

## **Interpretación de lineamientos estructurales en Nayarit, México, aplicando sensores remotos y software libre**

Carrilo de la Cruz, Juan Luis<sup>1</sup>, Felipe de Jesús Escalona Alcázar<sup>2</sup>

Araceli Zamora Camacho<sup>1</sup>, Francisco Javier Nuñez Cornú<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Sismología y Volcanología de Occidente (SisVOc), Universidad de Guadalajara  
Av. Universidad 203, Del. Ixtapa, C.P. 48280, Puerto Vallarta, Jalisco.

<sup>2</sup>Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas  
Calzada Universidad 108, Fracc. Progreso, C.P. 98058, Zacatecas, Zacatecas.

juanluiscc9@gmail.com

### **Resumen**

La aplicación de los sensores remotos facilita la interpretación y análisis de grandes áreas del territorio en relativamente poco tiempo. En este trabajo se realizó el procesamiento e interpretación de lineamientos estructurales de una imagen Landsat 7 ETM+ (Path 030, Row 045) del 30 de octubre de 2001, de la parte centro-occidental del estado de Nayarit, México con los programas QGIS y SAGA. Se aplicó la composición de colores en los diferentes canales RGB (432 y 754) y también se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) a 6 bandas del sensor (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta-1 e infrarrojo de onda corta-2) y el filtrado direccional del primer resultado del Análisis de Componentes Principales (ACP1). El objetivo de este procesamiento fue resaltar los rasgos lineales del terreno que pudieran estar asociados con lineamientos estructurales. Como resultado de este análisis se obtuvo una rosa de fracturas en la cual se observó una dirección preferente NW-SE. Los lineamientos interpretados se pueden asociar al origen y desarrollo del Graben Tepic-Zacoalco, en el límite NW del Bloque Jalisco y aportan una mejor definición de estructuras que no estaban definidas en mapas regionales anteriores.

**Palabras clave:** Sensores remotos, lineamientos estructurales, software libre, QGIS, SAGA.

### **Abstract**

Remote sensing analyses permit the study of large areas in a short time and simplify the selection of target zones for detailed exploration. Spatial analysis with commercial software is usually expensive (*e.g.* ArcGIS). In recent years, free software like "Quantum Geographic Information System" (QGIS) and "System for Automated Geoscientific Analyses" (SAGA), are competitive for analytic purposes and for their displaying capabilities. Both software are useful for the analysis and interpretation of satellite Landsat 7 ETM+ and Digital Terrain Model (DTM).

We used the QGIS and SAGA software to analyze and interpret structural lineaments from a Landsat 7 ETM+ image (Path 030, Row 045 of October 30<sup>th</sup>, 2001) of the West-Central part of Nayarit, Mexico. We used the composite color bands in RGB together with Principal Component Analysis (PCA) of six bands (Blue, Green, Red, Near Infrared, Short-wave infrared-1 and Short-wave infrared-2). The final map show a NW-SE main trend of structural lineaments which are oriented parallel to the NW edge of the Jalisco block. It is proposed that they were formed during the evolution of the Tepic-Zacoalco graben.

**Keywords:** Remote sensing, structural lineaments, free software, QGIS, SAGA

## Introducción

En años recientes se ha vuelto común el uso de software libre para el procesamiento de imágenes digitales. Dicho software cada día tiene mayor capacidad de análisis, edición e intercambio de información con software comercial, además de facilitar la enseñanza de metodologías para el procesamiento de imágenes de satélite porque es accesible a cualquier persona o institución. El análisis espacial se puede realizar con Sistemas de Información Geográfica comerciales cuyo costo es elevado (*p. ejem.* ArcGIS). En años recientes, el desarrollo de software libre, como “Quantum Geographic Information System (QGIS)” y “System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)”, compiten con los programas comerciales en la capacidad de análisis y en la forma de desplegar la información. Estos programas proporcionan las herramientas para procesar e interpretar imágenes Landsat 7 ETM+ y Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Una de las grandes ventajas de la percepción remota se debe a que facilita explorar grandes áreas en poco tiempo porque el procesamiento de las imágenes puede resaltar rasgos geológicos superficiales, en particular, los rectilíneos asociados con fallas o sistemas de fractura. Las fallas son superficies a lo largo de las cuales ha habido desplazamiento, por lo que los bloques afectados pueden poner en contacto unidades litológicas con características físicas diferentes. La traza de un plano de falla, aunque no sea visible por estar cubierto por vegetación o suelo, puede inferirse a partir de las tendencias lineales en la morfología o por contrastes en la tonalidad de las superficies, o el tipo de vegetación.

El área de estudio está delimitada por las coordenadas geográficas extremas 21°44'59.8" N, 105°30'1.1"W y 21°15'0.8"N, 104°44'59.8"W que corresponden a un sector del occidente y centro del estado de Nayarit (Figura 1). En esta región hay una deformación activa por la interacción entre las placas Rivera y Norteamérica, a la que incluso se ha asociado el desarrollo del graben Tepic-Zacoalco, que es el límite norte del bloque Jalisco (Ferrari et al. 2013). Más que discutir sobre la historia tectónica de la región, o sobre el origen

de las fallas, el objetivo de este trabajo es proponer una forma alternativa de identificar estructuras asociadas con el fenómeno de fallamiento a partir de imágenes de satélite.

Se realizó la interpretación, procesamiento y análisis de lineamientos estructurales de una imagen Landsat 7 ETM+ (Path 030, Row 045) del 30 de octubre de 2001, utilizando los criterios definidos por Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma (1995), Amri et al. (2011) y Ehsan (2012), los cuales consisten básicamente en aplicar filtros direccionales que son definidos en forma matricial. Los resultados obtenidos a partir de los filtros direccionales se compararon con los datos estructurales reportados en la literatura geológica, los cuales fueron obtenidos a partir de la cartografía de campo, o interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

## Fallas regionales

El área de estudio tiene una historia tectónica compleja y la edad de la deformación y las estructuras asociadas aún es materia de debate (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 2013). Los rasgos estructurales de la región son el resultado de eventos tectónicos a los que se puede asociar la apertura del Golfo de California y separación de la península de Baja California del macizo continental de México y, en consecuencia, el desarrollo del bloque Jalisco y los graben que lo limitan (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 2013). En los estudios estructurales hechos en el graben de Tepic-Zacoalco y en el estado de Nayarit por Nieto et al. (1985), Ferrari et al. (1994 y 2013) y Duque-Trujillo et al. (2014) se han identificado tres tendencias preferentes de fallas. La deformación más antigua es probablemente de finales del Oligoceno o principios del Mioceno y formó fallas normales cuya orientación varía de N-S a NNE-SSW (Duque-Trujillo et al. 2014). Esta tendencia se observa en el oriente del estado de Nayarit (Ferrari et al. 2013; Duque-Trujillo et al. 2014) y continúa hasta cerca de Tequila, Jalisco, aunque en esta última zona no representa la orientación dominante (Nieto et al. 1985). La segunda etapa de deformación se considera del Mioceno Temprano a

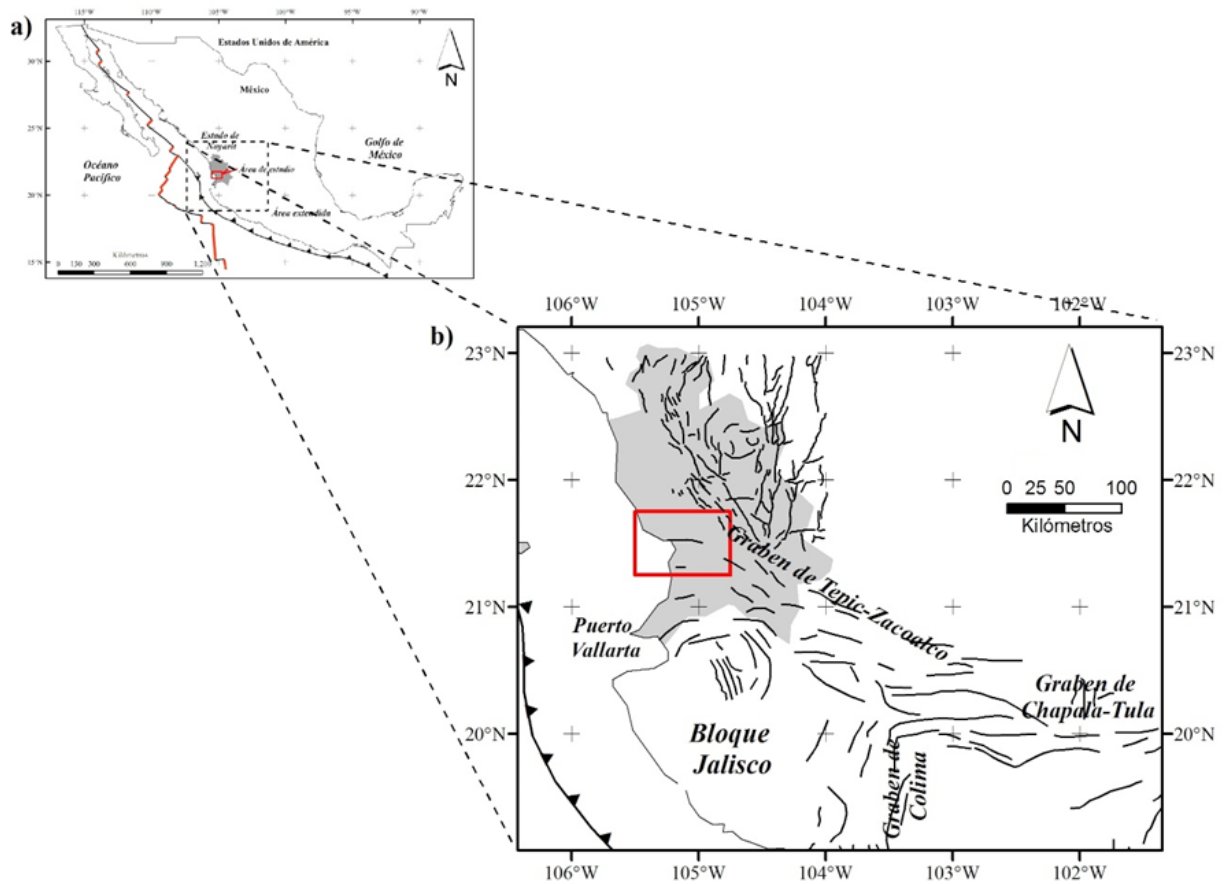


Figura 1. Ubicación del área de estudio (rectángulo rojo). a) Estado de Nayarit (gris), área de estudio y rasgos tectónicos principales. b) Acercamiento al área de estudio con los rasgos estructurales regionales tomados de Ferrari et al. (2003) y de Rutz-López y Núñez-Cornú (2011).

Medio (Duque-Trujillo et al. 2014), y se caracteriza por el desarrollo de fallas normales con orientación preferente NW-SE que es la tendencia dominante en la mayor parte del estado de Nayarit y en el graben de Tepic-Zacoalco (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). La última etapa de deformación es del Mioceno Tardío (Duque-Trujillo et al., 2014) o posiblemente del Plio-Cuaternario (Ferrari et al. 1994), a la que se atribuye la formación de fallas oblicuas y de desplazamiento lateral orientadas E-W y NE-SW.

En síntesis, hay cuatro tendencias preferentes de fallas: N-S a NNW-SSE, NW-SE, E-W y NE-SW, las cuales han sido identificadas a partir de trabajo de campo (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014).

## Metodología

La imagen del 30 de octubre de 2001 fue descargada de la página Earth explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). De la imagen se seleccionó esta área con la intención de correlacionar la sismicidad poco profunda asociada al rift Tepic-Zacoalco, del que se compilaron y procesaron sus rasgos estructurales siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

## Composición RGB

Al modelo digital del terreno (MDT) se le agregaron distintas composiciones RGB (Rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés). La primera fue la 432 en

falso color para resaltar la vegetación en tonos de rojo y las áreas urbanas en cian (Figura 2a) (Fernández-Coppel y Herrero-Llorente, 2001). La composición 754 (Figura 2b) permite visualizar mejor el terreno porque no incluye las bandas visibles.

### Filtrado de las imágenes

Los filtros espaciales que se utilizaron en el procesamiento de las imágenes de satélite tienen como objetivo resaltar rasgos lineales de la morfología. El procesamiento resalta rasgos que no son solamente naturales sino también antropogénicos (p. ejem. líneas de transmisión de electricidad, cultivos, etcétera). Por ello, es necesario conocer la infraestructura y áreas agrícolas de la región y así distinguirlas de los rasgos geológicos.

El filtrado se realizó por medio de una convolución espacial del tipo Prewitt (Aldalur y Santamaría, 2002). Tanto Fernández de la Vega-Márquez et al. (2001) como Aldalur y Santamaría (2002) utilizaron los filtros Prewitt para definir componentes direccionales usando algoritmos de convolución. De esta manera se pudieron resaltar bordes y segmentos de líneas de los que son perpendiculares al kernel (matriz móvil con un número impar de valores en cada dimensión) aplicado. Debido a que hay cuatro tendencias preferentes de orientación de lineamientos, las máscaras de convolución utilizadas fueron:

$$N-S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E-W = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$NW-SE = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad NE-SW = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Además, en el Análisis de las Componentes Principales (ACP) se aplicó la metodología propuesta por Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma (1995). El ACP se aplicó a seis bandas espectrales (Thematic Mapper) y se excluyó la banda 6 por ser banda térmica (Tabla 1). El ACP permite reducir la cantidad de información de los datos originales porque la

mayor parte de la información se concentra en las componentes principales (ACP1 a ACP6; Tabla 1) (Mehl y Peinado, 1997). El ACP se realizó con el *plugin PCA (Principal Component Analysis* por sus siglas en inglés) para QGIS ver. 2.8.2 (Figura 3) (Stravos, 2014).

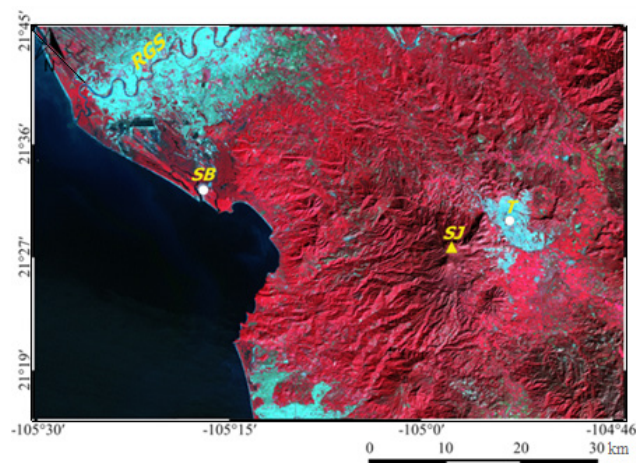


Figura 2a) Composición RGB 432 con el MDT superpuesto en donde destaca la abundante vegetación (rojo) y tonos de azul intenso en zonas urbanas.

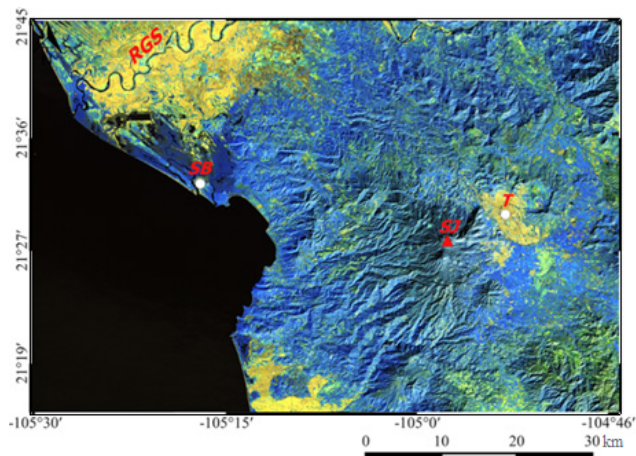


Figura 2b) Composición RGB 754 con MDT superpuesto. En esta composición la vegetación cambia a tonos de azul, mientras que las áreas urbanas están con los tonos de amarillo más claro. T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=volcán San Juan..

Tabla 1. Estadísticas del análisis de componentes principales. Las abreviaturas son: Cov.=Covarianza, PC= Componente Principal y TM= Banda Temática del Sensor Landsat.

|                       |        |       |       |        |       |       |
|-----------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Matriz de correlación | TM1    | TM2   | TM3   | TM4    | TM5   | TM7   |
| TM1                   | 1      | 0.811 | 0.806 | -0.111 | 0.323 | 0.614 |
| TM2                   | 0.811  | 1     | 0.947 | 0.382  | 0.745 | 0.873 |
| TM3                   | 0.806  | 0.947 | 1     | 0.246  | 0.725 | 0.92  |
| TM4                   | -0.111 | 0.382 | 0.246 | 1      | 0.765 | 0.452 |
| TM5                   | 0.323  | 0.745 | 0.725 | 0.765  | 1     | 0.895 |
| TM7                   | 0.614  | 0.873 | 0.92  | 0.452  | 0.895 | 1     |
|                       | APC1   | APC2  | APC3  | APC4   | APC5  | APC6  |
| Cov. Eigenvalores     | 4.29   | 1.381 | 0.236 | 0.059  | 0.022 | 0.013 |
| Suma de Eigenvalores  | 4.29   | 5.671 | 5.907 | 5.965  | 5.987 | 6     |
| Porcentajes (%)       | 71.5   | 23    | 3.9   | 1      | 0.4   | 0.2   |

Abreviaturas: Cov.=Covarianza, PC= Componente Principal y TM= Banda Temática del Sensor Landsat.

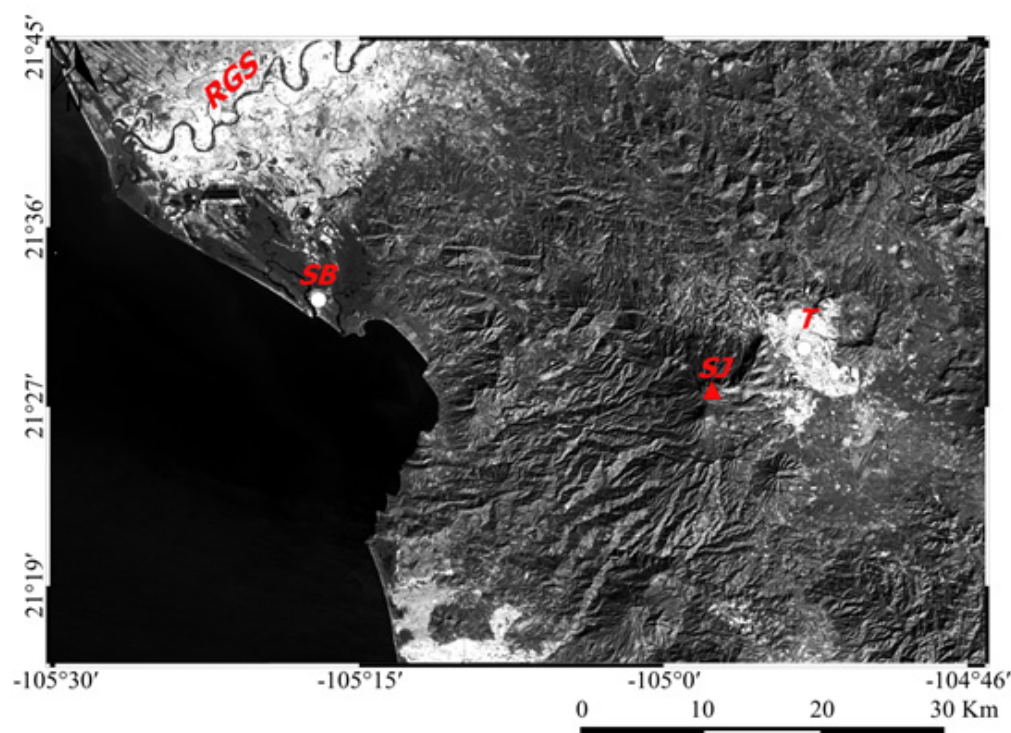


Figura 3. Resultado del ACP denominada imagen ACP1, utilizada para procesamientos posteriores ya que concentra el 71.5% de la información de la imagen original, en contraste con las otras pruebas (Tabla 1). T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=San Juan.

El Primer Análisis de Componentes Principales (ACP1) concentra el 71.5 % de la información de la imagen original, razón por la que se utilizó para la aplicación de los filtros subsecuentes. El primero fue un filtro pasa-bajas para reducir el ruido provocado por las altas frecuencias. A la imagen resultante se le aplicó un filtro direccional y nuevamente un filtro pasa-bajas para eliminar el ruido provocado por la convolución direccional (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995). Todos los filtros se realizaron con la herramienta Simple Filter de SAGA GIS del programa QGIS. En los filtros se ingresaron los valores de las máscaras de convolución que permitieron filtrar las imágenes en las direcciones NS, E-W, NE-SW y NW-SE.

El último paso consistió en agregar a las imágenes filtradas una composición RGB (Amri et al. 2011). En el canal R (rojo) se colocó el filtro NW-SE, en el G (verde) el N-S y en el B (azul) el filtro NE-SW (Figura 4). Los lineamientos estructurales interpretados se muestran en la Figura 5, los cuales se ponderaron tomando en cuenta el tamaño del menor de ellos que es de 1.5 km y, a partir de esa longitud, se hizo una retícula con cuadros de 1.5 km de lado. De esa forma se contaron los lineamientos y se midió la orientación de los lineamientos interpretados. En total, se midieron 580 azimuts con los que se hizo el diagrama de rosa de la Figura 5.b en el programa *GeoRose* de *Young Technology* (2015).

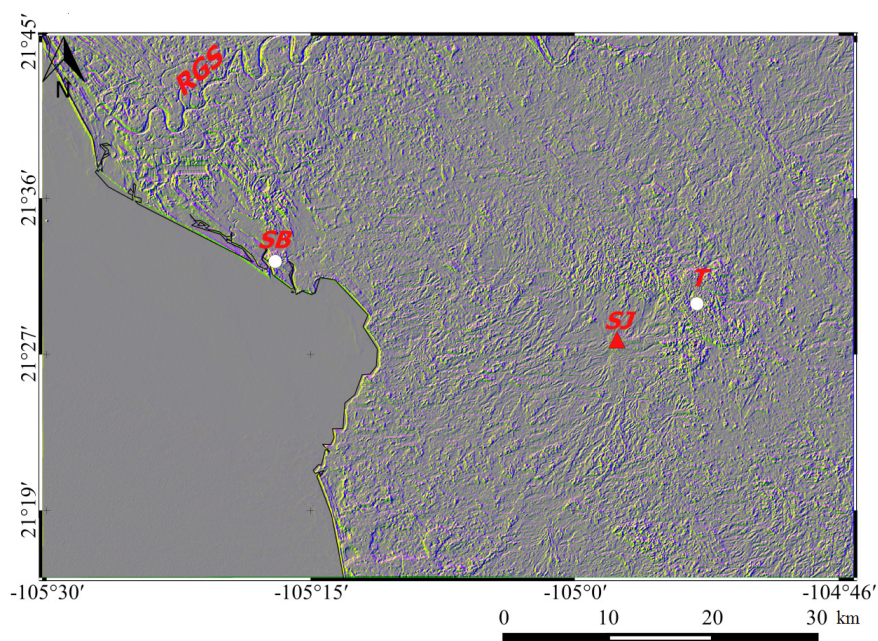


Figura 4. Imagen RGB con el filtrado direccional: R (NW-SE), G (N-S) y B (NE-SW). Los filtros resaltan los principales lineamientos estructurales del área de estudio. T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=San Juan.

## Discusión y conclusiones

El filtrado direccional de las imágenes tipo Landsat es una herramienta útil para resaltar los lineamientos estructurales con distintos tipos de cobertura vegetal, suelo y geología (p.ejem. Cengiz et al. 2006; Solomon y Ghebreab, 2006; Meshkani et al. 2013). La orientación y distribución de los lineamientos estructurales interpretados a partir del procesamiento de imágenes de satélite es paralela a las fallas y fracturas reportadas en artículos científicos (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). El procesamiento digital resalta los lineamientos estructurales cuando éstos tienen una expresión morfológica.

En el área de estudio los lineamientos estructurales interpretados están asociados con fallas o fracturas cuya orientación preferente es NW-SE. En menor proporción se observan tendencias hacia el E-W, NE-SE y N-S a NNE-SSW, en ese orden de abundancia (Figura 5). Estas orientaciones preferentes son paralelas a las que se han descrito con diferentes niveles de detalle en el graben de Tepic-Zacoalco y en el estado de Nayarit (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). En estos trabajos las tendencias obtenidas son hacia el NW-SE, E-W, N-S y NE-SW y corresponden con fallas normales y, en menor proporción, de desplazamiento lateral formadas desde el Mioceno Tardío al Cuaternario (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994; Ferrari y Rosas-Elguera, 1999; Ferrari et al. 2003; Duque-Trujillo et al. 2014). En la Figura 1 se destaca que los dos lineamientos que aparecen en la parte central del recuadro se orientan E-W y difieren de la tendencia preferente  $295^{\circ} \pm 10^{\circ}$ . La tendencia es similar a la del Graben Tepic-Zacoalco y claramente difiere de la tendencia  $60^{\circ}$ - $75^{\circ}$  que se desarrolla hacia el oriente de Puerto Vallarta, así como de la tendencia NW ( $315^{\circ}$ ) que define el río Ameca en el límite norte del Bloque Jalisco. Los filtros direccionales utilizados en el procesamiento de la imagen resaltan las tendencias lineales de la morfología asociada con un patrón de

estructuras regionales que difiere de la tendencia E-W reportada anteriormente por Ferrari et al. (2003) y Rutz-López y Núñez-Cornú (2011), según se muestra en la Figura 1b.

## Referencias

- Amri, K., Yamina, M., Lazha, G., 2011, Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine area (Tahifet-Central Hoggar, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 4, p. 1273-1287.
- Aldalur, B., Santamaría, M., 2002, Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, v. 17, p. 31-42.
- Cengiz, O., Sener, E., Yagmurlu, F., 2006, A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isapata, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 27, p. 155-163.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Norini, G., López-Martínez, M., 2014, Miocene faulting in the southwestern Sierra Madre Occidental, Nayarit, Mexico: kinematics and segmentation during the initial rifting of the southern Gulf of California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 31, p. 283-302.
- Ehsan, G., 2012, Investigation of lineaments in Tehran province on the basis of remote sensing techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, v. 3, p. 339-350.
- Fernández-Coppel, I.A., Herrero-Llorente, E., 2001, El satélite Landsat: Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Universidad de Valladolid, España, 37 pp.
- Fernández-de la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R.M., Orozco, G., 2001, Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). *Geofísica Internacional*, v. 40, p. 147-162.
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Castillo, D., Romero, F., 1994, Regional tectonics of western Mexico and its implications for

- the northern boundary of the Jalisco block. *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 139-151.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013, Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, v. 9, p. 1161-1200.
- Mehl, H., Peinado, O., 1997, Fundamentos del procesamiento digital de imágenes. Reporte. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 24 pp.
- Meshkani, S.A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A., Sadeghi, M., 2013, Recognition of the regional lineaments of Iran: Using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 55, p. 48-63.
- Nieto, J., Delgado, L., Damon, P.E., 1985, Geochronologic, petrologic, and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 623-663.
- Ruiz-Armenta, J.R., Prol-Ledesma, R.M., 1995, Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física de la Tierra*, v. 7, p. 105-137.
- Solomon, S., Ghebreab, W., 2006, Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*, v. 46, p. 371-378.

Recepción del manuscrito: 9 de mayo de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 10 de agosto de 2016

Aceptación: 6 de septiembre de 2016