



Relaciones fractales entre la variación del valor “b” de la relación GR de la sismicidad y la dimensión de capacidad de las estructuras asociadas (Sistema Falla Pinar) en un sector de Cuba occidental

Marcos Enrique Pazo-Arango

*Dpto. de Geoprocesamiento y Tectónica, Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Cuba.
arango@igp.minem.cu, marcospazo7731@gmail.com*

Recibido: 15 febrero 2024. Recibido en formato revisado: 21 agosto 2024. Aceptado: 26 agosto 2024.

Resumen.

El área de estudio constituye un sector ubicado en la región de Cuba Occidental y está atravesado por la dislocación tectónica activa Falla Pinar. Esta estructura es descrita por muchos autores como la principal estructura sísmo generadora en la porción occidental del territorio nacional y se le atribuye el sismo de mayor envergadura registrado en la región con una magnitud local de 6.1 ocurrido en el año 1880 en las inmediaciones de la localidad de San Cristóbal / Artemisa. La actividad sísmica vinculada al Sistema Falla Pinar y las estructuras asociadas al mismo, constituyen el objeto de estudio de esta investigación. Los datos geofísicos usados y la información geológica utilizada fueron validados mediante la comparación con los antecedentes presentes en el área de estudio y posteriormente analizados mediante técnicas de análisis fractal e interpretación de la variable precursora sísmica: “valor b” obtenida a partir de la ley de relación de Gutenberg y Richter. La interpretación de los criterios que ofrecen estos parámetros contribuye a la interpretación de la neotectónica de la región desde el punto de vista sísmico y propone a la vez un método para la identificación de áreas con más de un evento de deformación tectónica atendiendo a la dimensión de capacidad de las estructuras. Unos de los principales resultados alcanzados por las técnicas matemático-estadísticas antes mencionadas fue el comportamiento de la variación de la D_0 en el espacio para la sismicidad, lo que se interpreta en un mapa base que puede ser utilizado en futuros estudios dedicados al peligro sísmico y la reducción de riesgos. El análisis de las propiedades fractales de la distribución de los epicentros, su magnitud y la longitud de los planos de ruptura (fallas), resultó ser una prueba matemática que confirma que el evento del año 1880 está asociado a la dislocación tectónica activa Falla Pinar tal y como expresan varios autores [1,2,4,12,13].

Palabras claves: fractal; dimensión fractal; relación fractal; dimensión de capacidad; dimensión de información; dimensión de correlación.

Fractal relationships between the variation of the “b” value of the GR relationship of seismicity and the capacity dimension of the associated structures (Pinar Fault System) in a sector of western Cuba

Abstract.

The study area is a sector located in the Western Cuba region and is crossed by the active tectonic dislocation Pinar Fault. This structure is described by many authors as the main earthquake-generating structure in the western part of the national territory and is attributed to the largest earthquake recorded in the region with a local magnitude of 6.1 that occurred in 1880 near the town of San Cristóbal / Artemisa. The seismic activity linked to the Pinar Fault System and the structures associated with it are the object of study of this research. The geophysical data used and the geological information used were validated by comparison with the background present in the study area and subsequently analyzed by fractal analysis techniques and interpretation of the seismic precursor variable: “b value” obtained from the Gutenberg and Richter relationship law. The interpretation of the criteria offered by these parameters contributes to the interpretation of the neotectonics of the region from a seismic point of view and proposes at the same time a method for the identification of areas with more than one tectonic deformation event according to the capacity dimension of the structures. One of the main results achieved by the mathematical-statistical techniques mentioned above was the behavior of the variation of D_0 in the space for seismicity, which is interpreted in a base map that can be used in future studies dedicated to seismic hazard and risk reduction. The analysis of the fractal properties of the distribution of the epicenters, their magnitude and the length of the rupture planes (faults), turned out to be a mathematical proof that confirms that the event of the year 1880 is associated with the active tectonic dislocation Pinar Fault as expressed by several authors [1,2,4,12,13].

Keywords: fractal; fractal dimension; fractal relationship; capacity dimension; information dimension; correlation dimension.

How to cite: Pazo-Arango, M.E., (2024). Relaciones fractales entre la variación del valor “b” de la relación GR de la sismicidad y la dimensión de capacidad de las estructuras asociadas (Sistema Falla Pinar) en un sector de Cuba occidental. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 56, pp. 25 - 32. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.112973>

1 Introducción

El método de “box counting” (conteo de cajas) fue usado para definir en grandes medidas las bases conceptuales de los objetos fractales y sus dimensiones no enteras. Esta nueva geometría abrió las puertas al estudio de variables aleatorias y pseudoaleatorias que eran imposibles de modelar mediante modelos estadísticos convencionales. En Geología estos conceptos se empezaron a utilizar principalmente en los campos de Geomorfología y Sismología y desde entonces ha sido utilizado por varios autores para estudiar las propiedades geométricas de las dislocaciones tectónicas en determinadas regiones [10,9] y las relaciones de irregularidad en la distribución de la sismicidad [3,13]. La D_0 (dimensión de capacidad) determinada mediante la aplicación de box counting toma valores entre 0 – 1 para objetos puntuales como lo es la sismicidad y valores entre 1 – 2 para objetos lineales como los son las fallas, grietas, lineamientos, etc. Para la realización de este análisis es necesario tener en cuenta que los fractales naturales están acotados por límites y la aplicación de dichos límites en las series fractales modelos permiten la obtención de modelos matemáticos más realistas.

En general los objetos lineales se mantienen invariantes antes los cambios de escalas, sin embargo, las fallas no son planos perfectamente trazados en el espacio, presentado desde zonas de trituración observables a escalas locales y llegando hasta conformar sistemas de fallas observables a escalas regionales. A este último caso corresponde el sistema Falla Pinar que es la principal estructura sismo generadora en el área de estudio. Varios trabajos han demostrado la variación de las dimensiones fractales de capacidad en relación con los aumentos o disminuciones en las escalas cartográficas.

En el caso de la sismicidad como objeto puntual, sus límites van a estar trazados por la relación Gutenberg – Richter expresada en eq. (1).

$$\log N = b_m + \log a \quad (1)$$

Que se aplica para un número de eventos de magnitudes mayores o igual a una dada (N), b_m es un parámetro que describe la pendiente de la relación entre la magnitud y a es un parámetro que se relaciona con la actividad sísmica en una región específica. Esta magnitud se relaciona con la energía liberada y está por la eq. (2) que se utiliza para estimar la energía liberada por un terremoto en función de su magnitud.

$$\log E = 1.44m + 5.24 \quad (2)$$

En este contexto, (E) representa la energía liberada, que se mide en joules, y (m) es la magnitud del terremoto en la escala de Richter.

La relajación de los estados de esfuerzos durante la ocurrencia de un terremoto está estrechamente relacionada con el momento sísmico condicionado por la densidad de estructuras presentes por unidad de área (fallas). Este momento sísmico cumple con la relación plantada en la eq. (3).

$$\log M = cm + d \quad (3)$$

Donde m es una medida relacionada con la amplitud de las ondas sísmicas, c y d son constantes. Kanamori y Anderson [8] establecen teóricamente que $c = 1.5$ y a su vez

obtienen una aproximación teórica del momento sísmico con el área de influencia de una determinada falla eq. (4).

$$\log M = cm + d \quad (3)$$

$$M = \alpha A \quad (4)$$

Donde α es una constante. Mediante una combinación sencilla de las ecuaciones anteriores obtenemos la eq. (5).

$$N = \beta A^{-3b2c} \quad (5)$$

Entonces en una región sísmica el número de terremotos con magnitudes iguales o mayores que A y que ocurren en un intervalo de tiempo por unidad de área sigue una ley de potencias. Si aplicamos el método de box counting teniendo en cuenta que $A \approx r^2$. Obtenemos $D = 3b/c$ y tomando $c = 1.5$; entonces:

$$D = 2b \quad (6)$$

Siendo el valor b el calculado para un evento de magnitud M y D el grado de recubrimiento del plano por parte de las trazas en superficie de fallas (longitud del área de ruptura de los terremotos) [7]. A la vista de estas últimas ecuaciones y teniendo en cuenta el grado de recubrimiento del espacio, los terremotos pequeños se asocian a volúmenes de estructuras pequeñas, los terremotos grandes a líneas, es decir fallas de carácter regional y los terremotos intermedios a se asocian a superficies sobre el área de ruptura [9].

Pazo–Arango [13] mediante su estudio de la sismicidad en un sector de Cuba occidental expresa que descensos en el valor b de la relación GR está vinculado a la ocurrencia de sismos de magnitudes por encima a los de la media. Öncel [11] sugiere que un incremento en la dimensión fractal de las fallas está relacionado con aumentos en la longitud de las mismas. Esto puede sugerir que en una región sísmica la relajación de los esfuerzos dominicos ocurra mediante la ruptura de grandes fallas [7]. Pazo–Arango y Öncel [13,11] coinciden que si la sismicidad ocurrida históricamente en una región es de magnitudes pequeñas y esta incrementa su frecuencia; a su vez ocurre el incremento de la probabilidad de un sismo de magnitudes por encima a los de la media.

En este trabajo, para las fallas y eventos sísmicos dentro del polígono de estudio, calculamos la dimensión de capacidad D_0 y el parámetro b , con el objetivo de establecer las relaciones espaciales entre los sismos de magnitudes superiores a la media histórica para la región y las estructuras sismo generadoras presentes en la misma.

2 Marco Geológico

Una particularidad interesante es la estructura nappe–escamada del terreno Guaniguanico, la secuencia estratigráfica establecida en las escamas y mantos tectónicos individuales destacados tanto en los Órganos, Rosario, así como en el cinturón Esperanza, aparece muchas veces coronada por los depósitos del Paleoceno Superior – Eoceno Inferior de la Formación Manacas, propios de la Cuenca de Antepaís, particularmente por un olistostroma (Miembro Olistostroma Vieja) que marca el clímax de la colisión y avance de los mantos tectónicos (Fig. 1).

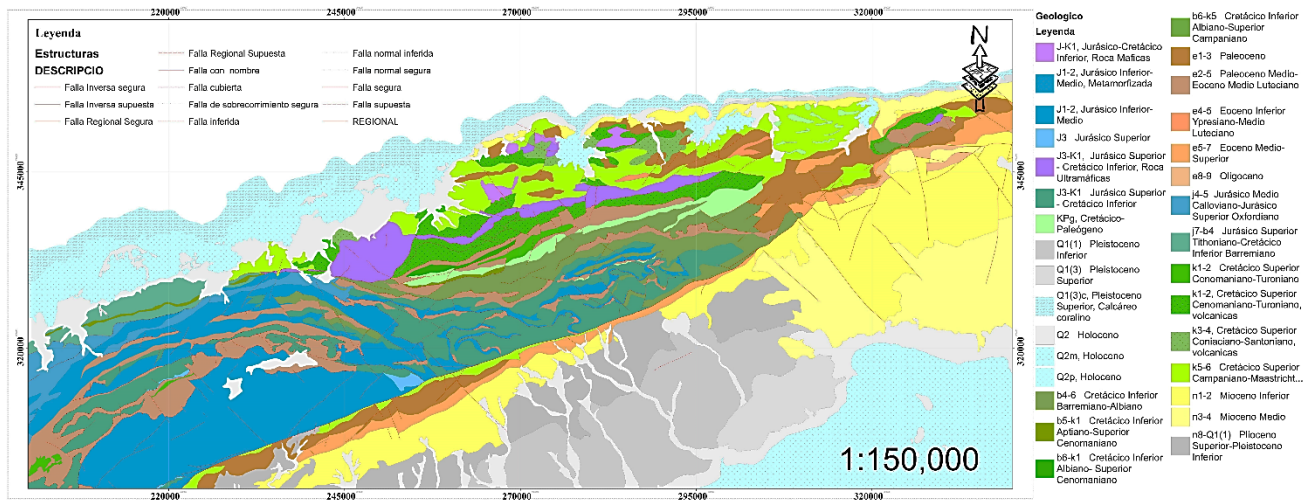


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio escala 1: 150 000. La base cartográfica fue elaborada por el Instituto de Geología y Paleontología (IG) / Servicio Geológico de Cuba escala 1: 100 000. Fuente: elaborado por el autor

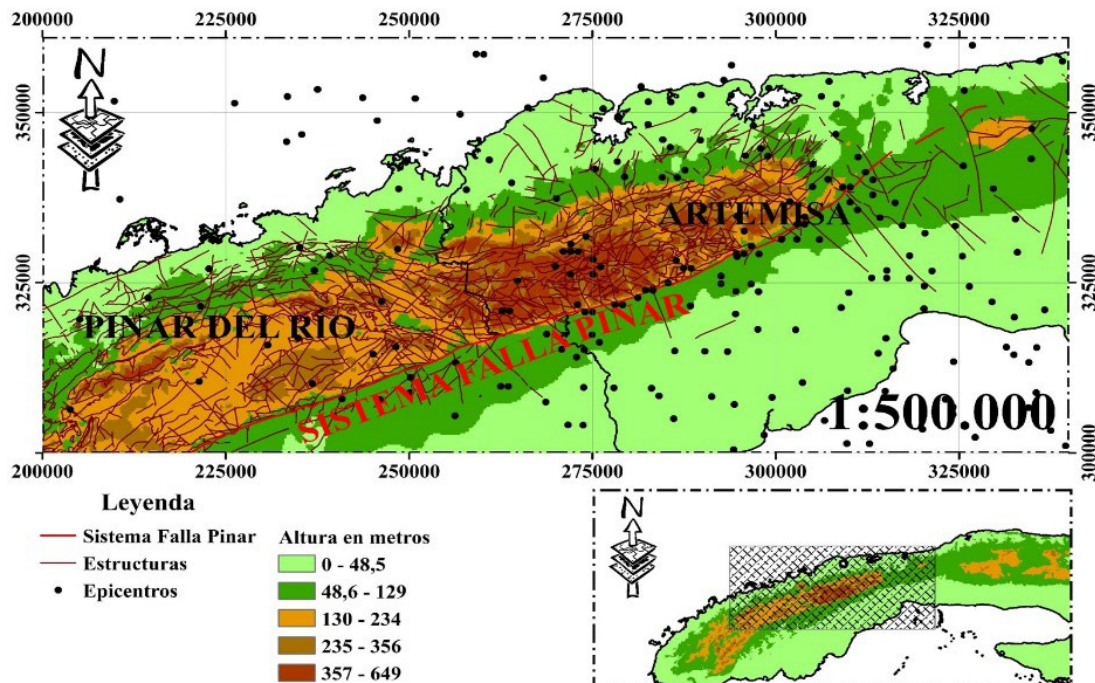


Figura 2. Relación de la distribución de la sismicidad con el Sistema Falla Pinar. Escala 1: 500 000. La sismicidad muestra una clara tendencia al agrupamiento cerca de la localidad de San Cristóbal actual provincia Artemisa. Es acumulación de esfuerzo es debido a un marcado cambio en el rumbo de la estructura Falla Pinar y un aumento en su ángulo de buzamiento (componente normal) [4,13] Fuente: tomada de Pazo-Arango 2024 [13].

Hatten [6] sugiere la estructura de mantos tectónicos en la región de Pinar del Río, relacionando la formación de los mismos con la orogenia cubana, y considera que la formación de mantos contribuyó al origen de sedimentos fliohoides sinorogénicos que se han depositado en su parte frontal. De igual forma Riggasi [14], desarrolló un esquema tectónico en el que se aprecia un amplio desarrollo de los mantos

tectónicos cabalgados con dirección norte y noroeste. En la década de los 60 las investigaciones se caracterizaron por un enfoque fijista del fenómeno, otros trabajos interesantes siguieron esa tendencia (por ejemplo: [2]).

Cáceres [2] al estudiar los cabalgamientos en la Faja Cangre y la unidad tectónica Alturas de Pizarras del Sur, señaló que el transporte tectónico ocasionó presiones que

desarrollaron abundantes sombras de presión asimétricas, constituidas por material silíceo y micáceo orientado, así como una reorientación de los minerales y la recristalización dinámica del cuarzo. Indicó además el probable entrapamiento frente a una “rampa frontal”, desde el inicio de los cabalgamientos, de una unidad primitiva mayor (previo al desmembramiento de las unidades tectónicas Pino Solo, Mestanza y Cerro de Cabras) sometida a presiones dirigidas relativamente más elevadas, lo que permitiría explicar la lineación por recristalización y solucionar la problemática referida a la intensidad del metamorfismo que afecta las unidades Pino Solo, Mestanza y Cerro de Cabras, en comparación con el resto de las unidades de la cordillera. Este proceso debió ocurrir en un tiempo anterior al Paleoceno Superior. Cáceres & Cruz–Gamez [1] explican la aparición de Faja Cangre a partir del desarrollo de una estructura en “flor positiva” durante la transcurrencia en Falla Pinar.

Desde el punto de vista estructural, la zona de articulación entre la Cordillera de Guaniguanico y la llanura sur de Pinar del Río constituye un excelente ejemplo de un frente de montaña asociado a una falla. La zona de falla Pinar posee una muy clara expresión topográfica, consecuencia de una componente normal extensiva en sus movimientos más recientes [5] (Fig. 2) y un contraste muy marcado en el desarrollo neotectónico y el modelado general del relieve. La zona falla Pinar constituye la dislocación tectónica de mayor extensión mapeada en superficie en el occidente de Cuba. Distintos investigadores la consideran como la principal estructura sismo-generadora en Cuba Occidental [12]. La falla registra una compleja evolución cinemática desde el Eoceno tardío [4]. A partir de la determinación de estructuras extendidas por todo su rumbo se ha establecido que la falla en sus inicios se comportó como un sistema transcurrente siniestro, posteriormente tuvo una etapa intermedia de transición, para culminar su evolución como una clásica falla gravitacional [5].

3 Materiales y métodos

La información empleada en este trabajo proviene de una base de datos sísmicos creada a partir de los catálogos publicados por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI) y contiene información de los años 1762 – 2021. Esta base de datos consta de los campos: Año, Mes, Día, Coordenadas Decimales en sistema WSG – 1984, Magnitud (magnitud local MI), Estaciones y Coordenadas Planares en Nad 1927 – Cuba Norte (Fig. 3).

Tabla 1. Materiales utilizados para la investigación.

Materiales	Observaciones
Catálogo sísmico total 1762 – 2021. [13]	Consiste en una base de datos normalizada de toda la sismicidad en el intervalo de tiempo 1762 – 2021. Organizada de forma tal que se retiraron los sismos duplicados y se incluyeron sismos omitidos.
Información estructural. IGP	Consiste en un fichero formato vectorial con los principales elementos de yacencia de las estructuras geológicas de la nación. actualización.

Fuente: elaborada por el autor.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Lat	Lon	Mag	Estac	POINT_X	POINT_Y
Año	Mes	Día								
1849	4	7			22.71	-83.06	3.3	4	288367.6073	21604.062
1872	7	2			22.71	-83.06	2.7	6	288367.6073	21604.062
1879	8	12			22.78	-83.45	4.2	3	248430.5613	29953.824
1879	8	21			22.71	-83.06	3.3	6	288367.6073	21604.062
1879	9	12			22.78	-83.45	4.2	4	248430.5613	29953.824
1879	9	21			22.71	-83.06	3.3	3	288367.6073	21604.062
1879	12	5			22.78	-83.45	4.2	3	248430.5613	29953.824

Figura 1. Muestra del catálogo empleado en este trabajo. Los datos epicentrales fueron obtenidos de la página electrónica del CENAI. Fuente: elaborada por el autor.

Originalmente el catálogo descargado no contaba con las coordenadas planares de los epicentros, estas fueron agregadas mediante un proceso de re-proyección en SIG para ser utilizadas durante la estimación de los parámetros fractales de la sismicidad que se plantean al inicio del trabajo. Estos datos fueron revisados minuciosamente para eliminar sismos repetidos e incluir sismos omitidos. La información hipo central de los eventos no se utilizaron por ser datos pocos fiables y precisos producto de la incertidumbre que se genera en la estimación de la profundidad de los eventos.

La información estructural base proviene del Departamento de Geoprocuremento y Tectónica / Instituto de Geología y Paleontología (IGP). Actualmente esta información se encuentra en un proceso de actualización desde una escala 1: 100 000 a 1: 50 000. Esta información se emplea durante la estimación de la dimensión fractal de capacidad de las estructuras asociadas a la sismicidad.

En la Tabla 1 se reflejan las características principales de estos ficheros mencionados anteriormente.

3.1 Metodología empleada para la realización del trabajo

La investigación comienza con una etapa de revisión bibliográfica que tiene como objetivo principal identificar y capturar el mayor volumen de información del área que guarde relación con la temática del presente trabajo. Una vez compilada la información geólogo – geofísica, se clasifica y normaliza de acuerdo a los criterios de calidad de los datos planteados por varios autores [3,8,13]. El resultado de este proceso es la confección de una región sísmica (área de estudio con datos sísmicos, estructurales, geológicos y geodinámicos que permiten la caracterización sismo-geológica de la misma) [13].

Como área de estudio, se tomó la región sísmica elaborada por Pazo-Arango 2024 por ser la única con antecedentes de trabajos dedicados al estudio del comportamiento fractal de la sismicidad en Cuba occidental. Esta área fue dividida posteriormente en 6 subsectores por medio de un parcelado regular en SIG teniendo en cuenta los parámetros geométricos rectangulares de un mallado regular sobre la totalidad del área de estudio. Se estimó el espectro de dimensiones generalizadas $D_q(D_0; D_1; D_2)$ y el valor b de la relación Gutenberg – Richter para la sismicidad en cada subsector.

Estos resultados se correlacionaron con la dimensión de capacidad de las estructuras presentes en cada sección. La interpretación de los resultados se realizó atendiendo a resultados de investigaciones geológicas presentes en el área y en base a los fundamentos de los análisis de irregularidad para fractales naturales. Los parámetros fueron obtenidos automáticamente mediante el empleo del Software libre Fractalyse.

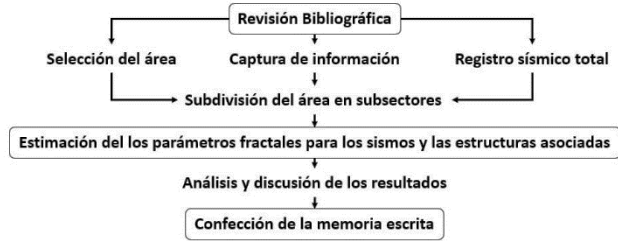


Figura 2. Diagrama de flujo de la investigación. la metodología posee cierta similitud con la empleada por Pazo-Arango 2024 [13] por ser esta el único antecedente sobre la interpretación de las propiedades fractales de los objetos geológicos.

Fuente: elaborado por el autor

Una vez los resultados fueron obtenidos se pasó a su interpretación y discusión y posteriormente a la confección de la memoria escrita tal como muestra la Fig. 4.

4 Resultados

4.1 Parámetros fractales de la sismicidad y el sistema de estructuras asociadas a la misma

El espectro de dimensiones D_q para la sismicidad para la sismicidad (observaciones puntuales) toma valores entre 0-1, mientras que para objetos lineales en el espacio toma valores entre 1-2, coincidiendo esta relación con los otros resultados obtenidos [9,10,13,15]. Los resultados obtenidos de la determinación de los parámetros fractales para cada ventana temporal se muestran en la Tabla 2.

Los mayores valores esperados de D_0 para la sismicidad van a estar ligados a los sectores donde la sismicidad presente mayor grado de agrupamiento (Fig. 5: Sectores 5, 6 y 3), siendo el subsector 5 el que contiene al evento histórico de magnitud local 6.1, este resultado va a estar influenciado principalmente por la capacidad que tengas los eventos puntuales para rellenar los espacios; es decir; mientras más cerca se encuentren los epicentros D_0 va a tender a tomar valores más próximos a 1. Esto explica la presencia de un sector con un valor de dimensión de capacidad de cero (Fig. 5: sector 1). Si se analizara la sismicidad de este sector de manera independiente; obtendríamos una serie sísmica muy cerca de la aleatoriedad natural. Lo que sugiere la necesidad de tener en cuenta la relación entre escala y cantidad de eventos a la hora de aplicar análisis de irregularidad.

Para el caso de las estructuras el valor de D_0 va a estar muy ligado la densidad de las mismas por unidad de área y sus valores más destacados están en los subsectores 2, 3, 4 y 5.

Tabla 2.

Resumen de los parámetros geométricos fractales de la sismicidad y las estructuras asociadas a las mismas. Los datos fueron determinados de manera automatizada mediante el empleo del Software Fractalysse.

S	Sismicidad				Fallas
	D_0	D_1	D_2	b	D_0
1	0	0	0	0	1
2	0.025	0.031	0.034	0.00149	1.357
3	0.031	0.044	0.053	0.038	1.238
4	0.0054	0.0060	0.0036	-0.85	1.442
5	0.046	0.035	0.010	-0.58	1.303
6	0.035	0.044	0.053	-0.058	1.079

Fuente: elaborado por el autor.

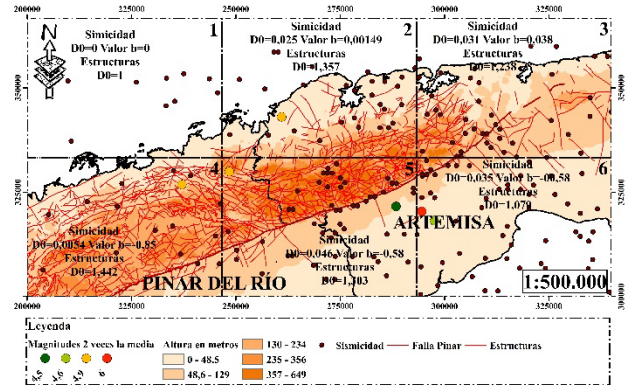


Figura 3. Mapa de relación espacial de la sismicidad con las posibles estructuras sismo generadoras del área de estudio. Escala 1:500 00. Confeccionado a partir de la base de datos realizada por Pazo-Arango (2024) y la información estructural facilitada por el IGP. En el mapa se muestran los valores de la dimensión de capacidad D_0 para las estructuras y la sismicidad. Los sismos destacados son los que presentan una magnitud local de dos veces la desviación estándar más la media histórica para la región.

Fuente: Elaborado por el autor.

Despaigne. G y Pazo-Arango [3,13] demuestran que la estimación del espectro de dimensiones entre $D_0 - D_2$ es suficiente para la caracterización de los patrones de irregularidad de la sismicidad. D_1 es la dimensión de información y comparte estrecha relación con la entropía de información del sistema [3,13], esto permite diferenciar los sectores entorno a su cantidad de datos y la relación entre los mismos. Este análisis también mostró que los sectores con mayor grado de información sobre la neotectónica en el área también coinciden con los sectores 2, 3, 5 y 6. Estos resultados son interpretados a partir del agrupamiento de epicentros ya que estos están estrechamente relacionados con la acumulación de esfuerzos en el interior de la corteza terrestre.

La dimensión de información D_1 se utiliza para cuantificar el nivel de información que aporta la distribución espacial de la serie sísmica ya que guarda estrecha relación con la entropía del sistema [13]. Por tanto un aumento de D_1 indica una distribución menos uniforme de los epicentros.

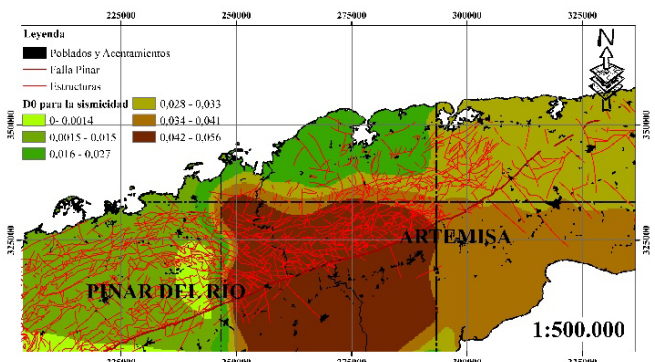


Figura 4. Comportamiento de la Dimensión de Capacidad (D_0) en el área de estudio. Véase que los mayores valores de capacidad se encuentran en el subsector 5 tal y como mostraba la Fig. 4. Este resultado guarda relación con la concentración de epicentros en las inmediaciones de la localidad de San Cristóbal / Provincia de Artemisa, que ha sido mencionada por varios autores en trabajos anteriores [4,12,13].

Fuente: elaborada por el autor

En el área de estudio el aumento de los valores de la D_1 de la sismicidad coincide con el aumento de valores de D_0 de la sismicidad. El valor de la dimensión de información puede verse influenciado por la ocurrencia de sismos relativamente alejados de la tendencia al agrupamiento

La dimensión de correlación D_2 es la que aporta mayor información en términos de espacio–densidad de ocurrencia y tiempo, pues es más sensible a pequeños cambios en las propiedades de los cúmulos o agrupamientos (densidad de eventos por unidad de área) y velocidad en la ocurrencia de los agrupamientos. D_2 muestra valores extremadamente pequeños para algunos sectores con poca sismicidad registrada y alcanza valores ligeramente mayores para aquellos con un mayor número de eventos. Los valores de D_2 obtenidos en este trabajo son menores que los planteados por Pazo–Arango [13]. Esta diferencia se debe a que en este trabajo solo se considera la posición espacial de los epicentros como medida cuantificadora de la concentración de esfuerzos en la corteza terrestre y el trabajo de Pazo–Arango [13] este analiza la relación espacio – variación espacial – tiempo – velocidad de cambio de la variación espacial.

Para los objetos lineales D_0 alcanza sus mayores valores en los sectores donde se concentran el mayor número de estructuras posibles (fallas) (Fig. 5: sectores 2–5) y puede tomar valores próximos a 2 en áreas que cuentan con varios episodios tectónicos. De este modo, mediante la evaluación de la dimensión de capacidad se puede tener una idea del número de periodos de ruptura, eventos de deformacionales y la complejidad estructural de diferentes regiones analizadas mediante el procesamiento espectral de imágenes satélites y la extracción de lineamientos.

Mediante este análisis se observó que los mayores valores de D_0 para sismos y estructuras están relacionados a los sectores atravesados por la dislocación tectónica activa Falla Pinar (Figs. 5 y 6). Para el sector 1 no se tienen datos sobre la relación de la sismicidad con las estructuras cartografiadas, los sismos en este sector pueden estar vinculados a estructuras ubicadas en la parte norte marina del territorio nacional o corresponder a un régimen dinámico que ha mostrado un receso entre los años 2009–2021. Estas consideraciones se basan en los estudios realizados sobre la migración espacial de la concentración de esfuerzos en el sector realizados por Pazo–Arango [13].

Los resultados antes mencionados son coherentes con trabajos dedicados en el área de estudio que asocian la concentración de epicentros en las inmediaciones de la localidad de San Cristóbal con cambio en el rumbo de la estructura Falla Pinar. El cálculo de la variación de D_0 de la sismicidad por unidad de área sirve como base para futuros mapas de peligro sísmico para la región occidental. Analizar los patrones de agrupamiento sísmico bajo los conceptos de la fractalidad, permiten relacionar la ocurrencia de eventos de magnitudes históricas a las diferentes estructuras sismo generadoras en el área de estudio teniendo en cuenta la relación entre la D_0 de las estructuras y la magnitud de los eventos en su cercanía.

Los resultados obtenidos de la determinación de los parámetros fractales para cada ventana temporal se muestran en la Tabla 2. Nótese que: los valores que se muestran son

aproximaciones no asintóticas. Esta incapacidad de exactitud se debe al hecho de que la determinación de las dimensiones generalizadas para objetos fractales puede presentar pequeñas variaciones en dependencia de las técnicas de medición empleadas.

4.2 Valor b de la relación Gutenberg – Richter.

El valor b de la relación de la relación GR guarda una estrecha relación con la ocurrencia de sismos de magnitudes por encima de la media histórica para una región determinada [13]. Como este parámetro está relacionado estrechamente con la cantidad de eventos analizados por intervalo de tiempo o unidad de área, los resultados de este análisis para la sección 4 son los más apreciables gráficamente, dado que en el área se encuentran dos agrupamientos de epicentros los cuales se aprecia en la Fig. 5. La sección con el menor valor de b es la sección 4, en ella se registra un sismo histórico de mayor magnitud local (4.9) en un ambiente tectónico caracterizado por una actividad sísmica de fondo caracterizada por la presencia de tremor tectónicos y eventos de baja frecuencia con valores entre 1.55 y 2 de magnitud según la escala local. Las fuerzas liberadas durante estas rupturas se relajaron a través de las trazas de fallas de carácter regionales y/o sistemas de fallas asociados a estas. Este sismo se registra cerca de una estructura cartografiada con yacencias similares a la Falla Pinar y aunque en varios trabajos se le asocia la ocurrencia de este evento a dicha estructura, bien puede ser el reflejo de una estructura profunda a la que se le denomina Falla Guane.

En todos los sectores donde el valor b de la relación GR alcanza cifras negativas, se registran magnitudes de hasta 2 veces la media histórica de la región. Además se registran en sectores donde el valor de D_0 para las estructuras es relativamente alto, como es el caso del sector 4. Este resultado cumple con lo planteado en la eq. (6) demostrada por Legrand, D. (2002) [9]. La información aportada por el valor b de la distribución espacial de la sismicidad en conjunto con la aplicación de técnicas estadísticas complejas como las cadenas de Markov, pueden usarse para la construcción de registros sísmicos complejos tal como sugiere Pazo–Arango (2024) [13]

La Tabla 2 constituye el resumen de la estimación de cada uno de los parámetros fractales analizados para la sismicidad y las estructuras objetos de estudio. Es importante tener en cuenta que los resultados mostrados no constituyen valores exactos, sino aproximaciones a los valores reales. Es necesario determinar en qué casos se puede trabajar con propiedades 3D, ya que pocos catálogos sísmicos muestran datos de confianza sobre la ubicación de los hipocentros. La principal limitante de este tipo de análisis está comprendida por la homogeneidad de los catálogos sísmicos, ya que estos afectan a las medidas utilizadas mediante la introducción de ruidos y sesgos en la determinación de los parámetros de cada sismo en el momento de su ocurrencia.

Con todos los parámetros geométricos determinados se puede pasar a visualizar de forma gráfica las relaciones entre el espectro de dimensiones de D_q y las relaciones entre el valor b de la relación GR y la dimensión de Hausdorff de las fallas. El comportamiento del espectro de dimensiones D_q

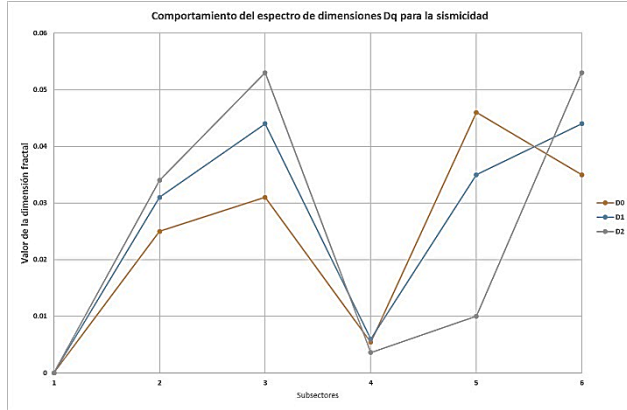


Figura 5. Comportamiento del espectro de dimensiones D_q para la sismicidad.
Fuente: elaborado por el autor

para la sismicidad mantiene un comportamiento similar para la mayoría de las secciones, con excepción de la sección 5 donde la dimensión de capacidad toma valores muy por encima de las demás dimensiones (Fig. 7). Este resultado está incitado por la presencia de 2 agrupamientos, uno que se sitúa a lo largo de la traza sísmica Falla Pinar y el otro sobre un sistema de fracturas pertenecientes a varios periodos de deformacionales. El agrupamiento de sismos asociados a estas estructuras corresponde con la presencia de nodos de fallas potencialmente activos conectados al sistema Falla Pinar.

Para el caso de la relación entre el valor b y la D_0 de las estructuras es evidente que existe una relación inversamente proporcional. Para elevados valores D_0 corresponden valores b pequeños como es para el caso de la sección 4 esto demuestra que en los momentos de ruptura (momentos sísmicos) los esfuerzos acumulados se relajan mediante las trazas de grandes fallas regionales y/o sistemas de fallas asociadas a las mismas (Fig. 8). Sin embargo, el comportamiento algunos epicentros no responde a la estructura Falla Pinar [13], este comportamiento puede estar regulado por complejos sistemas estructurales [12]. Este comportamiento es igual para los sismos de mayores magnitudes en el área de estudio.

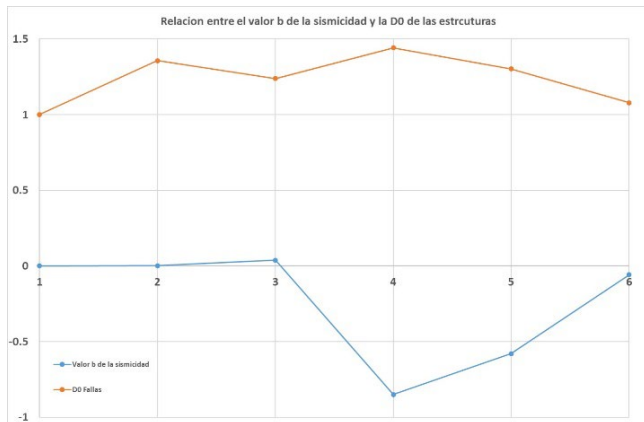


Figura 6. Relación entre el valor b de la sismicidad y la dimensión de capacidad de las estructuras asociadas a la misma.
Fuente: elaborado por el autor.

La gráfica de relación entre el valor b para la sismicidad y el valor de D_0 reafirma el cumplimiento de la relación GR para la sismicidad. Dichas relaciones pueden ser planteadas de la siguiente manera: para terremotos pequeños $D = 3b$, para terremotos intermedios $D = 1.5b$ y para terremotos grandes $D = b$ [9].

Esta relación muestra que el evento de 1880 está espacialmente y estructuralmente relacionado con el sistema Falla Pinar tal y como se plantean en varios trabajos orientados hacia el estudio de las causas de esta sismicidad. Además, la siguiente relación se propone como una capa a tener en cuenta para la construcción de mapas de peligros sísmicos futuros. Estos resultados pueden ser enriquecidos con trabajos que dedicados a la caracterización del umbral de frecuencias de las ondas sísmicas en el periodo cosísmico.

5 Conclusiones

En función de los valores del parámetro b de la relación GR, del espectro de dimensiones generalizadas D_q y de la correlación entre ambos, los subsectores 4, 5 y 6 poseen la mayor complejidad estructural y a su vez los mayores valores actividad sísmica. En estas regiones los esfuerzos se relajan mediante las trazas de grandes fallas y sistemas de fallas asociadas a las estas. La sismicidad de la región presenta un aumento en la frecuencia de ocurrencia sísmica acompañada de una clara migración de los epicentros hacia los sectores 5 y 6. Estos sectores han experimentado los mayores sismos registrados en Cuba occidental y muestran una variación de relación GR que comienza con $D = b$ y tiende hacia $D = 3b$. Este incremento en la actividad tectónica de fondo puede indicar la venida de un evento de magnitudes por encima de la media para la región occidental.

Las mayores concentraciones de esfuerzos están presentes en los subsectores 3, 5 y 6. En estos sectores la Falla Pinar posee un marcado cambio de rumbo y un aumento de la verticalización de su componente normal, estos cambios han sido descritos por varios autores y pueden ser la causa del aumento en la concentración de esfuerzos en dichas áreas. Esta actividad se refleja en secuencias pertenecientes a la cuenca de los palacios por medio de un complejo sistemas de estructuras disyuntivas interconectadas entre sí [1].

La relación del valor b con la dimensión de capacidad de las estructuras mostró dos tendencias en cuanto a su comportamiento. Una relacionada a un régimen caracterizado por estructuras activas producto de nodos con fallas que intersecan al sistema Falla Pinar y el segundo comportamiento de esta relación está dado en los sectores donde se ha cartografiado la Falla Pinar. El análisis de irregularidad de estructuras lineales mediante el procesamiento de lineamientos puede ser utilizado como una herramienta de confianza en la comprensión de la neotectónica a escala regional.

La relación entre la dimensión de capacidad de la sismicidad, su magnitud y la dimensión de Hausdorff de las estructuras en las cercanías de los epicentros confirmo que el evento ocurrido en el año 1880 de magnitud local 6.1 está relacionado con el sistema dominante Falla Pinar tal y como plantean varios autores [1,2,4,13].

La variación de la D_0 en el espacio puede servir como

base preliminar para la elaboración de mapas de peligros sísmicos que tengan en cuenta la relación magnitud - densidad de ocurrencia por unidad de área – dimensión del plano de ruptura.

Referencias

- [1] Cáceres-Govea, D., and Cruz-Gámez, E.M., Metamorphic- tectonic implications under a compression dynamic in Cangre Belt, western of Cuba. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39(1), pp. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1632>
- [2] Cáceres, D., Estructura geológica y pronóstico preliminar para metales básicos más barita en la parte central de las Alturas Pizarrozas del Sur. Pinar del Río. Pinar del Río: Hnos. Saiz Montes de Oca. 1997.
- [3] Despaigne-Longchamp, G., La entropía Poissoniana de la distribución espacial de la sismicidad y su variación temporal como premonitor a la ocurrencia de grandes sismos, 2017.
- [4] Estévez-Cruz, E., Cueto-Gil, C.J., Díaz-Guanche, C., Ramírez-Hernández, R., y Ordaz-Hernández, A., Estudio del Frente montañoso de la zona de Falla Pinar, Cuba occidental, y su relación con la tectónica reciente. *Cuaternario y Geomorfología*. 35(3-4), pp. 29-53, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17735/cyg.v35i3-4.84170>
- [5] Gordon, M.B., Mann, P., Cáceres, D., and Flores, R., Cenozoic tectonic history of the North America - Caribbean plate boundary zone in Western Cuba. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 102(B5), pp. 55-82, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB03177>
- [6] Hatten, C.W., Geologic report on Sierra de los Órganos. La Habana, (Inédito). 1957.
- [7] Henares-Romero, J., López-Casado, C., Martínez-López, F., Peláez-Montilla, J.A., y Delgado, J., Análisis fractal de las fallas y el parámetro b de la Cordillera Bética. *Geo-Temas*, 6(3), pp. 155-158, 2004.
- [8] Kanamori, H., and Anderson, L., Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, pp. 1073-1095, 1975.
- [9] Legrand, D., Fractal dimension of small, intermediate and large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, pp. 3318-3320, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120020025>
- [10] Lei, X., and Kusunosc, K., The fractal structures and characteristic scale of earthquakes, active faults, rivers and topographic relief of Japan. *Geophysical Journal International*, 139, pp. 754-762, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00977.x>
- [11] Oncel, A.O., Wilson, T.H., and Nishizawa, O., Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg-Richter b values. *Journal of Geophysical*, 106, pp. 21827-21841, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JB900408>
- [12] Ordaz, A., Hernández, J., Cofiño, C.E., Méndez, A., y Galaz, G., Análisis estructural y morfotectónico en los municipios San Cristobal y Candelaria, Cuba Occidental: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la Falla Pinar. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 82, pp. 7-23, 2013. DOI: <https://doi.org/10.14350/riig.36384>
- [13] Pazo-Arango, M.E., Análisis entrópico y fractal de la distribución espacial de la sismicidad en un sector de Cuba occidental y su relación con el régimen tectónico de la Falla Pinar. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 55, pp. 70-80, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n55.112800>.
- [14] Rigasi, D., Organos Mountains. La Habana. C.N.F.G, 1958.
- [15] Wilson, T.H, Non-fractal size-scaling attributes of fracture trace and active fault networks with examples from the central Appalachians and Japan. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 31: A 112. 1999.

M.E. Pazo-Arango, recibió el título de Ing. Geólogo en 2023 en la Universidad de Pinar del Río Hnos. Saiz Montes de Oca, Cuba. En 2024 comenzó a trabajar en el Instituto de Geología y Paleontología donde desempeña el rol de especialista en tectónica. Sus intereses de investigación incluyen: geodinámica, geología estructural, tectónica, neo tectónica, geo estadística, estadística compleja, matemática fractal, sísmica, programación y pronóstico de series temporales no lineales utilizando técnicas de inteligencia estadística y computacional.
ORCID: 0009-0009-5628-1060