
“Detección automática de alineamientos geológicos utilizando imágenes satelitales, un aporte a la geo exploración y zonificación de amenaza natural, Mérida, Venezuela”

“Automatic detection of geological alignments using satellite images and DEM, a contribution to geo exploration and natural hazard zoning, Mérida, Venezuela.”

Gutiérrez Julian*, Osorio Ramón, Andrades Jesús****

Recibido: 03/08/2013/

Aceptado: 08/08/2013

Resumen

Los alineamientos geológicos son una de las principales características de la corteza terrestre que interesan a los geocientíficos identificar y evaluar. Son elementos que reflejan las zonas de esfuerzos geotectónicos, indicadores de zonas de fracturación que influyen la prospección petrolera, gasífera e hidrogeológica, e igualmente indicadores para identificar zonas propensas a movimientos en masa. En este estudio se exploran diferentes técnicas geomáticas para su detección automática, a través de procesamiento digital de imágenes satelitales, para identificar alineamientos que reflejen fenómenos geológicos subsuperficiales, como fallas y diaclasas. El área de estudio, eje Mérida-Mucurubá, es atravesada por el sistema de fallas de Boconó, elemento estructural de importancia en el país. Se experimenta con filtros digitales, Sobel, Laplaciano, así como direccionales. Los filtros espaciales direccionales fueron diseñados para evaluar, mediante el proceso de convolución espacial, alineamientos en direcciones N-S, E-W, NW-SE, NE-SW. Se sumaron las imágenes resultantes de los anteriores filtros, para conocer las orientaciones en todas las direcciones, se les calculó la Roseta de Alineamientos, y se compararon con las orientaciones generadas a partir de los alineamientos geológicos, presentes en el mapa geológico existente. Predominando un patrón general de orientación NE45°SW. Los resultados confirman la utilidad de la detección automática de alineamientos, sobre imágenes satelitales.

* Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Vía Chorros de Milla, Mérida, Edo. Mérida. **email: Jgutie@ula.ve**

** Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Vía Chorros de Milla, Mérida, Edo. Mérida.

Palabras claves: Alineamientos geológicos, Detección automática, Filtros espaciales direccionales, Procesamiento digital de imágenes satelitales, Sistema de Falla de Boconó, Mérida-Venezuela.

Abstract

Geological alignments are one of the main features of the earth's crust that interest to identify and evaluate by geoscientists. They are both elements that reflect geotectonic efforts zones as indicators of fracturing areas affecting oil, gas and hydrogeological survey, and also as indicators to identify landslide prone areas. In this study various geomatics techniques, digital processing of satellite images of the study area, are explored to automatically identify alignments that reflect subsurface geological events, faults and joints. The study area, axis Mérida-Mucurubá is crossed by the Boconó fault system, important structural element in the country. We experimented with digital filters, Sobel, Laplacian and directional. The directional spatial filters were designed to evaluate, through the process of spatial convolution alignments in NS, EW, NW-SE, NE-SW directions. Resulting images of previous filters were added for guidance in all directions; it was calculated the Rosetta Alignments and then compared with those generated orientations from geological alignments present in the existing geological map. A general pattern of predominantly NE45°SW orientation was detected. The results confirm the usefulness of the automatic detection of alignments on satellite images.

Keywords. Geological alignments, automatic detection, Directional spatial filters, Digital Processing of Satellite images, Boconó fault system, Mérida Venezuela.

Introducción

Los alineamientos geológicos son una de las principales características de la corteza terrestre que interesan a los geocientíficos identificar y evaluar. De acuerdo a Mather (1987) los alineamientos geológicos, son definidos como "características mapeables, simples o compuestas, cuyas partes están alineadas o relacionadas de forma ligeramente curvilínea, que difieren distintivamente del patrón de características adyacentes, y que presumiblemente pueden reflejar un fenómeno subsuperficial". Igualmente, Prost (2001) afirma que los alineamientos se asumen como evidencia de fracturas, y

pueden indicar zonas de porosidad incrementada, de bordes de bloques levantados, trampas de falla, pliegues superpuestos, venas mineralizadas, zonas de cizallamiento, o límites de reservorios de petróleo y gas (Prabaharan *et al.*, (2013); Marghany 2012; Arafat *et al.*, (2010); Marghany *et al.*, (2009), Arafat *et al.*, (2010), así mismo, un fracturamiento denso puede revelar la zona de mayor curvatura de un pliegue. Según Argialas, *et al.*, (2001) el mapeo de alineamientos geológicos es considerado un asunto importante para resolver problemas de ingeniería, especialmente, en la selección de sitios para construcción de presas, puentes, carreteras, etc., evaluación de riesgo sísmico y movimientos en masa, exploración minera, detección de aguas termales, investigación hidrogeológica (Elmahdy y Mohamed (2012); Marghany (2012); Mallast *et al.*, (2011); Hung *et al.*, (2005)). En cuanto a la zonificación de amenaza a deslizamientos, la cobertura de alineamientos geológicos, que reflejan la presencia de fallas y diaclasas, forman parte del modelaje de tal fenómeno, una zona muy fracturada es indicativo de potencial sismicidad, producto de esfuerzos tectónicos, igualmente, rocas muy fracturadas son un factor a tomar en cuenta para evaluar la amenaza de movimientos en masa (Rutzinger *et al.*, (2007); Ayalew y Yamagishi (2005); Ölgün (2004); Argialas *et al.*, 2001; Phillip, (1996).

Varios autores han investigado cómo detectar automáticamente diferentes alineamientos, como la expresión de sistemas de fallas y diaclasas, así como su orientación principal, es decir Geología Estructural, se puede revisar a Abdullah *et al.*, (2013); Ghazi (2013); Aboyeji *et al.*, (2012); Ehsan (2012); Marchioni y Cavayas (2010); Marghany y Hashim (2010); Kavak y Cetin (2007); Argialas y Mavrantza (2003); Madani (2001); Casas *et al.*, (2000); Tripathi *et al.*, (2000); Wladis (1999); Arlegui y Soriano (1998); Sützen y Topak (1998); Karniell *et al.*, (1996); Mah *et al.*, (1995); Rowan y Bowers (1995); Qari (1991). Entonces, la detección automática de alineamientos geológicos es útil tanto para la exploración geológica (hidrocarburos, aguas subterráneas), como para la zonificación de amenazas naturales (sísmica, movimientos en masa); los diferentes autores y trabajos revisados, que investigan sobre la detección de alineamientos geológicos, confirman lo anterior.

El propósito de este estudio fue explorar técnicas geomáticas para la identificación de estructuras geológicas, específicamente

alineamientos, mediante la interpretación visual y el procesamiento digital, explorando técnicas como Filtros Laplaciano, Sobel y Direccionales, sobre imágenes satelitales LandsatTM+®, así como la utilización del Modelo Digital del Terreno (MDT) del área de estudio, con el fin de verificar qué tanto se corresponden los alineamientos generados mediante las anteriores técnicas con los alineamientos de los mapas geológicos existentes y la realidad topográfica de la zona, y confirmar, de esta manera, la efectividad de las técnicas en la generación/identificación de tales alineamientos, y de ser posible mejorarlos con la identificación de otros alineamientos en el área. Los alineamientos en un Modelo Digital del Terreno son definidos por una caída en la elevación en una distancia corta, de allí que un alineamiento puede ser descrito por una cierta frecuencia en términos de su representación en el MDT, Wladis (1999). Una vez hecha la revisión respectiva no se encontraron, en nuestro país, mapas geológicos que aprovecharan estas técnicas para su elaboración, además, las mismas permiten procesar grandes superficies, de forma rápida y efectiva.

Materiales y Métodos

- Área de estudio

El área de estudio fue seleccionada, además de la cercanía que permiten las observaciones en campo, por los siguientes factores: 1) es un área geológicamente activa, con estructuras geológicas ya conocidas, como el sistema de Fallas de Boconó; 2) presenta contrastes topográficos que permiten resaltar, comparar y evaluar los alineamientos ya conocidos y los generados en este estudio. La misma está restringida a un bloque perpendicular de aproximadamente 20 km de ancho x 17 km de alto, abarcando un eje de orientación SW-NE que coincide con parte de la cuenca media del río Chama y gran parte de la Cuenca del río Mucujún, edo. Mérida, eje que incluye en su extensión las poblaciones de Mérida, Tabay, Cacute, y Mucurubá, entre las coordenadas 262.000E y 282.000E, y 944.000N y 964.700N, (Figuras 1 y 2). Se caracteriza por un relieve abrupto, de montaña, valles fluviales y glaciales, pendientes fuertes, y algunas áreas de deposición. Con un Clima que se caracteriza por temperaturas que oscilan entre los 10 y los 26 C°, y un regimen de precipitaciones de 2 temporadas, una seca de diciembre a abril y otra de lluvias de mayo a noviembre.

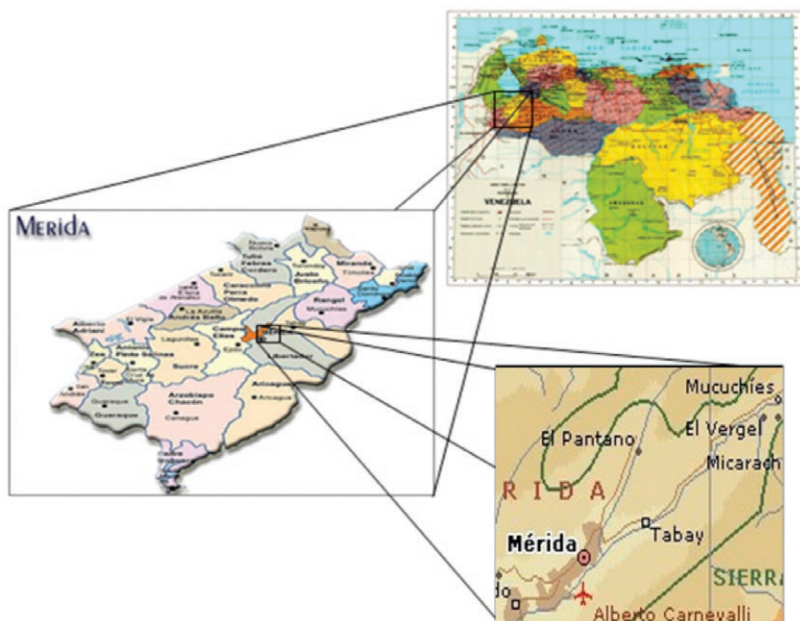


Figura 1.- Localización del área de estudio.

Fuente: elaboración propia

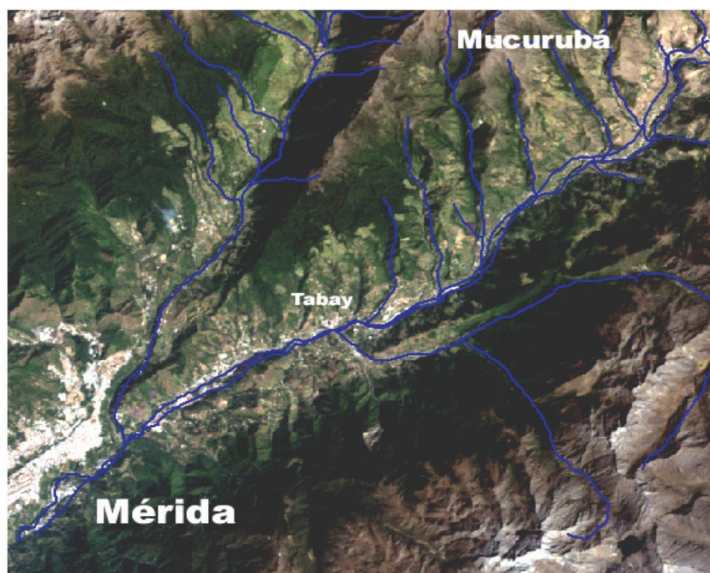


Figura 2.- Mapa-Imagen satelital, en verdadero color del área de estudio con hidrografía superpuesta.

Fuente: elaboración propia.

El área de estudio se encuentra geográficamente en el ramal septentrional de la Cordillera de Los Andes, la cual está conformada por la Sierra de La Culata y por la Sierra Nevada de Mérida, ambas sierras limitan nuestra área de estudio por el norte y por el sur respectivamente. Con altitudes que varían desde los 1.500 msnm hasta los 4.000 msnm, con un relieve montañoso escarpado en la zonas altas, de denudación, y con áreas planas, de deposición, que se ubican en los fondos de valle. Ambas cordilleras están separadas por el graben del río Chama, este río está controlado estructuralmente por la falla de Boconó, el cual es el principal sistema estructural del occidente de Venezuela, con una orientación aproximada N45°E. Se incluye además en nuestra área de estudio buena parte de la cuenca del río Mucujún, el cual drena sus aguas al río Chama.

De acuerdo a Carlini y Vera (2004) el rasgo tectónico más importante de los Andes venezolanos, es la zona (sistema) de falla de Boconó. Estas fallas representan una magnífica expresión topográfica con valles y depresiones lineales, escarpes, fosas, drenajes desplazados y rocas profundamente tectonizadas, con una anchura de 1 a 5 km, y con un rumbo aproximado de N45°E. En la cordillera de Mérida y de manera especial a lo largo de la falla de Boconó, es donde se han reportado las manifestaciones principales de la actividad tectónica cuaternaria venezolana, tanto en lo relativo a sus expresiones morfológicas más conspicuas, como a los movimientos sísmicos que frecuentemente afectan al territorio nacional.

Schubert (1992) en Carlini y Vera (2004), hace referencia a algunos rasgos morfológicos presentes a lo largo de esta estructura como son: escarpes de falla, lomas, depresiones angostas con lagunas, valles rectilíneos, trincheras de falla, ensilladuras en pasos de montañas, y zonas de roca triturada. Además, hace referencia a los siguientes rasgos: valles alineados con depresiones en forma de trinchera, como el del río Chama, conos aluviales, lagunas, lomas y trincheras de falla, así como desplazamiento de rumbo hacia la derecha de lechos de quebradas.

La sismicidad del área, según criterios históricos y datos

geofísicos recientes, muestra una actividad extremadamente alta y la misma se refleja en el intenso fallamiento local. La gran mayoría de las fallas reconocidas dentro y en las cercanías inmediatas parecen ser activas. Las mismas siguen el patrón general N45°E, y se disponen a manera de escalones paralelos entre sí. La interacción de fallas menores, pero de alto riesgo para Mérida pueden ser indicativos de estructuras de ajuste; son especialmente las fallas de Las Tapias (rumbo NO), San Jacinto y El Teleférico (rumbo NE). Otras fallas más importantes del área son las siguientes: falla del Albarregas, falla de Jají, falla del Chama, falla de La Hechicera y falla del Mucujún.

- Materiales

En este estudio se utilizó la imagen Landsat TM + ®, Paso/Fila 006054, del año 2001, de la misma se extrajo mediante técnicas digitales una subimagen que abarca la zona en estudio. La fuente para identificar los alineamientos geológicos conocidos fue el Mapa Geológico de la Región de Mérida (República de Venezuela, 1966). Se generó el MDT del área de estudio, mediante la digitalización de curvas de nivel a partir de hojas de Cartografía Nacional, a escala 1:100.000, para conocer la topografía, así como la hidrografía del área.

- Métodos

Es importante entender la naturaleza del procesamiento digital de imágenes en cuanto a su realce y mejora, en nuestro caso nos interesa resaltar los alineamientos, por lo que a continuación se exponen algunos conceptos relevantes.

Teoría sobre filtros.

Lo siguiente es tomado de Aldalur y Santamaría (2002). Una de las principales técnicas que componen el procesamiento digital de imágenes es la de realce o mejora de las mismas; esta técnica comprende un conjunto de operaciones tendientes a mejorar la calidad visual de una imagen, estas operaciones permiten

realzar las características de brillo y contraste, reducir su contenido de ruido, o agudizar o intensificar detalles presentes en ella. Las operaciones que componen la técnica de realce pueden dividirse en dos tipos: a) operaciones de procesamiento puntual o pixel por pixel, b) operaciones de procesamiento por grupo de píxeles o sobre vecindades; las operaciones del tipo b) mejoran el contraste espacial en la imagen, es decir, la diferencia entre el valor digital de brillo de un determinado pixel y el de sus vecinos. Pretenden suavizar o reforzar estos contrastes espaciales de forma tal que, los valores de brillo en cada pixel de la imagen se asemejen o diferencien más de los correspondientes a los píxeles que los rodean. En procesamiento digital de imágenes satelitales, las operaciones incluidas en a) se conocen como técnicas de realce radiométrico mientras que las incluidas en b), técnicas de realce geométrico.

El procesamiento por grupo de píxeles opera sobre un grupo de píxeles de entrada que circundan a un pixel central. Los píxeles vecinos proveen información valiosa sobre las tendencias del brillo en el área bajo procesamiento. El uso y análisis de estas tendencias del brillo en una imagen, motivan las operaciones de filtrado espacial. Todas las imágenes contienen detalles, algunos detalles marcados y otros detalles no tan marcados, estos detalles están compuestos por transiciones de brillo que varían en ciclos que van del oscuro al claro y vuelta al oscuro, la tasa a la cual el brillo varía completando un ciclo es su frecuencia espacial, las frecuencias espaciales pueden orientarse horizontalmente, verticalmente o en cualquiera de las diagonales. Una imagen está formada por componentes de frecuencia que varían de bajas frecuencias a altas frecuencias. Donde prevalecen transiciones rápidas de brillo, hay altas frecuencias espaciales, mientras que transiciones de brillo que cambian lentamente representan bajas frecuencias. Las altas frecuencias en una imagen aparecen toda vez que están presentes bordes abruptos o puntos, como una transición del blanco al negro dentro de uno o dos píxeles de distancia. Una imagen puede filtrarse para acentuar o eliminar una banda de frecuencias espaciales, tales como las altas frecuencias o las bajas frecuencias. Estas operaciones de procesamiento digital de imágenes se conocen

como operaciones de **filtrado espacial o filtros en el dominio del espacio**. Otras operaciones de filtrado espacial permiten resaltar solamente las transiciones abruptas en la imagen, tales como bordes de objetos. Estas constituyen un subconjunto de las operaciones de filtrado espacial y se conocen como *operaciones de realce de bordes*. Los realces de bordes son implementados a través de filtros espaciales. Los más utilizados son: desplazamiento y sustracción, filtros Laplacianos para bordes, gradiente de Prewitt, Roberts, Sobel y Kirsch. Igualmente, en referencia al realce de bordes, Gupta (2003) afirma que extrae las variaciones en valores de números digitales (DN) a lo largo de pixeles vecinos, o cambios de alta frecuencia espacial, también es llamado filtraje de paso alto o realce textural; una de las principales aplicaciones en investigación geológica del filtraje de paso alto es para realzar los sistemas lineales, para facilitar la interpretación de fracturas y juntas, entre otras.

Implementación de filtros espaciales lineales.

Los filtros espaciales se implementan mediante un proceso llamado **convolución espacial**, el proceso de convolución espacial se mueve a través de la imagen de entrada, pixel por pixel, ubicando los pixeles resultantes en la imagen de salida. El valor digital de brillo de cada pixel en la imagen de salida depende de un grupo de pixeles de entrada que rodean al pixel que se está procesando. Al utilizar la información del brillo de los pixeles vecinos a un pixel central, la convolución espacial calcula la actividad de frecuencia espacial en esa área, y por lo tanto, es capaz de filtrar en base al contenido de frecuencia espacial existente. El proceso de convolución espacial utiliza un promedio ponderado del pixel de entrada y de sus vecinos inmediatos para calcular el valor de brillo del pixel de salida. El grupo de pixeles utilizados en el cálculo del promedio ponderado se conoce como núcleo (**kernel**). El núcleo es una matriz móvil, generalmente cuadrada, con un número impar de valores en cada dimensión. Si la dimensión del núcleo es 1 x 1 se trata del procesamiento digital punto por punto; las dimensiones usuales en procesamiento por grupo son 3 x 3 y 5 x 5. Cuanto mayor es el tamaño del núcleo de pixeles que se emplea en el cálculo, más

grados de libertad posee el filtro espacial. Un cálculo de promedio ponderado es un proceso lineal puesto que involucra la suma de elementos multiplicados por valores constantes. En la convolución espacial los elementos son los valores digitales de brillo de los píxeles del núcleo y los valores constantes son los pesos, llamados *coeficientes de convolución*. Puede profundizarse más sobre el anterior aspecto en Aldalur y Santamaría (2002).

Si se considera un núcleo de píxeles de dimensión 3 x 3 y una máscara de convolución cuyos nueve coeficientes son:

<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>
<u>d</u>	<u>e</u>	<u>f</u>
<u>g</u>	<u>h</u>	<u>i</u>

entonces, la ecuación para el proceso de convolución espacial resulta:

$$O(x, y) = a I(x-1, y-1) + b I(x, y-1) + c I(x+1, y-1) + d I(x-1, y) + e I(x, y) + f I(x+1, y) + g I(x-1, y+1) + h I(x, y+1) + i I(x+1, y+1)$$

donde los prefijos I y O indican imagen de entrada e imagen de salida, respectivamente (Baxes, (1994), en Aldalur y Santamaría (2002)).

De acuerdo a Lillesand y Kiefer (1987) una técnica de realce orientada a enfatizar los bordes en imágenes es la Primera Diferencia Direccional, la cual es un procedimiento que sistemáticamente compara cada píxel en la imagen con los píxeles adyacentes inmediatamente vecinos, y despliega la diferencia en términos de escala de grises en una imagen de salida. Este proceso es matemáticamente análogo a determinar la primera derivativa de niveles de grises con respecto a una dirección dada. La dirección usada puede ser horizontal, vertical o diagonal. La primera diferencia horizontal de un determinado píxel A, resultaría de restarle el valor digital (DN: *Digital Number*) del píxel vecino H, Igualmente, la

primera diferencia vertical resultaría de restarle el valor digital (DN) del pixel V. La primera diferencia diagonal, resultaría de restarle el valor digital (DN) del pixel diagonal D.

A	H
V	D

1ra diferencia horizontal: DNA - DNH. 1ra diferencia vertical: DNA - DNV. 1ra diferencia diagonal: DNA - DND. La primera diferencia enfatiza aquellos bordes perpendiculares a la dirección de la diferencia (alineamientos verticales), y desenfatisa aquellos paralelos a la dirección de la diferencia. Por ejemplo, en una imagen producto de 1ra diferencia horizontal, los ejes verticales (alineamientos) resultarán en un gran cambio pixel a pixel en la escala de grises (resaltados); al contrario, en la imagen de 1ra diferencia vertical, tales ejes verticales resultarían casi nulos o invisibles, y los alineamientos horizontales resaltados. Otra forma de realce de bordes, se obtiene al sumar las imágenes resultantes de aplicar 2 filtros direccionales, uno en sentido esquina superior izquierda a esquina inferior derecha (\), y el otro, de la esquina superior derecha a la esquina inferior izquierda (□). Si se suman las 4 imágenes previas (bordes horizontales, verticales y diagonales), el resultado es una imagen que realza todos los bordes en la escena. Con los anteriores fundamentos se procedió a experimentar con las diferentes técnicas.

A continuación se describen las actividades y técnicas desarrolladas para lograr el objetivo del estudio. Inicialmente, se escaneó y georeferenció el mapa geológico (República de Venezuela (1966)) del área de estudio, se digitalizaron en pantalla los alineamientos presentes en el mapa (Figura 3). Mediante la identificación de las orientaciones de los mismos (Tabla 1), se les generó el respectivo Diagrama Rosa de los alineamientos conocidos (Figura 4). Un diagrama rosa, también llamados roseta de diaclasas, es un diagrama sencillo para visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras tabulares (diques, vetas) y de planos tectónicos (diaclasas, fallas), son usados para evaluar la distribución

de los alineamientos por dirección. Puede observarse el Diagrama Rosa de alineamientos del mapa geológico en la figura 4.

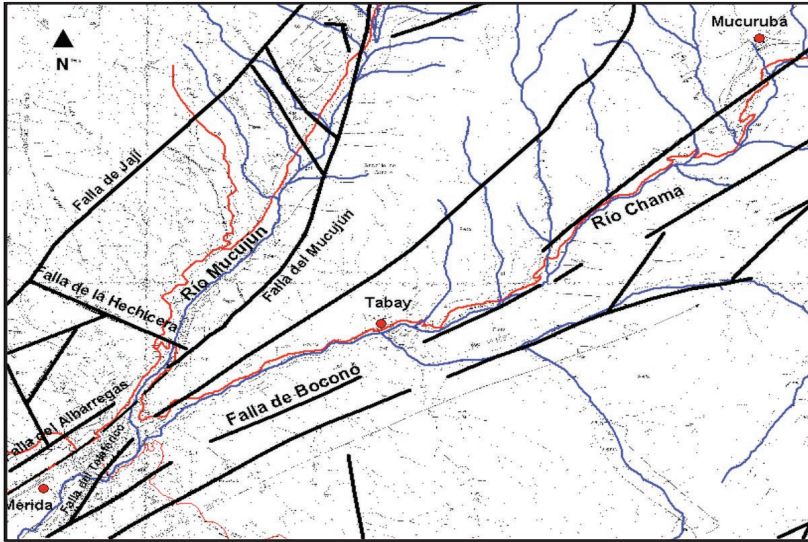


Figura 3.- Alineamientos geológicos presentes en el mapa existente
Fuente: Modificado de República de Venezuela (1966).

Tabla 1. Orientaciones de los alineamientos identificados en el mapa geológico del área de estudio.

Rangos	Cantidad de alineamientos	Longitud total (Km)
0-10°		
10-20°		
20-30°		
30-40°	3	8,4
40-50°	4	36,61
50-60°	11	45,11
60-70°	6	22,39
70-80°		
80-90°	1	0,5
90-100°		
100-110°		
110-120°	1	4,4
120-130°		
130-140°		
140-150°	2	4,2
150-160°	1	2,6
160-170°	1	0,8
170-180°	1	2,6
Total	32	127,61

Fuente: elaboración propia.

De la tabla 1 se puede extraer la siguiente información: de un total de 32 alineamientos, existen 3 alineamientos entre 20° y 40° , **15 entre 40° y 60°** , 6 entre 60° y 80° , 2 entre 80° y 120° , y 5 entre 140° y 180° , encontrándose la mayor cantidad de alineamientos en el rango 40° - 60° , correspondientes al **46,88%** del total de alineamientos observados, con un total de **81,62 Km de un total de 127,61 Km** de alineamientos, confirmando el patrón general aproximado **N45°E**, descrito en la bibliografía revisada y citada anteriormente.

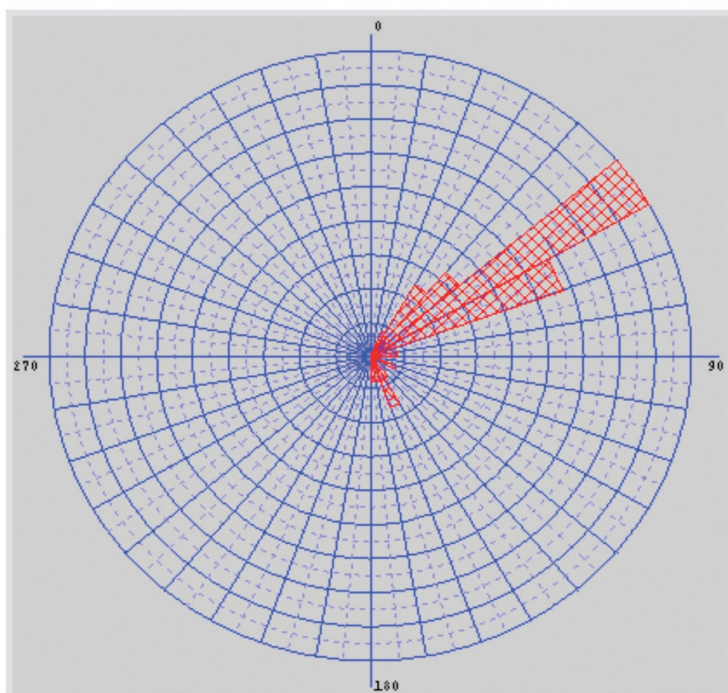


Figura 4. Diagrama Rosa de los alineamientos reflejados en el mapa existente.

Fuente: elaboración propia.

Los filtros direccionales tienen un diseño específico para cada dirección a evaluar, es decir, la matriz móvil o núcleo (Kernel) varía en sus coeficientes de convolución de acuerdo a las direcciones evaluadas, como fue explicado anteriormente. Puede verse su diseño

en la Tabla 2. Posteriormente, se le aplicaron diferentes filtros a la banda 5 (1.55 - 1.75 μm) de Landsat, seleccionada por su utilidad para el mapeo de litologías y estructuras geológicas según Argialas *et al.*, (2001), Kavak y Cetin (2007) y Abdullah *et al.*, (2013). Los filtros aplicados fueron Laplaciano, Sobel (Figura 5), y Direccionales.

Tabla 2. Diseño y coeficientes de los “kernels” en las 4 principales direcciones

N-S			NE-SW			E-W			NW-SE		
-1	0	1	-2	-1	0	-1	-2	-1	0	1	2
-2	0	2	-1	0	1	0	0	0	-1	0	1
-1	0	1	0	1	2	1	2	1	-2	-1	0

(Fuente: Ghazi, 2013).

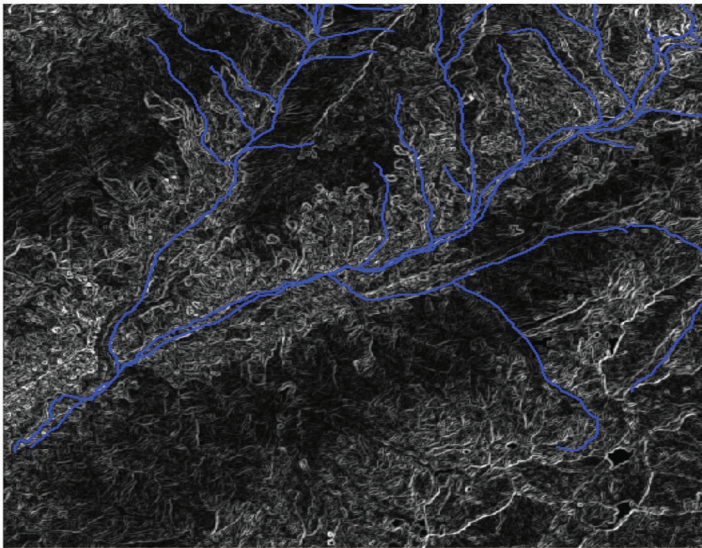


Figura 5. Resultado del filtro Sobel, alineamientos en blanco.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, mediante álgebra de mapas, se sumaron las imágenes resultantes de los anteriores filtros y se digitalizaron

en pantalla los alineamientos relevantes (Figura 6). Se procedió a la identificación de las orientaciones de los mismos (Tabla 3), y se les construyó el respectivo Diagrama Rosa a los alineamientos generados automáticamente con los filtros direccionales (Figura 7).

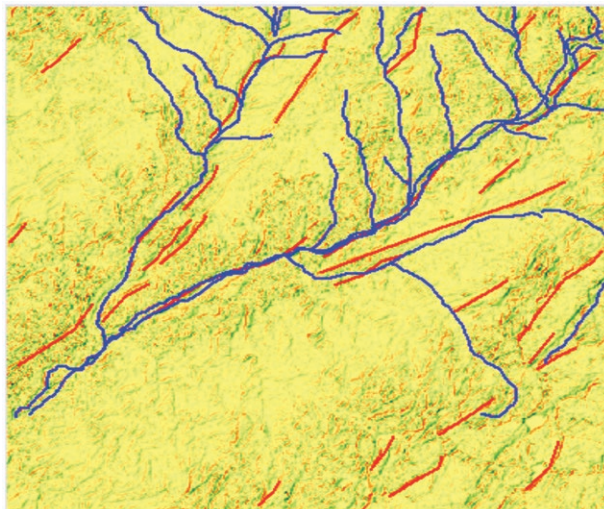


Figura 6. Digitalización en pantalla de los alineamientos (en rojo) detectados automáticamente.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Orientaciones de los alineamientos generados automáticamente.

Rangos	Cantidad de Alineamientos	Longitud total Km
0-10°		
10-20°		
20-30°	1	2,9
30-40°	11	29,8
40-50°	5	13,9
50-60°	8	18
60-70°	3	18
70-80°		
80-90°		
90-100°		
100-110°		
110-120°		
120-130°		
130-140°		
140-150°		
150-160°		
160-170°		
170-180°		
	28	82,6

Fuente: elaboración propia

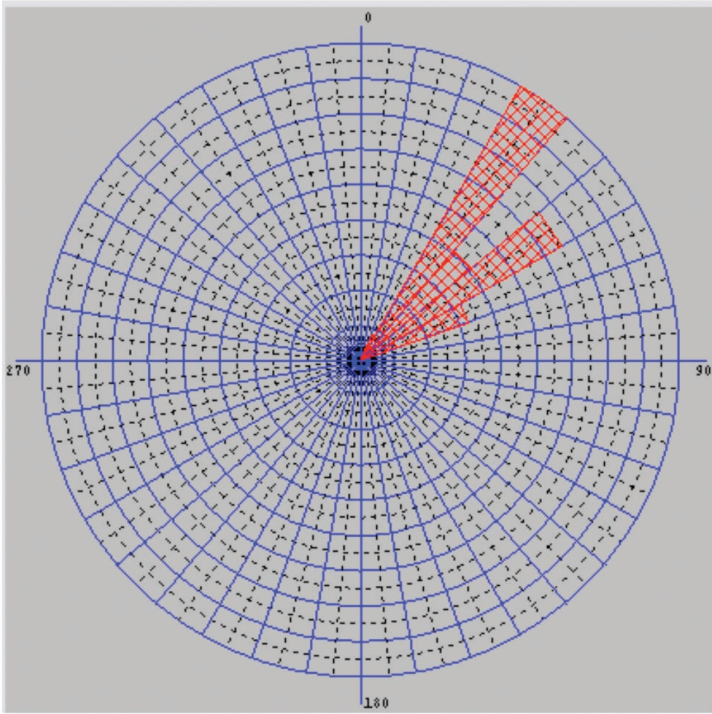


Figura 7. Diagrama Roseta de los alineamientos generados automáticamente con filtros direccionales.
Fuente: elaboración propia.

El MDT del área de estudio se construyó mediante la digitalización de curvas de nivel a partir de mapas de Cartografía Nacional a escala 1:100.000, el mismo se utilizó tanto para conocer la topografía del área como para contrastar visualmente los alineamientos generados automáticamente y los rasgos del terreno que se asocian a tales alineamientos, pueden revisarse ejemplos de su uso asociado a identificación de alineamientos en Wladis (1999), Argialas y Mavrantza (2003), Marghany *et al.*, (2009), Mallast *et al.*, (2011), Elmahdy y Mohamed (2012), Marghany (2012).

Resultados y discusión

Es importante resaltar que los alineamientos geológicos están controlados y son expresión, entre otros factores, tanto de la tectónica

de placas, cambios bruscos en pendientes (escarpes de fallas), como de cambios en unidades litológicas, además, pueden ser expresión de fondos de valles y divisorias de agua. El filtro Laplaciano generó un resultado muy pobre (por lo que no se incluye su figura), y el filtro **Sobel** generó resultados (Figura 6) que reflejan sobre todo las divisorias y cursos de agua, característica lineal importante en el área de estudio, así como algunos accidentes topográficos (bordes de precipicio y cambios fuertes de pendiente), resultado que concuerda parcialmente con lo realizado por Marchioni y Cavayas (2010), los cuales, en líneas generales, mediante la aplicación del filtro Sobel les dio un buen resultado para realzar las redes de drenaje.

Pueden observarse en la figura 7, producto de la suma de la aplicación de 4 filtros direccionales, los alineamientos generados automáticamente, con filtros direccionales en las 4 direcciones principales, N-S, E-W, NW-SE, y NE-SW, figuras que por razones de espacio no se incluyen. A los anteriores alineamientos se les generó el respectivo Diagrama Rosa (Figura 8), basados en las orientaciones identificadas (Tabla 3).

De la tabla anterior se puede extraer la siguiente información: de un total de 28 alineamientos, se observan 12 alineamientos entre 20° y 40° , **13 entre 40° y 60°** , 3 entre 60° y 70° , encontrándose la mayor cantidad de alineamientos en el rango **40° - 60° , correspondientes al 42,86% del total de alineamientos observados, con un total de 31,9 Km de un total de 82,6 Km de alineamientos**, confirmando el patrón general aproximado $N45^\circ E$, descrito en la bibliografía revisada.

Para disponer de una visualización más adecuada y poder comparar, se pueden observar en la figura 8, tanto los alineamientos extraídos del mapa geológico existente (amarillo), como los alineamientos generados automáticamente (en rojo). Haciendo un análisis visual de la figura 9, los alineamientos generados con filtros direccionales muestran concordancia en sus orientaciones tanto en la cuenca del río Mucujún como con la cuenca del río Chama, rangos que van entre 30° - 40° para los primeros y 40° - 50° para los segundos.

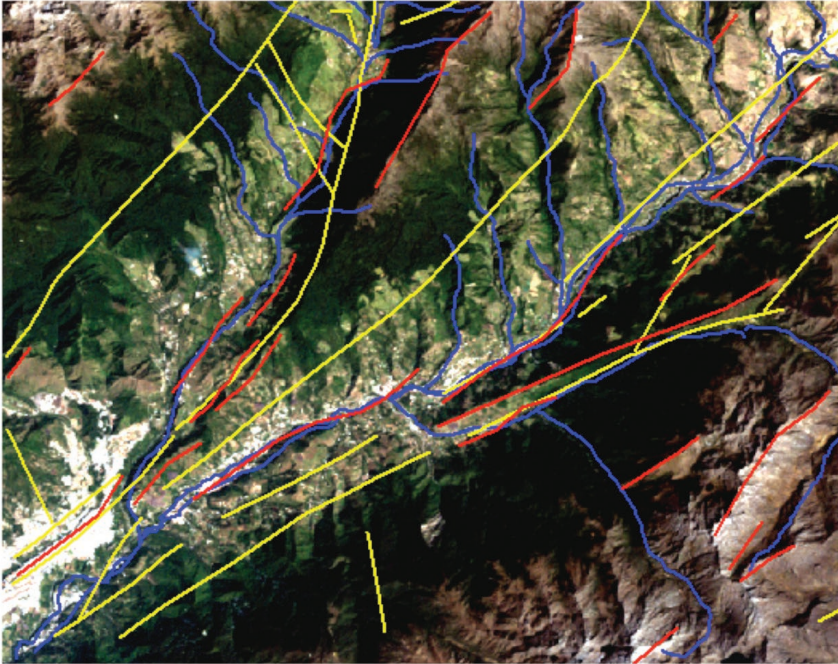


Figura 8. Subimagen satelital del área de estudio en Verdadero Color, con los alineamientos digitalizados a partir del mapa geológico existente (en amarillo), los alineamientos generados con filtros direccionales (en rojo), y la hidrografía superpuesta.

Fuente: elaboración propia

Los resultados evidencian una mayor cantidad de alineamientos en las direcciones predominantes, NE-SW, tanto del mapa geológico (realidad del área) como los generados con el procedimiento utilizado. Resultados similares obtuvieron Abdullah *et al.*, (2013), Ghazi (2013), Kavak y Cetin (2007), Mah *et al.*, (1995), y Qari (1991). Abdullah *et al.*, (2013) afirman que “los resultados muestran unas mayores orientaciones en sentido NE-SW, el patrón de los alineamientos extraídos de la imagen Landsat sugiere que algunas fallas pertenecientes a la zona de fallas fueron identificadas apropiadamente utilizando esta técnica en el área de estudio”. Ghazi (2013) afirma sobre sus resultados “1) los alineamientos en el área tienen 2 tendencias principales en las direcciones NE-SW y N-S, y una tendencia subordinada E-W y NW-SE; 2) el número total y longitud de los alineamientos están en la tendencia dominante

NE-SW; 3) la mayoría de las fallas y los alineamientos mayores están localizados muy cerca de las locaciones con altos valores de densidad de alineamientos, 4) el análisis geoespacial de los alineamientos dan una buena correspondencia con el arreglo de las fuerzas tectónicas del área de estudio”. Kavak y Cetin (2007), en un estudio localizado en la región Gölmarmara (Manisa), Turquía, afirman que “sus resultados iniciales indican que se ha desarrollado un extensivo sistema de alineamientos con tendencias NE y ENW. La mayoría de los alineamientos ENW-SSE están asociados con el fallamiento normal reciente conectado con el régimen extensional de Anatolia Occidental después del período Mioceno medio”. Igualmente, Mah *et al.*, (1995), en un análisis de alineamientos con borde resaltados de imágenes Landsat TM, de Palm Valley, Australia, definen un juego de alineamientos conjugado E-W, N-S, y NNW-SSE, NNE-SSW; la TM5 (banda de Landsat) filtrada NW-SE resaltó los alineamientos de tendencia NE-SW, NNE-SSW y ENE-WSW. Igualmente, construyeron una composición en color compuesto con TM4 filtrada N-S (azul), TM5 filtrada NW-SE (verde), y TM7 filtrada NE-SW (rojo); resultando que tanto las imágenes filtradas como la de color compuesto mostraron los alineamientos adecuadamente. Y Qari (1991), al aplicar un filtro de paso alto que enfatiza la frecuencias espaciales más altas, en el análisis de alineamientos se revelaron direcciones que pueden ser relacionadas con la tectónica regional del Escudo Árabe, en el área de estudio denominada Al-Khabt de 225 Km² dentro del cinturón Nabitah Mobile, Escudo (Shield) sur de Arabia.

Los alineamientos extraídos automáticamente con filtros direccionales coinciden con algunos rasgos topográficos presentes en el MDT, como fondos de valle y divisorias de agua. La generación automática de tales alineamientos permite planificar de forma más eficiente los trabajos de campo necesarios para confirmar la existencia de estructuras geológicas, límites de unidades litológicas, etc. Lo anterior es crucial en el análisis geológico de grandes superficies, ya que se pueden disminuir los costos asociados de las visitas al campo.

Conclusiones y recomendaciones

La extracción automática de alineamientos geológicos, utilizando imágenes Landsat TM+, mediante herramientas como los filtros direccionales, en las cuatro direcciones principales, demostró su utilidad en la identificación de características lineales asociadas a la geología estructural del área de estudio. Se evidenció una concordancia general de los alineamientos generados automáticamente con los reflejados en el mapa geológico existente. Igualmente, al generar los diagramas rosa tanto del mapa geológico existente como de los alineamientos extraídos automáticamente, se confirman las orientaciones principales de tales alineamientos, es decir, los segundos concuerdan con las orientaciones principales del mapa geológico disponible.

La técnica utilizada permite identificar de forma automática y rápida elementos lineales que reflejan características geológicas superficiales y subsuperficiales, permitiendo así planificar las actividades de campo para confirmar y documentar tales fenómenos geológicos, así como utilizarlos en la geoexploración, zonificación de amenazas naturales, como zonas de mayor actividad sísmica, y por lo tanto de mayor amenaza de deslizamientos.

Se recomienda desarrollar investigaciones que evalúen y comparen la utilidad de cada banda del Landsat en la identificación de alineamientos, así como la combinación y cocientes de las mismas, y las diferencias que pueda haber con su uso en diferentes ambientes geográficos.

La no coincidencia entre algunos de los alineamientos detectados automáticamente con los alineamientos del mapa geológico existente, utilizados para la verificación, puede deberse al algoritmo del programa empleado, el cual puede requerir ajustes matemáticos, también a las características del sensor y la resolución, propias del mismo, por lo que se recomienda experimentar con diferentes versiones de filtros, de imágenes, de resoluciones, así como de ambientes geológicos, tal cual se afirma más arriba.

Referencias bibliográficas

- ABDULLAH, A.; NASSR, S.; GHALEEB, A. 2013. Landsat ETM-7 for Lineament Mapping using Automatic Extraction Technique in the SW part of Taiz area, Yemen. *Global Journal of Human Social Science, Geography, Geo-Sciences, Environmental & Disaster Management* Volume 13 Issue 3 Version 1.0 Year 2013.
- ABOYEJI, O.S.; MOGAJI, K.A.; AND OYINLOYE, R.O. 2012. Structural interpretation of remotely sensed data sets, its hydrogeological implication over Ile-Ife and environs. *Ozean Journal of Applied Sciences* 5 (1).
- ALDALUR, B.; Y SANTAMARÍA, M. 2002. Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*. 2002. 17: 31-42.
- ARAFAT, M.; PALANIVEL, K.; AND KUMANAN, C.J. 2010. Significance of surface lineaments for gas and oil exploration in part of Sabatayn Basin – Yemen. *Journal of Geography and Geology*. Vol. 2, No. 1. September 2010.
- ARLEGUI, L.E. Y SORIANO, M.A. 1998. Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain). *Int. J. of Remote sensing*. Vol. 19, No. 16. 3169-3185.
- ARGIALAS, D.P. AND MAVRANTZA, O.D. 2003. Comparison of edge detection and hough transform techniques for the extraction of geologic features. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, Part XXX.
- ARGIALAS, D.; MAVRANTZA, O.; STEFOULI, M. 2001. Automatic mapping of tectonic lineaments (faults) using methods and techniques of photointerpretation, digital Remote Sensing and Expert Systems. Thales project No. 1174.
- AYALEW, L; YAMAGISHI, H. 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*. 65 (2005) 15-31.
- CASAS, A.; CORTÉS, A.; MAESTRO, A.; SORIANO, M.A.; RIAGUAS, A.; BERNAL, J. 2000. LINDENS: a program for lineament and density analysis. *Computer and Geosciences*. 26. (2000) 1011-1022.
- CARLINI, A; VERA, A. 2004. “Estudios de los riesgos geológico-ambientales del sector ocupado entre La Joya y San Jacinto, Estado Mérida”, Trabajo Especial de Grado para optar al Título

- de Ingeniero Geólogo. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. 150 p.
- EHSAN, G. 2012. Investigation of lineaments in Tehran province on the basis of remote sensing techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences* Volume 3, No 2, 2012.
- ELMAHDY, S. Y MOHAMED, M. 2012. Geological Lineament Detection, Characterization and Association with Groundwater Contamination in Carbonate Rocks of Musandam Peninsular Using Digital Elevation Model (DEM). *The Open Hydrology Journal*, 2012, 6, (Suppl 1-M3) 45-51.
- GHAZI, R. 2013. Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*. Vol. 2, Issue 2. Feb 2013.
- GUPTA, R. 2003. *Remote sensing geology*. 2nd edition. Springer. 655 p.
- HUNG, L.Q.; BATELAAN, O.; AND DE SMEDT, F. 2005. Lineament extraction and analysis comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V*, edited by Manfred Ehlers, Ulrich Michel, Proc. of SPIE Vol. 5983, 59830T.
- KARNIELI, A.; MEISELLS, A.; FISHER, L.; AND ARKIN, Y. 1996. Automatic extraction and evaluation of Geological linear features from digital remote sensing data using Hough Transform. *Photogram. Eng. Rem. Sensing*. Vol. 62. No. 5, May 1996. Pp 525-531.
- KAVAK, K.S.; Y CETIN, H. 2007. A Detailed Geologic Lineament Analysis Using Landsat TM Data of Göl marmara/Manisa Region, Turkey. *Online Journal of Earth Sciences*. 1 (3): 145-153. 2007.
- LILLESAND T. Y KIEFER, R. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2nd edition. John Wiley and sons. 721p.
- MAH, A., TAYLOR, G.R., LENNOX, P. AND BALIA, L., 1995. "Lineament Analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern Territory, Australia", *Photogram. Eng. Rem. Sensing*. 61(6), pp. 761-773.
- MADANI, A. 2001. Selection of the optimum Landsat Thematic mapper bands for automatic lineaments extraction, Wadi Natash area, South Eastern desert, Egypt. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001. Singapore. (*Asian Journal of Geoinformatics* 3(1): 71-76).

- MALLAST, U.; GLOAGUEN, R.; GEYER, S.; RODIGER, T.; AND SIEBERT, C. 2011. Semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data and the derivation of groundwater flow-paths. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 1399–1431, 2011.
- MARCHIONI, D.; Y CAVAYAS, F. 2010. Utilización de imágenes de radar (Ers y Radarsat) para la discriminación litológica y la cartografía estructural del sector central del macizo del deseado, provincia de santa cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 576 - 591 (2010).
- MARGHANY, M. 2012. Fuzzy B-spline algorithm for 3-D lineament reconstruction. *International Journal of Physical Sciences* Vol. 7(15), pp. 2294 - 2301, 9 April, 2012
- MARGHANY, M.; AND HASHIM, M. 2010. Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data. *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 5(10),
- MARGHANY, M.; MANSOR, S. AND HASHIM, M. 2009. Geologic Mapping of United Arab Emirates using Multispectral Remotely Sensed Data. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (2): 476-480.
- MATHER, P. 1987. Computer processing of remotely sensed images, An introduction. John Wiley and Sons. 352 p.
- ÖLGEN, M. K. 2004. Determining lineaments and geomorphic features using Landsat 5-TM data on the Lower Bakırçay plain, Western Turkey. *Aegean Geographical Journal*, 13 (2004), 47-57,
- PRABAHARAN, S.; RAMALINGAM, M.; SUBRAMANI, T.; LAKSHUMANAN, C. 2013. Remote Sensing and GIS Tool to Detect Hydrocarbon Prospect in Nagapattinam Sub Basin, India. *Geotech Geol Eng* (2013) 31:267–277.
- PHILLIP, G. 1996. Landsat thematic mapper data analysis for Quaternary tectonics in parts of the Doon Valley, NW Himalaya, India. *Int. J. of Remote Sensing* Vol. 17, No. 1, 143-153.
- PROST, G. 2001. Remote sensing for geologist. A guide to image interpretation, 2nd Ed. Taylor and Francis. 374 p.
- QARI, M. 1991. Application of Landsat TM data to geological studies, Al-Khabt area, Southern Arabian shield. *Photogram. Eng. Rem. Sensing* 57(4), pp. 421-429.
- REPÚBLICA DE VENEZUELA. 1966. Mapa de Geológico de la Región de Mérida. Ministerio de Energía y Minas. Dirección General Sectorial de Minas y Geología. Escala 1:50.000.

- ROWAN, L.; AND BOWERS, T. 1995. Analysis of linear features mapped in Landsat Thematic mapper and Side-looking Airborne Radar Images of the Reno 1° by 2° quadrangle, Nevada and California: implications for mineral resource studies. *Photogram. Eng. Rem. Sensing.* 61(6), pp. 749-759.
- RUTZINGER, M.; MAUKISCH, M.; PETRINI-MONTEFERRI, F.; STÖTTER, J. 2007. Development of Algorithms for the Extraction of Linear Patterns (Lineaments) from Airborne Laser Scanning Data. *Proceedings of the Conference "Geomorphology for the Future", Obergurgl 2007.*
- SÜZEN, M.L. Y TOPRAK, V. 1998. Filtering of satellite images in geological lineament analysis: an application to a fault zone in Central Turkey. *Int. J. of Remote Sensing.* Vol. 19, No. 6, 1101-1114.
- TRIPATHI, N. K.; GOKHALE, V.G.K.; SIDDIQUI, M.U. 2000. Directional morphological image transforms for lineament extraction from remotely sensed images. *Int. J. of Remote Sensing* Vol. 19, No. 6, 1101-1114.
- WLADIS, D. 1999. Automatic lineament detection using Digital Elevation Models with Second Derivative Filters. *Photogram. Eng. Rem. Sensing* 65(4), pp. 453-458.