

## INTERPRETACIÓN MORFOTECTÓNICA COMO CONTRIBUCIÓN AL PELIGRO SÍSMICO EN LOS MUNICIPIOS SAN CRISTÓBAL Y CANDELARIA, CUBA.

Alexis Ordaz Hernández<sup>1</sup>, Carlos Enrique Cofiño Arada<sup>2</sup>, José Ramón Hernández Santana<sup>3</sup>, Ana Patricia Méndez Linares<sup>4</sup> y Gonzalo Galaz Escanilla<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Pinar del Río, Cuba, Email: [alexisordaz@geo.upr.edu.cu](mailto:alexisordaz@geo.upr.edu.cu) y/o [ordaz1978@hispanista.com](mailto:ordaz1978@hispanista.com)

<sup>2</sup> Universidad de Pinar del Río, Cuba, Email: [cenriques@geo.upr.edu.cu](mailto:cenriques@geo.upr.edu.cu)

<sup>3</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Email: [santana@igg.unam.mx](mailto:santana@igg.unam.mx)

<sup>4</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Email: [patyml@igg.unam.mx](mailto:patyml@igg.unam.mx)

<sup>5</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Email: [ggalaz@ing.uchile.cl](mailto:ggalaz@ing.uchile.cl)

### RESUMEN

Se revelan las principales expresiones morfotectónicas del relieve, como contribución al estudio de la sismicidad moderada del territorio. El análisis morfoestructural se combina con resultados del análisis de estructuras, a escala mesoscópica, para aportar elementos sobre la dirección preferencial de los esfuerzos tectónicos, que determinaron el relieve contemporáneo. En total, se describieron 44 afloramientos y se midieron 850 elementos estructurales (fracturas de extensión, de cizalla e híbridas, escamas tectónicas, estrías, ejes de pliegues, planos axiales y de fallas). Las interpretaciones morfotectónicas y de índices geomorfológicos permitieron revelar la diferenciación morfoestructural en bloques, transversales a la falla sinistral Pinar, de potencial carácter sismogénico y, además, concluir sobre las direcciones principales y subordinadas de los esfuerzos tectónicos que generaron las mesoestructuras del substrato y las morfoestructuras del relieve, parámetros significativos en la caracterización sismotectónica regional. Atención especial merece el “lomo de presión” generado sobre la traza de la falla Pinar, al norte del pueblo de San Cristóbal, cuya diferenciación en microbloques escalonados y desplazados horizontalmente, refleja una notable deformación, con características de amenaza sísmica para los pueblos de San Cristóbal, Candelaria y Los Palacios.

Palabras claves: morfotectónica, morfoestructura, peligro sísmico, Cuba occidental.

## **INTRODUCCIÓN**

El área de trabajo cubre la porción centro-meridional de la Sierra del Rosario y del margen norte de la Cuenca de Los Palacios (República de Cuba); cuya frontera tectónica es la falla de desplazamiento horizontal de izquierda, con componente normal, denominada Pinar. Según la división político-administrativa, el sector corresponde a los municipios San Cristóbal y Candelaria (Provincia Artemisa), se ubican en una zona relativamente estable, hacia el interior de la placa Norteamericana. No obstante, el 23 de enero de 1880, se reportó el sismo de mayor energía en Cuba occidental, con epicentro en las cercanías del pueblo de San Cristóbal, con una magnitud de 5.9 en la escala de Richter. La mayoría de los autores consideran a la Falla Pinar como la principal estructura sismogeneradora en la región (Díaz y Lilienberg, 1989; Cotilla y Álvarez, 2001; Chuy, 2002), aunque Cotilla y Córdova (2011), proponen a la falla Guane, como el foco de aquel evento.

El trabajo profundiza en el conocimiento del substrato geológico (escala de afloramiento) y morfoestructural del relieve, para determinar su papel en el desarrollo geomorfológico y su posible relación con el peligro sísmico local.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materiales topográficos y geológicos**

El área ocupa parcialmente las hojas cartográficas 3584-II-a, 3584-II-b, 3684-III-a, 3584-II-c, 3584-II-d y 3684-III-c, a escala 1: 25 000 (Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1985), con equidistancia de 10 metros. Los trabajos geológicos fueron generalizados y reinterpretados de la hoja g3584-85 San Cristóbal del mapa geológico, a escala 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, 2004) y de la interpretación de imágenes satelitales del Landsat y de Google Earth, así como, por trabajos de reconocimiento de campo, con aplicación de técnicas geológicas en condiciones de afloramientos en canteras, taludes y escarpas, y cañones fluviales

### **Métodos**

El análisis del substrato geológico se obtuvo a partir de la descripción de 44 afloramientos, en los que se realizaron mediciones de elementos estructurales para su procesamiento e interpretación (850 estructuras, separadas en ejes y planos de pliegues, fracturas de cizalla, de extensión e híbridas). Hacia el sur de la falla Pinar fue imposible la medición de elementos estructurales, dada la inexistencia de afloramientos y la presencia de sedimentos no consolidados. El procedimiento fue el siguiente: (a) Orientación espacial del afloramiento; (b) Descripción litológica y medición de los elementos de yacencia de los estratos  $S_0$  (buzamiento y dirección del buzamiento); (c) Identificación de estructuras de génesis tectónica, y clasificación y medición de sus elementos de yacencia.

Para el análisis morfotectónico y morfoestructural, se aplicaron los métodos siguientes: (a) Interpretación hipsométrica y topográfica, a escala 1: 25 000; (b) Análisis

estructuro-geomorfológico para la delimitación de las estructuras geológicas con expresión en el relieve; (c) Identificación de los morfoelementos lineales del relieve; (d) Evaluación de la disección vertical del relieve (m/6.25 ha; es decir, por 1/16 partes de 1 km<sup>2</sup>, como malla mínima), a escala 1: 25 000; (e) Interpretación morfotectónica del relieve, a escala 1: 25 000; (f) Análisis del espectro de niveles geomorfológicos; y (g) Evaluación de indicadores geomorfológicos de la actividad tectónica: índices de incisión fluvial, de separación de cuencas y de desarrollo de frentes de montañas e índice de sinuosidad de escarpas tectónicas.

Los elementos de yacencia de cada estructura, se tabularon y procesaron por separado y se les aplicó el Criterio de Riedel (1929). Este criterio constituye una herramienta clásica en geología estructural para orientar el esfuerzo principal con respecto a sus estructuras asociadas (pliegues, foliación, fallas, fracturas, etc).

## RESULTADOS

### APLICACIÓN DEL CRITERIO DE RIEDEL

El conjunto de datos analizados sugirió, que estas rocas fueron afectadas por, al menos, dos fases deformacionales, cuyos paleoesfuerzos principales se orientan en dirección noroeste-sureste ( $\sigma_1$ ) y noreste-suroeste ( $\sigma_1'$ ). La primera dirección es consistente con la generación de dos sistemas de pliegues ( $F_1$  y  $F_2$ , **Figura 1b**), mientras que la segunda dirección, se sustenta con la generación de otros dos sistemas ( $F_3$  y  $F_4$ ).

El máximo esfuerzo compresivo noroeste-sureste ( $\sigma_1$ ), determinado en este trabajo, posiblemente esté asociado a desplazamientos principales reportados en la Cordillera de Guaniguanico, que generaron sobrecorrimientos con vergencia norte-noroeste durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano (Cobiella, 2009; Cofiño y Cáceres, 2003). Por otro lado, se ha documentado un segundo máximo esfuerzo compresivo con dirección noreste  $\sim 045^\circ$  (Cofiño y Cáceres, 2003; Cruz *et al.*, 2007), que coincide exactamente con la dirección noreste-suroeste ( $\sigma_1'$ ), determinada en este trabajo. Cabe mencionar, que la temporalidad del evento deformacional, asociado al segundo esfuerzo compresivo, es aun muy ambigua.

### APLICACIÓN DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS

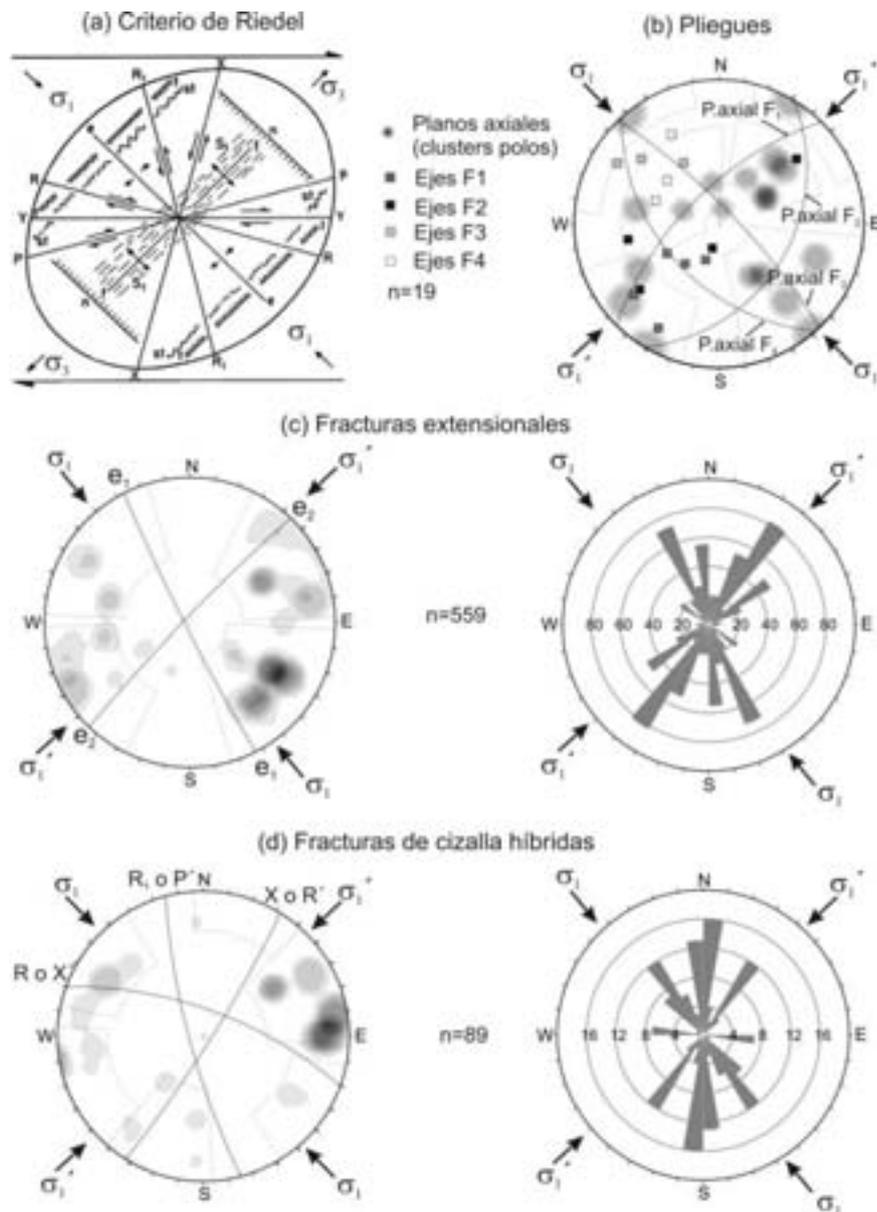
Desde el punto de vista geomorfológico, la actividad tectónica de las estructuras geológicas se manifestó en las deformaciones de las superficies de planación (restos cumbrales), en la profundidad de disección de la red fluvial, en el índice de sinuosidad de la falla transcurrente Pinar, en los índices de incisión hídrica en los frentes de montaña y en la diferenciación altimétrica de éstos, y el índice de separación de cuencas (**Tabla 1 y Figuras 2**). El caso de la falla Pinar es controvertido, algunos la estiman activa en el presente, mientras otros la consideran sin actividad. Sin embargo, la aplicación del análisis morfotectónico demostró, que esta transcurrencia regional, así como los bloques morfoestructurales transversales I, II y III (**Figura 2**), controlan el

desarrollo geomorfológico, de manera activa y diferenciada, quedando manifestada en los valores de los índices geomorfológicos (**Tabla 1**).

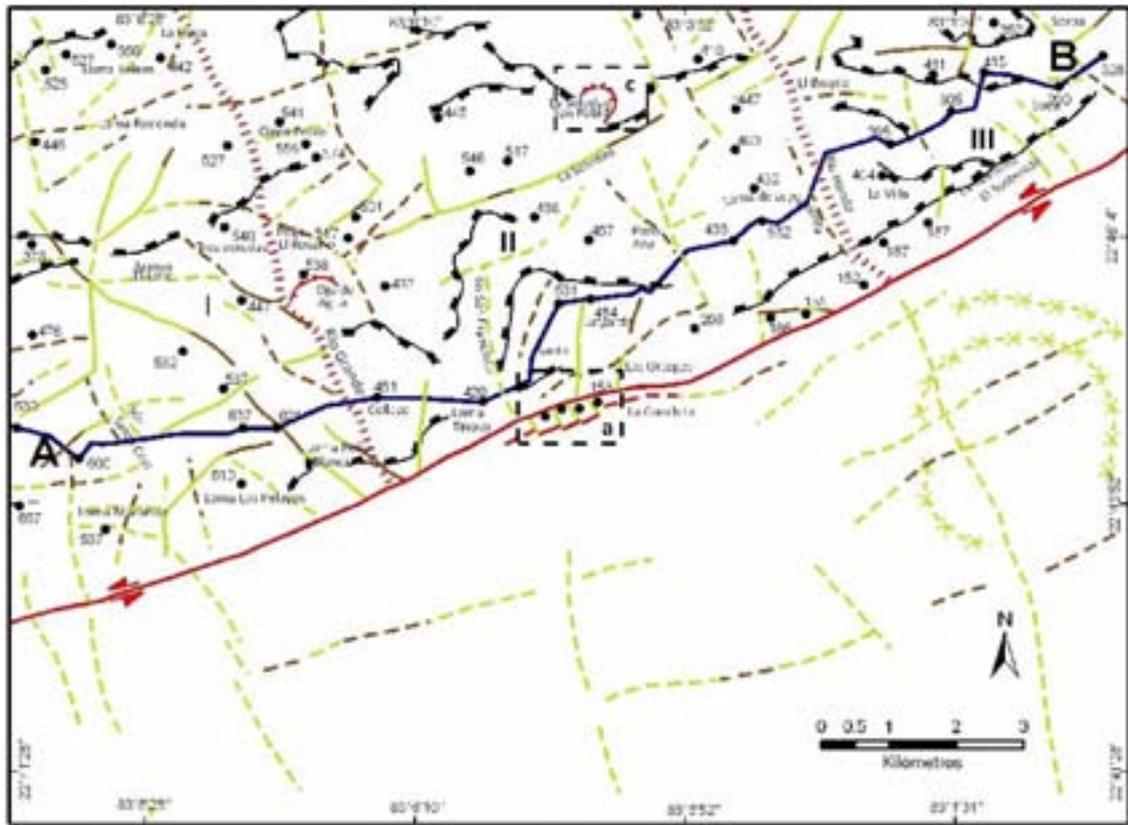
El índice de incisión hídrica demuestra la mayor actividad tectónica del bloque occidental (I), con valores entre 0.55 y 0.90, muy contrastantes con los valores entre 3.34 y 3.42 del bloque central (II). Este índice relaciona el ancho del valle entre su altura relativa promedio (profundidad de incisión), destacando que en los valores inferiores a 1, la profundidad del corte fluvial supera varias veces su ancho. Precisamente en el bloque I, existen los mayores valores de las superficies cumbrales, de los frentes tectónicos de montaña, de la disección vertical, del índice de separación de cuencas más bajo (0.31, como promedio) y de la formación de cañones profundos (Río Santa Cruz) (**Tabla 1 y Figura 2**). En general, mientras mayor sea el valor de los índices de incisión hídrica y de separación de cuencas, menor es el reflejo de la actividad tectónica en el relieve. De esta manera, los indicadores geomorfológicos revelan un mayor ascenso tectónico en el bloque occidental (I), seguido por el central (II) y el oriental (III), que es el de menor desarrollo morfotectónico (**Tabla 1 y Figura 2**).

**Tabla 1.** Comportamiento de los indicadores geomorfológicos para cada bloque morfoestructural.

<b>Bloques morfoestructurales transversales en el frente montañoso de la Sierra del Rosario (I,..., III)</b>	<b>Altitud de restos de superficies cumbrales (m)</b>	<b>Disección vertical máxima del relieve (m)</b>	<b>Índice de sinuosidad de la escarpa tectónica de la falla Pinar</b>	<b>Índice de incisión en frentes de montañas en la falla Pinar</b>	<b>Índice de separación de cuencas y micro-cuencas</b>	<b>Altura relativa de frentes de montañas en la falla Pinar (m)</b>
<b>Bloque occidental I</b>	620-640	Mayor de 300	1.00	0.63	0.31	620-670
<b>Bloque central II</b>	520-530	151-200 m (200-300 m, aislado)	1.02	2.09	0.35	520-530
<b>Bloque oriental III</b>	400-415	101-150 m	1.03	2.30	0.46	330-410



**Figura 1.** Aplicación de Criterio de Riedel. Estereogramas de contornos para cada elemento estructural mapeado. (a) Criterio de Riedel, donde f: pliegues, S: foliación, n: fallas normales, t: fallas inversas, st: estilolitas, e: fracturas extensionales, R, R<sub>1</sub>, X, Y, P: fracturas por cizalla; (b) Pliegues asociados a dos paleoesfuerzos principales con orientaciones  $\sigma_1$ : NW-SE y  $\sigma_1'$ : NE-SW; (c) Fracturas extensionales; (d) Fracturas de cizalla híbridas.



Morfoalineamientos	Génesis de morfoelementos del relieve		
	Tectónicas	Erosivo-fluvial	Denudativas
Por datos geológicos			
Por evidencias geomorfológicas			
Rasgos circulares			
	Falla transcurrente sinistral Pinar		
	Frente de sobrecorrimientos, con reflejo en el relieve		
	Límites de bloques morfoestructurales		
	Paleosismodislocaciones		
I, II, III	Bloques morfoestructurales transversales		
A — B	Perfil longitudinal complejo		
• 206	Superficies cumbreales (m)		
Collazo	Topónimos de significado geólogo- geomorfológico		

Figura 2. Esquema morfotectónico regional.

## CONCLUSIONES

1. Los patrones de fracturación y su papel en la formación morfotectónica del relieve, encuentran fuerte correspondencia en el campo deformacional de fracturas extensionales (NNW-SSE) y, en el caso de las cizallas, con orientación N-S y NNW-SSE, ambos del régimen neotectónico, muy extendido en el archipiélago cubano, y determinante en la edificación escalonada y transversal de los bloques morfoestructurales I, II y III.
2. Se evidenció la actividad de neotectónica de los bloques estructurales transversales a la falla Pinar, demostrada mediante criterios geomorfológicos.
3. Las intercepciones entre las suturas de los bloques transversales y la Falla Pinar, constituyen potenciales nudos morfoestructurales sismoactivos y poseen peligrosidad para los núcleos urbanos aledaños.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chuy, T. J. (2002), *Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo económico sostenible*. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica y IV Conferencia Latinoamericana de Geofísica del 2002. Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba. Ed. Academia, La Habana, pp. 27-36.
- Cobiella Reguera, J. L. (2009), "Emplacement of the northern ophiolites of Cuba and the Campanian-Eocene geological history of the northwestern Caribbean-SE Gulf of Mexico region". Geological Society, London, Special Publications, núm. 328, pp. 315-338.
- Cofiño, C. E. y D., Cáceres (2003), "Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar)". *Revista Minería y Geología*, vol. 19, núms. 3-4, pp. 29-34.
- Cotilla, M. y J. L., Álvarez (2001), "Regularidades sismogenéticas de la Unidad Neotectónica Occidental de Cuba". *Rev. Geol. Chile*, vol. 28, núm.1, pp. 3-24.
- Cotilla, M. y D., Córdova (2011), "Study of the earthquake of the January 23, 1880, in San Cristóbal, Cuba and the Guane fault". *Física de la Tierra*, núm. 6, pp. 35-56.
- Cruz Toledo, R., J., Sánchez Arango, R., Otero Marrero, J. E., Gómez Herrera, C., Sosa Meizoso, C., Fariñas Hernández, Y., Pérez Martínez, L., Mejías Rodríguez, O., Rodríguez Morán (2007), *Efectividad de la geomorfología aplicada en la precisión de fallas generadoras del relieve en la provincia Pinar del Río, Cuba*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, pp. 2207-2213.
- Díaz Díaz, J. L. y D. A., Lilienberg (1989), "Nuevos datos sobre los movimientos tectónicos recientes en Cuba Occidental". *Reporte de Investigación, Instituto de Geografía*, núm. 4, 11 p.

Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (1985), Mapas 3584-II-a, 3584-II-b, 3684-III-a, 3584-II-c, 3584-II-d y 3684-III-c, a escala 1:25 000. La Habana.

Instituto de Geología y Paleontología (2004), Mapa geológico digital, Hoja Los Palacios 3583. Centro de Información Geológica, La Habana, 1 hoja.

Riedel, W. (1929), Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zbl. Miner. Geol. Palaeont.*, B354.