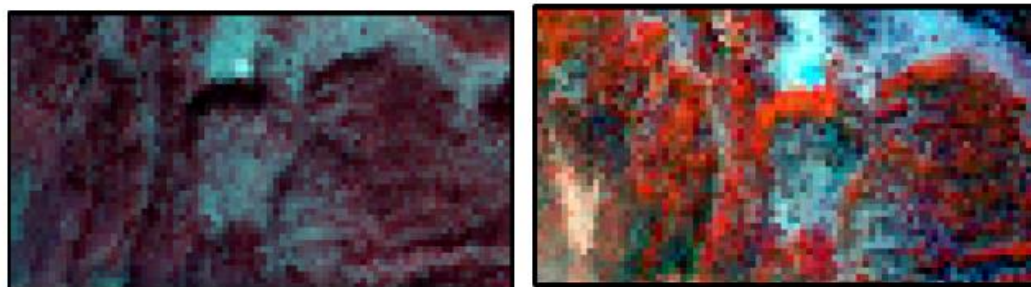
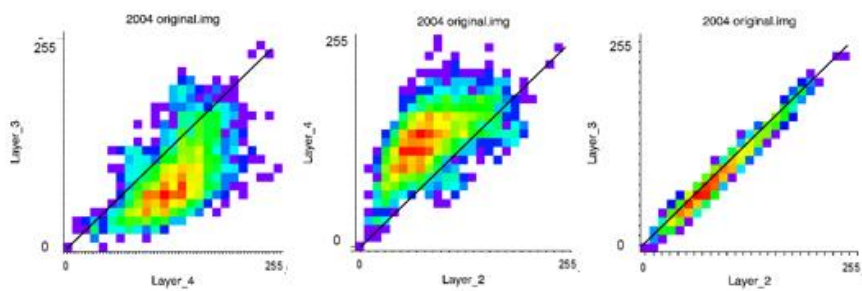


Imagen Original

Imagen Compuesta

Original



Layer 3: Banda 3

Layer 4: Banda 4

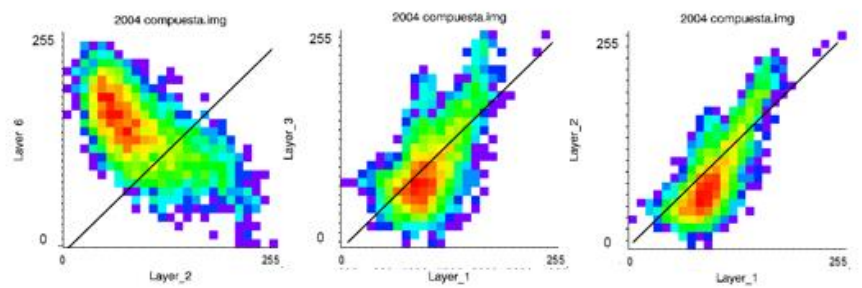
Layer 4: Banda 4

Layer 2: Banda 2

Layer 3: Banda 3

Layer 2: Banda 2

Compuesta



Layer 6: Banda InvC

Layer 2: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC

Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda: CP

2007-04-20

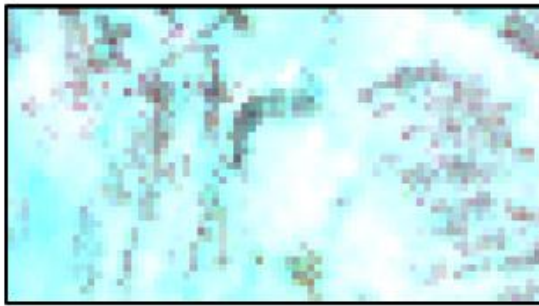
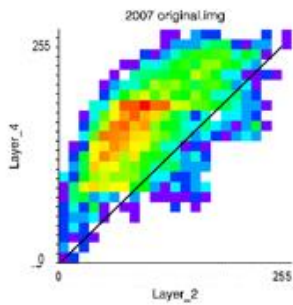


Imagen Original



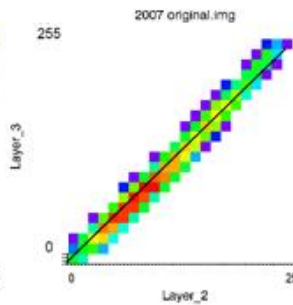
Imagen Compuesta

Original



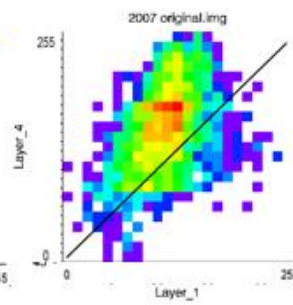
Layer 4: Banda 4

Layer 2: Banda 2



Layer 3: Banda 3

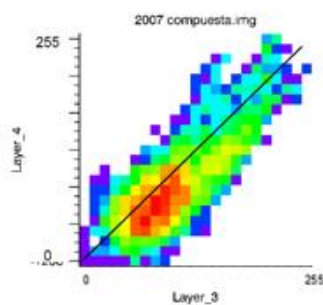
Layer 2: Banda 2



Layer 4: Banda 4

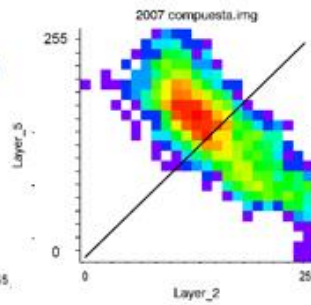
Layer 1: Banda 1

Compuesta



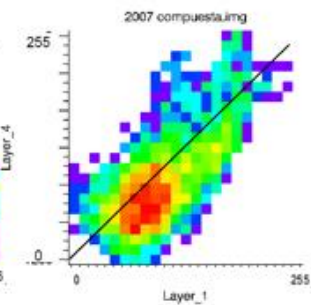
Layer 4: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC



Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda CP



Layer 4: Banda InvC

Layer 1: Banda CP

2008-02-16

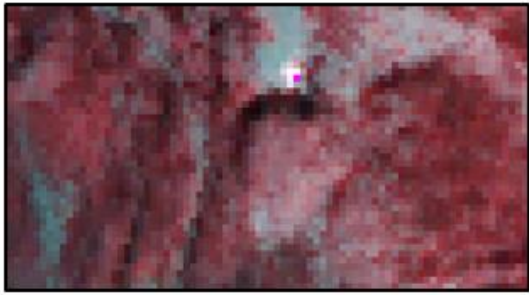


Imagen Original

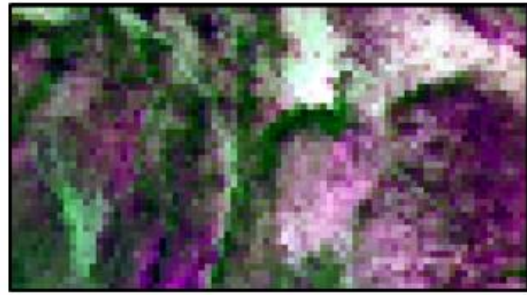
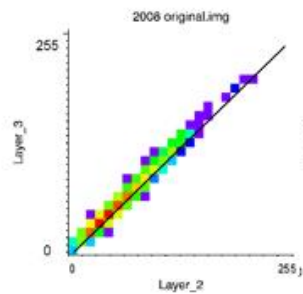


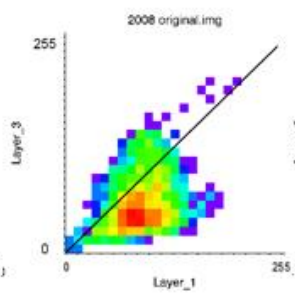
Imagen Compuesta

Original



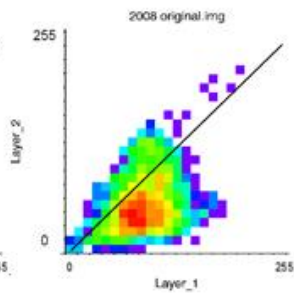
Layer 3: Banda 3

Layer 2: Banda 2



Layer 3: Banda 3

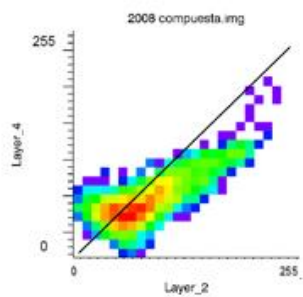
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

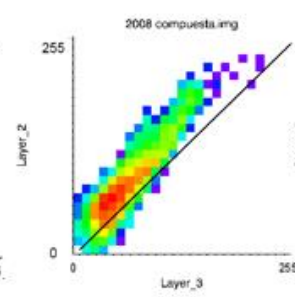
Layer 1: Banda 1

Compuesta



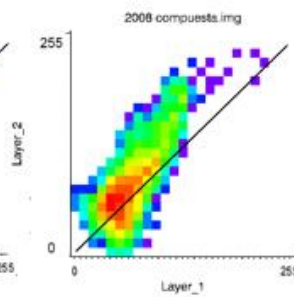
Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 3: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

2011-05-27

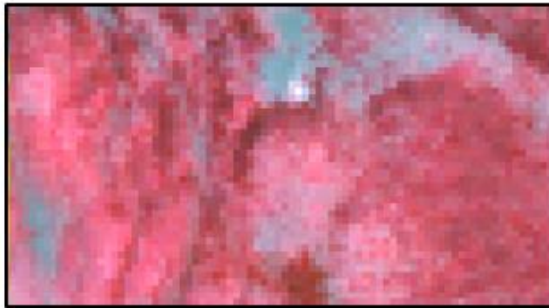


Imagen Original

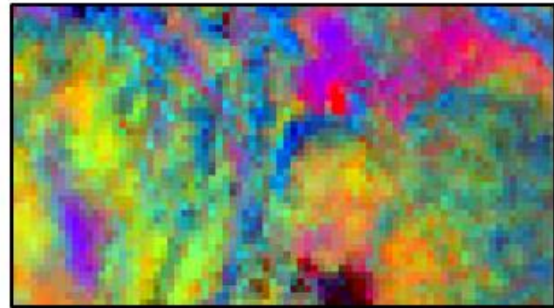
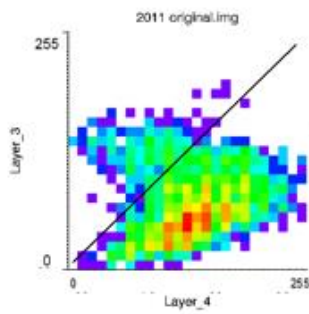


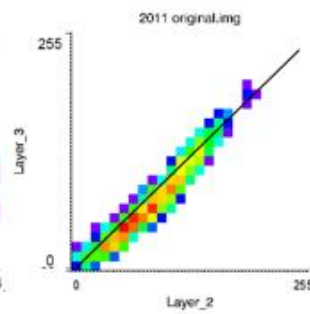
Imagen Compuesta

Original



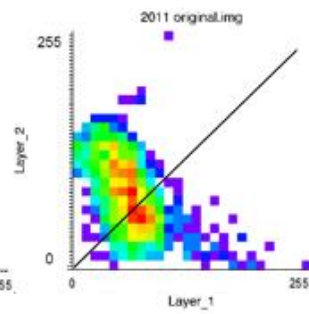
Layer 3: Banda 3

Layer 4: Banda 4



Layer 3: Banda 3

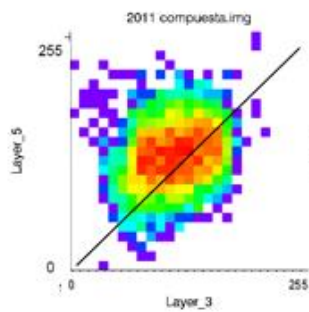
Layer 2: Banda 2



Layer2: Banda 2

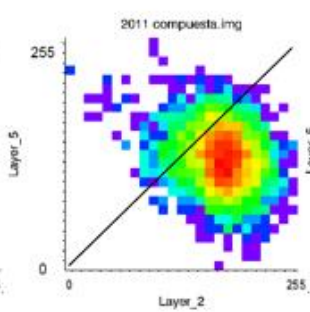
Layer 1: Banda 1

Compuesta



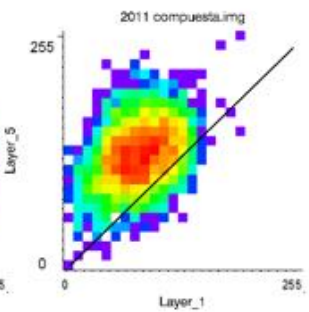
Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda CP



Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP

2013-04-08

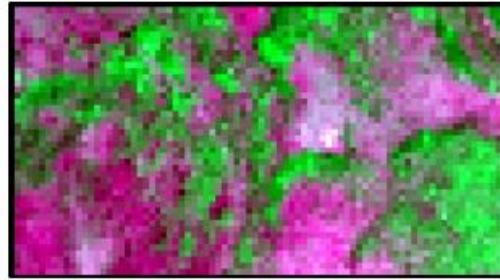
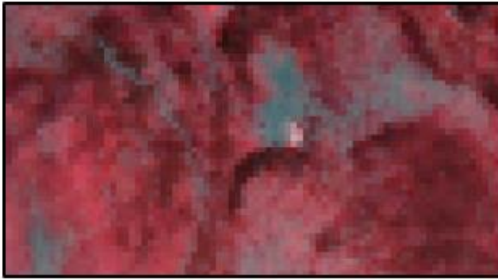
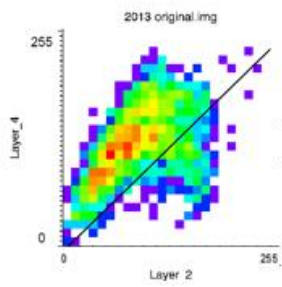


Imagen Original

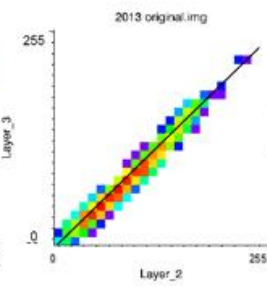
Imagen Compuesta

Original



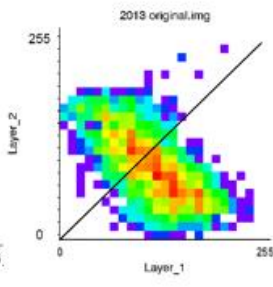
Layer 2: Banda 2

Layer 4: Banda 4



Layer 3: Banda 3

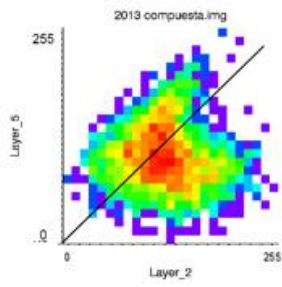
Layer 2: Banda 2



Layer2: Banda 2

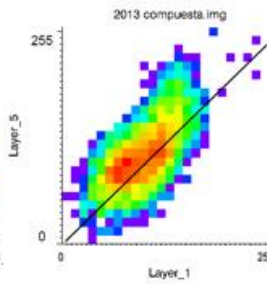
Layer 1: Banda 1

Compuesta



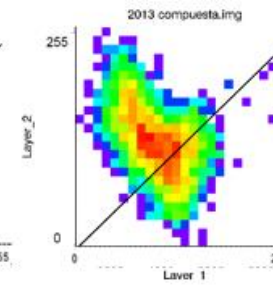
Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda PC



Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

2014-02-22

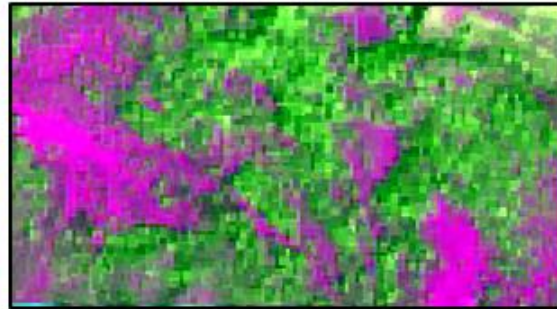
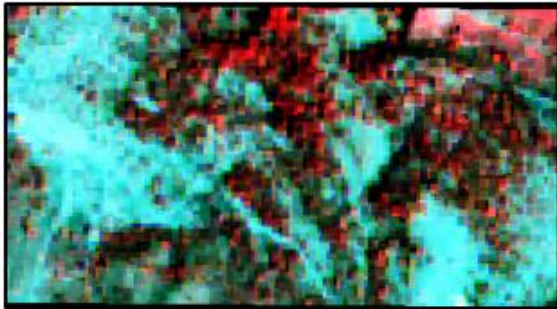
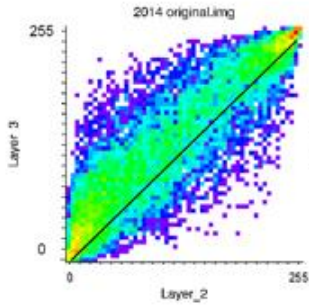


Imagen Original

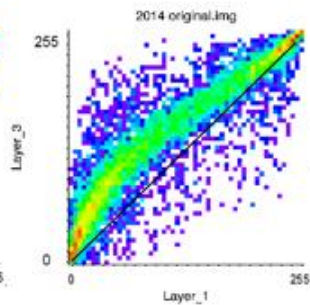
Imagen Compuesta

Original



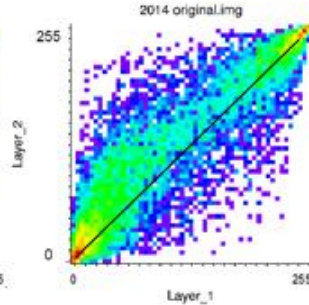
Layer 2: Banda 2

Layer 3: Banda 3



Layer 3: Banda 3

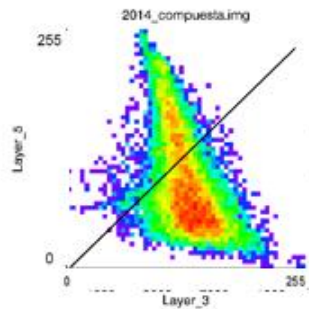
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

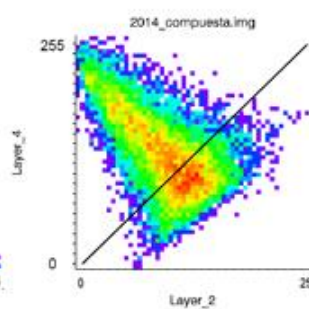
Layer 1: Banda 1

Compuesta



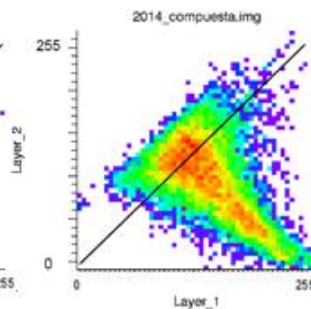
Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

Figura 13-B: Se muestra un comparativo entre las imágenes y los dispersogramas para unidades de depósitos de **coladas de lava**.

2004-11-07

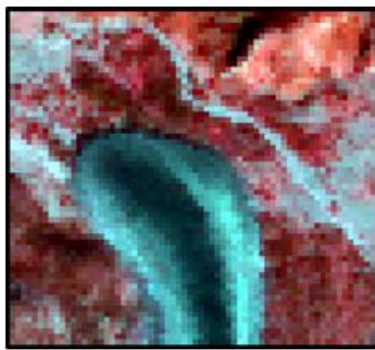


Imagen Original

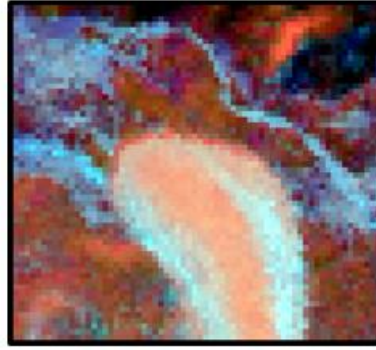
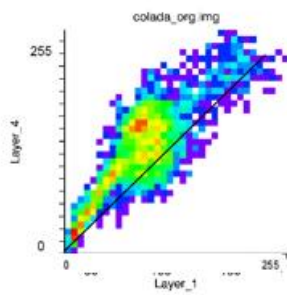


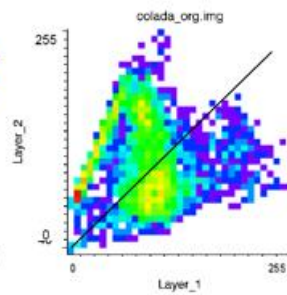
Imagen Compuesta

Original



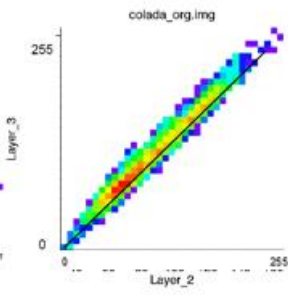
Layer 4: Banda 2

Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

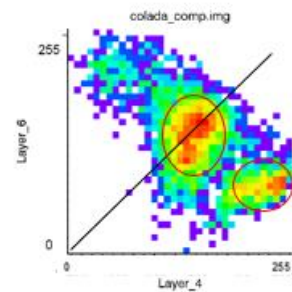
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

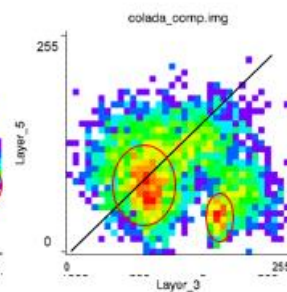
Layer 3: Banda 3

Compuesta



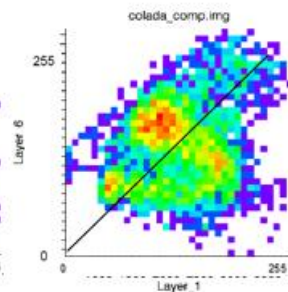
Layer 6: Banda IndC

Layer 4: Banda InvC



Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 6: Banda IndC

Layer 1: Banda CP

2007-04-20

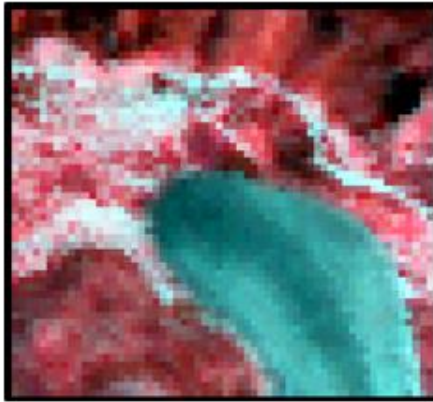
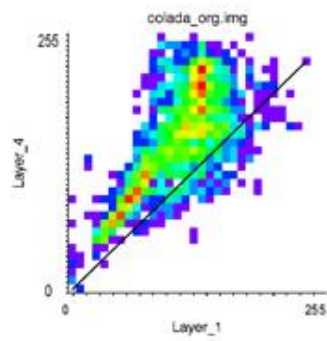


Imagen Original



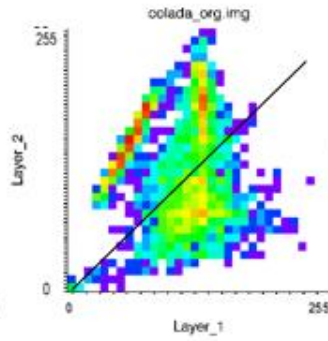
Imagen Compuesta

Original



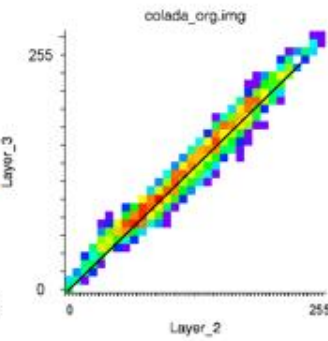
Layer 4: Banda 4

Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

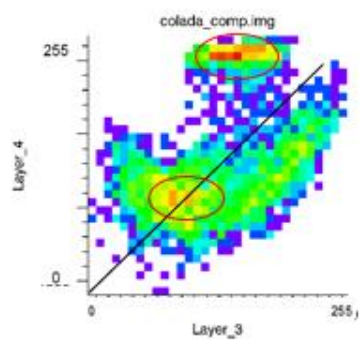
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

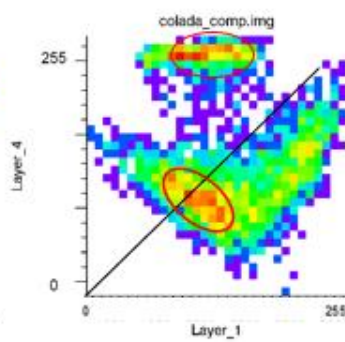
Layer 3: Banda 3

Compuesta



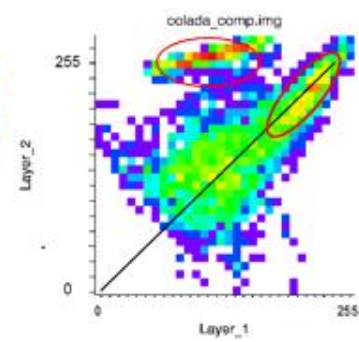
Layer 4: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC



Layer 4: Banda InvC

Layer 1: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

2008-02-16

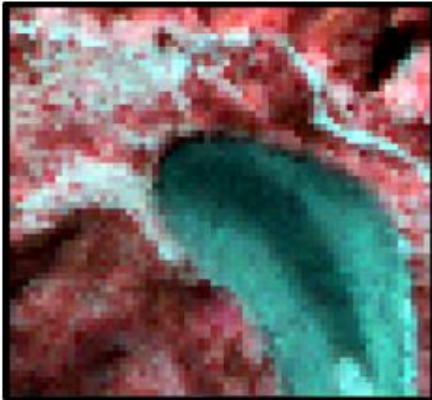


Imagen Original

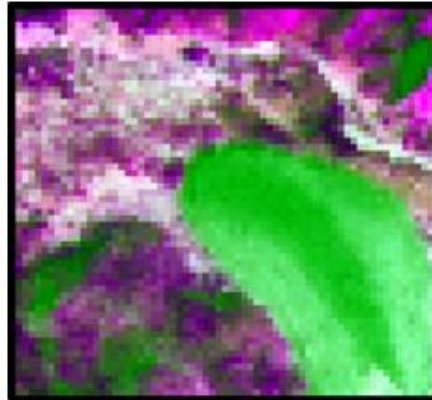
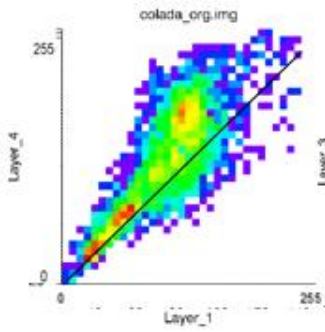


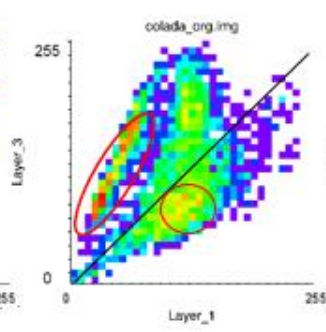
Imagen Compuesta

Original



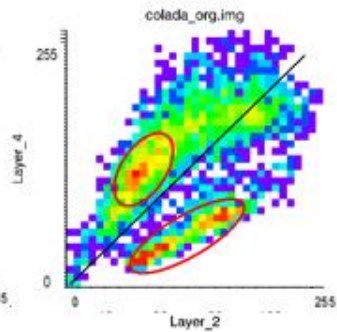
Layer 4: Banda 4

Layer 2: Banda 2



Layer 3: Banda 3

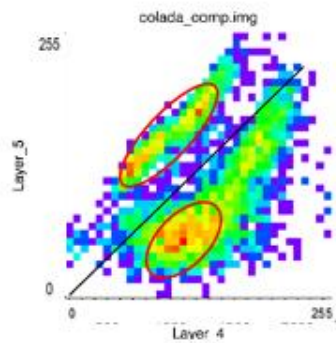
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

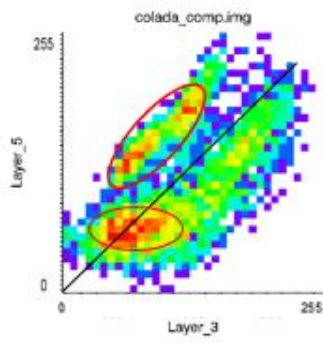
Layer 4: Banda 4

Compuesta



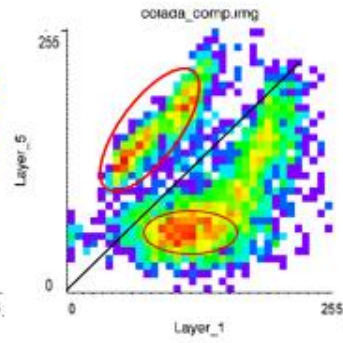
Layer 5: Banda IndC

Layer 4: Banda InvC



Layer 3: Banda InvC

Layer 5: Banda IndC



Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP

2011-05-27

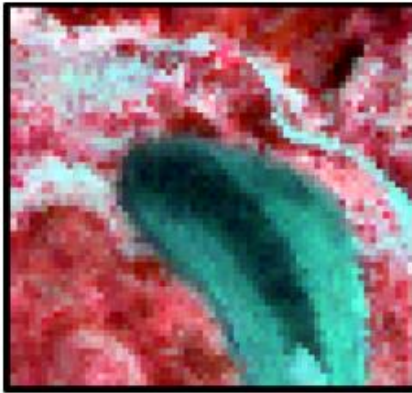


Imagen Original

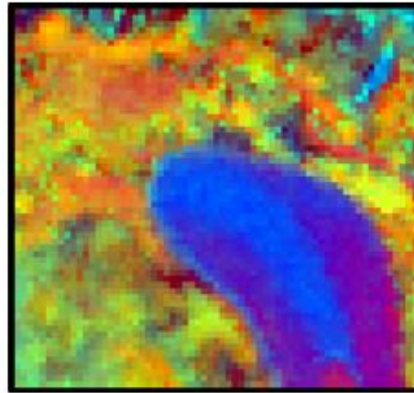
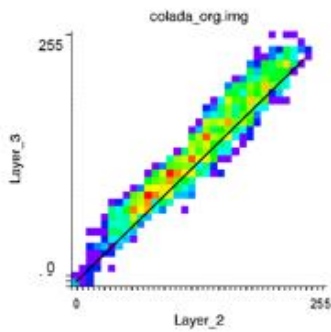


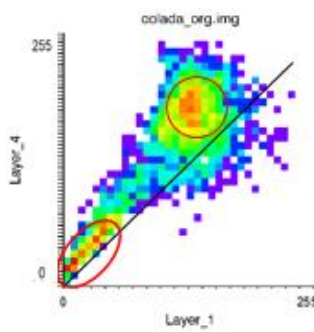
Imagen Compuesta

Original



Layer 2: Banda 2

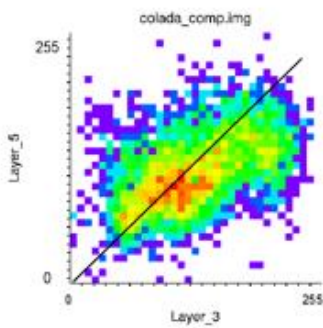
Layer 3: Banda 3



Layer 4: Banda 4

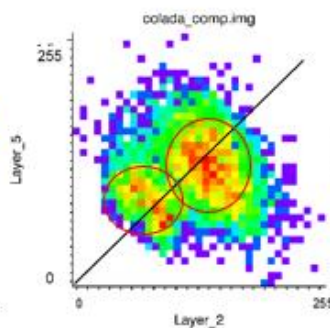
Layer 1: Banda 1

Compuesta



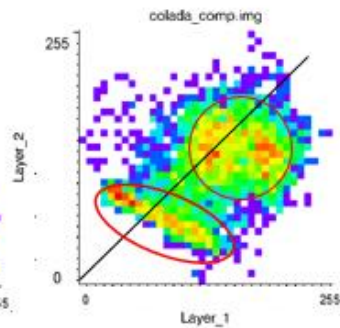
Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

2013-04-08

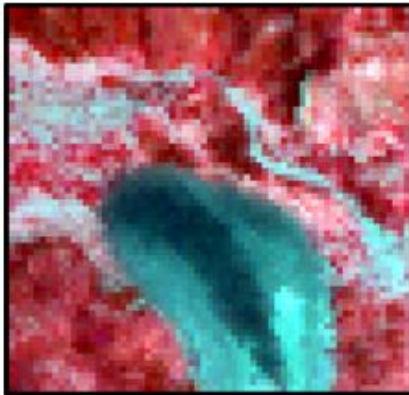


Imagen Original

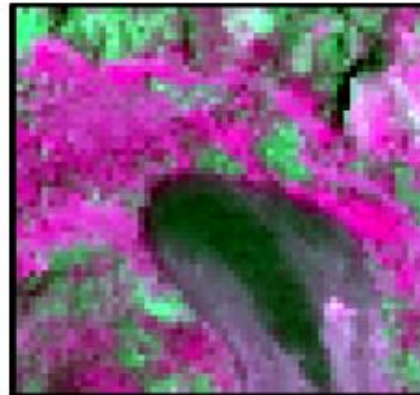
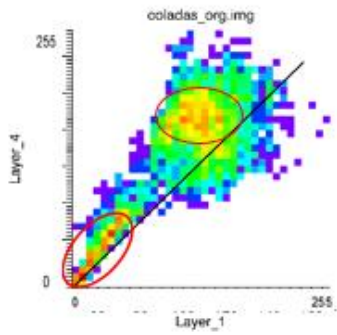


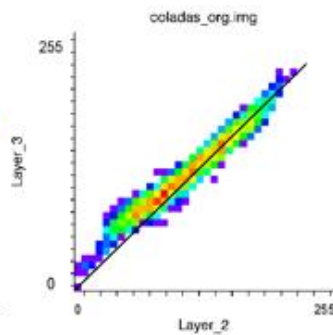
Imagen Compuesta

Original



Layer 1: Banda 1

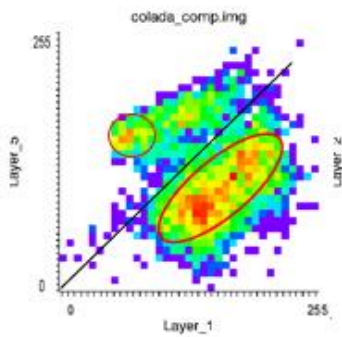
Layer 4: Banda 4



Layer 3: Banda 3

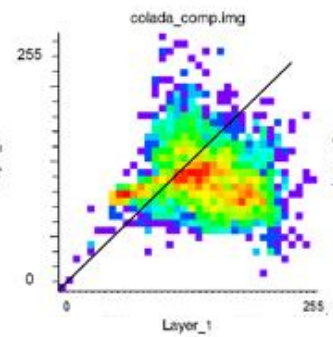
Layer 2: Banda 2

Compuesta



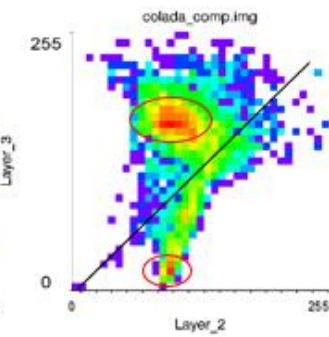
Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 3: Banda InvC

2014-02-22

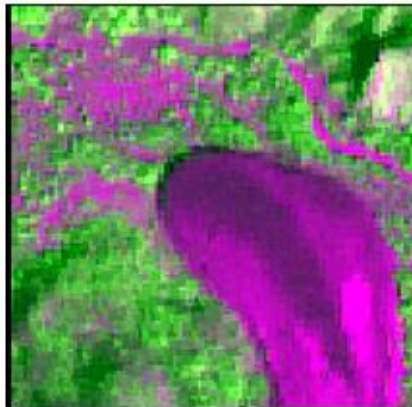
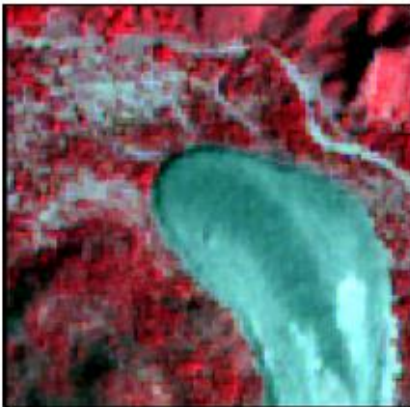
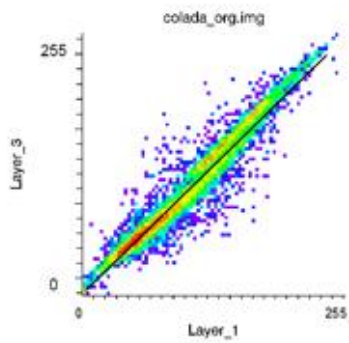


Imagen Original

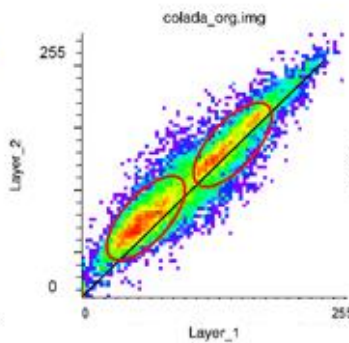
Imagen Compuesta

Original



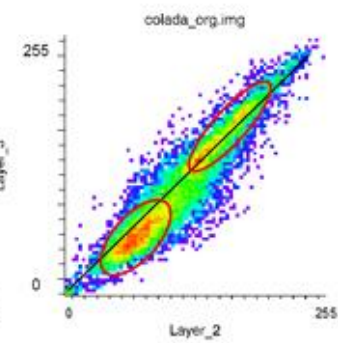
Layer 1: Banda 1

Layer 3: Banda 3



Layer 2: Banda 2

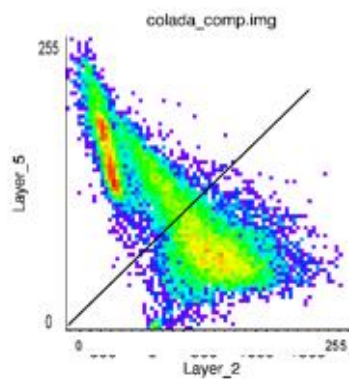
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

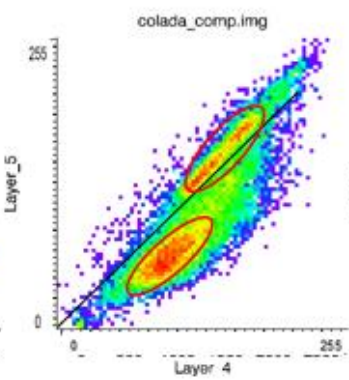
Layer 3: Banda 3

Compuesta



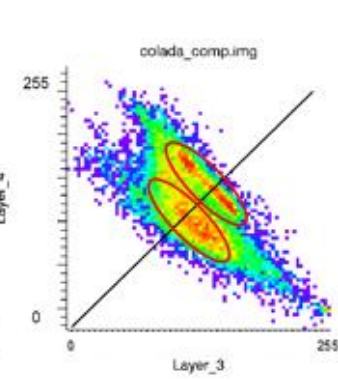
Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda CP



Layer 4: Banda InvC

Layer 5: Banda IndC



Layer 4: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC

Figura 13-C: Se muestra un comparativo entre las imágenes y los dispersogramas para unidades de depósitos de **flujos piroclásticos**.

2004-11-07

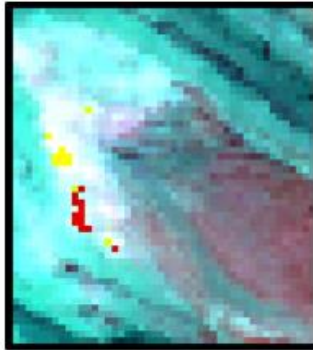


Imagen Original

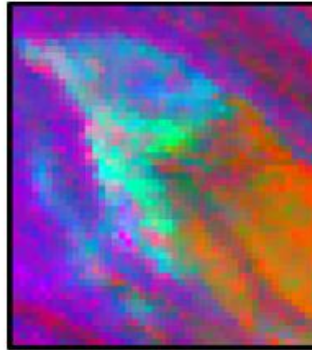
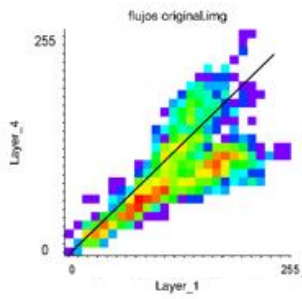


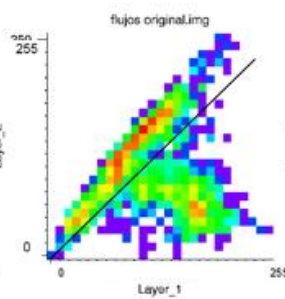
Imagen Compuesta

Original



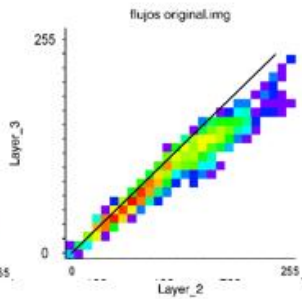
Layer 1: Banda 1

Layer 4: Banda 4



Layer 2: Banda 2

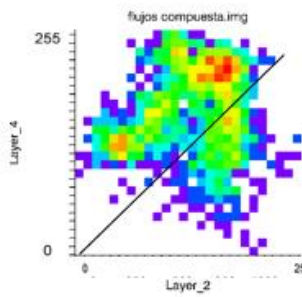
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

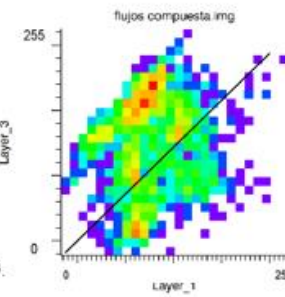
Layer 3: Banda 3

Compuesta



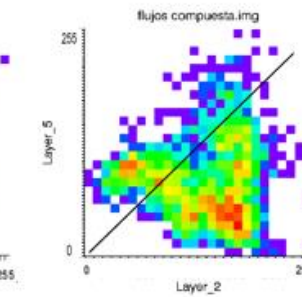
Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 3: Banda InvC



Layer 2: Banda CP

Layer 5: Banda IndC

2007-04-20



Imagen Original

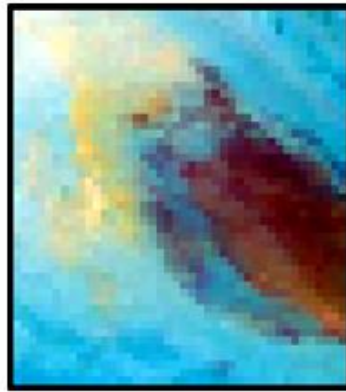
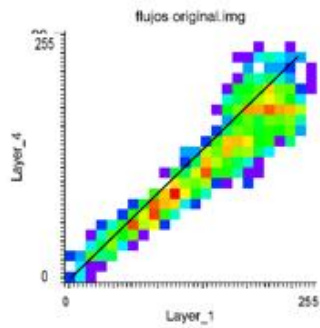


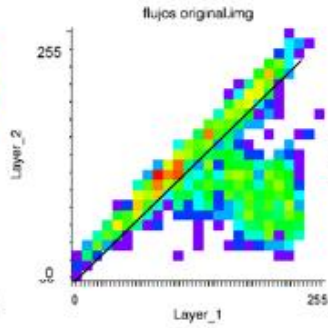
Imagen Compuesta

Original



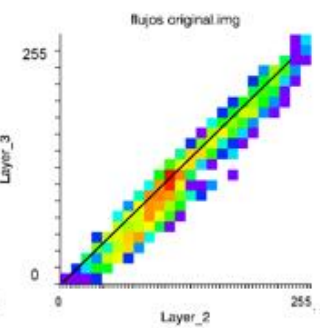
Layer 1: Banda 1

Layer 4: Banda 4



Layer 2: Banda 2

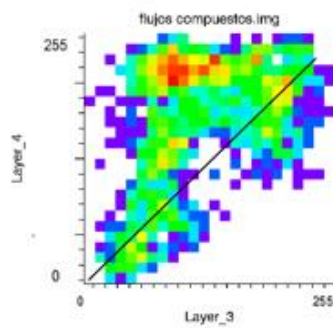
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

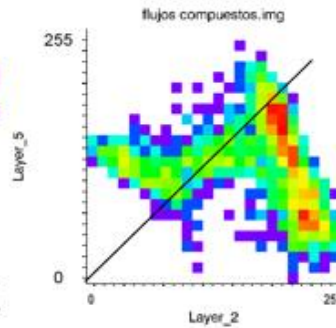
Layer 3: Banda 3

Compuesta



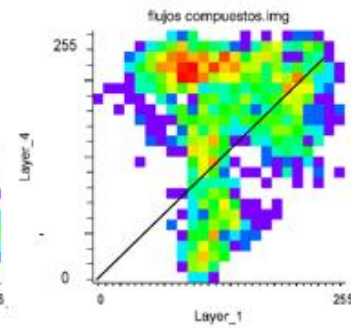
Layer 4: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC



Layer 2: Banda CP

Layer 5: Banda IndC



Layer 4: Banda InvC

Layer 1: Banda CP

2008-02-16

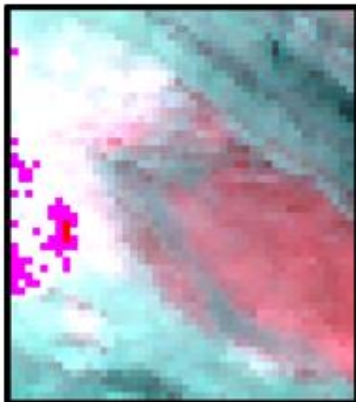
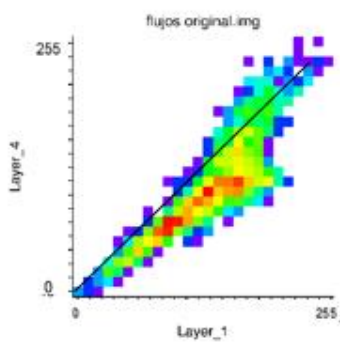


Imagen Original



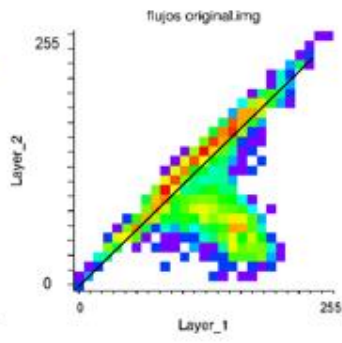
Imagen Compuesta

Original



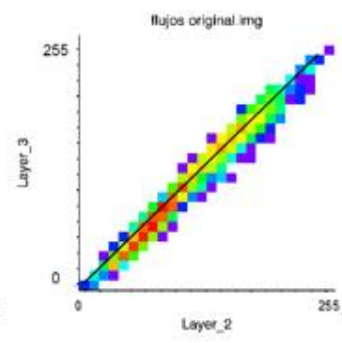
Layer 1: Banda 1

Layer 4: Banda 4



Layer 2: Banda 2

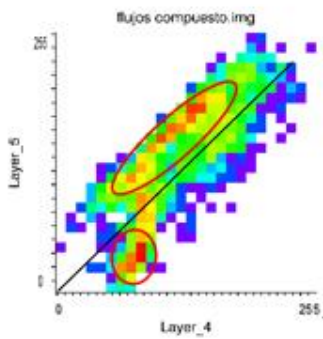
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

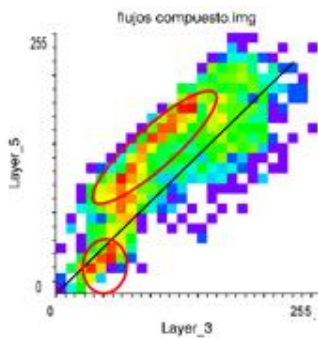
Layer 3: Banda 3

Compuesta



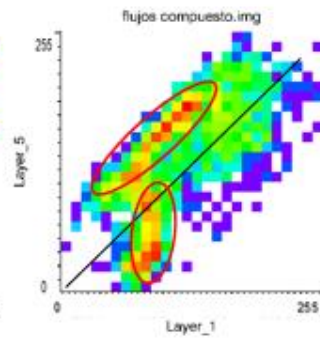
Layer 5: Banda IndC

Layer 4: Banda InvC



Layer 3: Banda InvC

Layer 5: Banda IndC



Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP

2011-05-27

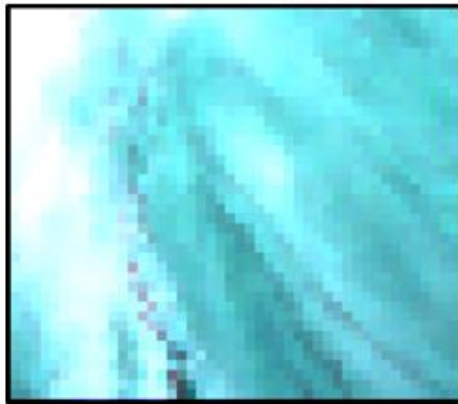


Imagen Original

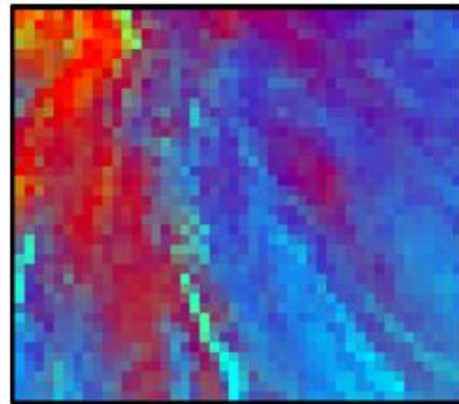
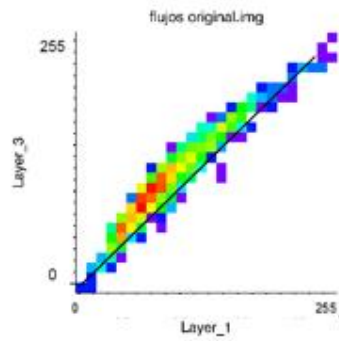


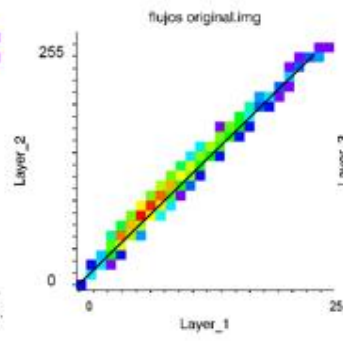
Imagen Compuesta

Original



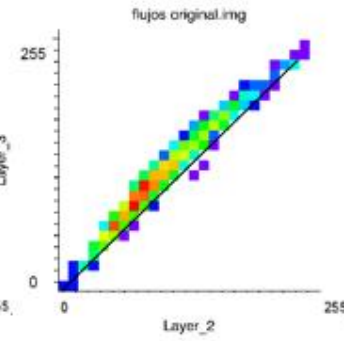
Layer 1: Banda 1

Layer 3: Banda 3



Layer 2: Banda 2

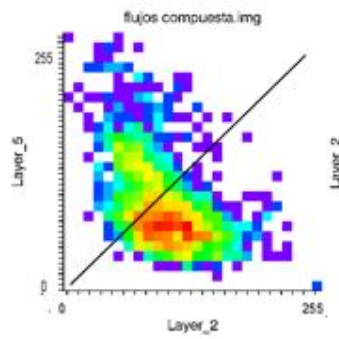
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

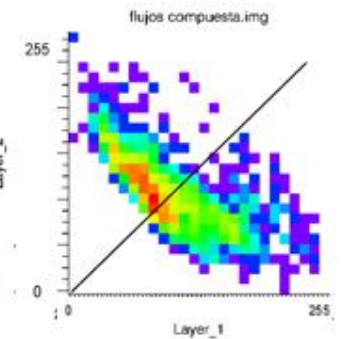
Layer 3: Banda 3

Compuesta



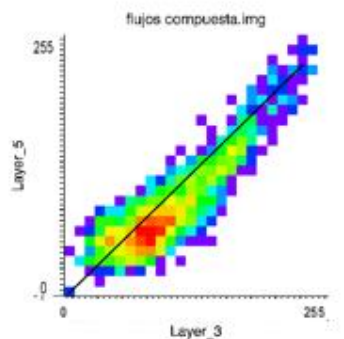
Layer 5: Banda IndC

Layer 2: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP



Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC

2013-04-08

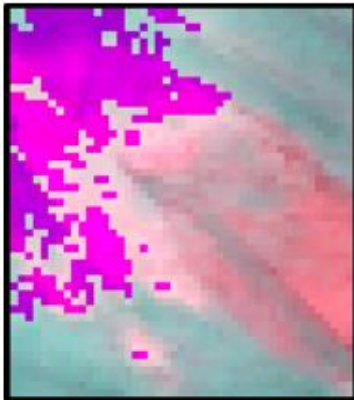
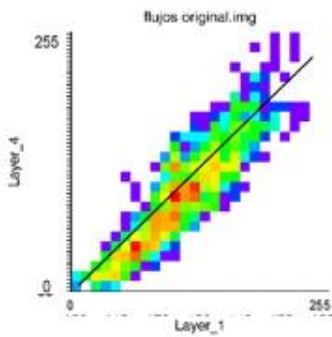


Imagen Original



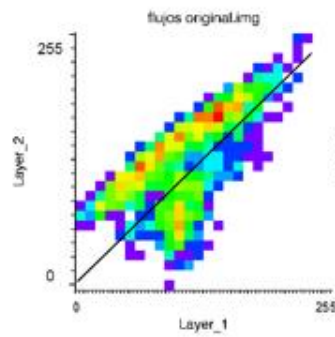
Imagen Compuesta

Original



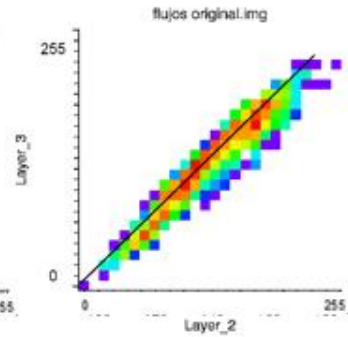
Layer 1: Banda 1

Layer 4: Banda 4



Layer 2: Banda 2

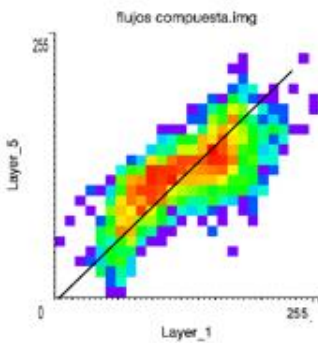
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

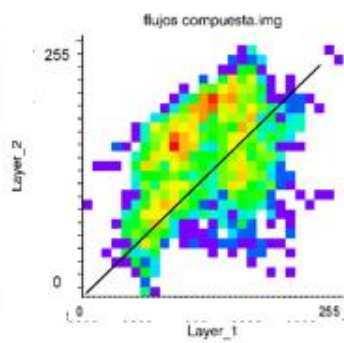
Layer 3: Banda 3

Compuesta



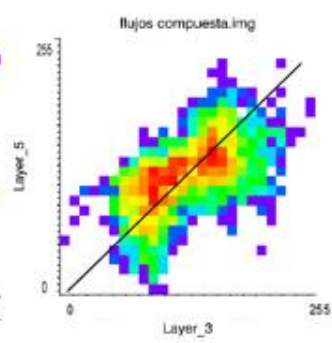
Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP



Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC

2014-02-22



Imagen Original

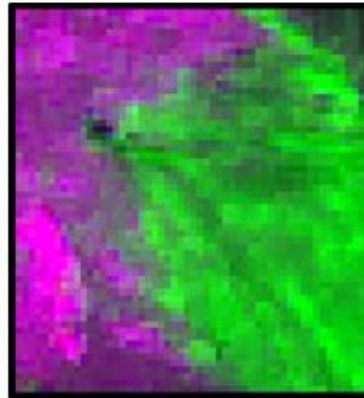
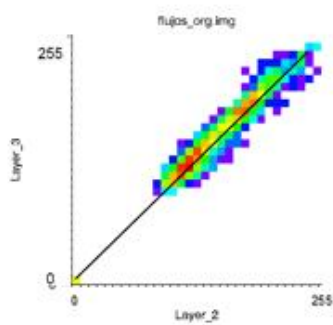


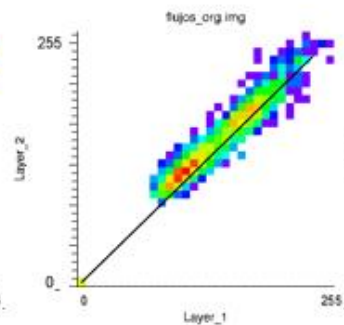
Imagen Compuesta

Original



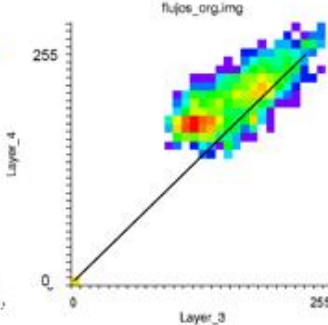
Layer 1: Banda 1

Layer 3: Banda 3



Layer 2: Banda 2

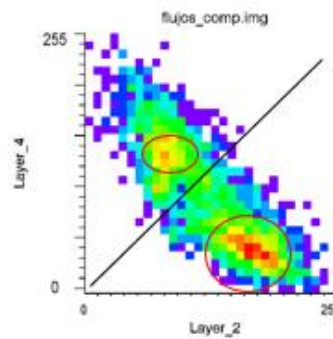
Layer 1: Banda 1



Layer 4: Banda 4

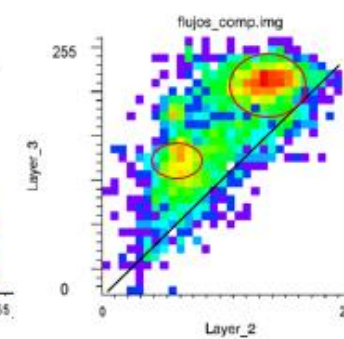
Layer 3: Banda 3

Compuesta



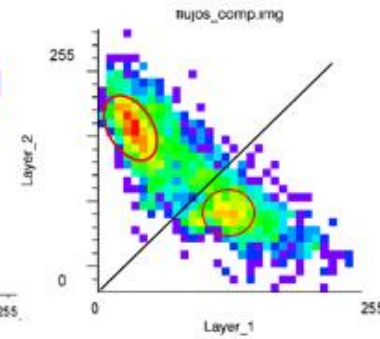
Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 3: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

Figura 13-D: Se muestra un comparativo entre las imágenes y los dispersogramas para unidades de depósitos de lahares.

2004-11-07

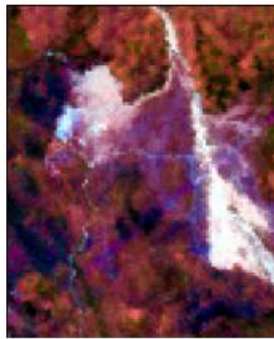
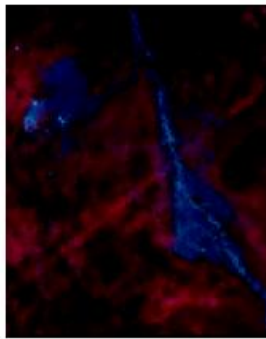
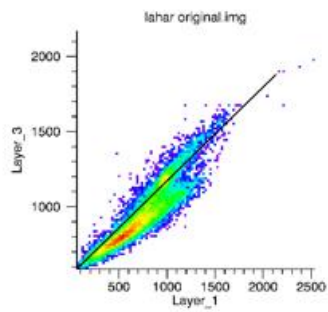


Imagen Original

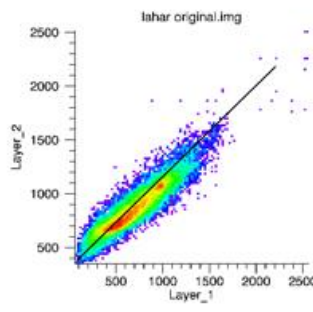
Imagen Compuesta

Original



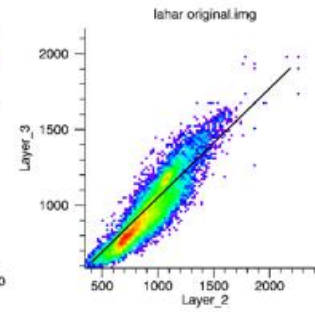
Layer 1: Banda 1

Layer 3: Banda 3



Layer 2: Banda 2

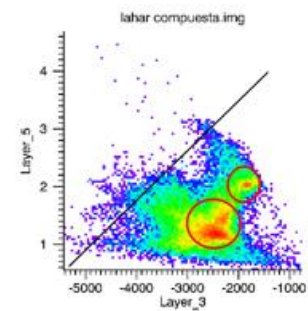
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

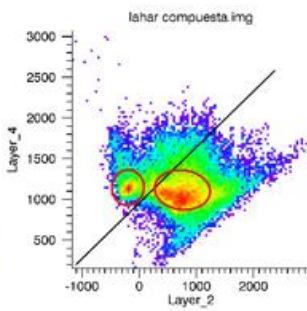
Layer 3: Banda 3

Compuesta



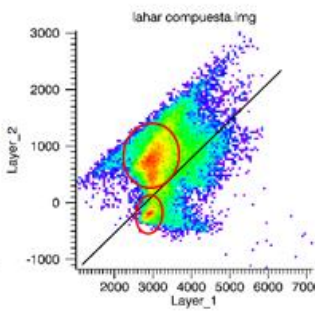
Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP

2007-04-20

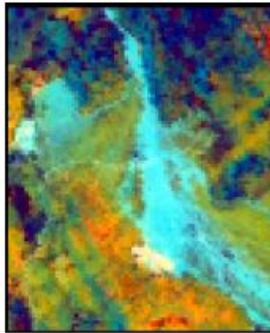
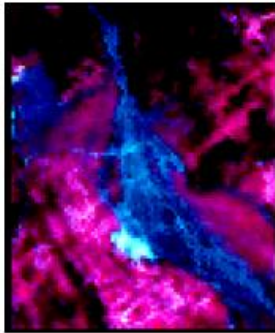
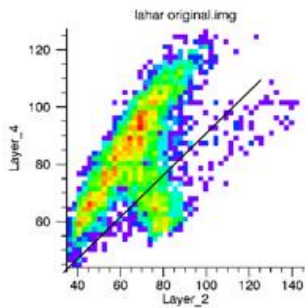


Imagen Original

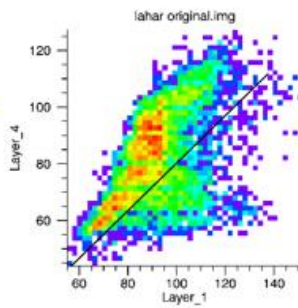
Imagen Compuesta

Original



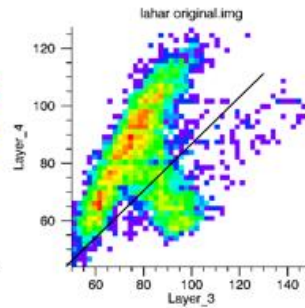
Layer 2: Banda 2

Layer 4: Banda 4



Layer 4: Banda 4

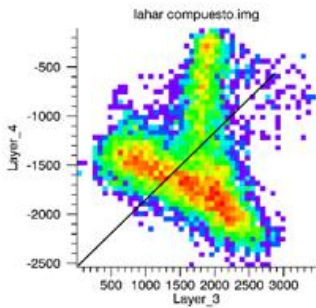
Layer 1: Banda 1



Layer 4: Banda 4

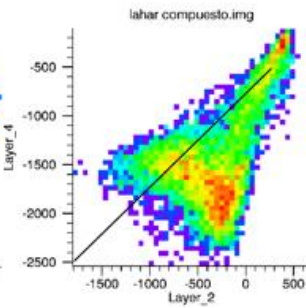
Layer 3: Banda 3

Compuesta



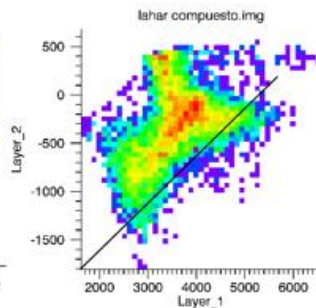
Layer 4: Banda InvC

Layer 3: Banda InvC



Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 2: Banda CP

Layer 1: Banda CP

2008-02-16

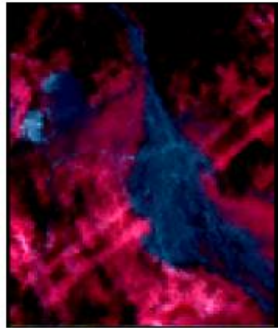


Imagen Original

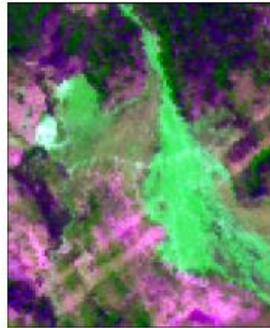
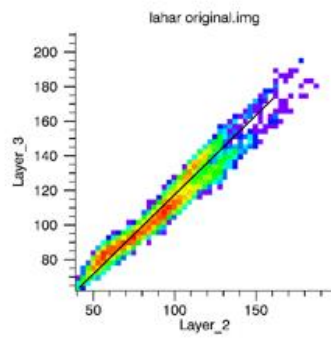


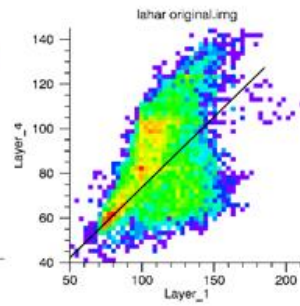
Imagen Compuesta

Original



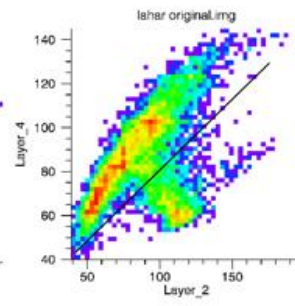
Layer 1: Banda 1

Layer 3: Banda 3



Layer 2: Banda 2

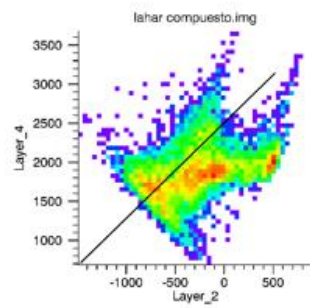
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

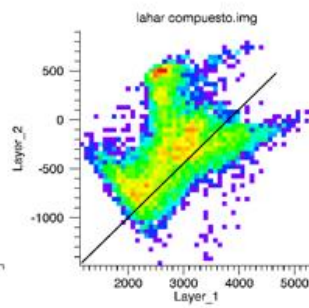
Layer 3: Banda 3

Compuesta



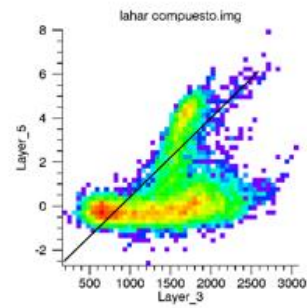
Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP



Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC

2011-05-27

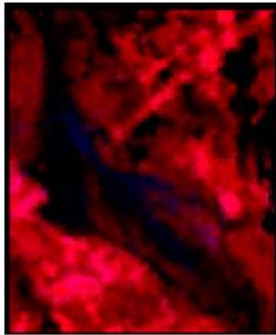


Imagen Original

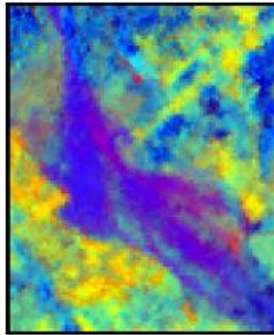
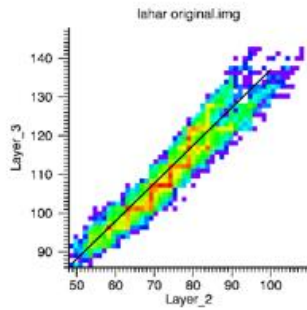


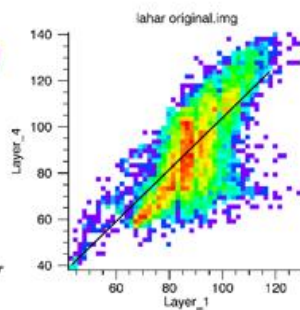
Imagen Compuesta

Original



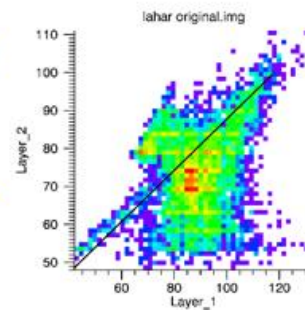
Layer 1: Banda 1

Layer 2: Banda 2



Layer 4: Banda 4

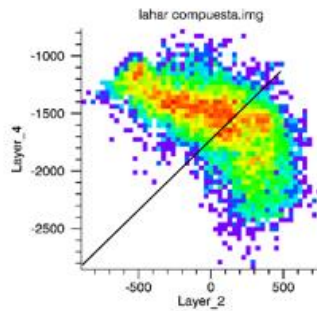
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

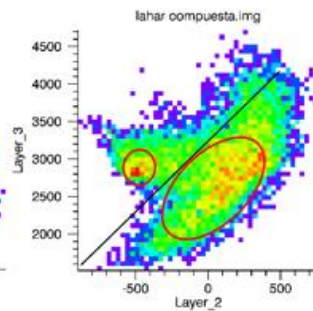
Layer 1: Banda 1

Compuesta



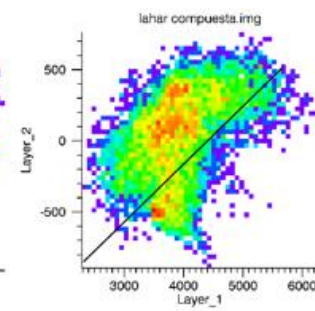
Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 3: Banda InvC

Layer 2: Banda CP



Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP

2013-04-08

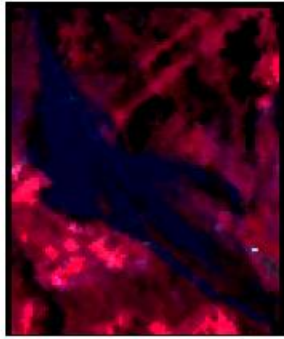


Imagen Original

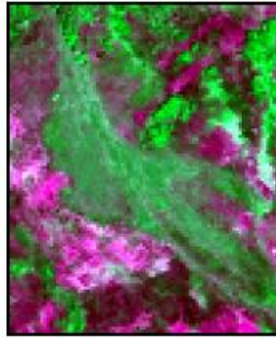
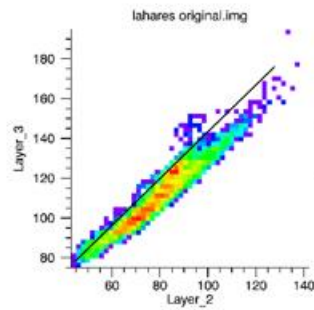


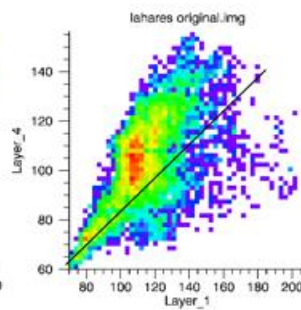
Imagen Compuesta

Original



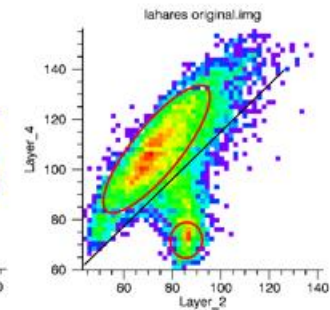
Layer 2: Banda 2

Layer 3: Banda 3



Layer 4: Banda 4

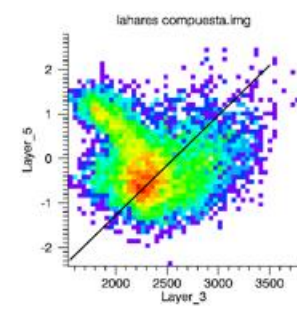
Layer 1: Banda 1



Layer 2: Banda 2

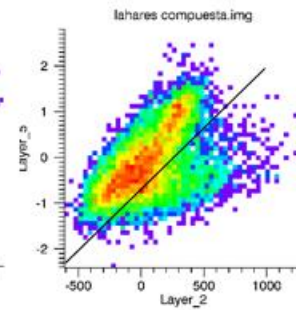
Layer 4: Banda 4

Compuesta



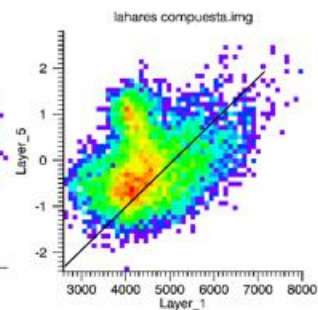
Layer 5: Banda IndC

Layer 3: Banda InvC



Layer 2: Banda CP

Layer 5: Banda IndC



Layer 5: Banda IndC

Layer 1: Banda CP

2014-02-22

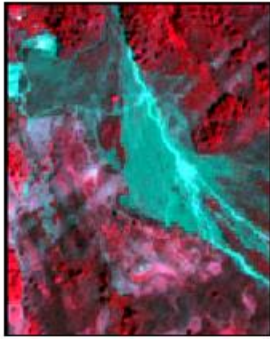


Imagen Original

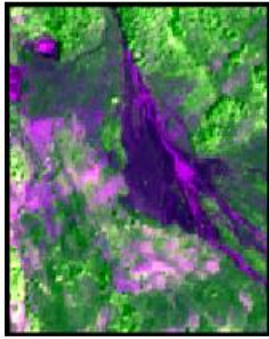
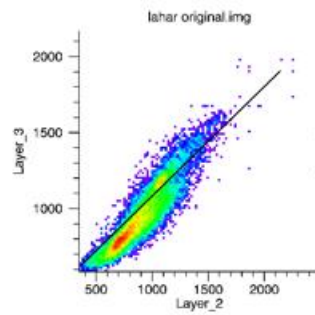


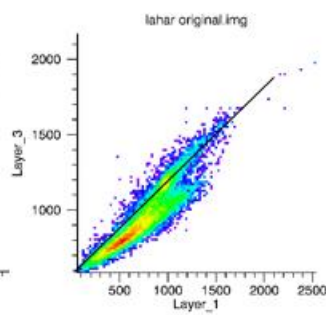
Imagen Compuesta

Original



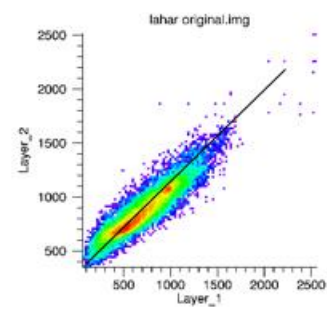
Layer 2: Banda 2

Layer 3: Banda 3



Layer 3: Banda 3

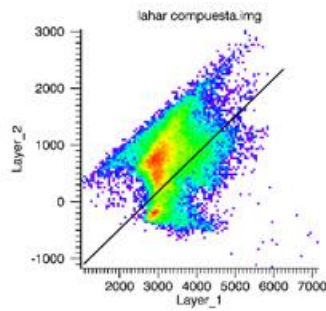
Layer 1: Banda 1



Layer2: Banda 2

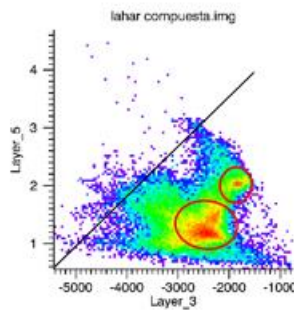
Layer 1: Banda 1

Compuesta



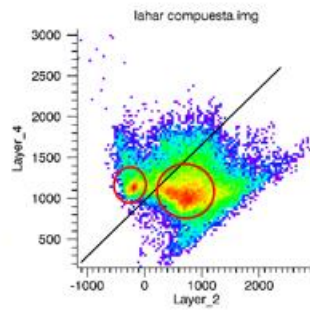
Layer 1: Banda CP

Layer 2: Banda CP



Layer 3: Banda InvC

Layer 5: Banda IndC



Layer 4: Banda InvC

Layer 2: Banda CP

Figura 13: Muestra los Scatters de imágenes originales e imágenes compuestas, agrupadas por el tipo de depósito y año de la imagen.

Por otra parte, en la Tabla 3 se generó una matriz para determinar el aporte de cada una de las bandas de salida (derivadas de las transformadas reversibles aplicadas a las imágenes SPOT 5 y 6). De esta forma se determinó que CP1, es decir, la primer banda de salida de CP, fue la que mostro mayor realce para la discriminación de los cuatro tipos de unidades volcánicas seleccionadas. Así, CP fue de utilidad para la unidad de “ceniza”; seguida por la banda 2 de la InvC. Lo mismo sucedió con la unidad de “Coladas de lava” donde la CP1 y CP2 con las que mostraron un mayor realce seguida por IndC de la primera banda. Para los “flujos piroclásticos” las bandas que mostraron un mayor realce son CP1 y la IndC1. Para lahares la CP1 a diferencia de las otras unidades de depósito no fue la que realizó un mayor realce espectral, en este caso la CP2 fue en la que se observa mayor discriminación a estas unidades de depósitos, en segundo lugar se determinó que no sobresale ninguna banda ya que tanto los procesos de inversa de componente principal e independiente de la componente muestran un realce semejante.

Cabe destacar que para la imagen SPOT6 del año 2014 se observa un patrón en las bandas de salida seleccionadas como son: CP1, CP2, InvC1, InvC3 y IndC4 lo cual puede ser un indicativo de la capacidad espectral para discriminar depósitos volcánicos respecto a SPOT 5, ya que para este sensor se observó una mayor variabilidad en la selección de componentes de salida; lo cual puede ser asociada a la alta resolución del pixel y a un mayor número de bits en su despliegue. Mientras que la imagen del 2013 y 2008 se observa en la Tabla 3 que las componentes que más se utilizaron fue la CP1 y la InvC1. Para la imagen 2011 se observó que IndC1 se utilizó para identificar en las cuatro unidades de depósito, mientras que para el 2007 la InvC2 el mismo caso que la imagen del 2011. Tanto para la imagen del 2011 y 2007 las CP1 y CP2 permitieron en segundo término una mayor discriminación para identificar las unidades de depósitos.

La imagen del 2004 mostro una mayor variabilidad en la selección de sus componentes con respecto a las imágenes SPOT 5, ya que se utilizaron las bandas CP1, CP2, InvC2 e InvC3; de las cuales la Banda InvC2 se utilizó en mayor ocasiones.

Con lo anterior descrito se puede mencionar que el proceso de CP permitió una mayor discriminación espectral para todas las unidades de depósitos, mientras que INVC fue el proceso que le siguió en cuanto a la discriminación espectral.

Tabla 3: Matriz

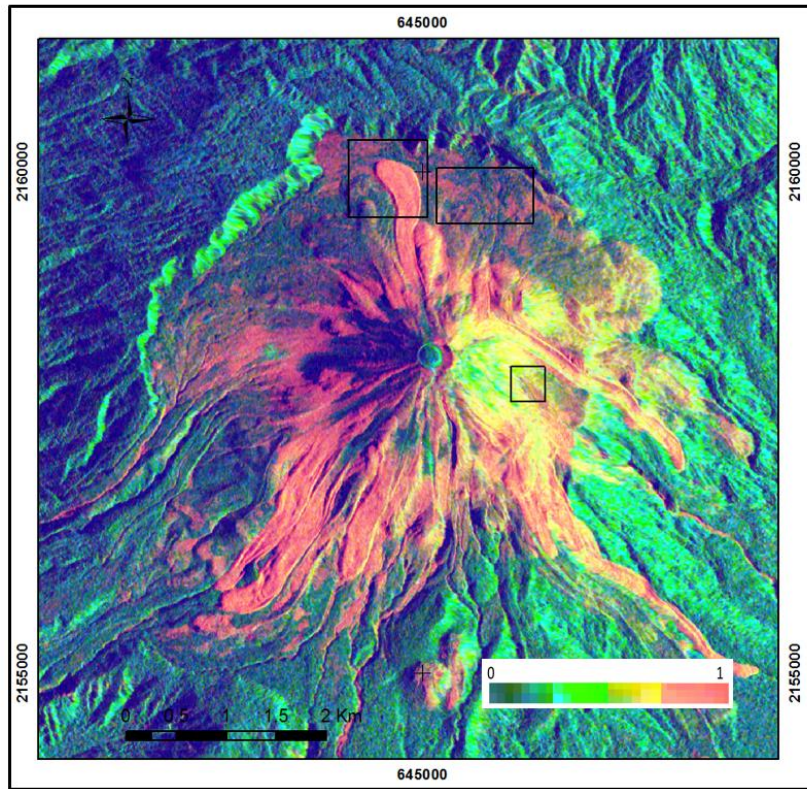
DEPOSITO AÑO	CENIZA	COLADAS DE LAVA	DEPOSITOS PIROCLÁSTICOS	LAHARES
2014	CP1 INVC3	CP2 INDC4	CP2 INVC3	INVC1 INDC4
2013	CP1 INVC2	CP1 INDC1	CP1 INDC1	CP3 INDC1
2011	CP1 INDC1	CP2 INDC1	CP2 INDC1	CP2 INDC1
2008	CP1 INVC4	CP1 INDC1	INVC1 INDC1	CP2 INVC4
2007	INVC1 INVC2	CP2 INVC2	CP1 INVC2	CP2 INVC2
2004	CP1 INVC2	INVC3 INVC2	CP1 INVC2	CP2 INVC3

7.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL PROCESO ECC.

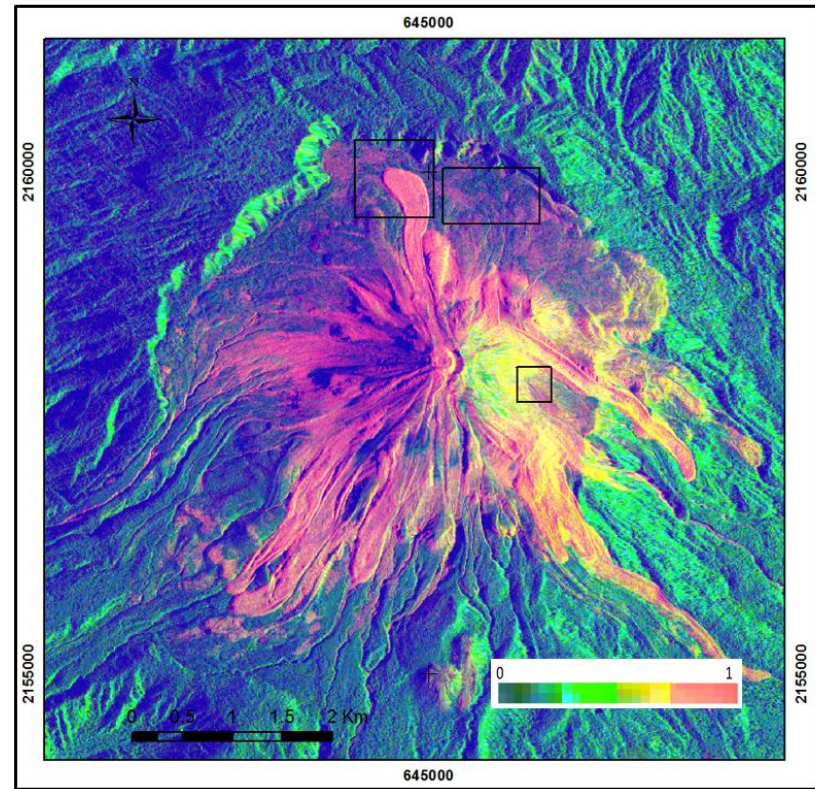
Por otra parte, como se mencionó en el apartado metodológico, se realizó la estimación de ECC a partir de una técnica D-InSAR. En la Figura 14, se muestran dos imágenes resultado del cálculo ECC para las imágenes complejas de orden descendente entre las fechas 2012-09-07, 2012-09-18 y 2009-02-28, 2009-04-02. Las tonalidades en verde indican pérdida total en coherencia debido a la gran cantidad de vegetación que se encuentra rodeando el Volcán de Colima; lo que impide el desplazamiento de la señal del radar. Mientras que las áreas en alta coherencia interferométrica (cerca de 1) se muestran en tonalidades rojizas y coherencia media en tonalidades naranjas-amarillas; las cuales son de nuestro especial interés para la discriminación de depósitos.

Lo que es de nuestro especial interés son dos aspectos: píxeles en alta coherencia que evidencie nuevos emplazamientos de unidades volcánicas y píxeles con

pérdida en coherencia pero con conectividad 8 respecto a píxeles con alta coherencia; este último lo cual es un indicativo de emplazamiento del depósito o de procesos erosivos secundarios. De esta forma, de acuerdo con la Figura 15 los recuadros en rojo se asocian a emplazamiento de flujos piroclásticos, mientras los recuadros en amarillo evidencian emplazamiento de ceniza. En ambos casos la detección de estas dos unidades volcánicas se realiza en función del cambio de fase expresado en valores de coherencia interferométrica, así su detección no se puede asociar a su comportamiento espectral sino a su expresión en la coherencia interferométrica de la señal de radar, siendo una novedosa técnica para identificar depósitos volcánicos recientes.



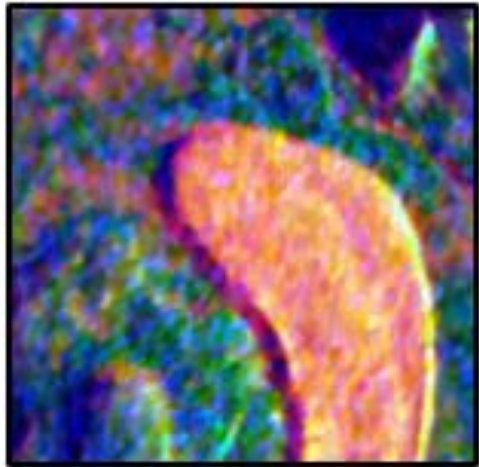
ECC del año 2009



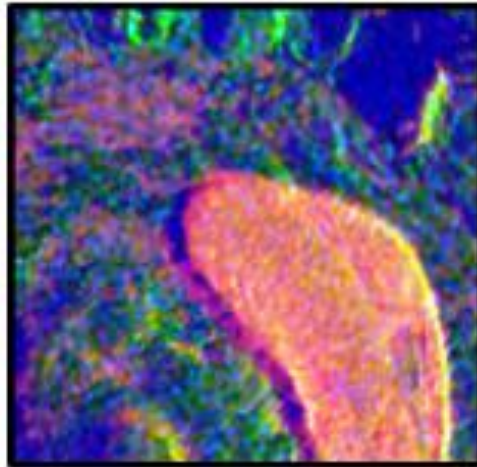
ECC del año 2012

Figura 14: Áreas seleccionadas como unidades de depósitos, estimación de Cambio en Coherencia obtenidos a partir de técnicas D-InSAR para los años 2009 y 2012.

Por otra parte, en términos de asociar el grado de coherencia de las unidades volcánicas se puede decir que, la mayoría de las coladas de lava tanto históricas como recientes mantienen una alta coherencia con un rango entre 0.8 a 1 (valores de coherencia en tonalidades rojizas). Como se muestra en la Figura 15, esta alta coherencia se asocia a un no emplazamiento o cambio en el transcurso de las dos tomas de radar complejas (SAR 1 y SAR 2 para un periodo de tiempo determinado); por lo que altos valores de coherencia y con conectividad 8 se asocia a la morfología del terreno (o de la unidad volcánica) siempre y cuando la coherencia presente un comportamiento espacial homogéneo. Por ejemplo, en la Figura ya mencionada se muestra un acercamiento de las coladas de lava para los pares 2012-09-07, 2012-09-18 y 2009-02-28, 2009-04-02, las cuales fueron proyectadas en 3 dimensiones; identificando la morfología del depósito hacia los valores mayores 0.8 en coherencia, mientras que valores menores a 0.5 se observa un comportamiento aleatorio donde la coherencia presenta valores bajos o nulos

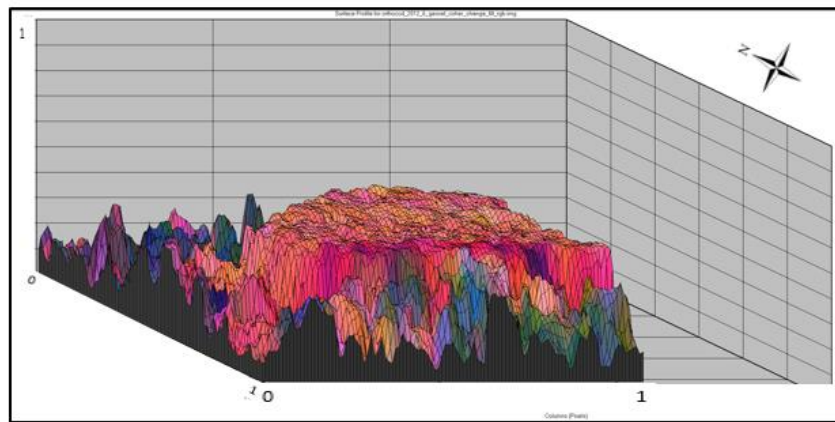


ECC 2009



ECC 2012

Grafica en 3D, muestra el comportamiento la colada de lava para el año 2009



Grafica en 3D, muestra el comportamiento la colada de lava para el año 2012

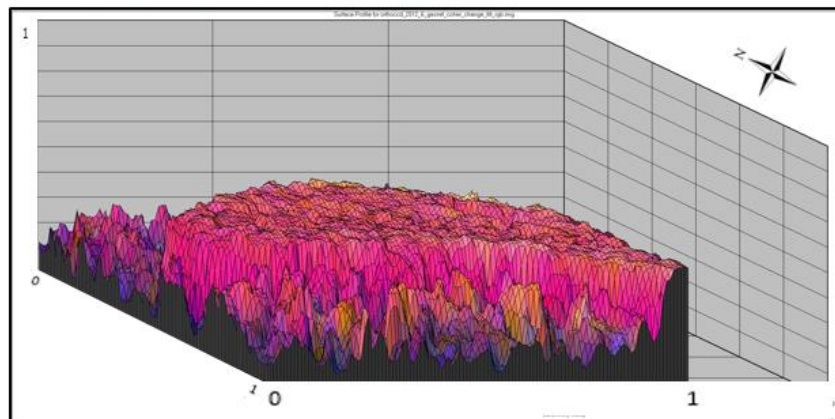
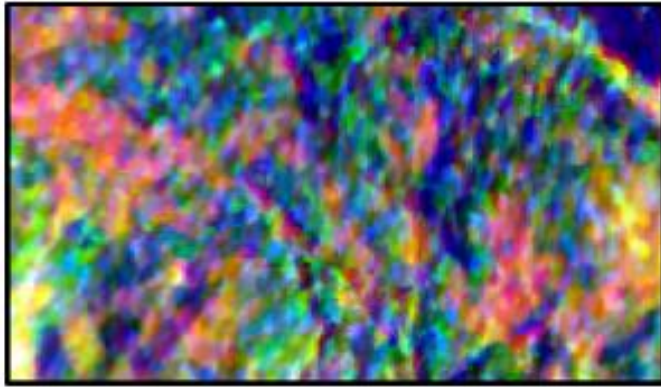
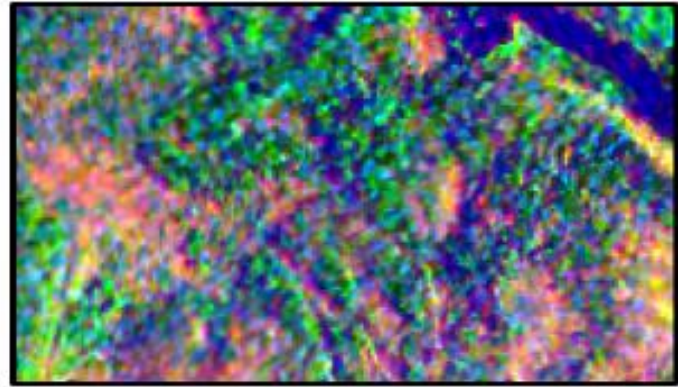


Figura 15: Comparativo de Imágenes de ECC para los años 2009 y 2012, Grafica en 3D del comportamiento de unidades de depósitos de coladas de lava.

Para las unidades volcánicas de ceniza se puede decir que tienen una baja coherencia, como se muestra en la Figura 16. Esta baja coherencia se asocia a el cambio del emplazamiento de la ceniza entre las dos tomas de radar complejas. En la Figura mencionada anteriormente, muestra la unidad de depósito en proyectada en 3 dimensiones, en las cuales se identifican un comportamiento aleatorio en la conectividad de los pixeles, mostrando una coherencia con valores nulos o bajos asociados a un rango menor a los 0.5.

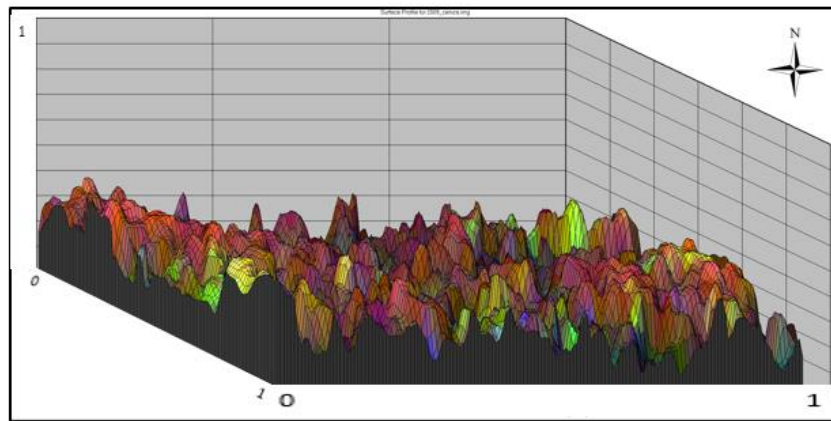


ECC 2009



ECC 2012

Grafica en 3D, muestra el comportamiento la ceniza para el año 2009



Grafica en 3D, muestra el comportamiento la ceniza para el año 2012

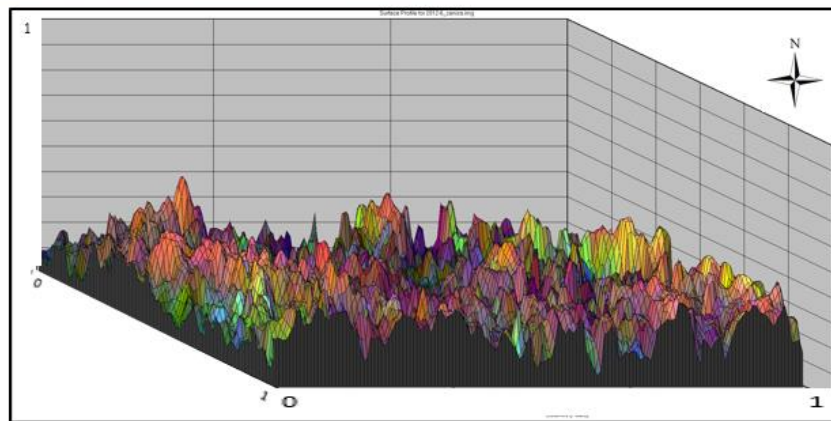
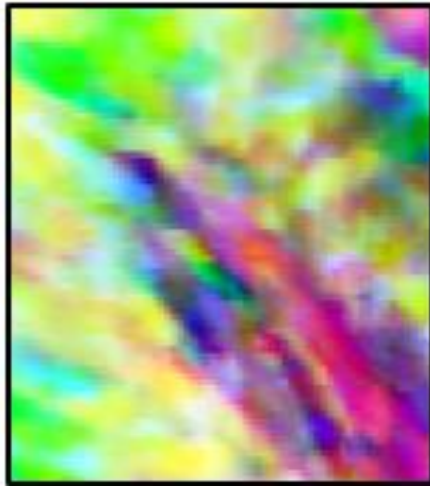
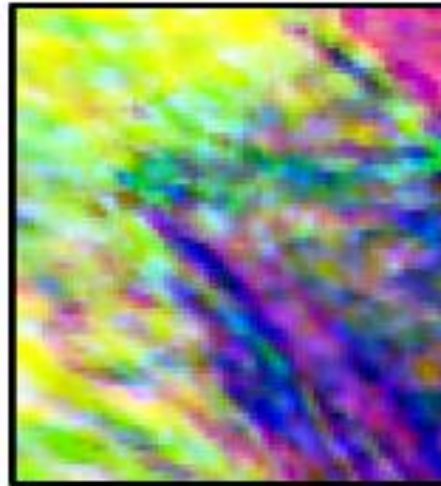


Figura 16: Comparativo de Imágenes de ECC para los años 2009 y 2012, Grafica en 3D del comportamiento de unidades de depósitos de ceniza.

Por su parte, las unidades de depósitos de flujos piroclásticos que se muestra en la Figura 17, se asocia a emplazamientos de material volcánico entre las dos tomas SAR del 2012-09-07, 2012-09-18 y las del 2009-02-28, 2009-04-02, provocando una coherencia entre los rangos 0.5 a 0.8, (valores de coherencia 0.8 tonalidades rojizas y valores de coherencia 0.5 tonalidades amarillas). Los depósitos de flujos fueron proyectados en 3 dimensiones, lo que nos permite identifica la morfología de toda la unidad del depósito (mostrada en coloraciones oscuras), en los cuales se observa un comportamiento homogéneo con valores de coherencias de 0.5 y 0.8.

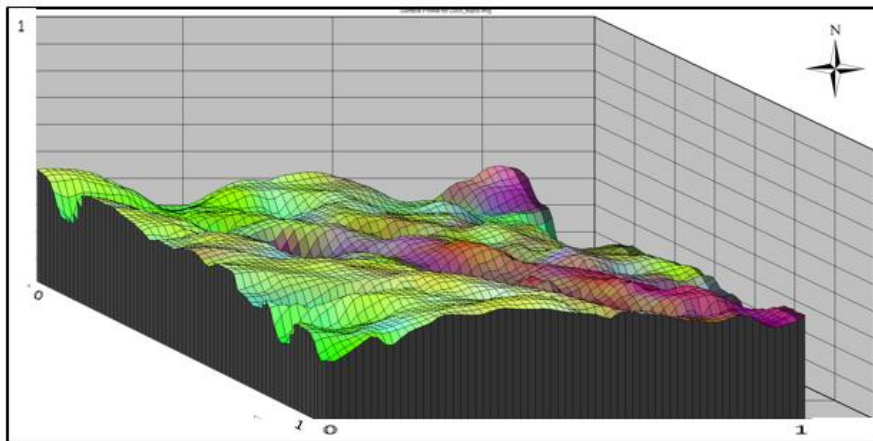


ECC 2009



ECC 2012

Grafica en 3D, muestra el comportamiento los flujos piroclásticos para el año 2009



Grafica en 3D, muestra el comportamiento los flujos piroclásticos para el año 2012

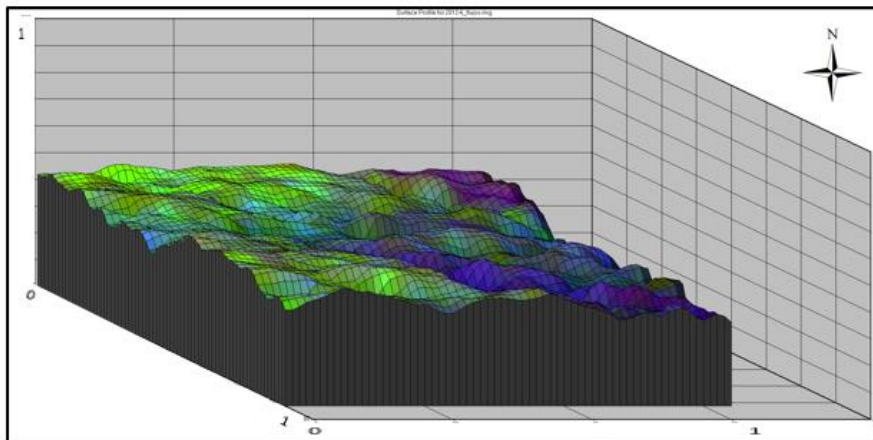
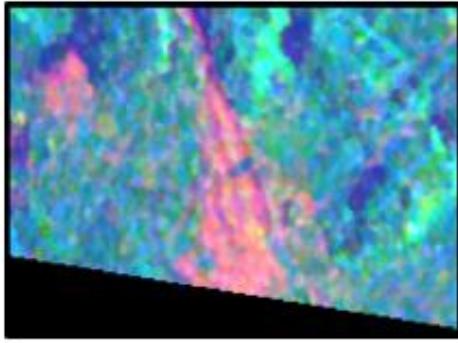


Figura 17: Comparativo de Imágenes de ECC para los años 2009 y 2012, Grafica en 3D del comportamiento de unidades de flujos piroclásticos.

En cuanto a lahares solo se obtuvo de los pares complejos asociados al año 2009, debido a que la imagen del 2012 no abarcó la zona que se determinó como unidades de depósitos de lahar; esto debido a que la resolución de la imagen es alta y la cobertura baja. Se observa en las unidades de lahares una coherencia de 0.5 a 0.7 (valores rojizos coherencia 0.7) Estos valores de coherencia son más dispersos en comparación a las unidades de flujos piroclásticos, lo que se asocia al emplazamiento de nuevas unidades en el transcurso de las dos tomas SAR. Mientras los valores con coherencia alta muestran un comportamiento homogéneo y los pixeles con coherencia baja muestran un comportamiento aleatorio como se observa en la Figura 18, en esta misma Figura observamos la imagen proyectada en 3 dimensiones donde identifican los pixeles con coherencia de 0.7 y 0.5, y los pixeles con coherencia baja o nula; donde en comparación con la unidad de flujos piroclásticos la definición de la morfología es menor.

Por tanto, el uso de la técnica ECC es una herramienta útil para identificar por un lado el emplazamiento o cambio total asociado a un depósito, de igual forma es de gran utilidad para identificar la morfología del depósito y poder evaluar sus cambios; sin embargo para discriminar entre tipos de depósitos el límite para definirlos puede llegar a ser complejo.



ECC 2009

Grafica en 3D, muestra el comportamiento los flujos piroclásticos para el año 2009

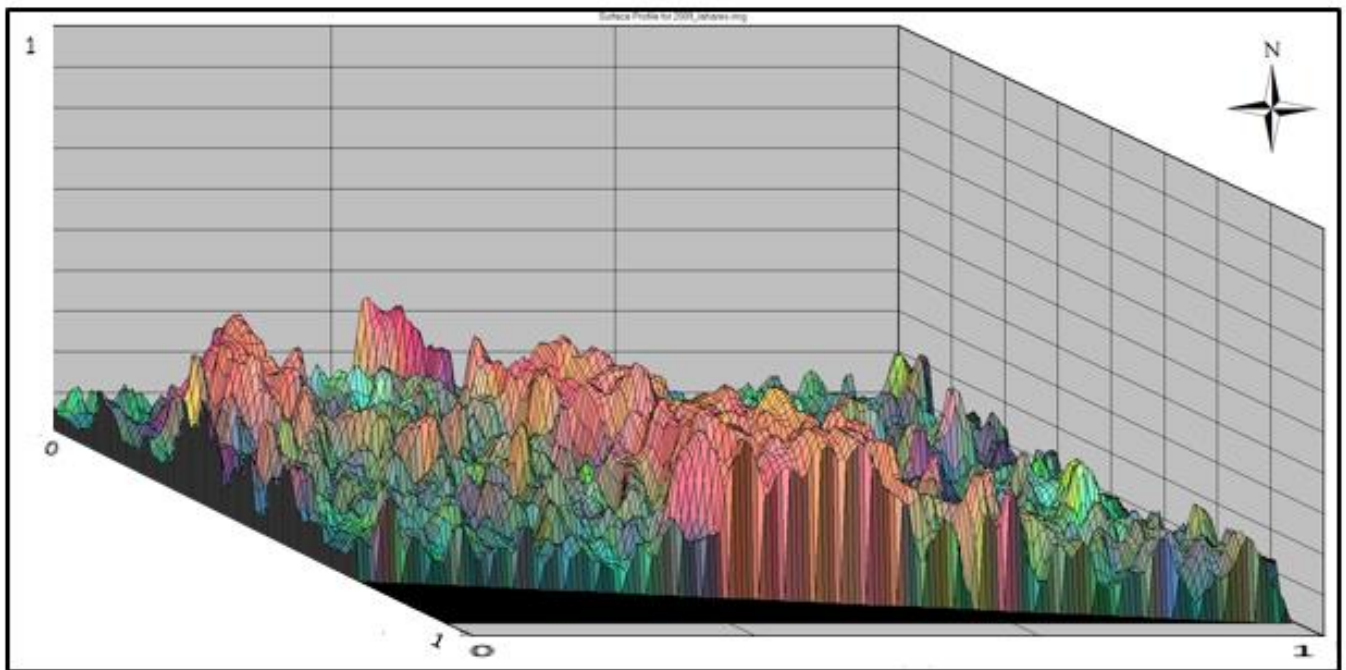


Figura 18: Imágenes de ECC para los años 2009, Grafica en 3D del comportamiento de unidades de lahares.

7.3 EVALUACION DE CAMBIO A PARTIR DE LAS TRANSFORMACIONES VECTORIALES PARA EL PERIODO 2004-2014

Con la intención de evaluar la discriminación espectral en términos de cambio espacial, se realizó una evaluación de cambio entre las imágenes compuestas derivadas de las transformaciones vectoriales para las imágenes SPOT 2004 y 2014; seleccionando estas por haber arrojado los resultados más óptimos derivados

de los dispersogramas de las unidades volcánicas. Así, se estimó el cambio a partir de la correlación lineal entre bandas transformadas, es decir:

Cambio1: Banda Transformada 1 del año 2014 - Banda Transformada 1 del año 2004

Donde, Banda Transformada 1= CP, Banda Transformada 1=CP

Cambio2: Banda Transformada 2 del año 2014 - Banda Transformada 2 del año 2004

Donde, Banda Transformada 2= CP, Banda Transformada 2=CP

Cambio3: Banda Transformada 3 del año 2014 - Banda Transformada 3 del año 2004

Donde, Banda Transformada 3= InvC, Banda Transformada 3=InvC

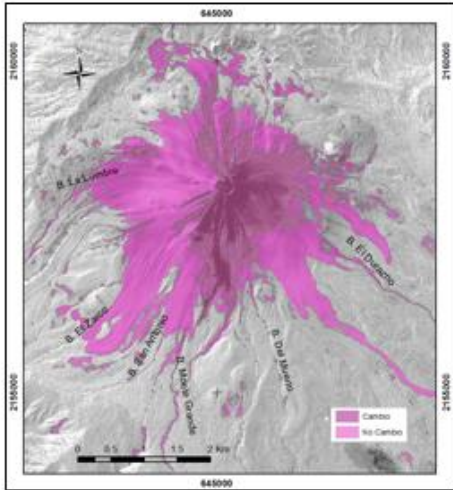
Cambio4: Banda Transformada 4 del año 2014 - Banda Transformada 4 del año 2004

Donde, Banda Transformada 4= InvC, Banda Transformada 4= InvC

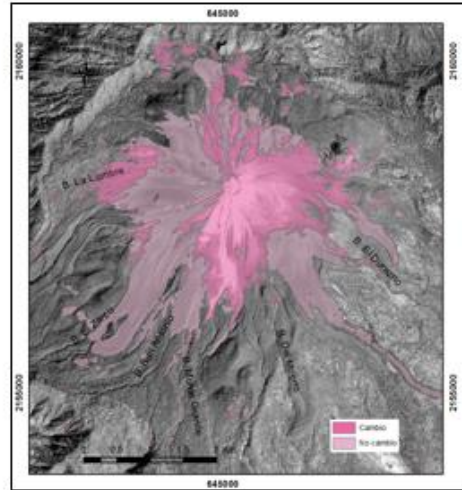
Cambio5: Banda Transformada 5 del año 2014 - Banda Transformada 5 del año 2004

Donde, Banda Transformada 5= IndC, Banda Transformada 5= IndC

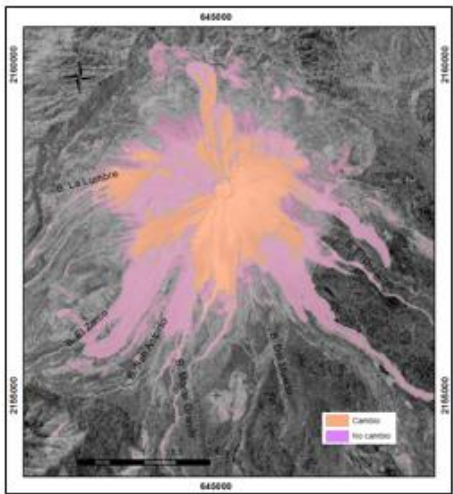
Cabe recordar que las imágenes compuestas resultantes fueron conformadas por 5 componentes de salida cada una y el orden de cada una de ellas se respeta para los dos años seleccionados. De manera tal que, se obtuvieron 5 mapas de razón de cambio los cuales se muestran en la Figura 20.



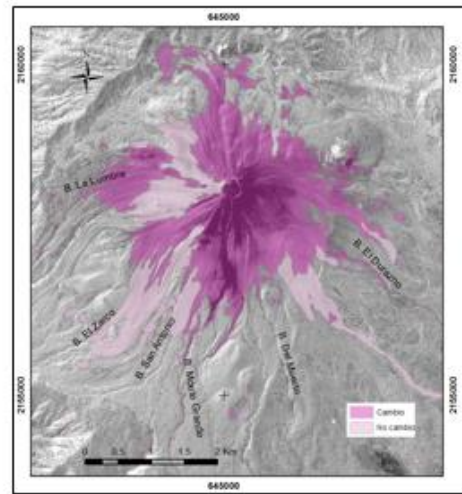
B1: CP



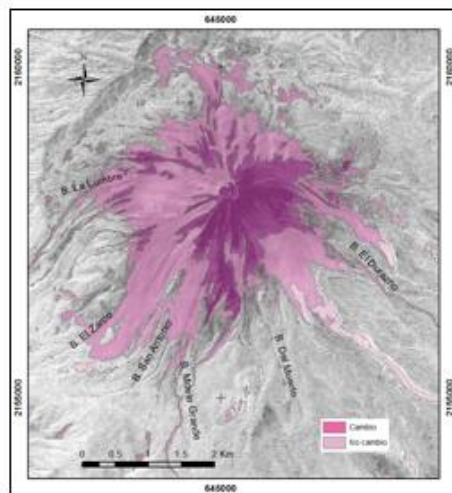
B3: InvC



B2: CP



B4: InvC



B5: IndC

Figura 19: Mapas de razón de cambio y no cambio.

En los mapas de la Figura 19 se observa la diferencia de cambio asociada al emplazamiento de unidades volcánicas para las imágenes 2004 y 2014, esta diferencia se asocia al cambio por emplazamiento de ceniza, flujos piroclásticos y lahares, mientras que las zonas donde no se calculó una diferencia se asoció al no cambio.

El mayor cambio se observa hacia el este y sur del Volcán, se asocian al emplazamiento de unidades de depósitos de ceniza, flujos piroclásticos y depósitos secundarios. La unidad de depósito de ceniza se asocia al principal cambio el cual se observa en mayor parte depositada al este y sur-este del Volcán, mientras que en las partes próximas al cráter se asocian a emplazamientos de flujos piroclásticos. Al sur del Volcán en las partes distales, se observa emplazamientos sobre las barrancas; los cuales se asocian a depósitos secundarios como lahares o avalanchas de escombros

De igual manera en la Tabla 4 se muestra el área asociada a todos los cambios asociados a emplazamiento de unidades volcánicas no diferenciadas, es decir, considerando el cambio como un total para cada una de las bandas consideradas, de acuerdo a esta estimación la diferencia entre las Bandas 1 es la que arroja un mayor cambio.

Tabla 4: Áreas estimadas a partir de la estimación de cambio y no cambio derivado de la correlación de las bandas de salida (Transformaciones Reversibles) para el periodo 2004-2014.

Bandas7cambio	Cambio (km ²)	No Cambio (km ²)
B1- CP	7.43	4.03
B2- CP	3.8	7.6
B3- InvC	5.04	6.42
B4- InvC	2.84	8.62
B5- IndC	2.74	8.72

Por otra parte, a partir cada una de las imágenes resultado de cambio y no cambio se realizó una segmentación por objetos con la intención de identificar y diferenciar

las unidades volcánicas definidas en mayor grado en términos de conectividad de pixel. De esta forma, en la Figura 20 se muestra el mapa final de detección de unidades volcánicas derivadas de la detección de cambio-no cambio para las bandas de salida (transformaciones vectoriales) consideradas.

En la Figura mencionada en el párrafo anterior se observa de color amarillo la primera unidad, se asocia a depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de caída y depósitos secundarios (lahares), esto debido a la conectividad de los pixeles y su distribución al interior de las barrancas. Esta unidad se observa emplazada sobre las barrancas al sur del Volcán por lo que se calculó correlación del 53% con respecto a puntos de control tomados por Dávila (2011).

La segunda unidad se asocia a depósitos de flujos piroclásticos, ya que su emplazamiento se observa tanto en el cráter como en las proximidades al sur-oeste del Volcán.

La tercera unidad de depósito en color naranja se asocia principalmente a flujos piroclásticos, en segundo término se asocia a depósitos de caída; la unidad muestra un emplazamientos al sur próximo al cráter hasta las barrancas Monte grande y Del Muerto y se observa otro emplazamiento en el lado este.

La cuarta unidad en color rosa emplazada en su mayoría en el lado este del Volcán, por el tipo de comportamiento que presenta la unidad se asocia a depósitos de caída y depósitos de flujos piroclásticos.

De acuerdo a lo anterior se puede afirmar la complejidad que puede llegar a presentar el discriminar tipos de depósitos a partir de su comportamiento espectral debido a que la composición magmática es la misma para todos los depósitos asociados a las distintos periodos de actividad del Volcán de Colima. Sin embargo las unidades que presentaron un mayor realce fueron las coladas de lava, seguidas por los flujos piroclásticos y lahares, mientras que los depósitos de ceniza mostraron menor discriminación espectral.

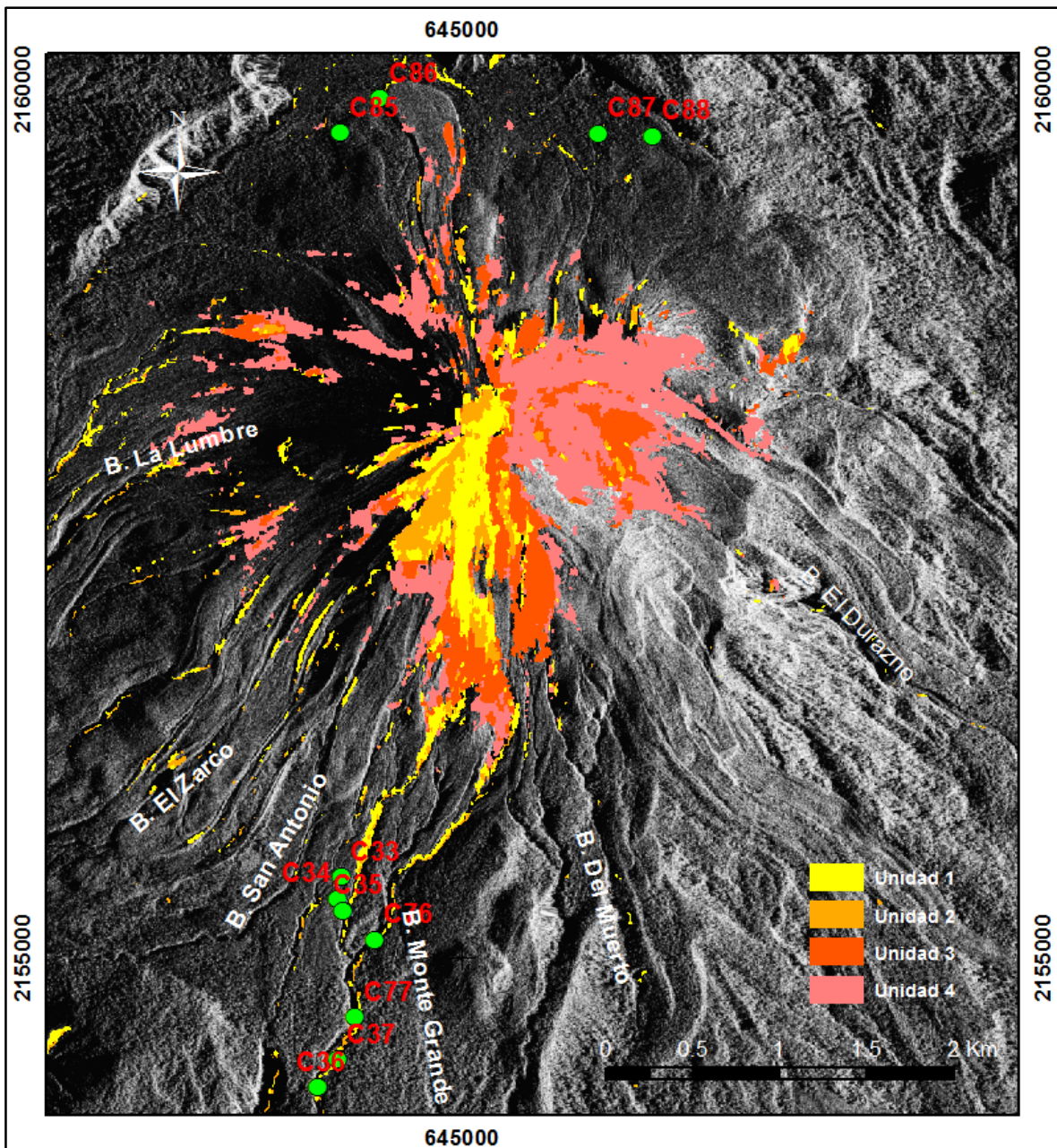


Figura 20: Mapas de detección de cambio de unidades volcánicas derivadas la detección de cambio-no cambio para las bandas de salida, periodo de análisis 2004-2014.

8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó una discriminación espectral a partir de componentes principales (CP), Inversa de componentes principales (InvC) e independiente de la componente (IndC) con la intención de diferenciar por tipo de depósito.

Se empleó la técnica DinSAR a partir del método estimación de cambio en coherencia (ECC), el cual radica en calcular la diferencia en coherencia de dos tomas SAR pares la temporalidad 2012-09-07, 2012-09-18 y 2009-02-28, 2009-04-02. Obteniendo así píxeles con coherencia de 0.8 para las unidades de coladas de lava asociados al no emplazamiento de depósitos; píxeles con coherencia media (0.5 a 0.8) para flujos piroclásticos asociados a emplazamientos de unidades volcánicas, coherencia media (0.7 y 0.5) para los lahares evidenciando un cambio por nuevos emplazamientos y baja coherencia para el caso de las unidades de ceniza, con píxeles con coherencia menores a 0.5.

Para la validación de los resultados se utilizaron dispersogramas con los cuales evidenciamos el realce espectral entre las imágenes originales y las imágenes compuestas por CP, InvC e IndC.

De igual forma la estimación de cambio y no cambio mostro que la unidad de ceniza provoca cambio hacia el sur-este y este del Volcán, mientras que los flujos piroclásticos se emplaza tanto cerca del cráter, como al sur-este del Volcán. En cuanto a lahares se observa su emplazamiento sobre las barrancas al sur del Volcán. Siendo coincidente con la segmentación de unidades volcánicas las cuales guardan un patrón de emplazamiento hacia la ladera este y sur predominantemente.

Con base en las técnicas empleadas se puede afirmar la complejidad que puede llegar a presentar el discriminar tipos de depósitos a partir de su comportamiento espectral debido a que la composición magmática es la misma para todos los depósitos asociados a las distintos periodos de actividad del Volcán de Colima

Este tipo de geotecnologías es de gran ayuda debido a que permite con relativa rapidez el análisis de la información multitemporal de algunas zonas de riesgo en

específico, o de difícil acceso así como la generación de mapas de peligros que pueden ser de gran utilidad durante un evento de máxima actividad.

9.0 BIBLIOGRAFÍA

- (2010) "Volcano field trip to Las Cañadas calderas, a UNESCO World Heritage Site, Tenerife Island". *Cities on Volcanoes*, 6, (10).
- Araña, J.M., (1993) *La vulcanología actual Consejo superior de investigaciones científicas*. Madrid.
- A. Rivera-Tapia, A. Yañez -Santos, L. Cedillo-Ramírez. (2005) "Emisión de ceniza volcánica y sus efectos". *Ecosistemas*, 14, (107-115).
- Boselli Flank, Lucia Capra, Damiano Sarocchi, Servando De la Cruz-Reyna., (2011) "Flank collapse scenarios ay Volcán de Colima, Mexico: A relative instability analysis". *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*, 208 (51-65).
- Canchola P. Yared G. (2001) *Análisis geomorfológico de las laderas SE-SW del volcán de Colima, México*. Tesis, Licenciado en Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Canty, J. Morton, (2010) *Image classification, and change detection in remote sensing*, United States of America: CRC Press.
- Capra Macías, Scott Abrams, Garduño-Monroy, (2002) "Las avalanchas de escombros flujos y desechos en el Cinturón volcánico Trans-Mexicano, México comportamiento, y las implicaciones para la evaluación de riesgos". *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, (81-110).
- Capra L., L. Borselli, N. Varley, J.C. Gavilanes-Ruiz, G. Norini, D. Sarocchi, L. Caballero, A. Cortes, (2010) "Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process". *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*, 189 (105-117).
- Carmichael, I.S.E., Turner, F.J., y Verhoogen, J., (1974). "Igneous Petrology". *International in the Earth and Planetary Sciences*, 739
- Chuvieco, Emilio, (1995) *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A.

- Common, P., (1994) "Independent component analysis, a new concept?," *Signal Processing*, 36, (87-314).
- Cortes Cortes, (2002) *Depositos de avalanchas y flujos de escombros originados hace 3600 años por los colapsos del sector suroeste del Volcán de Colima*, México D.F., Tesis, Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cortés, A., Garduño, V.H., Macias, J.L., Navarro-Ochoa, C. Komorowski, J.C., Saucedo, R., Gavilanes, J.C., (2010) Geologic mapping of the Colima volcanic complex (Mexico) and implications for hazard assessment. In: Groppelli, G., Viereck-Goette, L. (Eds.), *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas: Geological Society of America Special*, 464, (1–16).
- D'Ercole Robert, Metzger, Sierra Alexis, (1999) "Alerta volcánica y erupción del Volcán Pichincha en Quito". *Bulletin de l'Institut Francais d'Études Andines*, 38, 3, (487-499), Organismo internacional.
- Dávila Hernández, Norma Angélica, (2010) *Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y radar de alta resolución (TerraSAR-X)*, México D.F., Tesis, Doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Davila Hernández, Norma Angélica, (2007) *Análisis espacial de los lahares en el Volcán de Colima, México. Tesis*, Maestría en Geografía, Universidad Nacional de México.
- Davila Norma, L. Capra, J.C. Gavilanes –Ruiz, N. Valey, G.Norini, Angel Gómez Vázquez, (2008) "Recent lahars at Volcán de Colima (México): Drainage variation and spectral classification" *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, (127-141).
- De Dicco A. Ricardo, (2009) "Teledetección satelital de erupciones volcánicas Enero-Abril/2009". *CLICeT*. (1-92). Buenos Aires.
- Decker Robert, (1993). *Montañas de fuego. La naturaleza de los volcanes*, Madrid España.

- Elizarrarás Rodríguez, Sergio R., (1995) “Consideraciones preliminares sobre riesgo en el Volcán de Colima, México”. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 12, (47-51).
- ERDAS (2013) *ERDAS Field Guide*. pp.792
- Franco, R. O., Stoffel, M., Vázquez, S. L., Capra, L., (2013) Spatio-temporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima volcano, Mexico – A dendrogeomorphic approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 267, (30-38).
- Gutierrez E. Mateo, (2008) *Geomorfología*, España: Madrid.
- Hooper, A., Beakaert, D., Spaans, K., Arikani, M., (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*. 514, (1-13).
- Jensen, J.R., (2005) “Introductory digital image processing: A remote sensing perspective”. *Prentice Hall series in Geographic Information Science*, 3, (526).
- Jensen, J. R., (1996) *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Keller, A. Edward, Robert H. Blodgett, (2007) *Riesgos naturales Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. España: Pearson Prentice Hall.
- Ketelaar V.B.H. (Gini), (2009) *Satellite Radar Interferometry*, The Netherlands: Delft University of Technology.
- Lavigne, Franck, Hiroshi Suwa, (2004) “Contrasts between debris flows, hyper concentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia”. *Geomorphology*, 61, (41-58).
- Lira Chávez Jorge, (2002) *Introducción al Tratamiento digital de Imágenes*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lira Chávez Jorge, (2010) *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lugo, H. José, (2011) *Diccionario geomorfológico*, México: Instituto de Geografía. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 3. (379-424).

- Macias, Jose Luis, (2005) "Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México". México D.F.
- Macias, Jose Luis, Ricardo Saucedo, Juan Carlos Gavilanes, Nick Varley, Sergio Velasco García, Marcus Bursik, Víctor Vargas Gutiérrez y Abel Cortéz (2006) "Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcán de Colima y perspectivas futuras". *GEOS*, 25, (3).
- Matthews, Kamata, Okuyama, Yusa, Shimizu, (2003) "Surface height adjustments in pyroclastic-flow deposits observed at Unzen volcano by JERS-1 SAR Interferometry", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125, (247-270).
- Mayorga Torres, Tania Margarita, (2012) *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética)*, Tesis, Magister en aplicaciones espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencias, Universidad Nacional de Córdoba.
- Meyer, F. J., McAlpin, D. B.; Gong, W., Ajadi, O., Arko, S., Webley, P. W., Dehm, J., (2014) Integrating SAR derived products into operational volcano monitoring and decision support system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- McAlpin, D., Meyer, F. J., (2012) Multi-sensor data fusion for remote sensing of post-eruptive deformation and depositional features at Redoubt Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 259, (414-423).
- Payam, Birjandi, Mihai Datcu, (2009) ICA based visual words for describing under meter high resolution satellite images. "IEEE IGARSS 2009".
- P.W. Webley , T.M. Lopez, A.L. Ekstrand, K.G. Dean, P. Rinkleff, J. Dehn, C.F. Cahill, R.L. Wessels, J.E. Bailey, P. Izbekov, A. Worden, (2012) "Remote observations of eruptive clouds and surface thermal activity during the 2009 eruption of Redoubt volcano". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259 (185-200).
- Pinel, V., Hopper, A., De la Cruz, R. S., Reyes, D. G., Doin, M. P., Bascou, P., (2011) The challenging retrieval of the displacement field from InSAR data for andesitic stratovolcanoes: Case study of Popocatepetl and Colima

- Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 200, (49-61).
- Roverato, M., Capra, L., Supizio, R., Norini, G., (2011) Stratigraphic reconstruction of two debris avalanche deposit at Colima Volcano (Mexico): Insight into pre-failure conditions and climate influence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 207, (33-46).
 - Rodriguez-Elizarrarás, S.R., Siebe, C., Komorowski, J.C, Espíndola, J.M. Saucedo, R., (1995) “Consideraciones preliminares sobre riesgo en el Volcán de Colima, México”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12, (47-51).
 - Saricchi, D., Sumplizio, R., Macías, J. L., Saucedo, R., (2011) The July 1999 block-and-ash flow (BAF) at Colima Volcano: New insights on volcanic granular flows from textural analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 204, (40-56).
 - Saucedo, Girón Ricardo., (2000) Erupciones de 1991 y 1998-1999 del Volcán de Colima: mecanismos de transporte y depositación de los flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Doctorado en Ciencias de la Tierra; Universidad Nacional Autónoma de México. 132.
 - Saucedo, R., Macías, J.L., Bursik, M. I., Mora, J.C., Gavilanes, J. C., Cortés. A., (2002) Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 177, (129-153).
 - Saucedo, R., Macías, J.L., Sheridan, M. F., Bursik, M.I., Komorowski, J-C., (2005) Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico, implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 139, (103-115).
 - Schimnke, H.U., (2006) *Volcanism*. Springer, Alemania, 324,
 - Shah, C. A., (2003) *Independent component analysis mixture model (ICAMM) algorithm for unsupervised classification of multi/hyperspectral imagery*, New York. Masters Thesis, Syracuse University, Syracuse.
 - Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H., Stix, J., (2000) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. 1456.

- Stevens, Nicki F., Harold Garbeil, Peter J. Mouginis-Marck, (2004) "NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability". *EL SEVIER*, 90, (405-414).
- Strahler N., Arthur, (1982) *Geografía Física*. Barcelona:Ediciones Omega.
- Sidgurdsson Haraldur (2000) *Encyclopedia of volcanoes*. USA: University of Rhode Island.
- Sulpizio R., Capra, Sarochi, Saucedo, Gavilanes-Ruiz, Valey. (2010) "Predicting the block-and-ash flow inundation áreas at Volcán de Colima (Colima, México) based on the present day (February 2010) status". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193, (49-66).
- Tarbuck, Edward J., Frederick. K. Lutgens, (2005) *Ciencias de la Tierra Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Person Education S.A.
- Terunuma, Nishida, Amada, Mizuyame, Sato y Urai, (2005)"Detection of traces of pyroclastic flows and lahars with satellie systhetic aperture radars" *International Journal of Remote Sensing*, 26, (1927-1942).
- Van Zyl, Jacob, Yunjin Kim, (2010) *Synthetic Aperture Radar Polarimetry*, United States of America: Wiley.
- Vázquez, R., Capra, L., Caballero, L., Arambula, M. R., Reyes, D. G., (2014) The anatomy of a lahar: Deciphering the 15th September 2012 lahar at Volcán de Colima Mexico. *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*. 272, (126-136).
- Yarza de la Torre, Esperanza, (1992) *Volcanes de México*, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zeineb, K., Thouret, J.C., Gupta A. Solikhin, A. Chin, L.S., (2014) "Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT 5 image for mapping geology and landforms of active volcanoe: Semeru case study, Indonesia". *Geomorphology*. 221, (18-33).