

# BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 56, Julio - Diciembre de 2024

ISSN 0120 - 3630



Imagen creada con Inteligencia Artificial IA en: <https://gemini.google.com/app?hl=es>

Facultad de Minas  
Sede Medellín



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

Número 56, Julio - Diciembre de 2024

Publicación de la Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia  
ISSN 0120 - 3630

**Boletín de Ciencias de la Tierra** es una publicación creada en 1978, en el Programa Curricular de Ingeniería Geológica, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La revista publicará artículos originales resultados de investigación en las diferentes áreas de las geociencias y pretende dinamizar la discusión científica en torno al conocimiento del territorio colombiano, sus recursos y restricciones. Se publicaran tanto artículos de análisis específicos como de interés regional, que promuevan el desarrollo de las Ciencias de la Tierra.

**Boletín de Ciencias de la Tierra** es una publicación dirigida a investigadores e interesados en las áreas de las geociencias y la ingeniería. Publica artículos sobre las siguientes áreas:

- |  |   |   |
|--|---|---|
| • Estratigrafía, sedimentología, estructura y evolución de cuencas   | • Geología económica, metalogénesis, génesis y reservorios de hidrocarburos   | • Geoquímica                                    |
| • Geoquímica y geofísica   | • Minería, mineralogía, metalurgia y extracción de recursos minerales         | • Minería                                       |
| • Vulcanología, petrología ígnea y metamórfica   | • Paleontología, paleoclimatología, geología del Cuaternario y geoarqueología | • Metalurgia y extracción de recursos minerales |
| • Tectónica, modelamiento sismo -tectónico y geodinámico   | • Aplicaciones de software e inteligencia artificial en ciencias de la Tierra | • Recursos naturales y sostenibilidad           |
| • Geomorfología, amenazas geológicas, geología ambiental, investigación de suelos, cambio climático y patrimonio geológico |   | • Recursos naturales y sostenibilidad           |
| • Aprovechamiento y explotación de recursos minerales  |   | • Hidrogeología, oceanografía y geotermia       |

**Boletín de Ciencias de la Tierra** publicará dos números en el año con editorial, artículos de investigación, ensayos, comunicaciones breves e imágenes diagnósticas. Los artículos enviados deberán ser siempre originales y no estar sometidos a otra publicación; todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

La orientación general para la presentación de artículos e información interesante se puede encontrar en la dirección electrónica:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/about/submissions#authorGuidelines>.

El correo electrónico de la revista es: [rbct\\_med@unal.edu.co](mailto:rbct_med@unal.edu.co), Teléfono y Fax: (57-4) 425 53 43

## Imágen de la carátula:

Imagen creada con Inteligencia Artificial IA en: <https://gemini.google.com/app?hl=es>

### BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 56, Julio - Diciembre de 2024

Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia

ISSN impreso: 0120 - 3630 ISSN en línea: 2357-3740

Periodicidad semestral: Enero - Junio y Julio - Diciembre

Tarifa Postal Reducida No. 2015-456 .

4-72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2024

Carrera 80 No. 65 - 223

Facultad de Minas - Bloque M9 - Of.: 107

Medellín - Colombia

Teléfono: (57+4) 425 53 43

e-mail: [rbct\\_med@unal.edu.co](mailto:rbct_med@unal.edu.co)

Versión electrónica disponible en:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

<http://www.scielo.org.co/scielo.php>

Grupo Centro Editorial - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD, Director

Mónica del Pilar Rada T., Coordinación Editorial

Catalina Cardona A., Asistente editorial

Manuela González C., Asistente editorial

Todográficas Ltda, Diagramación

© Copyright 2024. Universidad Nacional de Colombia

Se permite la reproducción total o parcial de textos con fines didácticos, siempre que se cite debidamente la fuente. A menos que se indique lo contrario.

#### Nota:

Todas las declaraciones, métodos, instrucciones e ideas son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente representan la visión de la Universidad Nacional de Colombia. El editor no se hace responsable de ninguna lesión y / o daño por el uso del contenido de esta revista.

Los conceptos y opiniones expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores.

**BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA Número 56, Julio - Diciembre de 2024**

Es una edición de 100 ejemplares en papel y se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2024

En Todográficas Ltda. Medellín - Colombia

Revista indexada en:

SCOPUS

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

Índice Actualidad Iberoamericana, del Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología de Chile.

Base de Datos Periódica de La Universidad Nacional Autónoma de México.

Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

Emerging Sources Citation Index (ESCI) - Journal Citation Reports, Clarivate.

SE SOLICITA CANJE - EXCHANGE SOLICITED

Los pedidos de esta serie de publicaciones en Suscripción y/o Canje,

pueden ser solicitados a:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biblioteca Facultad de Minas - Bloque M5

Carrera 80 No. 64 - 223

Teléfonos: (57+4) 425 53 43, 430 97 86 Medellín - Colombia

Correo Electrónico: [canje@unal.edu.co](mailto:canje@unal.edu.co)



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**BOLETÍN**  
**DE**  
**CIENCIAS DE LA TIERRA**

## CONSEJO DE LA FACULTAD DE MINAS

### Decana

Eva Cristina Manotas, PhD

### Vicedecano Académico

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

### Vicedecano de Investigación y Extensión

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, PhD

### Director de Bienestar Universitario

Camilo Alberto Suárez Méndez, PhD

### Secretario Académico

Carlos Mario Sierra Restrepo, PhD

### Representante de Directores de Áreas

#### Curriculares

John Robert Ballesteros Parra, PhD

### Representante de Directores de Áreas

#### Curriculares

Claudia Helena Muñoz Hoyos, PhD

### Representante de Unidades Académicas

#### Básicas

Álvaro Jesús Castro Caicedo, PhD

### Representante de Unidades Académicas

#### Básicas

Albeiro Rendón Rivera, PhD

### Representante Profesores

Luis Hernán Sánchez Arredondo, PhD

### Representante de estudiantes al Consejo de

#### Facultad

BleidysThamara Valderrama Casas

### Representante de estudiantes de posgrado al

#### Consejo de Facultad

Sara Daniela Coronado Maju

## COMITÉ EDITORIAL DE FACULTAD

### Decana

Eva Cristina Manotas, PhD

### Vicedecano de Investigación y Extensión

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, PhD

### Miembros

Luz Alexandra Montoya Restrepo, PhD

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Enrique Posada Restrepo, MSc

Mónica del Pilar Rada Tobón, MSc

### Miembros de apoyo

Francisco Montaña Ibáñez, MSc

Director Editorial UN

Andrés Pavas Martínez, PhD

Director Nacional de Bibliotecas UN

## COMITÉ EDITORIAL

### Editor

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD  
Departamento de Materiales y Minerales  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

### Editores

Gladys Bernal Franco, PhD.  
Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Carles Sanchis-Ibor, PhD.  
Universitat Politècnica de València, España

Umberto Cordani, PhD.  
Instituto de Geociências  
Universidade de São Paulo, Brazil

Diego Villagómez Díaz, PhD.  
Tectonic Analysis Ltd. Switzerland

Teresa Orozco Esquivel, PhD.  
Centro de Geociencias  
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Gretchen T. Lapidus Lavine, PhD.  
Dpto. de Ingeniería de Procesos e Hidráulica  
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento, PhD.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia -  
UPTC, Colombia

Vanesa Bazán, PhD.  
Departamento de Estudios de Postgrado de la Facultad  
de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan,  
Argentina

Asieh Hekmat  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, PhD.  
Universidad de Concepción, Chile

Juan María Menéndez Aguado, PhD.  
Departamento de Explotación y Prospección de Minas,  
Universidad de Oviedo, España



## CONTENT

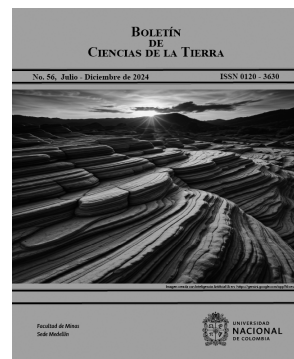
Editorial – First Meeting Néstor Ricardo Rojas-Reyes	7
Mineral resource classification: case study of a low volume vetiform mining project Luis Hernán Sánchez-Arredondo & Andrés López-Gómez	8
Organic matter content evaluation and its effects, by well logs. Case study of Western Varadero sector, Cuba Olga Castro-Castiñeira & Ronal Barcala-Alvarez	18
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 Marcos Enrique Pazo-Arango	25
Physical diagnostic of a 16th century religious building damaged by an earthquake Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Víctor Galindo-López, José G. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustin Salas-Xochipa	33
Evaluation of normalization methods applied to Short-Wavelength Infrared (SWIR) spectroscopy mineral databases from multiple instruments and for vectoring analysis exploration Juan Camilo Paredes, Yan Carlos Trigos & Camilo Uribe-Mogollon	47
Climatic water balance of Puyo and Amazon River Airport weather stations Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Jairo Miguel Maldonado-Erao, Brigitte Tatyana Pérez-Tuti, Mayerling Kirina Toscano-Guatatoca, Keyla Fernanda Palacios-Guerra & Cesar Bladimir Pérez-Noguera	54

**Our cover:**

Image created with artificial intelligence AI

**Source:**

<https://gemini.google.com/app?hl=es>

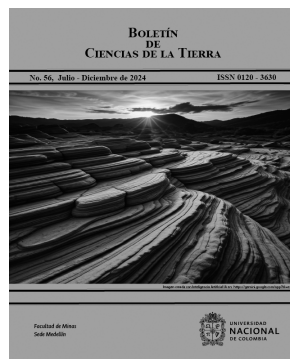


## CONTENIDO

Editorial – Primer Encuentro Néstor Ricardo Rojas-Reyes	7
Clasificación de recursos minerales: caso de estudio sobre un proyecto minero vetiforme de bajo volumen Luis Hernán Sánchez-Arredondo & Andrés López-Gómez	8
Evaluación del contenido de materia orgánica y sus efectos, por registros geofísicos en el ejemplo de pozos petroleros del sector Varadero Oeste, Cuba Olga Castro-Castiñeira & Ronal Barcala-Alvarez	18
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	25
Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Víctor Galindo-López, José G. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustín Salas-Xochipa	33
Evaluación de métodos de normalización aplicados a bases de datos minerales de Espectrografía de Infrarrojo Cercano (SWIR) provenientes de múltiples instrumentos y para análisis de vectores de exploración Juan Camilo Paredes, Yan Carlos Trigos & Camilo Uribe-Mogollon	47
Balance hídrico climático de estaciones meteorológicas Puyo y Aeropuerto Río Amazonas Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Jairo Miguel Maldonado-Eraza, Brigitte Tatyana Pérez-Tuti, Mayerling Kirina Toscano-Guatatoca, Keyla Fernanda Palacios-Guerra & Cesar Bladimir Pérez-Noguera	54

**Nuestra carátula:**  
Imagen creada con inteligencia artificial IA

**Fuente:**  
<https://gemini.google.com/app?hl=es>





## Editorial – Primer Encuentro

Néstor Ricardo Rojas-Reyes

*Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Instituto de Minerales -CIMEX, Medellín, Colombia. nrrojasr@unal.edu.co*

El pasado 9 de octubre de 2024 tuve la oportunidad de reunirme con varios editores de revistas nacionales e internacionales en el marco del primer encuentro de revistas científicas/humanistas, el cual se llevó a cabo en la ciudad más septentrional de Colombia continental y de Suramérica: Riohacha. El evento fue muy bien organizado por la profesora Emilce Sánchez, editora de la revista Entretextos y un grupo profesoral de la Universidad de la Guajira de una calidad humana abrumadora, para la cual les presento mi más profundo agradecimiento.

Dentro de los asistentes a este valioso evento aparecieron figuras influyentes en el tema editorial como el profesor José Alonso, coordinador general de Latindex (México) y el profesor Carlos Agudelo, codirector de SciELO (Colombia), además de otros extranjeros claves, de forma presencial y de forma virtual.

Este “primer encuentro” no sólo fue sobre revistas, para quien escribe, también fue el primer encuentro con otros editores, pues soy neófito en el asunto editorial toda vez que acabo de asumir el cargo de editor para la revista Boletín de Ciencias de la Tierra. En esta primera reunión tuve la suerte de compartir historias y experiencias profesionales con docentes quienes son a su vez editores como Mauricio Hernández de la Universidad de la Salle, Héctor Flórez de la Universidad Distrital, Tatiana Gómez del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Santa Marta) e Iris Jiménez de la Universidad de la Guajira, a quienes expreso mi gratitud y ofrezco mi futura amistad.

Fueron 3 días de exposiciones, todas interesantes y con variadas aristas por explorar, pues para alguien quien está incursionando en el mundo de la gestión editorial, cada oración y aporte de los conocedores del asunto representó un gran tesoro, no sólo por la cualificación de sus presentaciones sino también por la calidad humana allí mostrada, lejos de los egos académicos que tanto abundan dentro de las universidades y que ínfimo aporte hace para el avance de una ciencia más democrática. Además de intentar conservar la información adquirida en el disco duro de mi cerebro, los consejos de las personas que conforman este gremio fueron, en demasía, provechosos para mí. Como parte de los temas tratados en el encuentro se destacaron: la divulgación científica en Colombia; ciencia abierta; medición de las publicaciones de revistas científicas y programas académicos; futuro de las revistas científicas; gestión editorial en revistas científicas Latinoamericanas; uso del Open Journal System (OJS); retos, riesgos y oportunidades de la inteligencia artificial y la digitalización de las revistas, entre otros más.

Ojalá en el futuro cercano se vuelva a presentar un espacio de discusión para editores, y que esta ardua labor que hicieron los profesores de la Universidad de la Guajira no se quede en el limbo de las buenas acciones, y sea esta la oportunidad para hacer la invitación a todos los editores de las revistas nacionales y latinoamericanas para que nos reunamos en un “segundo encuentro” y fortalecer esta idea que nació en Colombia boreal y nos dé igualmente un norte a quienes editamos revistas científicas y humanistas.



# Clasificación de recursos minerales: caso de estudio sobre un proyecto minero vetiforme de bajo volumen

Luis Hernán Sánchez-Arredondo & Andrés López-Gómez

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. [lhsanche@unal.edu.co](mailto:lhsanche@unal.edu.co), [anlopezgo@unal.edu.co](mailto:anlopezgo@unal.edu.co)

Recibido: 6 enero 2024. Recibido en formato revisado: 24 junio 2024. Aceptado: 26 junio 2024.

## Resumen

Este artículo presenta una guía metodológica para la clasificación de recursos minerales, siguiendo técnicas de análisis geoestadísticas y la terminología del reporte de recursos según el estándar colombiano de recursos y reservas (ECRR-2018). A modo de ejemplo se exhiben los resultados obtenidos del estudio de un proyecto minero de bajo volumen para un depósito filoniano con más de 700 muestras de canal, sobre una veta auro-argentífera. Se elaboraron curvas de grado tonelaje, el factor de dilución y el tenor de corte financiero. Se calculó la vida óptima del proyecto y el rendimiento óptimo de producción. Las reservas obtenidas al involucrar un tenor de corte de 4,2 Au g/ton fueron de 28.541 toneladas, con un contenido de 13.396 onzas troy de oro y un grado promedio de 14,60 Au g/ton. Análisis de conciliación de los resultados fueron elaborados utilizando el método geoestadístico de simulación condicionada por bandas rotantes.

*Palabras clave:* procedimiento geoestadístico; recursos minerales; reservas minerales; curvas de grado tonelaje; conciliación

## Mineral resource classification: case study of a low volume vetiform mining project

### Abstract

This article presents a methodological guide for the classification of mineral resources, following geostatistical analysis techniques and the terminology of resource reporting according to the Colombian standard of resources and reserves (ECRR-2018). As an example, the results obtained from the study of a low-volume mining project for a vein deposit with more than 700 channel samples, on an auro-argentiferous vein, are presented. Curves of tonnage grade, dilution factor and financial cut-off grade were developed. The optimal project life and optimal production performance were calculated. The reserves obtained by involving a cut-off grade of 4.2 Au g/ton were 28,541 tons, containing 13,396 troy ounces of gold and an average grade of 14.60 Au g/ton. Reconciliation analyzes of the results were prepared using the geostatistical method of conditional simulation with turning bands method.

*Keywords:* geostatistical procedure; mineral resources; mineral reserves; grade tonnage curves; conciliation.

## 1 Introducción

Las técnicas geoestadísticas aún no son muy populares en Colombia; sin embargo, esta área de la geología económica ofrece excelentes alternativas para caracterizar los recursos minerales y brindar información confiable a la hora de tomar decisiones de inversión. La mayor parte de los problemas de estimación minera se vinculan a las estimaciones locales, donde el principal objetivo es la precisión y la localización de unidades de minado con leyes superiores a una ley de corte determinada.

Las etapas por desarrollar en un estudio geoestadístico consisten en un examen exploratorio de la información,

donde el análisis variográfico representa la principal herramienta de estudio, ya que permite medir la variabilidad espacial, la cual está sujeta al tipo de muestreo; ya sea puntual, de testigos de perforación o de bloques. Por lo tanto, es necesario identificar la variabilidad espacial, áreas de influencia y anisotropías de las variables de estudio. La simulación geoestadística condicionada es actualmente considerada la mejor alternativa para la estimación local de recursos recuperables y el dimensionamiento técnico del proyecto minero. En el contexto minero, la simulación implica un intento de crear un conjunto de valores que posean las mismas características espaciales y estadísticas que los tenores reales, por lo que los resultados se asemejen,

**How to cite:** Sánchez-Arredondo, L.H. y López-Gómez A., (2024). Clasificación de recursos minerales: caso de estudio sobre un proyecto minero vetiforme de bajo volumen. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 56, pp. 8-17. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.112384>



Tabla 1. Estadísticas arrojadas por la Herramienta Declustering (Desagrupamiento).

	Cantidad	Promedio		Desviación estándar	
		Bruto	Ponderado	Bruto	Ponderado
Au [Au g/ton]	783	17,24	14,7	54,87	48,42
Espesor [m]	783	0,46	0,45	0,35	0,35

Fuente: Propia.

relativamente a la realidad absoluta. [1]. La base de datos a ser utilizada en este estudio corresponde a un proyecto de oro filoniano, con reporte de 783 datos de oro y espesor de una veta mineralizada esencialmente con pirita, esfalerita y galena. La secuencia lógica de una clasificación de recursos es: la elaboración del modelo geológico, la validación de los datos (muestras QAQC, donde para la realización de este ejercicio; se parte de que las muestras de canal cumplieron los estándares de calidad), interpretación geológica, análisis exploratorio de datos, variografía, estimación de leyes, validación y finalmente clasificación de recursos. Es decir, el procedimiento geoestadístico abarca desde el análisis exploratorio de datos hasta la clasificación.

### 2 Análisis Exploratorio de datos

Como se mencionó anteriormente, este análisis estará basado en muestras de canal, recolectadas con el objetivo de ser enviadas a análisis de laboratorio para conocer la ley mineral de oro en gramos por tonelada (Au g/ton); en el mismo sitio de la toma de muestra se midió el espesor de la veta (en metros). El mapa del Desarrollo minero y sus respectivos sitios de muestreo se observan en la Fig. 1.

Antes de iniciar el proceso exploratorio, se verificó la presencia de datos agrupados, siendo necesario desagruparlos. El principio de desagrupamiento (declustering) consiste en la asignación de un peso a cada dato donde se define una determinada variable teniendo en cuenta posibles conglomerados de puntos muestreados para una ventana espacial. El procedimiento se elabora con una serie de pruebas con diferentes ventanas móviles. La Tabla 1 muestra los resultados del desagrupamiento, donde se resalta que el promedio del contenido de oro es 17,24 Au g/ton, mientras que después de desagrupar es de 14,70 Au g/ton, igualmente la desviación estándar antes y después de desagrupar es de 54,87 y 48,42 respectivamente. El agrupamiento de datos para la variable espesor no es notorio en el reporte, ya que se obtienen los mismos resultados antes y después.

Por otro lado, más del 90% de los datos muestran contenidos de oro inferiores a 50 Au g/ton, por lo tanto, el diseño de la estructura variográfica se desarrolló con base a un capping de la variable oro para este valor. Los mayores tenores de oro se observan concentrados hacia el sector sur (Fig. 2) y hacia el occidente del depósito (Fig. 3), indicando que en esta área existen zonas enriquecidas.

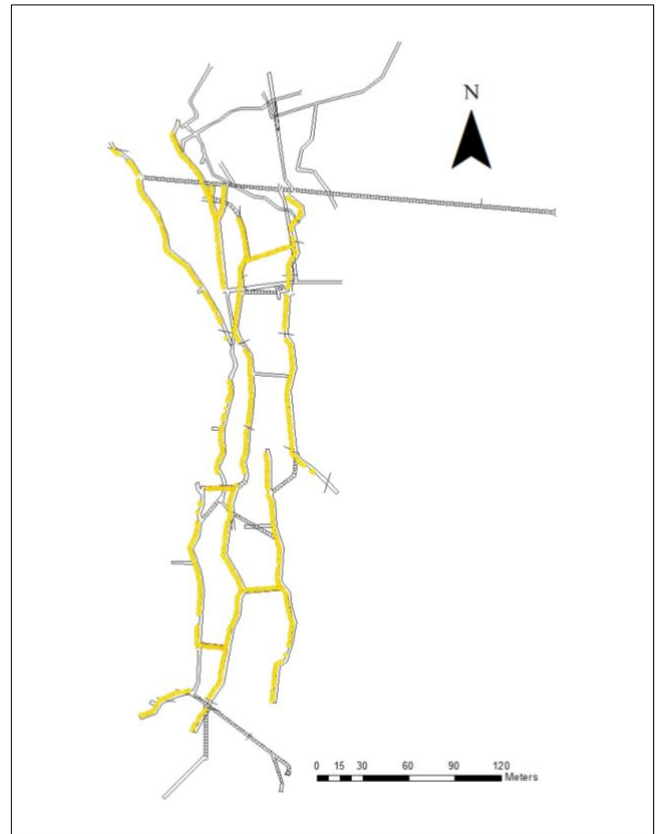


Figura 1. Mapa de Desarrollo minero (líneas negras) y puntos de muestreo (en amarillo) de un filón de cuarzo auroargentífero mineralizado con pirita, esfalerita y galena. Fuente propia.

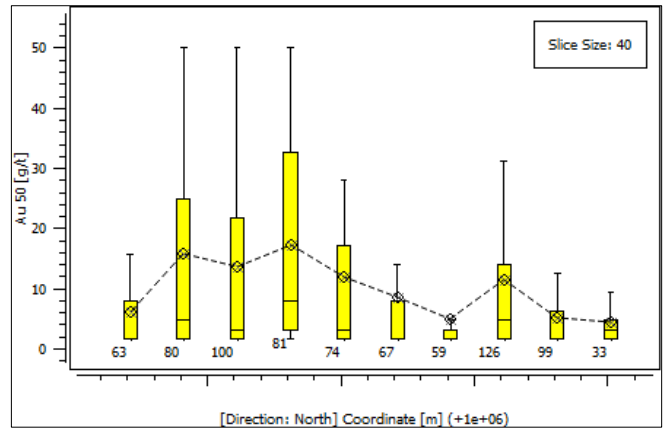


Figura 2. Gráfico de franjas (Swath plot) de la variable oro para tenores inferiores o iguales a 50 Au g/ton en la dirección norte. Fuente propia.

### 3 Análisis variográfico

La herramienta básica de la geoestadística que nos permite rendir cuenta de la continuidad presente de la mineralización es el variograma  $\bar{\gamma}(h)$ , el cual constituye un índice de la variabilidad presente en el

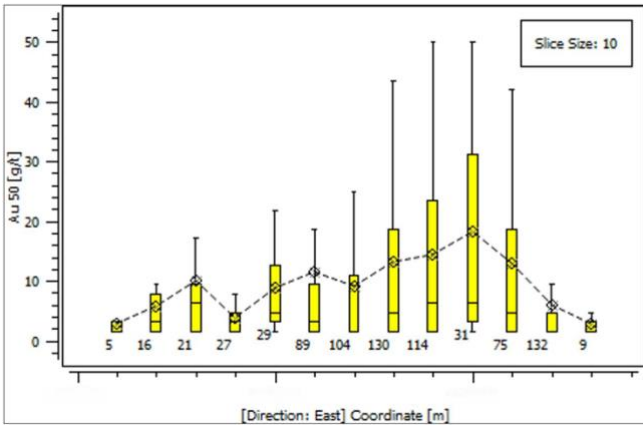


Figura 3. Gráfico de franjas (Swath plot) de la variable oro para tenores inferiores o iguales a 50 Au g/ton en la dirección Este.  
Fuente propia.

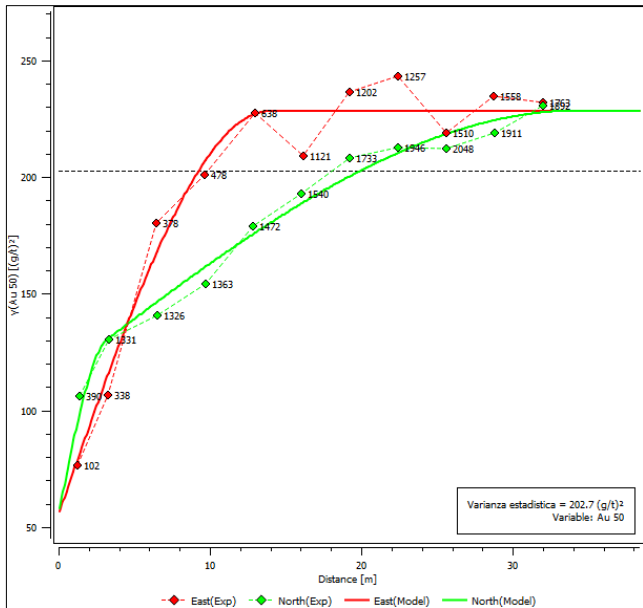


Figura 4. En este caso el efecto de pepita  $[55,33 \text{ (Au g/ton)}^2]$ , representa el 24% de la varianza real  $[228,6 \text{ (Au g/ton)}^2]$ ; equivalente a la meseta del variograma. Se observa además como la varianza estadística  $[202,7 \text{ (Au g/ton)}^2]$  subestima en un 12% la varianza real en este depósito de oro. El efecto pepita puede ser debido a que entre el 40-45% de plata y oro en este ocurren como pequeñas inclusiones dentro de la estructura cristalina de los sulfuros, mientras que entre el 55% y el 60% restante del oro ocurren en forma nativa.  
Fuente propia.

depósito, permitiendo medir un cierto carácter de estacionaridad presente en la mayoría de los depósitos minerales, donde el  $\bar{Y}(h)$  aumenta a medida que la distancia aumenta hasta alcanzar un valor máximo denominado meseta ( $C(0) = \text{covarianza cuando la distancia es cero}$ ) y la distancia a la cual se produce la meseta se llama alcance o rango de influencia ( $a$ ) de la mineralización. Los cambios bruscos a muy pequeña escala cuando la distancia tiende a cero, se reflejan en un salto brusco de  $\bar{Y}(h)$  denominado efecto de pepita ( $C_0$ ).

Al analizar la variabilidad espacial de un fenómeno puede

ocurrir que el semivariograma no coincide en distintas direcciones de análisis, a esto se le llama anisotropía. El semivariograma debe ser entonces caracterizado desde varias direcciones con la finalidad de establecer un modelo variográfico más integral [2]. En nuestro caso de estudio se obtuvo un variograma anisotrópico como se muestra en la Fig. 4; en este podemos observar que existen dos direcciones preferenciales de la mineralización (líneas a trazos correspondiente a los variogramas experimentales y líneas continuas correspondientes a los modelos teóricos); una expresión en el sentido Este - Oeste y la otra en el sentido Norte - Sur. Los rangos de influencia en el primero y segundo caso corresponden a 14 m y 34 m respectivamente.

Ambas direcciones de variogramas están representadas por estructuras anidadas, es decir, se observa la existencia de un efecto pepita y dos estructuras esféricas que lo conforman, como se observa en las eqs. (1) y (2).

$$\gamma(h, 0^\circ) = 55 \text{ (g/t)}^2 + \text{Esf} [3m, 59 \text{ (g/t)}^2] + \text{Esf} [34m, 114 \text{ (g/t)}^2] \quad (1)$$

$$\gamma(h, 90^\circ) = 55 \text{ (g/t)}^2 + \text{Esf} [13m, 59 \text{ (g/t)}^2] + \text{Esf} [14m, 114 \text{ (g/t)}^2] \quad (2)$$

Cabe destacar que el efecto pepita ( $C_0$ ) reportado por el semivariograma es característico de este tipo de depósitos. La expresión de este fenómeno se debe a la existencia de 2 tipos de génesis del oro en depósitos vetiformes; a nivel molecular, el oro se presenta como inclusiones dentro de la estructura cristalina de los sulfuros, además puede presentarse de manera nativa, acumulándose en cantidades que pueden llegar a ser visibles macroscópicamente. La gráfica del semivariograma a su vez denota una anisotropía geométrica, lo que quiere decir que ambas estructuras coinciden en la Meseta, en el efecto pepita y difieren en el rango de influencia.

#### 4 Validación Cruzada.

Una vez construido el Semivariograma representativo del depósito, se hace necesario validarlos con el objetivo de evaluar los errores de estimación y así establecer el grado de bondad del modelo variográfico. La validación cruzada es un procedimiento ampliamente utilizado para este propósito; consiste en extraer individualmente datos puntuales de una matriz de datos para posteriormente, ser estimados mediante un grupo de datos vecinos, permitiendo comparar los resultados obtenidos de las estimaciones puntuales con los valores conocidos [2]. Con la técnica geoestadística denominada kriging puntual y el algoritmo del variograma, se estiman de nuevo los puntos de muestreo y posteriormente se procede a comparar con los datos reales de los tenores obtenidos.

Según Chiles y Delfiner (1999), para considerar que un modelo es representativo del fenómeno en estudio, debe cumplir con los parámetros de validación descritos a continuación. 1) un promedio de los errores cercano a cero, 2) una desviación estándar de los errores cercana a 1 (Como se muestra en la Fig. 5), 4), un rechazo de los datos estimados inferior a un 10% (es decir, aquellos datos que queden por fuera de los umbrales establecidos con base al nivel de confianza) [1], y un parámetro adicional sería una buena correlación entre los datos estimados y los datos reales.

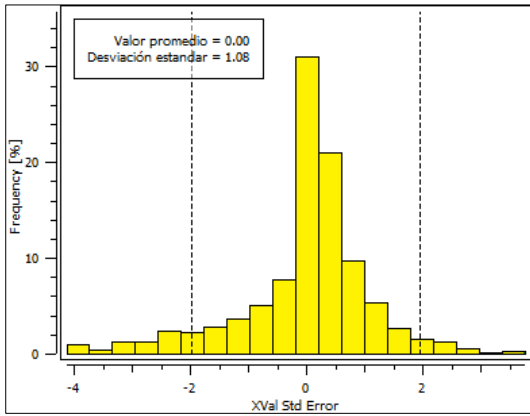


Figura 5. Histograma de los errores de estimación estandarizados arrojado por la herramienta Validación Cruzada. Los valores atípicos son aquellos que se encuentran por fuera de las líneas verticales, trazadas con base al valor umbral que a su vez está asociado al nivel de confianza (95%). Podemos observar que el promedio de los errores es 0 y la desviación estándar es aproximadamente 1. Fuente propia.

El cumplimiento de estos parámetros permite considerar que una estructura variográfica es adecuada para proceder con cierto grado de bondad al aplicar un método de estimación para tenores y espesores con técnicas geoestadísticas sobre un diseño de bloques.

## 5 Estimación

### 5.1 Estimación por Kriging Ordinario de Bloques (KOB)

La estimación local de los recursos “in situ” debe hacerse con técnicas geoestadísticas, las cuales proporcionan un procedimiento de estimación denominado Kriging, el cual fue establecido por el Profesor Matheron (1962) [3]. Este método permite elaborar una cartografía automática (por ejemplo, de tenores), detectar zonas cuya estimación es menos confiable y evaluar bloques de minado considerando la continuidad de la mineralización.

Como ejemplo de la dinámica del Kriging de bloques, tenemos una unidad de minado como el bloque de la Fig. 6, la cual está siendo influenciada por 4 muestras (muestras de canal o perforaciones).

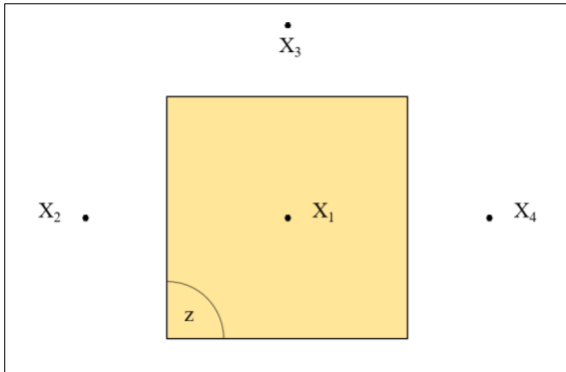


Figura 6. El método de estimación por bloques consiste en establecer un grado promedio para el bloque usando un grupo de datos cercanos. Para mejor comprensión del lector se ha idealizado un panel minero a ser estimado con muestras localizadas simétricamente. Fuente propia.

El procedimiento Kriging:

- Introduce la continuidad de la mineralización.
- Busca un estimador lineal  $Z^* = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3 + \lambda_4 X_4$  en el cual  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ .
- Condiciona la estimación para que la varianza sea mínima (varianza Kriging).

El Sistema para determinar  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , se escribe como se muestra en las Ec. (3) – (8):

$$\lambda_1 \bar{Y}_{11} + \lambda_2 \bar{Y}_{12} + \lambda_3 \bar{Y}_{13} + \lambda_4 \bar{Y}_{14} = \bar{Y}_{1z} - \mu \quad (3)$$

$$\lambda_1 \bar{Y}_{21} + \lambda_2 \bar{Y}_{22} + \lambda_3 \bar{Y}_{23} + \lambda_4 \bar{Y}_{24} = \bar{Y}_{2z} - \mu \quad (4)$$

$$\lambda_1 \bar{Y}_{31} + \lambda_2 \bar{Y}_{32} + \lambda_3 \bar{Y}_{33} + \lambda_4 \bar{Y}_{34} = \bar{Y}_{3z} - \mu \quad (5)$$

$$\lambda_1 \bar{Y}_{41} + \lambda_2 \bar{Y}_{42} + \lambda_3 \bar{Y}_{43} + \lambda_4 \bar{Y}_{44} = \bar{Y}_{4z} - \mu \quad (6)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1 \quad (7)$$

$$\sigma_K^2 = \sum \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) + \mu \quad (8)$$

$\bar{Y}$  constituye el valor medio de la función  $\gamma$  cuando un punto  $x$  se mueve en el espacio de un punto A a la coordenada  $x+h$  ubicada en un punto B. A pesar de la impopularidad de las técnicas geoestadísticas, debido en su mayoría a la complejidad matemática que requieren, existen de igual manera una serie de propuestas para la clasificación de recursos, en su mayoría basadas en el error estandarizado de la varianza KOB. En el proyecto minero objeto de estudio, se diseñaron unidades de minado de 5 m \* 5 m para efectos de la homogeneidad de los resultados; sin embargo, otra opción viable para el diseño de bloques o unidades de minado es el de utilizar el 50% o el 100% de la persistencia de la mineralización (es decir, del rango de influencia) del variograma anisotrópico de la Fig. 4, obteniéndose unos bloques de 17 m \* 7 m o 34 m \* 14 m aproximadamente (ver Fig. 7).

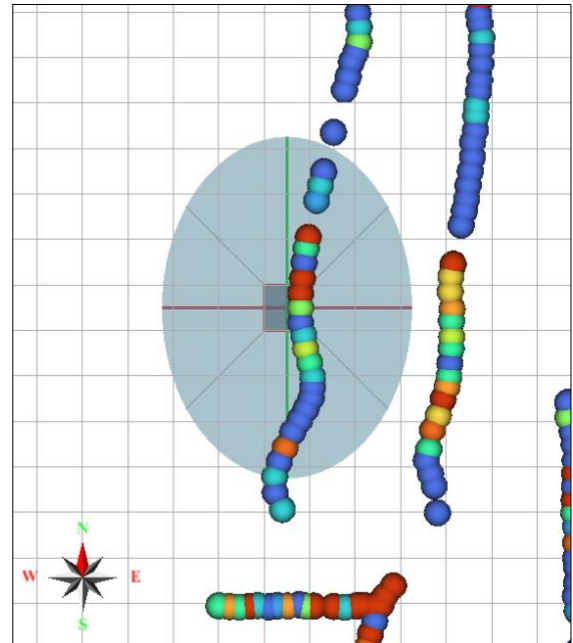


Figura 7. Diseño de bloques de minado de 5 m \* 5 m en contraste con el elipsoide de búsqueda, las dimensiones de este último elaboradas automáticamente conforme a la persistencia de la mineralización (i.e rango de influencia del Semivariograma). Fuente propia.

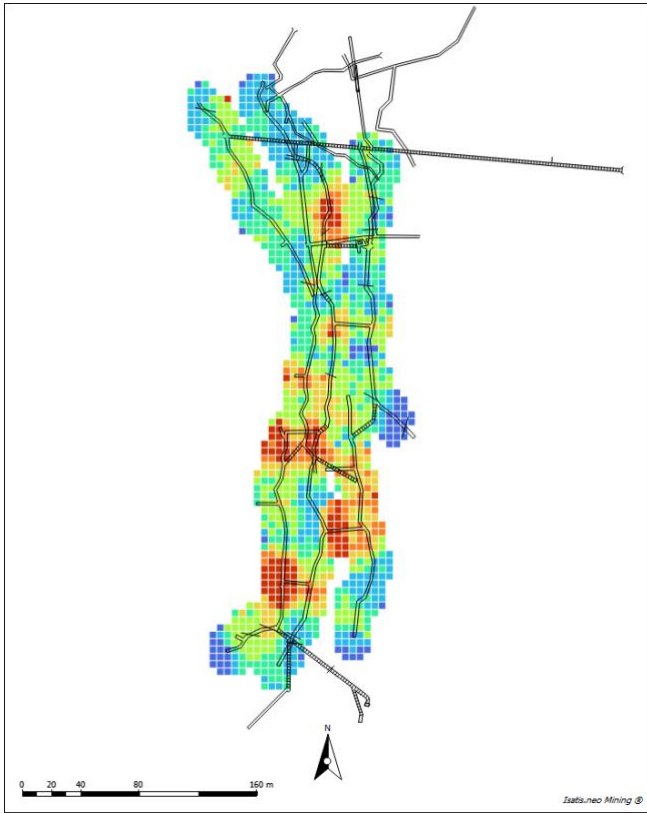


Figura 8. Mapa de bloques estimados por KOB y reclasificados por colores según los cuantiles 5, 25, 50, 75, 90, y 98 de los tenores estimados. Fuente propia.

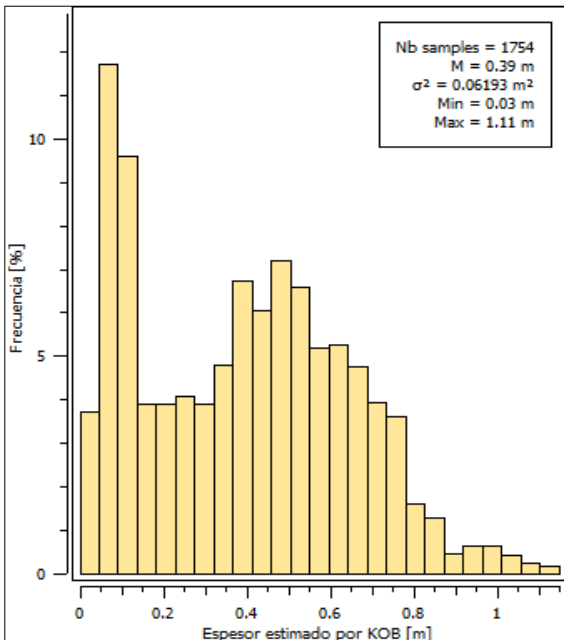


Figura 9. Histograma de frecuencias que resume las estadísticas obtenidas al estimar la variable espesor por el método de Kriging ordinario de bloques. Fuente propia.

Los resultados obtenidos al ejecutar el procedimiento del KOB se muestran en el plano de la Fig. 8. La estimación de los

volumétricos para cada uno de los paneles requiere adicionalmente de la estimación por kriging de los espesores promedios para cada bloque. El histograma de los resultados de esta estimación es presentado en la Fig. 9, donde se reportan 1.754 bloques estimados con un espesor promedio de 0,39 m, variando entre un mínimo de 0,03 m y un máximo de 1,11 m.

Kriging genera mapas suaves que no consideran el efecto proporcional, ni el efecto de información. Como veremos más adelante, la simulación condicional permite ejecutar múltiples realizaciones y tiene la ventaja de cuantificar la incertidumbre de la variable en consideración. Kriging tiene como objetivo seguridad, en cambio, la simulación es una forma alternativa de modelar la realidad; es decir apunta al realismo. La simulación reproduce la variabilidad correcta de la variable, por lo que se puede utilizar para medir los recursos recuperables.

### 5.2 Curvas de grado tonelaje (QTM)

Las curvas de grado tonelaje son una forma útil de resumir los resultados del inventario minero obtenido en los procedimientos anteriormente realizados. En estas se analiza como varía el contenido de metal (Q), el tonelaje (T) y el grado promedio (M) al variar el tenor de corte. Las curvas QTM se basan en la dispersión de tenores o leyes con el objetivo de clasificar las unidades de minado selectivo (UMS) como mena o como estéril, de esta manera proveen una cuantificación de los recursos basados en los datos exploratorios dando una estimación inicial aproximada del tamaño general de los recursos (toneladas de mena o cantidad de metal) para varios tenores de corte. Para este tipo de minería se estima el tenor de corte involucrando los factores modificadores que corresponden a los costos de operación, el valor de venta del producto en el mercado, el porcentaje de recuperación en la planta de beneficio y el factor de dilución.

Al integrar varios tenores de corte será fácil construir las curvas QTM, como las que se muestran en las Fig. 10, 11, 12. Es de notar, que para la elaboración de estas curvas es necesario involucrar adicionalmente la variable espesor y la densidad de la mena, esta última se consideró constante en el depósito, con un valor de 2.700 Kg/m<sup>3</sup>. La variable espesor fue tratada geoestadísticamente al igual que como se hizo con la variable tenor de oro.

## 6 Tenor de corte operacional

Los resultados de las curvas QTM se resumen en la Tabla 2. Para un tenor de corte de 1.56 Au g/ton, obtendremos el mayor tonelaje posible para los recursos, computarizados en 38.250 toneladas, con un contenido de metal de 14.288 onzas de oro y un grado promedio de 11,62 Au g/ton. Nótese que un aumento en el tenor de corte representa menor tonelaje, menor contenido de metal y mayor grado promedio. Esto nos da una aproximación inicial del tamaño general del depósito en términos de recursos, que son necesarios investigar desde un punto de vista del planeamiento minero para establecer el inventario de reservas minerales. Miremos el caso de una mina pequeña, que tiene el objetivo de producir 20 toneladas por día (ton/d). Si consideramos unos costos operativos de 200 \$US/ton y tomando como referencia un precio del oro en el mercado de 2.042 \$US/Ozt (1 oz troy = 31,103 gramos) entonces podemos calcular el tenor operativo según la eq. (9):



Tabla 2.  
Reporte de recursos según curvas QTM.

Tenor de corte [Au g/ton]	Tonelaje (T) [t]	Contenido de metal (Q) [ozt]	Grado Promedio (M) [Au g/ton]
1,56	38.250,90	14.288,10	11,62
4,20	28.541,40	13.396,30	14,60
6,84	21.948,60	12.230,20	17,33
9,49	17.023,90	10.952,90	20,01
12,13	13.716,20	9.789,85	22,20
14,78	11.239,90	8.724,46	24,14
17,42	9.039,72	7.600,72	26,15
20,07	7.177,83	6.491,01	28,13
22,71	5.641,92	5.433,07	29,95
25,36	4.582,53	4.614,56	31,32
28,00	3.180,48	3.416,56	33,41
30,65	2.332,92	2.622,69	34,97
33,29	1.269,03	1.524,82	37,37
35,94	648,35	836,31	40,12
38,58	423,05	566,50	41,65
41,23	199,96	283,14	44,04
43,87	72,39	107,81	46,32
46,52	26,57	41,19	48,22

Fuente: propia.

$$\begin{aligned} \text{Tenor Operacional} &= \frac{\text{Costos de operacion}}{\text{Valor en el mercado}} * 31,103 \frac{g}{ozt} \\ &= \frac{200 \frac{\$}{ton}}{2042 \frac{\$}{ozt}} * 31,103 \frac{g}{ozt} = 3,046 \frac{g}{ton} \end{aligned} \quad (9)$$

Una vez obtenido este tenor operativo, debemos tener en cuenta también el porcentaje de recuperación y el factor de dilución. El factor de dilución (F.D) es la relación entre el espesor promedio de la veta o filón mineralizado y el espesor de la roca estéril, obtenido como se muestra en la eq. (10):

$$F.D = \frac{\bar{E}_v}{E_R} = \frac{0,39 \text{ m}}{1,61} = 0,24 \quad (10)$$

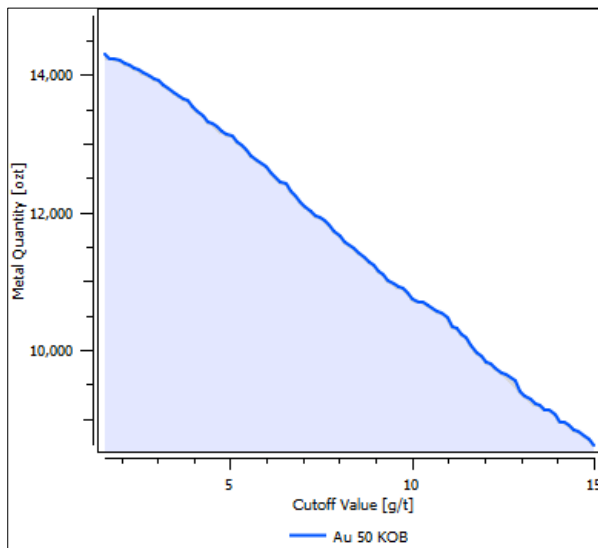


Figura 10. Reporte de contenido de metal vs tenor de corte para las estimaciones realizadas por KOB de la variable oro. Fuente propia.

Donde  $\bar{E}_v$  corresponde al espesor promedio de la veta y  $E_R$  corresponde al espesor de la roca estéril. Finalmente, al multiplicar el tenor operativo por el factor de dilución y dividirlo por el porcentaje de recuperación (el cual establecimos en este caso en un 90%) obtenemos el tenor de corte como se muestra en la eq. (11).

$$\begin{aligned} \text{Tenor de corte} &= \frac{\text{Tenor operativo}}{\% \text{ de recuperación}} * 1,24 \\ &= \frac{3,04 \frac{g}{ton}}{0,9} * 1,24 = 4,2 \frac{g}{ton} \end{aligned} \quad (11)$$

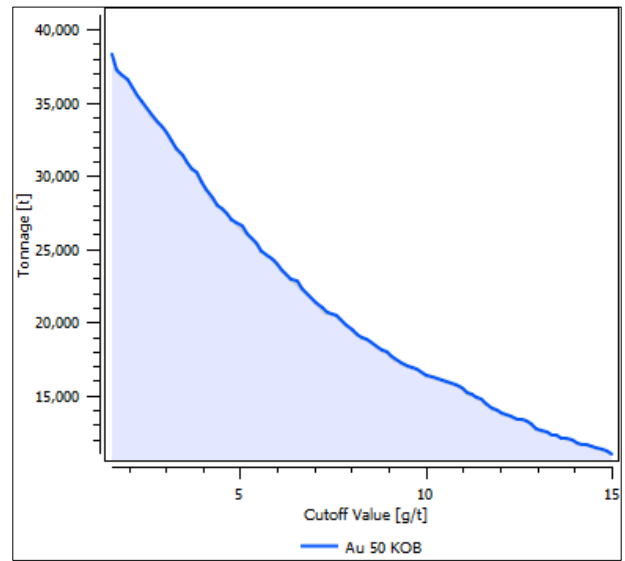


Figura 11. Reporte de tonelaje vs tenor de corte para las estimaciones realizadas por KOB de la variable oro. Fuente propia.

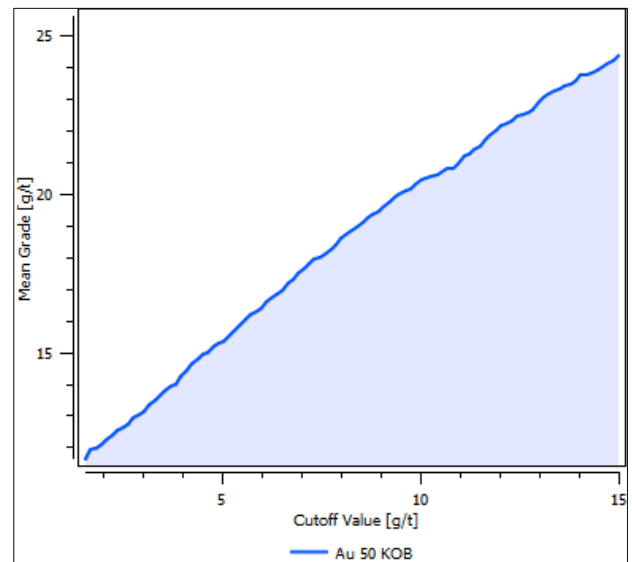


Figura 12. Reporte de grado promedio vs tenor de corte para las estimaciones realizadas por KOB de la variable oro. Fuente propia.

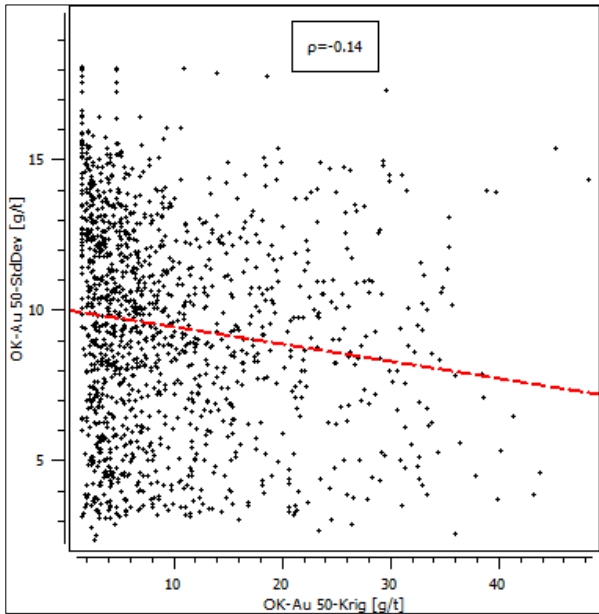


Figura 13. El coeficiente de correlación es de sólo 0,14, es decir bastante bajo. No existe una relación entre los tenores estimados con kriging ordinario de bloques y la desviación estándar de los errores. Por lo tanto, se demuestra que no existe un efecto proporcional. Fuente propia.

Finalmente, si tenemos en cuenta este tenor de corte en el análisis de las curvas QTM, vemos que el tonelaje obtenido es 28.541 toneladas (Tabla 2), con un contenido de metal de 13.396 onzas troy de oro y un grado promedio de 14,60 Au g/ton. seguidamente es procedente elaborar una clasificación de estos recursos con el objetivo de establecer el grado de confianza de los recursos y las reservas estimadas.

## 7 Clasificación de recursos

Según Silva & Boisvert (2014), de una revisión de los informes canadienses más recientes bajo la norma 43-101 se concluye que las técnicas más comunes utilizadas para la clasificación de recursos son de naturaleza geométrica. Estas técnicas no tienen en cuenta la continuidad espacial de las variables ni la frecuencia entre datos [4].

La calidad de la clasificación de recursos y reservas minerales es clave para una evaluación económica y medioambiental. La divulgación pública de los resultados de los proyectos mineros en Colombia debe seguir las normas del estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR) [6]; también es importante anotar que Colombia es miembro de CRIRSCO (Comité de Recursos y Reservas Minerales para el Estándar Internacional de Reportes Públicos). La idea de las normas de clasificación es ofrecer una definición general de las distintas categorías en un nivel cuantificado de confianza geológica para que una persona competente pueda juzgar la incertidumbre basándose en su experiencia con yacimientos similares. La estimación de la calidad y confianza geológica no sólo depende de la cantidad de datos disponibles, sino también de su calidad. Los resultados de evaluación económica suelen ser comunicados por empresas para atraer inversionistas [4].

Una de las ventajas de las técnicas de estimación kriging es que cuando se aplican correctamente éstas, producen estimaciones de bloques imparciales y aseguran una varianza de estimación mínima conocida como varianza kriging. La ventaja de utilizar la varianza kriging como criterio para la clasificación es la consideración de la estructura espacial de la variable y la redundancia entre muestras; sin embargo, a menudo produce mapas de clasificación con efecto proporcional, el cual puede ser de impacto negativo en la estimación para zonas de alta ley, donde la varianza es elevada. Este efecto consiste en una relación directamente proporcional entre el promedio y la varianza local del fenómeno estimado [5]. Como es de notar en la Fig. 13, el coeficiente de correlación entre el promedio kriging para cada bloque y su correspondiente desviación estándar es muy bajo, por lo tanto, se verifica la no existencia de un efecto proporcional.

El ECRR (2018) es un estándar para reportes públicos que no regula la manera como una persona competente debe estimar recursos y reservas minerales [6]. Existen múltiples criterios para la clasificación de recursos basados en estudios geoestadísticos [7]. Para darle curso al caso de estudio que venimos desarrollando, se propone como metodología un sistema basado en el error relativo, el cual se calcula como la relación entre la desviación estándar de kriging y el valor estimado de cada bloque por el método de KOB. A un nivel de confianza del 90% y un error relativo dentro del intervalo [0,20%] el recurso se clasificará como medido; si se encuentra entre el intervalo (20%-50%) se considera como recurso indicado; finalmente, si supera el 50% el recurso se clasificará como inferido.

La Tabla 3 resume los resultados de la clasificación de los recursos minerales. Del total de los recursos estimados, solo el 5% corresponden a recursos medidos, el 21% son indicados y el 74% restantes son inferidos.

Tabla 3. Resultados de clasificación de recursos minerales.

Clasificación	Tonelaje	%
Medidos	1859	5
Indicados	8092	21
Inferidos	28300	74
TOTAL	38251	100

Fuente: Propia.

Finalmente, los recursos medidos e indicados deben ser afectados por el tenor de corte calculado en la sección anterior (4,2 Au g/ton), de esta manera podrán ser considerados reservas minerales probadas y reservas minerales probables, ya que los resultados obtenidos al aplicar este criterio reflejan que estos recursos cumplen con superar el tenor de corte. Taylor (1977), propuso una fórmula empírica para estimar el tiempo de vida óptima de un depósito (TVO) [8]; en este caso con 9951 toneladas de reservas minerales (probadas + probables), la ecuación propuesta (eq. 12) quedaría de la siguiente manera:

$$TVO = 0,2 * 9.951^{0,25} = 2 \text{ años} \quad (12)$$

Es decir 4.976 toneladas por año (ton/a), que, para los 260 días anualmente laborales en Colombia, representaría un ritmo de explotación de 19 ton/d.

### 8 Conciliación de los recursos minerales estimados

El análisis de conciliación es una de labores más importantes de la cadena productiva minera. Se lleva a cabo con el objetivo de planear mejoras en todos los procesos, permitiendo calibrar los tres principales factores de producción: Factor 1 o de geología, el cual contrala los grados o tenores de los materiales insitu, el Factor 2 o de minería, involucrado con la calidad de los materiales entre el arranque y el inicio del proceso de beneficio (por ejemplo, se responde por el control de leyes en cabeza de molino) y el Factor 3, el cual tiene que ver con los procesos de beneficio de los materiales hasta llegar parcialmente o totalmente hasta los productos terminados.

Los procesos de conciliación juegan un papel muy importante, porque ayudan a identificar y a estandarizar la cadena productiva con los más altos controles de calidad. Previamente al beneficio de minerales, la geoestadística ofrece técnicas de control la estimación de recursos, denominadas simulación geoestadística. La forma de obtener estas simulaciones es muy sencilla si se usa el *Kriging*, dadas sus propiedades de ser un estimador exacto y de que los errores *Kriging* son "ortogonales" a los valores estimados [9].

El Objetivo de la Estimación geoestadística por KOB, que se llevó a cabo en la sección 3.1, consistió básicamente en minimizar la varianza del error de estimación, con la tendencia de producir patrones de variación más suavizados que los reales. Con la intención de realizar una conciliación de los recursos es recomendado llevar a cabo la simulación geoestadística, cuyo objetivo es reproducir mejor el aspecto de las fluctuaciones del fenómeno real. La simulación geoestadística viene siendo ampliamente reconocida, a tal grado que muchos autores la consideran como el reporte de una realidad relativa del fenómeno en estudio (en este caso estimación de tenores de oro).

Con esto en mente, es posible realizar una evaluación que nos permita determinar el grado de confiabilidad del método de estimación seleccionado para nuestro estudio (es decir, KOB). En términos prácticos, KOB es un método relativamente económico que cae dentro de la capacidad financiera de un proyecto minero de bajo volumen como el desarrollado en este estudio.

#### 8.1 Simulación condicionada por bandas rotantes (TBS)

Como se mencionó anteriormente, el método de simulación involucra un intento de crear un conjunto de datos que reflejen características espaciales y estadísticas similares a los datos reales tomados en el muestreo. De los resultados obtenidos por distintos métodos de estimación, es conocido que estos no reflejan las fluctuaciones locales reales en la distribución espacial de los tenores, más bien tienden a suavizar estas variaciones. Los valores de las matrices simuladas se construyen para variar al mismo nivel que la variación real de los tenores muestreados. En otras palabras, se dice que en la estimación se busca minimizar la varianza del error, mientras que en las simulaciones nos preocupamos por reproducir la varianza de dispersión de los datos reales [4].

El método de bandas rotantes (TBS) consiste en generar procesos unidimensionales a lo largo de líneas distribuidas

uniformemente en el espacio. Las simulaciones condicionales son útiles cualitativamente para obtener imágenes realistas de variabilidad espacial. Son la herramienta de elección para evaluar el impacto de la incertidumbre espacial en los resultados de procedimientos complejos, como modelación numérica de un sistema dinámico u optimización económica del desarrollo de un recurso natural. Las simulaciones condicionales entran dentro del alcance de los llamados métodos de Monte Carlo; en realidad no son más que simulaciones consistentes de Monte Carlo [1]. Este método proporciona posibles realizaciones  $Z_S(x)$  (simulación no condicional) de la variable aleatoria  $Z(x)$  cuya estructura de covarianza espacial sea igual a la de  $Z(x)$ , para posteriormente realizar el proceso de condicionamiento a los datos que se obtienen experimentalmente.

La respuesta depende del objetivo y de la estructura del fenómeno. Al modelar un campo estacionario sobre un área mucho mayor que el rango, una sola simulación puede dar una visión de una variedad de posibles situaciones locales. Este suele ser suficiente para evaluar el rendimiento de un escenario minero, que depende principalmente de la variabilidad local de las leyes o espesores del mineral. Típicamente es posible que se necesiten cien simulaciones, pero este número depende en gran medida de la distribución del parámetro de interés.

El procedimiento de la simulación condicionada por bandas rotantes (TBS), el cual se resume en la Fig. 14, requiere transformar los datos a gaussianos (Anamorphosis), elaborar un análisis variográfico a la información transformada, ejecutar el método geoestadístico de simulación y por último realizar la transformación inversa al proceso realizado, para ejecutar la cartografía automática e interpretar los resultados. Para realizar la estimación en un modelo de bloques es necesario cuantificar el efecto de cambio soporte de puntos a bloques de 5 m x 5 m, por lo tanto, requerimos de un modelo de la distribución definido mediante una función de anamorfosis gaussiana. De esta manera la varianza de los bloques puede calcularse mediante la relación de Krige que da la varianza de dispersión en función del variograma.

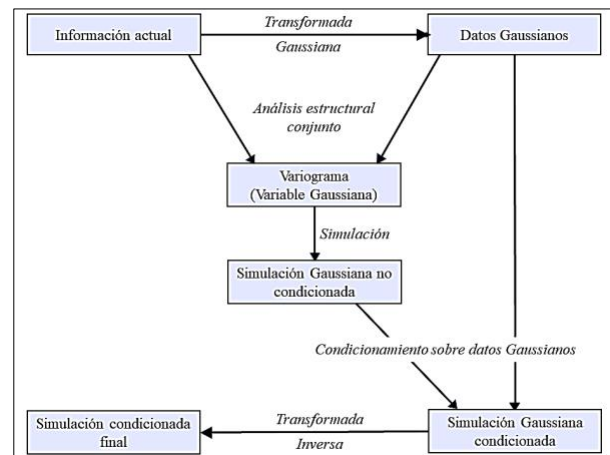


Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento a seguir en el método de simulación por bandas rotantes.

Fuente: Adaptado de Chilés & Delfiner, 1999.

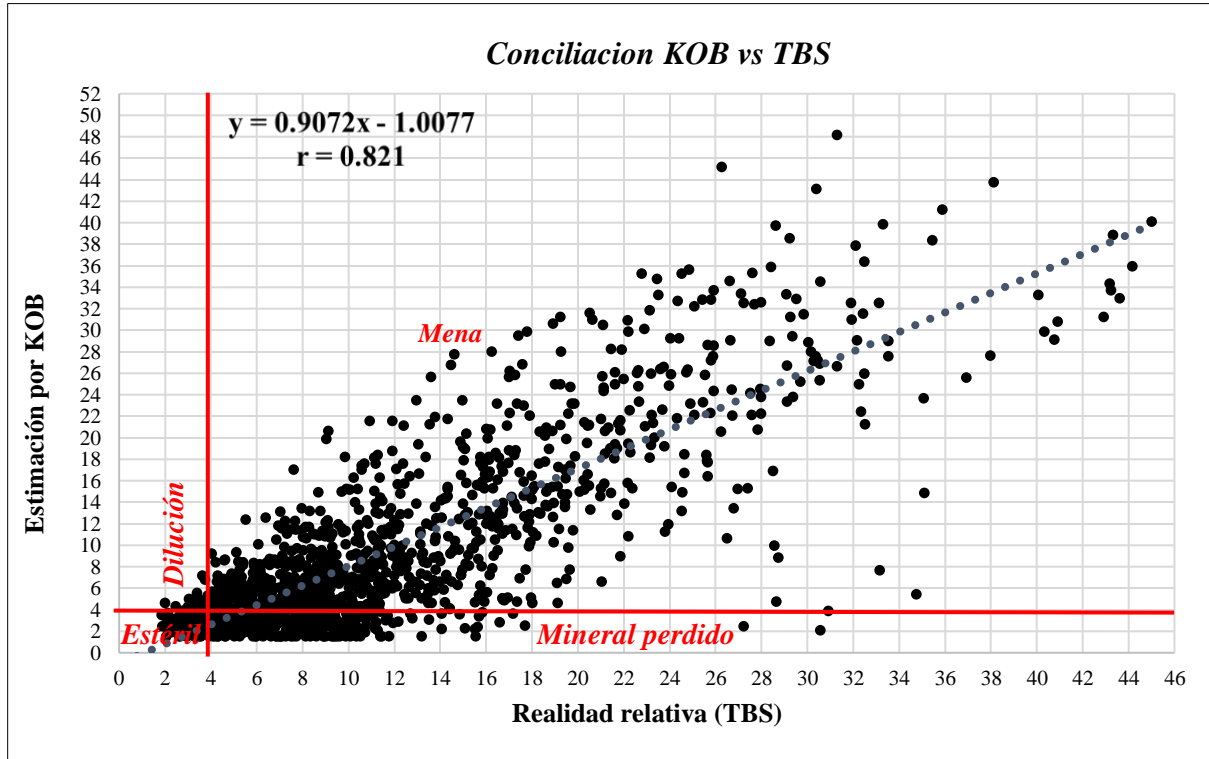


Figura 15. Grafica de conciliación de recursos minerales, donde comparamos los resultados obtenidos por el método de estimación KOB y la realidad relativa por TBS. Las líneas rojas están basadas en el tenor de corte operacional de la sección 4 y dan a lugar a 4 sectores de análisis para los recursos minerales. En la parte superior izquierda se encuentra la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de correlación.

Fuente propia.

### 8.1 Conciliación

Como caso de aplicación se presentan los resultados de 100 simulaciones de bloques discretizados por el método de bandas rotantes. La idea de la conciliación en este ejercicio es graficar los resultados obtenidos por TBS en el eje de las x, y los valores obtenidos con KOB, involucrando dos ejes adicionales relacionados con el tenor de corte (Fig. 15) y los cuales nos permiten identificar cuatro sectores de importancia económica para el proyecto minero: el primer sector que encierra el volumen de estériles; el segundo sector corresponde a el mineral perdido, es decir, mena que equivocadamente sería enviada al botadero; el tercer sector corresponde a él volumen de material estéril que erróneamente estaría siendo enviado a la pila de beneficio aumentando así el factor de dilución; el cuarto sector contiene el volumen de material de mena de la operación.

De las 38.250 toneladas estimadas por el método de KOB, 384 toneladas (equivalente al 1%) no pudieron ser involucradas en el análisis; debido a que estas no lograron ser simuladas. Por lo tanto, el volumen considerado para el estudio corresponde a 37.868 toneladas de mineral. De este modo, para el primer sector de análisis encontramos que 1074 toneladas de material deben ser remitido a la zona de estériles, los cuales representan un 3% del volumen total. El análisis del segundo sector arroja que 8345 toneladas consideradas por el método KOB también como estériles (22

% de la operación), irán a parar igualmente a la pila de estériles; sin embargo, según el reporte de TBS este volumen corresponde también a material de mena, y por ende es reconocido como mineral perdido. El tercer sector señala que 372 toneladas de estéril (1% de la operación), serían enviadas a la planta de beneficio, provocando así un aumento en el factor de dilución. Finalmente, en el cuarto sector se encuentra un volumen de 28.076 toneladas de mena (74%), que serían destinadas como material óptimo para la planta de beneficio.

### 9 Conclusiones

El análisis geoestadístico reportó un Efecto de Pepita  $C_0 = 55,34$  (Au g/ton)<sup>2</sup>, equivalente al 24% de la varianza real (meseta del variograma). El  $C_0$  es característico de este tipo de depósitos con mineralización metálica; en este caso el 45% del oro y de la plata ocurre como pequeñas inclusiones dentro de la estructura cristalina de los sulfuros y un 55% en forma nativa. También se identificó una anisotropía de tipo geométrico, con dos direcciones preferenciales y dos modelos esféricos. El primero de estos en la dirección nortesur con alcances de 3 y 34 metros y el segundo de dirección Este-Oeste de 13 y 14 metros de rango. Los dos modelos esféricos podrían estar representando por lo menos dos eventos mineralizantes, el primero considerablemente pobre en metales preciosos; el cual sufrió fracturamiento y fue



reinyectado con cuarzo de grano más fino en un segundo evento, siendo este más rico en sulfuros y metales preciosos.

Se estimaron 38251 toneladas de recursos minerales clasificados en medidos, indicados e inferidos, con base en el error relativo de la varianza mínima reportada por el método geoestadístico del Kriging Ordinario de Bloques. Con base en los recursos y reservas minerales estimadas, se involucraron parámetros tales como la vida óptima del depósito, el rendimiento óptimo de producción, dilución, porcentaje de recuperación y tenor de corte. A través de técnicas de simulación condicionada, se elaboró un análisis de conciliación de los recursos, utilizando el promedio de 100 simulaciones geoestadística por el método de bandas rotantes.

Este acercamiento a los métodos geoestadísticos para la pequeña minería nos demuestra que esta puede ser una herramienta fundamental al momento de evaluar y planificar adecuadamente un proyecto y evaluar su potencialidad en términos de recursos y reservas minerales; este es el primer eslabón que sienta las bases para el estudio de otros factores financieros que determinaran la continuidad o no del proyecto en desarrollo como lo son factores ambientales, tasas de extracción y producción, precio en el mercado del metal, tecnología para la explotación y exploración, entre otros. La vida a largo plazo de la mina se basará en un equilibrio entre estos factores siendo la actualización constante de las reservas minerales indispensable para mantener el proyecto en marcha.

#### Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses económicos ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

#### Agradecimientos

A la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo dado para la elaboración de este manuscrito. El análisis variográfico y la estimación por KOB en este informe, hizo parte del trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Geólogo del estudiante Andrés López Gómez. El software utilizado para la estimación geoestadística fue Isatis Neo Mining 2023.08.1, versión académica adquirida por la Facultad de Minas a Geovariances

Doy mis agradecimientos al Profesor Luis Hernán Sánchez Arredondo, gran maestro y amigo, por su apoyo a mi formación profesional en el área de los recursos minerales. A mis padres Pedro José y Rubiela y mi hermano Pedro Pablo por su incansable e incondicional apoyo en mi carrera.

#### Referencias

- [1] Chilés, J.-P., and Delfiner, P., *Geostatistics - Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons. 1999. DOI: <https://doi.org/10.2307/2685361>
- [2] Sinclair, A.J. and Blackwell, G.H., *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press., 2006. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511545993>
- [3] Matheron, G., *Traité de géostatistique appliquée*, Tome I; Tome II: Le krigeage. I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No. 14 (1962), Eds. Technip, Paris. II: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No. 24, 1963, Eds B.R.G.M., Paris.
- [4] Silva, D.S.F., and Boisvert, J.B., Mineral resource classification: a comparison of new and existing techniques. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, [online]. 114(3), pp. 265-273, 2014. Available at: [https://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2225-62532014000300017&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2225-62532014000300017&script=sci_arttext)
- [5] Emery, X., Ortiz, J.M., and Rodríguez, J.J., Quantifying uncertainty in mineral resources by use of classification schemes and conditional simulations. *Math. Geol.*, 38, pp. 445-464, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11004-005-9021-9>
- [6] Comisión Colombiana de Recursos y Reservas CCRR. (2018). *Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales -ECRR-*. [online]. Available at: [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr\\_espanol\\_version\\_final.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr_espanol_version_final.pdf)
- [7] Dohm, C., Quantifiable mineral resource classification: a logical approach. In: Leuangthong, O., and Deutsch, C.V., (eds), *Geostatistics Banff, 2004. Quantitative Geology and Geostatistics*, vol 14. Springer, Dordrecht. 2005, pp 333-342. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_34)
- [8] Taylor, H.K., *Mine valuation and feasibility studies*. In: *Mineral Industry Costs*. Compiled by Hoskins, J.R. and Green, W.R., Northwest Mining Association, Spokane, WA. 1977, pp. 1-17.
- [9] Journel, A.G., and Huijbregts, C., *Mining geostatistics*, Academic Press, New York, 1978, pp. 495-498.

**L. Sánchez-Arredondo**, es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Área de estimación de depósitos minerales y geología de minas, geoestadística ambiental y minera. Actualmente se dedica a la investigación de proyectos relacionados con la reutilización de terrenos mineros con enfoque hacia el geoturismo de sitios mineros y actividades relacionadas con la geoeducación, geoconservación y geoturismo. Participante en el curso digital “UNESCO Global Geoparks and Sustainability, 2021”. Super Mentor certificado por iNNpulsa y CEmprende (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo) en el año 2023.  
ORCID: 0000-0003-1501-8345

**A. López-Gómez**, es estudiante de último año de Ingeniería Geológica en la Universidad Nacional de Colombia. Integrante del Semillero Minero Energético y Ambiental de la Facultad de Minas. Actualmente enfocado en el área de estimación de recursos y reservas para planeamiento minero y al diseño de proyectos relacionados con geoeducación, geoconservación y geoturismo.  
ORCID: 0000-0002-6994-7759



# Evaluación del contenido de materia orgánica y sus efectos, por registros geofísicos en el ejemplo de pozos petroleros del sector Varadero Oeste, Cuba

Olga Castro-Castiñeira <sup>a</sup> & Ronal Barcala-Alvarez <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro de Investigación del Petróleo, La Habana, Cuba, [olgac@ceinpet.cupet.cu](mailto:olgac@ceinpet.cupet.cu); [olgacastro510328@gmail.com](mailto:olgacastro510328@gmail.com)

<sup>b</sup> Gaia, Exploración, Valverde del Camino, Huelva, Andalucía, España. [ronal.b.alvarez@gmail.com](mailto:ronal.b.alvarez@gmail.com)

Recibido: 4 abril 2024. Recibido en formato revisado: 5 julio 2023. Aceptado: 10 julio 2023

## Resumen

Desde finales del pasado siglo, varios investigadores han argumentado sobre la utilidad de los registros geofísicos de pozo para identificar rocas madres y cuantificar su potencial, a partir del efecto de la materia orgánica presente en las rocas sedimentarias sobre la respuesta de los registros. Las investigaciones sobre las rocas madre y los petróleos exigen la utilización de equipos de alto costo con los que Cuba no cuenta. Sin embargo, teniendo en cuenta el comportamiento de los registros geofísicos de pozos, donde son fundamentales la resistividad, porosidad y espectrometría gamma, se puede realizar una evaluación rápida de la capacidad de generación de hidrocarburos de secuencias descubiertas en pozos exploratorios. Esta evaluación puede realizarse sin elevado costo adicional, al aplicar métodos donde se combinan los registros. Es indispensable contar, además, con algunos datos de laboratorio para la calibración de los resultados. El alcance del presente trabajo responde al objetivo de definir las zonas con potencial generador y productor en las rocas del Grupo Veloz de pozos del sector Varadero Oeste, dentro de la Franja Petrolera Norte Cubana, y realizar correcciones a la porosidad por el efecto de la materia orgánica. Como resultado, se definen por primera vez en un yacimiento cubano los espesores generadores de las formaciones y unidades petrofísicas, y se realiza la corrección para la porosidad efectiva por la presencia de materia orgánica.

*Palabras clave:* registros geofísicos; rocas madres; materia orgánica; potencial generador; porosidad.

## Organic matter content evaluation and its effects, by well logs. Case study of Western Varadero sector, Cuba

### Abstract

For latest decades of the past century, several researches have argued about the utility of geophysical well logs in identify source rocks and quantifying their potential, this is mainly sustained on the effect observed in geophysical well logs by the presence of organic matter within sedimentary rocks. Conventional research about hydrocarbon source rocks demands the utilization of high-cost equipment which is not available in Cuba. However, taking into account the behavior of well logs, mainly resistivity, porosity and gamma spectrometric, a rapid assessment of the hydrocarbon generation potential can be carried out within discovered sequences in exploratory wells. This evaluation can be undertaken without high additional cost by applying a combined well logs methodology; nonetheless, laboratory data is essential for results calibration. The scope of this research is set to define hydrocarbon generating and producing potential zones within Veloz Group in Western Varadero sector, Northern Cuban Oil Belt, while also applying correction to porosity due to organic matter influence in logs. As results, generating thicknesses of formations and petrophysical units are defined for first time in a Cuban oilfield and correction to effective porosity due to organic matter presence are applied.


*Keywords:* well logs; source rocks; organic matter; generating potential; porosity

## 1 Introducción

En numerosos artículos se ha argumentado el uso de los registros de pozo convencionales para identificar rocas madres y

cuantificar su potencial, a partir del efecto que la materia orgánica presente en las rocas sedimentarias ejerce en la respuesta de los registros. Para esto es preciso tener un modelo físico conceptual del material de estudio, o sea, las secuencias sedimentarias

**How to cite:** Castro-Castiñeira, O. y Barcala-Alvarez, R., (2024). Evaluación del contenido de materia orgánica y sus efectos, por registros geofísicos en el ejemplo de pozos petroleros del sector Varadero Oeste, Cuba. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 56, pp. 18 - 24. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.113797>

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.   
BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 56 Julio - Diciembre, 2024  
<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.113797>

enriquecidas o no por material orgánico. Es importante recordar que la materia orgánica se deposita al mismo tiempo que el grano de la matriz de las rocas y no rellena los poros vacíos. Con el incremento de la maduración, el querógeno se torna lo suficientemente maleable como para ser desplazado hacia el espacio poral, lo que no debe afectar el volumen de los poros en las arcillas, a menos que el contenido de materia orgánica sea relativamente alto.

Es conocido que los métodos de estudio de las rocas madres y los petróleos exigen la utilización de equipos de alto costo con los que Cuba no cuenta.

El registro más comúnmente utilizado ha sido el de rayos gamma, donde los aumentos anómalos de uranio se asocian a las rocas madres por su correspondencia con la materia orgánica, de ahí la utilidad del registro espectral, aunque la correlación no sea universal. La experiencia demuestra que existe una relación inversa entre las curvas de rayos gamma (GR) y de resistividad ( $R_t$ ), en forma de reloj de arena, excepto cuando hay carbono orgánico total (COT), donde ambas curvas sufren un incremento. Este efecto se visualiza mejor cuando se invierte una de las escalas y se superponen las curvas: la separación entre ellas indica la presencia de roca generadora [1].

Igualmente, la utilización de los registros geofísicos de pozos, formulada por [2] permite una evaluación rápida y sin elevado costo adicional, de la capacidad de generación de secuencias descubiertas en los pozos exploratorios. También permite pronosticar, de forma rápida, los intervalos más favorables para su estudio por Geoquímica Orgánica. Esta técnica fue desarrollada y probada por la compañía EXXON desde 1979, y se ha publicado posteriormente [3-6,7,8] y otros. Para poder medir correctamente la efectividad del método es conveniente en su etapa de introducción contar con datos geoquímicos que permitan calibrar sus resultados. Fue aplicada con éxito en las rocas del Grupo Veloz del pozo de exploración cubano PE-4, ubicado en la Franja Petrolera Norte Cubana [9]. Las formaciones del Grupo Veloz tienen la característica de presentar rocas carbonatadas como rocas madres, que además constituyen el reservorio, lo que se demuestra en los resultados obtenidos aquí presentados.

El objetivo del presente trabajo es definir las zonas con potencial generador y productor en las rocas del Grupo Veloz en pozos del sector Varadero Oeste, y realizar correcciones a la porosidad por el efecto de la materia orgánica. El método de Passey parte de superponer, a una escala adecuada, la curva de resistividad a una de las de porosidad, preferiblemente al registro acústico y en caso de no existir éste, al neutrónico o al de densidad. Para la investigación desarrollada se utilizó, además, una modificación del método de Passey propuesta por Bowman [10].

La ubicación geográfica esquemática del área de estudio (dentro de la Franja Petrolera Norte Cubana) se presenta en la Fig. 1.

La investigación partió de la interpretación de las propiedades de reservorio: volumen de arcilla (VCL), porosidad efectiva (PHIE) y saturación de agua (SW) en los pozos del área de estudio, para los que se calculó el COT y se les realizó la corrección de la porosidad. Para ello se visualizaron los registros compuestos y se confeccionaron gráficos de propiedades cruzadas.

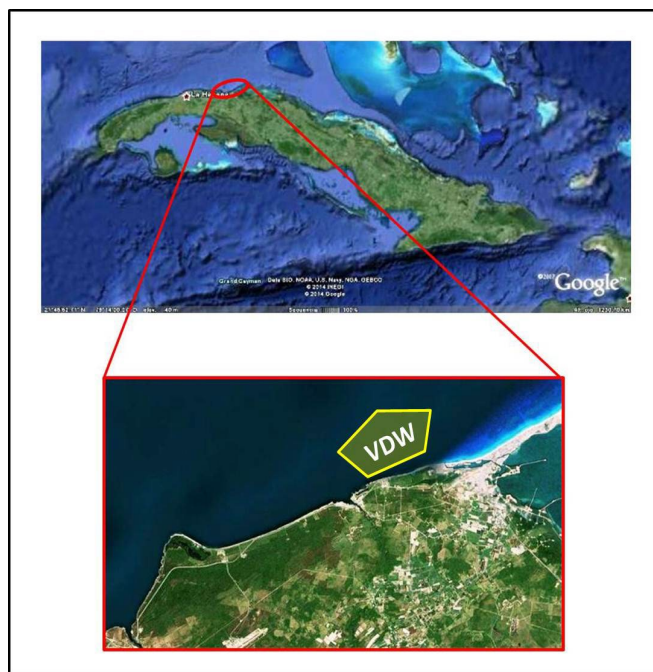


Figura 1. Ubicación geográfica esquemática de la zona de estudio. Fuente: Tomado de [11].

## 2 Materiales. Metodología empleada

Se contó con los registros convencionales de 8 pozos, fundamentalmente la resistividad ( $R_t$  obtenida a partir del Laterolog profundo LLD o del radio más profundo de investigación RLA5 en el registro de varios radios de investigación HRLA) y los métodos de porosidad (sónico-Dt, densidad-RHOB y neutrónico-NPHI), seguidos por el gamma espectral (Total-SGR o GR, Computado-CGR, Uranio-URAN) y el potencial espontáneo (PE). También en el set aparecen los registros de calíper (CAL) y factor fotoeléctrico (PEF).

Como información geólogo-petrofísica de partida, se tiene que en los pozos aparecen dos mantos del Grupo Veloz (Veloz 1 y Veloz 2), que se dividen en electrofacies correspondientes a las subunidades petrofísicas: Neocomiano, CPI, CS, Constancia (que no pertenece a Veloz), CSII, CSII Inf, CPII+III+Brecha, CSIII-1, CSIII-2 y CSIII-3.

### 2.1 Método de Passey

Asume que las rocas están compuestas por tres componentes: 1) la matriz mineral, 2) la materia orgánica sólida y 3) el o los fluidos que rellenan el espacio poral. Aquellas que no son rocas madres, se componen principalmente de sólo dos componentes: la matriz y el fluido que rellena los poros.

En las rocas madres inmaduras la fracción sólida de la roca comprende la matriz mineral y la materia orgánica sólida, mientras que el agua de formación rellena los poros. A medida que la roca madre madura, una porción de materia orgánica sólida se transforma a hidrocarburos líquidos o gaseosos que se mueven hacia el espacio poral, desplazando al agua de la formación.

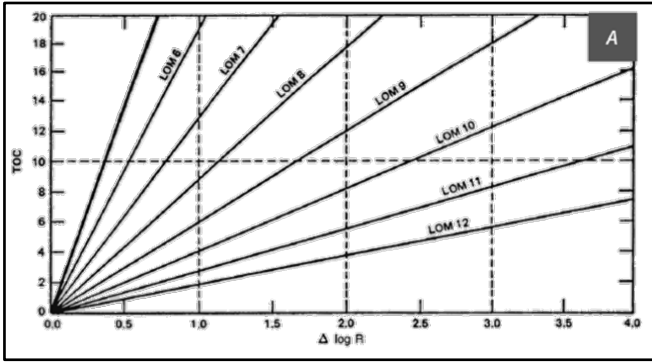


Figura 2. Diagrama que relaciona  $\Delta\log R$  con el COT a través de LOM. Fuente: Tomado de [2].

Para las rocas madres el efecto de la materia orgánica sólida sobre los registros resulta en la disminución de la densidad, el aumento del tiempo de tránsito (baja velocidad en el registro sónico) y el aumento de la porosidad neutrónica por alto contenido de hidrógeno, además de una resistividad mayor que en otros sedimentos de igual compactación y composición mineralógica. Esta anomalía puede utilizarse para la identificación de estas rocas, siempre que la resolución de las herramientas lo permita y exista abundancia de materia orgánica. Cuando la roca madre está madura, contiene petróleo móvil además del querógeno, y la resistividad aumenta por un factor de 10 o más.

Para aplicar el método se requiere que la curva tránsito - tiempo y la de resistividad sean llevadas a escala, de modo tal que su escala relativa sea de  $-164 \mu\text{seg}/\text{m}$  para un ciclo de resistividad. Las curvas son superpuestas y se les halla la línea base en un intervalo constituido por una roca de grano fino no generadora. La línea base se determina donde las dos curvas se superponen una sobre otra en un rango de profundidad continuo. Cuando ya está establecida la línea base, los intervalos ricos en materia orgánica pueden ser reconocidos por la separación y ausencia de paralelismo de las curvas. Esta separación se designa como  $\Delta\log R$ .

La separación  $\Delta\log R$ , relacionada linealmente con el contenido de COT, es una función de la maduración, y puede ser transformada directamente a COT si la madurez ha podido ser determinada o estimada [2].

$$COT = (\Delta\log R) \times 10^{(2.297 - 0.1688 \cdot LOM)} (\%) \quad (1)$$

La madurez se mide en unidades de nivel de metamorfismo orgánico o LOM [12], determinadas a partir de una serie de métodos de análisis de la maduración (reflectancia de la vitrinita, TAI, SCI o Tmax) o estimada a partir de la historia térmica y de sedimentación. Los valores de LOM de 7 y 12 corresponden, respectivamente, al umbral y al final de la ventana de generación de petróleo para un querógeno de tipo II (Fig. 2).

La separación  $\Delta\log R$  tiene lugar, tanto en intervalos enriquecidos por materia orgánica, como en reservorios de petróleo. Entonces, paralelamente, se debe usar también el registro gamma, el potencial espontáneo o cualquier registro informativo, para identificar los diferentes casos a reconocer y encontrar los intervalos de rocas madres enriquecidas

cuando se calcula un perfil de COT (guía esquemática para la interpretación de diferentes características en el método de  $\Delta\log R$ , de [2]). Se señala que la roca madre enriquecida, se diferencia por la separación de curvas en forma de balón oval o reloj de arena.

Las tres curvas comunes de porosidad (sónico, densidad y neutrón) responden a la presencia de materia orgánica sólida, que presenta baja velocidad, baja densidad y alto contenido de hidrógeno. Todos estos atributos producen una respuesta que simula un incremento de la porosidad. Por todo esto, cuando no se dispone del registro sónico se puede utilizar uno de los otros dos.

## 2.2 Método de Bowman

Para este método se requiere: 1) Construir el gráfico cruzado Dt vs LogR (Dt u otro método de porosidad: RHOB, PHIN vs logaritmo de la resistividad); 2) Determinar la línea de las arcillas por las menores resistividades (línea del método directo), como se muestra en la Fig. 3, donde dicha línea abarca los puntos con bajos valores de resistividad y altos valores de porosidad, característico de sedimentos pobres en materia orgánica. El color de los puntos se relaciona con los métodos de radiactividad (SGR, CGR, URAN), y ayuda a reconocer las distintas zonas; 4) Calcular la nueva curva sintética del sónico (o seudosónico: DtR) o de otro método de porosidad (RHOBR o NPHIR) a partir de la línea de las arcillas con la obtención de la ecuación lineal de las curvas [10]:

$$DtR, RHOBR \text{ o } NPHIR = b - m \cdot \log R \quad (2)$$

La clasificación por la guía esquemática desarrollada por [2] para la interpretación de la separación de las curvas en función del contenido de COT, se logra al graficar las curvas sintéticas y las originales. La diferencia entre estas curvas, multiplicada por factores de escala que responden al método de porosidad (0.02 para sónico, 4 para el neutrónico y 2.5 para la densidad), representa el parámetro  $\Delta\log R$ , el cual se convierte en COT de la misma forma que en la metodología de Passey (ec. 1).

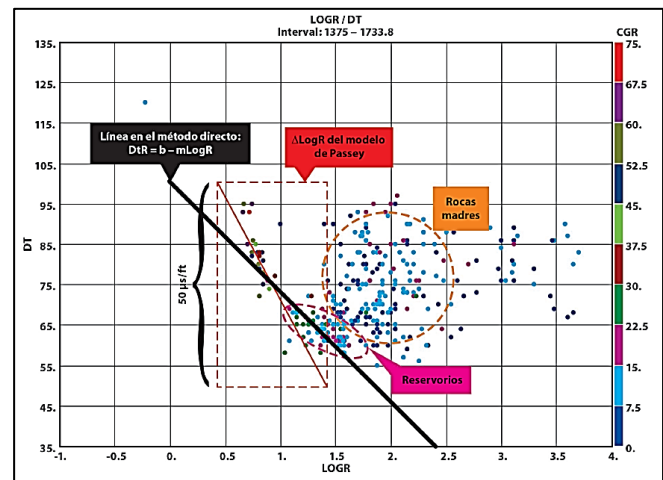


Figura 3. Gráfico de propiedades cruzadas de Dt vs. logaritmo de la resistividad y el valor del CGR (Torio + Potasio) según el color de los puntos, que muestra la línea de las arcillas, los reservorios y el clúster de las rocas madres, en el pozo PE-4

Fuente: [13].



### 2.3 Corrección de la porosidad por el efecto de la presencia de querógeno

Por el efecto en los registros de la materia orgánica que se deposita junto a los sedimentos, pero sin formar parte de la matriz de la roca ni ocupar el espacio poroso, es preciso corregir los valores de las curvas. Para ello, primero se deben convertir los valores de COT en valores de volumen fraccional de querógeno, puesto que los valores de COT son solo representativos de la cantidad de carbono presente, mientras que el querógeno contiene también oxígeno, nitrógeno, sulfuros, etc. Para esto se utiliza un factor de corrección (KTOC) que representa la relación entre la cantidad de carbono y la cantidad total de querógeno, el cual puede variar entre 0.68 y 0.95. Para la conversión de la fracción de masa a volumen fraccional se siguen los siguientes pasos [14]:

$$\begin{aligned} Wker &= TOC/KTOC & (3) \\ Vol\ rock &= Volker + Volma & (4) \\ Volker &= Wker/RHOBkerr & (5) \\ Volma &= (1 - Wker)/RHOBma & (6) \\ Vker &= Volker/Volma & (7) \end{aligned}$$

Donde:

KTOC: factor de corrección (g-1 o Kg-1); Wker: masa del querógeno (Kg o g); Volrock: volumen de la roca (m<sup>3</sup> o cm<sup>3</sup>); Volker, Volma: volumen del querógeno y de la matriz (m<sup>3</sup> o cm<sup>3</sup>); RHOBker, RHOBma: densidad del querógeno y de la matriz (Kg/m<sup>3</sup> o g/cm<sup>3</sup>); Vker: volumen fraccional del querógeno (v/v).

Se corrigen las porosidades neutrónicas y de densidad, considerando la porosidad total, estimada a partir de registros, como una combinación lineal del volumen de arcilla, la porosidad efectiva y el querógeno, con sus respectivos volúmenes.

$$DPHIker = (2.71 - RHOBker)/(2.71 - 1) \quad (8)$$

$$DPHIc = DPHI - (Vcl * DPHIcl) - (Vker * DPHIker) \quad (9)$$

$$NPHIc = NPHI - (Vcl * NPHIcl) - (Vker * NPHIker) \quad (10)$$

Donde:

DPHIker: porosidad del querógeno por el registro de densidad (v/v); RHOBker: Densidad del querógeno (v/v); DPHIc: Porosidad obtenida por el registro de densidad corregida por el efecto de la arcilla y el querógeno (v/v); DPHI: Porosidad obtenida por el registro de densidad (v/v); Vcl: Volumen de arcilla (v/v); DPHIcl: Porosidad de la arcilla por el registro de densidad (v/v); NPHIc: Porosidad por el registro neutrónico corregida por el efecto de la arcilla y el querógeno (v/v); NPHI: Porosidad proveniente del registro neutrónico (v/v); NPHIcl: Porosidad de la arcilla por el registro neutrónico (v/v); NPHIker: Porosidad del querógeno por el registro neutrónico (un rango de 0.45 a 0.75 v/v).

La porosidad efectiva corregida por el efecto del querógeno (PHIEk, v/v), se calcula como el promedio de la porosidad neutrónica corregida (NPHIc) y la porosidad por densidad corregida (DPHIc).

### 3 Resultados

En la investigación presente, para la estimación del contenido de materia orgánica se utilizaron las metodologías de Passey y de Bowman, que parten del registro de resistividad y alguno de porosidad (sónico, densidad, neutrónico). El valor de madurez alcanzado por la materia orgánica (LOM), se tomó como 10, a partir de estudios geoquímicos del área.

Debido a que en los pozos del sector Varadero Oeste no existían mediciones de laboratorio de COT en núcleos o muestras de canal, se calibró en el pozo PE-4, el cual se encuentra también en la FPNC, con las mismas formaciones y donde se realizaron mediciones de COT en muestras de canal [9].

Para homogeneizar el procedimiento, se trabajó con la curva de COT calculada por la metodología de Bowman para el registro de densidad volumétrica en todos los pozos del área [15]. Esta mostró el mayor índice de correlación en la curva sintética.

Los valores de COT fueron transformados en valores fraccionales de querógeno y se corrigió la porosidad efectiva correspondiente a los intervalos con presencia de materia orgánica o potencial generador en cada pozo. Se utilizó el factor de corrección KTOC = 0.80, la densidad del querógeno como 1.3 g/cm<sup>3</sup> y la porosidad como 0.65 v/v. Seguidamente se recalcularon los valores de saturación de agua.

### 4 Discusión

Este análisis confirmó el carácter no convencional del yacimiento estudiado, donde las mismas formaciones que actúan como reservorio, también constituyen rocas madres. En el registro compuesto del pozo VDW-1002 que aparece en la Figura 4, se resume el procedimiento realizado:

En la pista 3, la presencia de uranio (sombreado en color lima) se relaciona con un alto contenido de materia orgánica [16]. En esta misma pista, los valores del factor fotoeléctrico (PEFZ) cercanos a 5, denotan el componente calcáreo de las rocas. En la pista 6 se muestra la representación visual de ΔlogR sombreada en verde, dada por la separación entre la curva de densidad original (RHOZ) y la sintética (RHOBR); en la pista 7, en la curva de COT, se señalan los valores mayores de 2%.

Los resultados del análisis de ambiente de sedimentación muestran una relación entre el COT y el contenido de uranio, excepto en intervalos donde las condiciones sedimentarias se tornan de transicional a oxidante [17]. El COT disminuye en función del contenido de sedimentos terrígenos en la formación (pista 10).

En todos los pozos se identificaron los intervalos relacionados con rocas generadoras maduras, según la topología establecida en la metodología de Passey, de los cuales se separaron los que presentaban valores de COT mayores o iguales que 2 % (pista 8), condición de roca madre excelente en carbonatos [018]. Con la selección de estos intervalos se estimó el espesor generador para cada subunidad petrofísica en todos los pozos.

En la Tabla 1, en la segunda columna se representan las subunidades petrofísicas (SUP), y en el resto de las columnas, el espesor generador en metros (HGEN). En el recuadro más grueso se muestra el pozo VDW-1002, utilizado en el ejemplo de la Fig. 4.

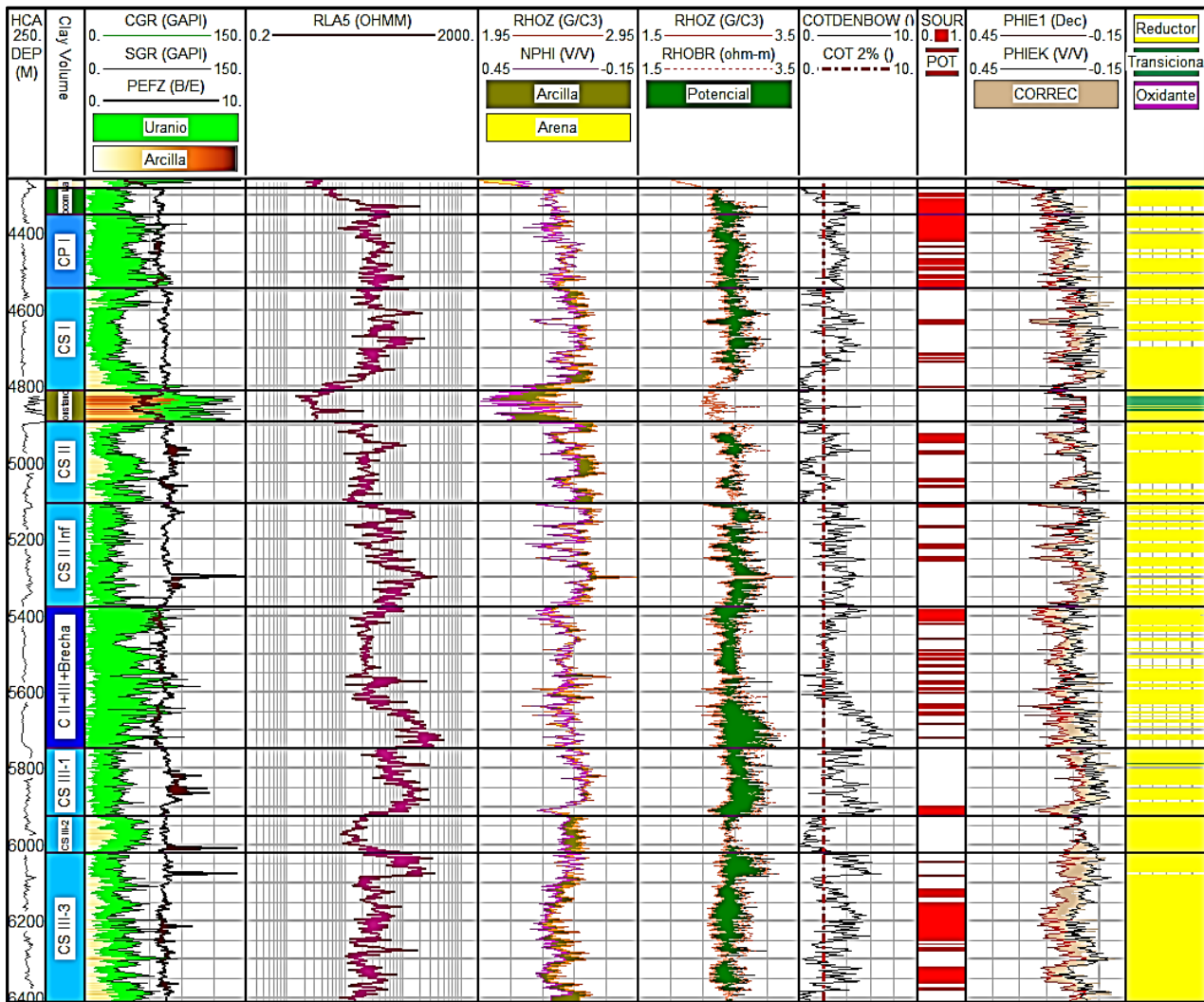


Figura 4. Comportamiento del contenido de COT y corrección a la porosidad por el efecto de la materia orgánica en el pozo VDW-1002.

Fuente: Los autores.

Tabla 1.

Espesores generadores de las subunidades petrofísicas para cada pozo.

		HGEN (m) para cada pozo								
		SUP	718	1000	1001	1002	1003	1007	1004	1005
Veloz 1	Neocomiano		n/r	12.4	14.8	51.0	n/r	n/r	98.8	43.9
	CPI		n/r	34.6	29.4	113.3	n/r	n/r	166.0	125.8
	CS		20.9	24.1	24.8	46.8	n/r	n/r	65.5	59.8
	Constancia		3.2	18.2	3.2	4.9	0.0	n/r	n/r	n/r
Veloz 2	CSII		0.2	0.0	14.8	50.6	14.5	4.4	n/r	n/r
	CSII Inf		17.2	9.8	16.1	52.4	84.0	83.7	n/r	n/r
	CPII+III+Brecha		148.6	166.9	130.5	131.9	131.8	140.7	n/r	n/r
	CSIII-1		n/r	15.1	45.8	28.9	59.8	40.5	n/r	n/r
	CSIII-2		n/r	n/r	0.0	2.8	0.0	9.1	n/r	n/r
	CSIII-3		n/r	n/r	50.2	192.5	118.5	24.1	n/r	n/r

n/r: No registrado

Fuente: Los autores

Se puede apreciar en general que los espesores generadores netos, son relativamente altos, excepto en la subunidad CSIII-2 y en la Formación Constancia (que no

pertenece al Grupo Veloz), y que solo pudiera ser significativo en el pozo VDW-1000 con 18 m. Por otra parte, como se observa mejor en la Tabla, las subunidades CPI,

perteneciente a Veloz 1, CPII + III + Brecha y CS III-3, pertenecientes a Veloz 2, presentan los mejores espesores generadores en la zona; a su vez, CPII + III + Brecha, presenta bastante similitud en su alto espesor generador en todos los pozos. Estas tres subunidades representan el alto potencial generador en la zona de estudio, y permiten establecer correlación entre los pozos con mejor precisión. En la tabla aparece en un recuadro el pozo tomado como ejemplo en el registro compuesto.

En la Figura 4, pista 9, se muestra la diferencia entre la porosidad efectiva corregida por el efecto del volumen de arcilla (PHIE1), y luego corregida además, por el efecto de la presencia de la materia orgánica (PHIEK). Como es de esperar, el efecto de la corrección resulta en la disminución de los valores de porosidad.

Los valores de saturación de agua, eran menores con la porosidad sin corregir, por lo que se sobreestimaba la saturación de petróleo. Los valores de volumen de arcilla se mantienen iguales, los valores de porosidad disminuyen, los valores de saturación de agua aumentan y por lo tanto los valores de *Net to Gross* disminuyen. Con esto se demuestra el error que se comete al evaluar petrofísicamente un yacimiento, al estimar sus propiedades, si se desconoce la presencia de materia orgánica o la influencia de esta en los registros geofísicos de pozo y por tanto en los resultados de la interpretación.

## 5 Conclusiones

Las metodologías de Passey y Bowman fueron empleadas y validadas con éxito para evaluar el contenido de COT en el caso de estudio. Los mejores resultados se obtuvieron con la metodología de Bowman empleando los registros de densidad volumétrica.

Por primera vez, fueron definidos los espesores generadores de las formaciones y unidades petrofísicas del Grupo Veloz en el yacimiento Varadero Oeste mediante registros geofísicos de pozo. Las subunidades CPI, CPII+III+Brecha y CSIII-3, mostraron los mejores espesores generadores en todos los pozos, destacándose CPII+III+Brecha. Esto permite fundamentar los volúmenes de hidrocarburos generados y mejorar la correlación entre los pozos por sus propiedades.

Se realiza, por primera vez en Cuba, la corrección para la porosidad efectiva por efecto de la presencia de materia orgánica, que conduce a la disminución de la saturación de hidrocarburos y su volumen fraccional. Esto se validará en la medida en que los cálculos se vayan respaldando con más análisis de laboratorio.

## Reconocimientos

Los autores agradecen al Dr. C. José Orlando López Quintero, por la idea inicial de realizar este tipo de análisis a los reservorios cubanos. También a la comisión de publicaciones del Consejo Científico de Geología del Centro de Investigación del Petróleo integrada por Silvia Valladares Amaro, Manuel Pardo Echarte y Reinaldo Rojas Consuegra, por su exhaustiva revisión y sus recomendaciones.

## Bibliografía

- [1] Heslop, K.A., Generalized method for the estimation of TOC from GR and Rt, search and discovery article #80117, adapted from poster presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 2010.
- [2] Passey, Q.R., Creaney, S., Kulla, J.B., Moretti, F.J., and Stroud, J.D., A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74 (12), pp. 1777-1794, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1306/0C9B25C9-1710-11D7-8645000102C1865D>.
- [3] Flower, J.G., 1983. Use of sonic-shear-wave/resistivity overlay as a quick-look method for identifying potential pay zones in the Ohio (Devonian) Shale: *Journal of Petroleum Technology*, 35, pp. 636-642, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2118/10368-PA>.
- [4] Mann, U., Leytehaeuser, D., and Muller, P.J., Relation between source rock properties and wireline log parameters. An example from Lower Jurassic Posidonia Shale, *Advances in Organic Geochemistry*, 10(4-6), pp. 1105-1112, NW Germany, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(86\)80051-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80051-1).
- [5] Mann, U., and Muller, P.J., Source rock evaluation by well log analysis (Lower Toarcian, Hils Syncline): *Advances in Organic Geochemistry*, 13(1-3), pp. 109-119, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90031-9).
- [6] Meyer, B.L., and Nederlof, M.H., Identification of source rocks on wireline logs by density/resistivity and sonic transit - time resistivity crossplot: *AAPG Bulletin*, 68(2), pp. 121-129, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1306/AD4609E0-16F7-11D7-8645000102C1865D>.
- [7] Naidés, C., Metodología de cálculo de Carbono Orgánico Total (COT) utilizando datos de perforación y perfiles LWD. En: 11° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Evaluación de Formaciones, 2022.
- [8] Santamaría-Orozco, D. y Ramírez-Maldonado, T., Integración geológica, geofísica y geoquímica en la estimación del potencial generador de rocas con altos contenidos orgánicos, *Revista Geociencias de la Universidad Olmeca*, 5(2), pp. 137-149, 2022.
- [9] López-Quintero, J.O. y Castro, O., Cómo los registros geofísicos de pozos pueden ser utilizados en la solución de tareas de la geoquímica orgánica. *Memorias del 3er Simposio Cubano de Geofísica, Geofísica '96*, La Habana, 1996.
- [10] Bowman, T., Direct method for determining organic shale potential from porosity and resistivity logs to identify possible resource plays. *AAPG Annual Convention*, New Orleans, LA., [online]. 2010, 34 P. Available at: [https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/document/ts/2010/110128bowman/ndx\\_bowman.pdf.html](https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/document/ts/2010/110128bowman/ndx_bowman.pdf.html)
- [11] Tamayo, Y., Evaluación de las litofacies en el yacimiento Varadero Oeste mediante el uso de atributos sísmo-estratigráficos, para determinar su continuidad lateral. Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Departamento de Ingeniería Geofísica, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba, 2015.
- [12] Hood, A., Gutjahr, C.C.M., and Heacock, R.R., Organic metamorphism and the generation of petroleum, *The American Association of Geologists Bulletin*, 59(6), pp. 986-997, 1975. DOI: <https://doi.org/10.1306/83D91F06-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- [13] Castro, O., Capítulo 2: Métodos y Metodologías de Interpretación en Castro, O., Evaluación petrofísica de formaciones gasoprolíferas cubanas, Centro Nacional de Información Geológica, 2017, pp 83-90.
- [14] Crain, E.R., and Holgate, D., A 12-step program to reduce uncertainty in kerogen-rich reservoirs. *Geoconvention 2014: FOCUS*, Calgary, Alberta, Canada, 2014.
- [15] Barcala, R., Caracterización petrofísica del sector Varadero Oeste. Franja norte de crudos pesados cubana. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Geofísica, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba, 2015.
- [16] Torres, M., Castro, O., Reyes, R. y Ortiz, G., Naturaleza de la presencia de uranio en los reservorios carbonatados. *Memorias de la Sexta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2015*. La Habana, 2015. ISSN 2307-499X,

- [17] Castro, O. y Moya, C., Estudio Petrofísico de la Zona Económica Exclusiva de Cuba (ZEEC) en el Golfo de México, PDVSA, Archivo Técnico, CEINPET, 2014, 73 P.
- [18] Magoon, L.B., and Dow, W.G., The petroleum system - From source to trap. American Association of Petroleum Geologist, 1994. ISBN-10:0891813381. ISBN (e): 9781629810928, DOI: <https://doi.org/10.1306/M60585>.

**O. Castro–Castiñeira**, se graduó como Ing. Geofísica en 1974 y obtuvo el grado de Dra. en Ciencias Geológicas en 1992, todo en la Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, José Antonio. Ha trabajado a través de los años en el Centro de Investigaciones del Petróleo de Cuba Petróleo-CUPET, como especialista en petrofísica, en diversos proyectos de investigación, y durante un tiempo, como Profesora Titular en la Universidad. Tiene artículos con resultados de sus investigaciones en publicaciones nacionales e internacionales, un grupo de los cuales aparecen recogidos en el libro Evaluación Petrofísica de las Formaciones Gasopetrolíferas Cubanas.

ORCID: 0000-0003-4285-6774

**R. Barcala–Alvarez**, se graduó como Ing. en Geofísica Aplicada en la Universidad Tecnológica de la Habana en 2016. Trabajó durante 5 años en el Centro de Investigaciones del Petróleo (Unión Cuba Petróleo), como especialista en petrofísica, realizando trabajos centrados en la evaluación de reservorios, sellos y rocas generadoras mediante la interpretación de registros geofísicos de pozo en la Franja Petrolera Norte Cubana. Ha publicado artículos como resultado de sus investigaciones en revistas nacionales y en colaboración con universidades extranjeras, abordando mayormente la caracterización de yacimientos petrolíferos no convencionales teniendo en cuenta la influencia de la presencia de carbono orgánico total. Posteriormente adquirió el título de MSc. en Geología y Gestión Ambiental de Recursos Minerales en la Universidad de Huelva.

ORCID: 0009-0002-8874-4284



# 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  $\alpha$  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).

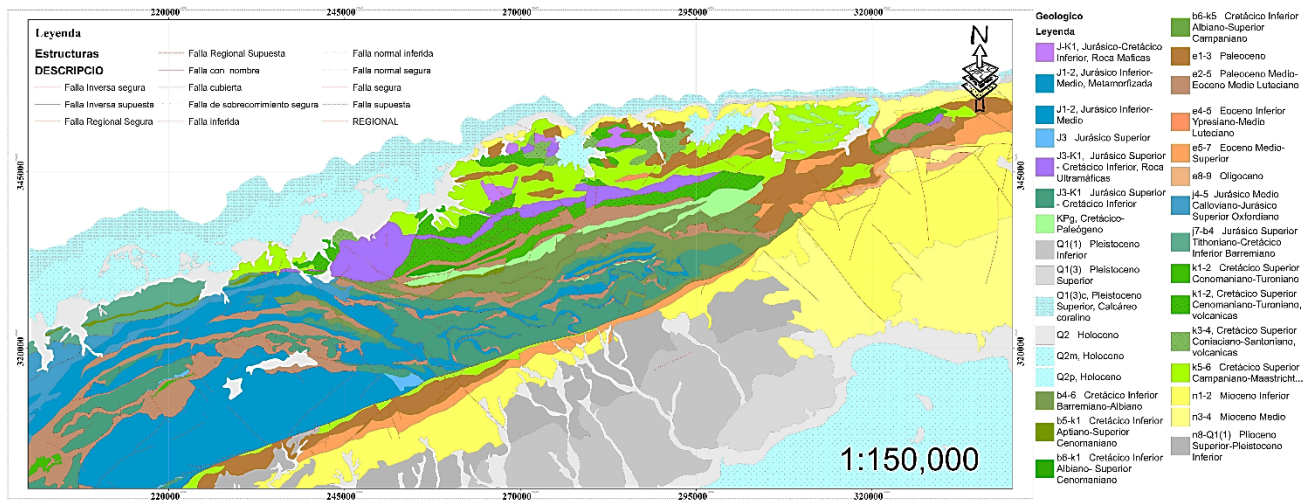


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio escala 1: 150 000. La base cartográfica fue elaborada por el Instituto de Geología y Paleontología (IG) / Servicio Geológico de Cuba escala 1: 100 000. Fuente: elaborado por el autor

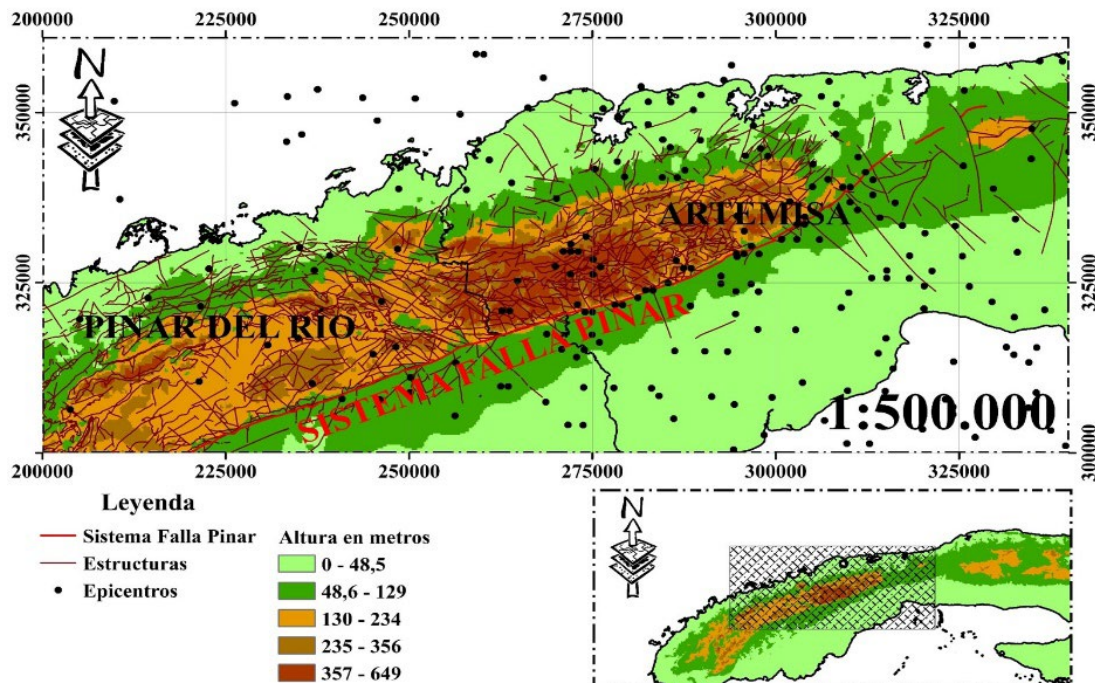


Figura 2. Relación de la distribución de la sismicidad con el Sistema Falla Pinar. Escala 1: 500 000. La sismicidad muestra una clara tendencia al agrupamiento cerca de la localidad de San Cristóbal actual provincia Artemisa. Es acumulación de esfuerzo es debido a un marcado cambio en el rumbo de la 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 (CENSAIS) 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 CENSAIS. 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.



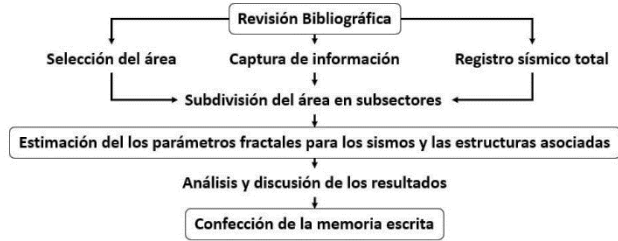


Figura 2. Diagrama de flujo de la investigación. la metodología posee cierta similitud con la empleada por Pazo-Arango 2024 [13] por ser esta el único antecedente sobre la interpretación de las propiedades fractales de los objetos geológicos.

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 Fractalyse.

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.

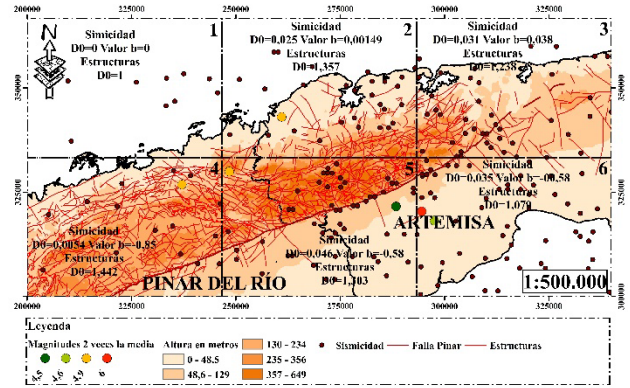


Figura 3. Mapa de relación espacial de la sismicidad con las posibles estructuras sismo generadoras del área de estudio. Escala 1:500 00. Confeccionado a partir de la base de datos realizada por Pazo-Arango (2024) y la información estructural facilitada por el IGP. En el mapa se muestran los valores 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.

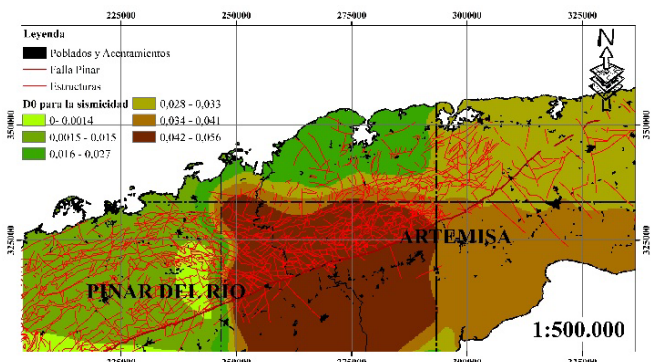


Figura 4. Comportamiento de la Dimensión de Capacidad ( $D_0$ ) en el área de estudio. Véase que los mayores valores de capacidad se encuentran en el subsector 5 tal y como mostraba la Fig. 4. Este resultado guarda relación con la concentración de epicentros en las inmediaciones de la localidad de San 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  $D_q$



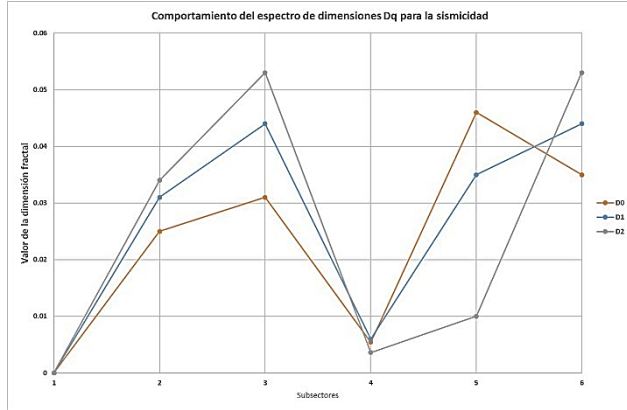


Figura 5. Comportamiento del espectro de dimensiones  $D_q$  para la sismicidad.  
Fuente: elaborado por el autor

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 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.

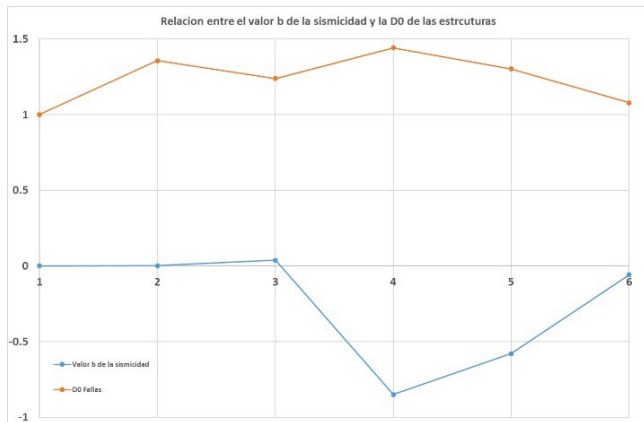


Figura 6. Relación entre el valor  $b$  de la sismicidad y la dimensión de capacidad de las estructuras asociadas a la misma.  
Fuente: elaborado por el autor.

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



# Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo

Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Máximo Ávila-Cruz, Víctor Galindo-López, José G.O. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustin Salas-Xochipa

*Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. patricia.maximo@correo.buap.mx*

Recibido: 6 mayo 2024. Recibido en formato revisado: 5 septiembre 2024. Aceptado: 9 septiembre 2024.

## Resumen

Este trabajo es el resultado de una serie de estudios que se realizaron en el templo de Nuestra Señora de la Merced, localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, México. El templo es una edificación colonial con valor patrimonial que ha tenido modificaciones estructurales y daños por sobrecargas generadas por sismo y por bombardeos. Sobresale el sismo del 2 de octubre de 1864 que dañó severamente el segundo cuerpo de la torre. El sismo del 19 de septiembre de 2017 agrietó y fisuró algunos elementos de la estructura, por ejemplo, la clave del arco del coro donde se formó una articulación plástica. Se realizó la modelación del arco en SAP 2000 v20 para aplicar un análisis Pushover; se registraron vibración ambiental, temperatura y humedad, variables que degradan a los materiales; se hizo el levantamiento topográfico de la portada y el estudio fotogramétrico del exterior de toda la estructura.

*Palabras clave:* sismo; templo; Pushover; vibración ambiental; fotogramétrico.

# Physical diagnostic of a 16<sup>th</sup> century religious building damaged by an earthquake

## Abstract

This work presents the findings of a series of studies conducted on of the temple Nuestra Señora de la Merced, located in The Historic Center of the city of Puebla, Mexico. The temple is a colonial building with heritage value that has undergone structural modifications and suffered damage from overloading generated by earthquakes and bombings. A noteworthy earthquake is the one of October 2, 1864, which severely damaged the second level of the tower. The earthquake of September 19, 2017, caused cracking and fissures in some elements of the structure, such as the keystone of the choir arch, where a plastic joint was formed. The arch was modeled in Sap 2000 v20 to perform a Pushover analysis; ambient vibration, temperature, and humidity were recovered, variables that cause degradation of materials. A topographic survey of the façade and a photogrammetric study of the entire structure's exterior were conducted.

*Keywords:* earthquake; temple; Pushover; ambient vibration; photogrammetric.

## 1 Introducción

Los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Estado de México, Veracruz y Baja California, forman parte del territorio mexicano localizados en la costa del Océano Pacífico. Estos estados están localizados en las zonas de riesgo alto y riesgo medio. La alta sismicidad generada por la interacción de las placas de Norteamérica, de Cocos, del Pacífico, de Rivera y del Caribe, se registra en la red acelerográfica que se extiende a lo largo

de la costa del Pacífico, hacia los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, y en las ciudades de México, Puebla, Oaxaca y Acapulco [1].

El estado de Puebla se divide en tres regiones sísmicas, al norte la zona asísmica, en el centro la zona penisísmica y al sur la zona sísmica. La última zona está relativamente cerca de la zona de subducción del sureste de la República Mexicana. También, se tienen identificadas siete fallas geológicas, de las cuales, tres (Popocatepetl-Chignahuapan, Malintzi y Tehuacán, Cd. Sedán) pasan por la zona sísmica,

**How to cite:** Máximo-Romero, P., Ramos-Aguilar, R., Galindo-López, V., Muñoz-Flores, J.G., Cárdenas-López, L., Morales-González, A.E. y Salas-Xochipa, A.A., (2024). Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 56, pp. 33 - 46. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.114291>

donde han ocurrido sismos que han causado escenarios de desastre en algunos municipios del estado de Puebla.

Uno de los sismos que ocasionó graves daños en el Patrimonio Cultural Edificado, principalmente en templos construidos entre los siglos XVI y XIX, fue el que ocurrió el 15 de junio de 1999, cuyas características y reporte de daños se dieron a conocer en el Informe Técnico “El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999”, elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Según el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el sismo ocurrió a las 15:41:06 hrs. (Hora local), con magnitud M 6.7 (Mw 7.0), coordenadas focales latitud 18.20°N, longitud 97.47°O y profundidad de 60 a 80 km. El epicentro se ubicó aproximadamente a 20 km al sur-suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla y también a unos 55 km al noreste de la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, donde se registró un temblor de magnitud Mw 7.1 el 24 de octubre de 1980. El temblor produjo intensidades de moderadas a altas en el epicentro, causando daños de consideración en algunas ciudades y poblados del sur de Puebla y norte de Oaxaca; y en mucha menor medida, en el sur de Morelos y en los estados de Tlaxcala, México, Veracruz y Guerrero. En otros lugares los daños fueron muy ligeros.

En el estado de Puebla, causó daños en viviendas, escuelas, hospitales, edificios históricos e iglesias, edificios públicos, caminos, puentes y en el suministro de energía. El Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (CONACULTA) y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), censaron minuciosamente los daños y reportaron 1,124 edificios históricos e iglesias dañados, de los cuales un 10 por ciento tuvieron daños severos, 40 por ciento moderados y 5 por ciento leves. (CENAPRED, 1999) [2].

El 7 de septiembre de 2017, ocurrió un sismo de magnitud 8.2, el Servicio Sismológico Nacional reportó los datos siguientes: epicentro localizado a 133 km al suroeste del poblado de Pijijiapan, en el estado de Chiapas, ocurrido a las 23:49:17 (hora del centro), profundidad de 45.9 km y coordenadas epicentrales 14.761° latitud N y -94.103° longitud W [3]. Este sismo se sintió en los Estados de Chiapas, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Guerrero, Estado de México, Ciudad de México y Oaxaca, causó la pérdida de vidas humanas y daños severos en viviendas construidas con adobe y templos, localizados en Oaxaca, principalmente.

Otro sismo de magnitud importante fue el ocurrido el 19 de septiembre de 2017, a las 13:14:40 horas, reportado por el Servicio Sismológico Nacional, con magnitud de 7.1, localizado en el límite estatal de Puebla y Morelos, a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos, a 120 km de la Ciudad de México y a 8 kilómetros al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla. Las coordenadas del epicentro fueron 18.40 latitud N y -98.72 longitud W y la profundidad de 57 km [4]. El sismo se sintió en Puebla, Morelos, Oaxaca, Veracruz, Tlaxcala, Estado de México y Guerrero, causando la pérdida de vidas humanas. El INAH reportó 241 templos dañados en Puebla [5].

Cabe señalar que los sismos del 15 de junio de 1999 y del 19 de septiembre de 2017 se originaron por fallas locales, lo que se puede corroborar con las coordenadas de los epicentros.

## 2 Caso de estudio. Templo de Nuestra Señora de la Merced

El templo de Nuestra Señora de la Merced se localiza en la calle 5 Nte. 1001, Centro histórico de Puebla, México. Es una construcción de grandes dimensiones que ha tenido modificaciones estructurales a lo largo de su historia. También ha sido dañado por sismo y por bombardeos provocados por el sitio de Puebla en el siglo XIX. A continuación, se presenta información histórica del este templo.

1864, 3 de octubre. México D.F. En la noche del 2 al 3 de octubre ocurrió un sismo que causó 20 muertos en Puebla y muchos heridos; en Acultzingo y Acatzingo muchas desgracias personales, lo mismo que en San Andrés Chalchicomula. Una parte de la torre se vino abajo junto con dos pilares. El ingeniero del ejército francés suscribe del deterioro... templos y edificios públicos, que halló en la Merced muy lacrado el segundo cuerpo de la torre, el que será conveniente destruir, y en la portería apuntalar las bóvedas por estar muy cuarteadas, y quitar los techos que hay encima de ellas que amenazan ruina, así como otros del interior del convento que se hallan en el mismo estado [6].

Leicht, 2016 comenta respecto a una fotografía del templo incluida en su libro: El acceso al atrio, por la esquina suroriente, se mantiene inalterado, mas la fotografía revela que no existía el actual acceso izquierdo sobre la barda, el cual replicó las formas del arco lateral que fue tapiado sobre la avenida 10 poniente [7].

A causa de los sitios que sufrió la ciudad en el siglo XIX, la torre se dañó tanto que hubo que demoler la mitad; lo que queda es un ancho cuerpo de planta cuadrada. En 1817 por indicaciones del superior fray José Santos Coy, se demolieron los muros laterales de las capillas con la finalidad de que el templo tuviera corredores a ambos lados de la nave central, es decir, como un templo de planta basilical. Hacia 1835 se hicieron otras reformas quedando el edificio más o menos como hoy lo vemos [8]. En la Fig. 1 se observa el templo de la Merced antes del año 1872.



Figura 1 Torre original del templo de la Merced antes del año 1872. Fuente: Mercedarios Puebla.





Figura 2 Templo de Nuestra Señora de la Merced en siglo XX.  
Fuente: Mercedarios Puebla.

Hasta el momento, no se tiene información de daños en el templo de Nuestra Señora de la Merced causados por el sismo del 15 de junio de 1999. Pero, por ejemplo, el templo de Nuestra Señora del Refugio, localizado en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, tuvo daños moderados por este sismo y no fueron documentados en el informe del CENAPRED, lo mismo pudo haber pasado con el templo en estudio. En la Fig. 2 se muestra como lucía el templo en el siglo XX, sin el segundo cuerpo de la torre y el cupulín.

El sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017, ocasionó agrietamientos y fisuras en diferentes elementos de la estructura del templo. Sobresalen los daños que provocó en la clave del arco del coro donde se formó una articulación plástica de 0.5 cm, aproximadamente, debido a que el movimiento telúrico abrió las columnas que sostienen al arco mostrado en la Fig. 3 y el detalle del daño se observa en la Fig. 4, otros arcos resultaron con daños menores, en la bóveda se formó una grieta de 7.6 cm de ancho, grietas y fisuras en muro de la sacristía, entre otros.

Después del sismo el arco fue apuntalado para evitar una mayor deformación, mientras las autoridades competentes decidían qué tipo de materiales utilizarían para la restauración, de tal manera, que fueran compatibles con los originales sin alterar sus valores intrínsecos.

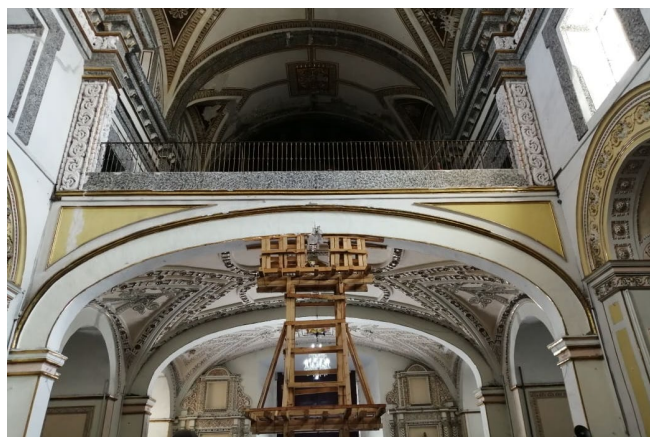


Figura 3. Arco del coro con falla estructural y por abertura de los apoyos.  
Fuente: Fotografía tomada por Muñoz-Flores, 2019.



Figura 4. Detalle del daño del arco.  
Fuente: Fotografía tomada por Muñoz-Flores, 2019.

### 2.1 Modelación del arco del coro y el análisis Pushover

Para lograr que el modelo fuera lo más aproximado posible, se realizó el levantamiento del arco y de la bóveda con una estación total, tomando lecturas de distancia, mediante una onda electromagnética portadora (microondas o infrarrojos) con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas. Posteriormente, se vaciaron los datos registrados en Microsoft Excel y se trazó una aproximación del arco, enseguida se exportaron esos datos a AutoCAD versión 2018 para generar el modelo y poderlo exportar a SAP 2000 v20.

Las coordenadas de los puntos se obtuvieron respecto a un sistema de referencia global, registrando las lecturas respecto a los ejes X Y (horizontales) y Z (vertical).

La Tabla 1 contiene los datos de las coordenadas de los puntos del eje inferior del arco y la Tabla 2 los mismos datos, pero del eje superior. Donde X e Y corresponden a los ejes de referencia globales, análogamente, x e y son las coordenadas de los ejes locales.

Tabla 1.  
Coordenadas de los puntos del eje inferior del arco.

No. Puntos	Coordenadas de los Puntos Eje Inferior			
	X	Y	x	Y
1	1003.2530	1004.275	3.253	4.275
2	1003.2370	1004.486	3.237	4.486
3	1003.1610	1004.799	3.161	4.799
4	1003.0340	1005.092	3.034	5.092
5	1002.7350	1005.439	2.735	5.439
6	1002.0470	1005.882	2.047	5.882
7	1001.0030	1006.289	1.003	6.289
8	1000.0440	1006.483	0.044	6.483
9	998.8440	1006.63	-1.156	6.63
10	997.8950	1006.642	-2.105	6.642
11	996.8130	1006.576	-3.187	6.576
12	995.6440	1006.395	-4.356	6.395
13	994.6950	1006.126	-5.305	6.126
14	993.8600	1005.732	-6.14	5.732
15	993.3070	1005.291	-6.693	5.291
16	993.0270	1004.934	-6.973	4.934
17	992.9420	1004.698	-7.058	4.698
18	992.9050	1004.428	-7.095	4.428
19	992.9200	1004.229	-7.08	4.229

Fuente: Elaborada por Muñoz-Flores, 2019.



Tabla 2.  
Coordenadas de los puntos del eje superior del arco.

No. Puntos	Coordenadas de los Puntos Eje Superior			
	X	Y	x	y
1	1003.7920	1004.2515	3.7920	4.2515
2	1003.7767	1004.5712	3.7767	4.5712
3	1003.6714	1004.9792	3.6714	4.9792
4	1003.4927	1005.3779	3.4927	5.3779
5	1003.1018	1005.8498	3.1018	5.8498
6	1002.2957	1006.3638	2.2957	6.3638
7	1001.1518	1006.8104	1.1518	6.8104
8	1000.1261	1007.0134	0.1261	7.0134
9	998.8806	1007.1696	-1.1194	7.1696
10	997.8829	1007.1802	-2.1171	7.1802
11	996.7568	1007.1177	-3.2432	7.1177
12	995.5286	1006.9286	-4.4714	6.9286
13	994.5031	1006.6368	-5.4969	6.6368
14	993.5716	1006.1906	-6.4284	6.1906
15	992.9203	1005.6724	-7.0797	5.6724
16	992.5494	1005.1956	-7.4506	5.1956
17	992.415	1004.8318	-7.5850	4.8318
18	992.3622	1004.4466	-7.6378	4.4466
19	992.3794	1004.2173	-7.6206	4.2173

Fuente: Elaborada por Muñoz-Flores, 2019.

La Fig. 5 muestra los puntos del arco modelado en AutoCAD versión 2018.



Figura 5. Puntos de los datos registrados en Microsoft Excel.  
Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

La Fig. 6 muestra la configuración del arco mediante la unión de los puntos para obtener su perfil en AutoCAD versión 2018.

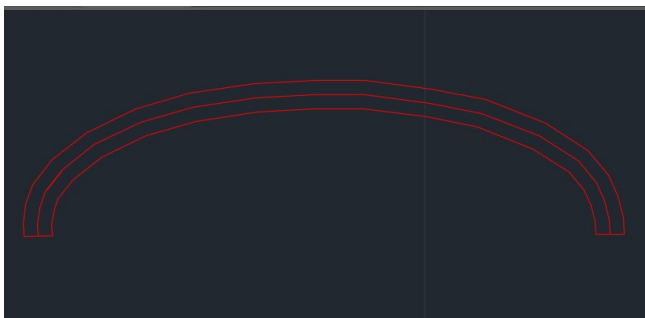


Figura 6. Perfil del modelo del arco.  
Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

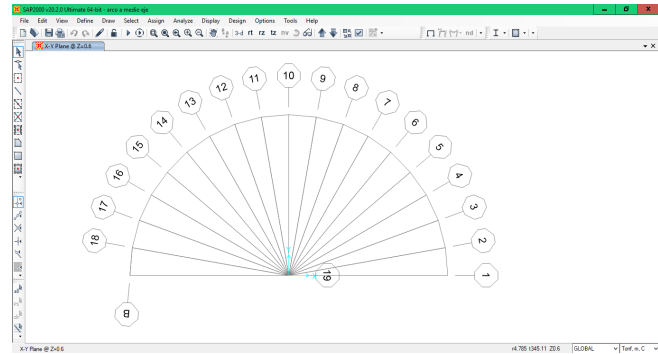


Figura 7. Configuración del arco con coordenadas importadas de Microsoft Excel.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

A continuación, se presenta un resumen de la modelación del arco en SAP 2000 v20 y parte del procedimiento de la aplicación del método del empujón (Pushover o análisis de colapso) con el objetivo de crear la curva de capacidad del arco, donde se aplica un patrón de cargas laterales, que se incrementa en cada iteración, llevando al arco más allá del rango elástico y su posterior colapso o hasta su deformación máxima. Se obtiene una gráfica de fuerza-desplazamiento conocida como curva de capacidad estructural o curva Pushover. El modelo se exportó a SAP 2000 v20, configurando el software con una malla en coordenadas cilíndricas, tal como se muestra en la Fig. 7. Posteriormente, se trazó el arco sobre la malla con el comando Draw Frame y sobre cada punto de las barras se asignaron las coordenadas correspondientes para obtener el arco con la configuración real.

El informe FEMA 273 (1997) [9], introduce el Análisis Estático No Lineal para el modelado y análisis sísmico, conocido como análisis “Pushover”. Consiste en empujar el modelo matemático de una estructura con una distribución prescrita de fuerzas monótonamente crecientes para predecir la secuencia de daño en el intervalo de comportamiento inelástico, provee una relación entre el desplazamiento del nudo de control, donde se registra el desplazamiento y el cortante basal. La relación resultante muestra los cambios de rigidez, así como la capacidad de carga lateral de la estructura.

En SAP 2000 v20 se siguieron los siguientes pasos: modificación de las propiedades del material, introducción de los valores en el apartado Non linear Material Data...e introducción de los puntos de la curva Stress-Strain... (Ver más en informe FEMA 273). En la Fig. 8 se muestra el modelo del arco con las rótulas plásticas propuestas de

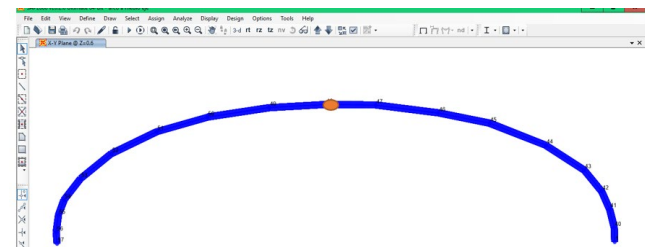


Figura 8. Arco modelado que muestra las rótulas plásticas y el punto de control.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

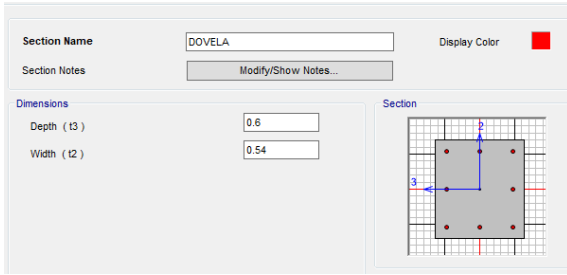


Figura 9. Sección característica geométrica de la dovela.  
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

acuerdo a los lineamientos del FEMA 356 o ASCE 41-13 y el punto de control, que en este caso fue el punto 10, localizado en la mitad de la clave del arco, con dicho punto se monitoreó el desplazamiento.

Los templos mexicanos construidos en el siglo XVI, son de mampostería combinada, por lo que en SAP 2000 v20 se seleccionó el concreto por ser el material más parecido a la mampostería, introduciendo sus características para el análisis. El arco del templo es del tipo carpanel o apainelado, conformado por dovelas, caracterizadas por su disposición radial. El punto de control se ubicó en la dovela central del arco, llamada clave. En la Fig. 9 se muestran las dimensiones de la sección plana que se utilizaron para cada dovela.

El material se definió introduciendo los datos siguientes:

$E=1,500 \text{ kips/in}^2=105,675 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\gamma=160 \text{ lb/ft}^3$ ,  $f'c=200 \text{ psi}=140.61 \text{ kg/cm}^2$ ,  $ft=100 \text{ psi}=7.03 \text{ kg/cm}^2$ .

Donde

$E$ =módulo de elasticidad

$\gamma$ =peso unitario.

$f'c$ =capacidad de resistencia a la compresión

$ft$ =capacidad de resistencia a la tensión.

El arco se modeló con carga muerta que considera su peso propio y la correspondiente al peso del coro. El análisis Pushover se hizo mediante un análisis estático no lineal. En la Fig. 10 se muestra la gráfica Desplazamiento vs Reacción en la base, el desplazamiento es el del punto de control (punto 10) con un valor de  $-0.015 \text{ m}$  (negativo porque se desplaza hacia abajo en la dirección del eje Z) y la reacción en la base, tiene un valor de  $158.8 \text{ ton}$ . Estos valores representan la carga y el desplazamiento que puede soportar el arco antes de fallar.

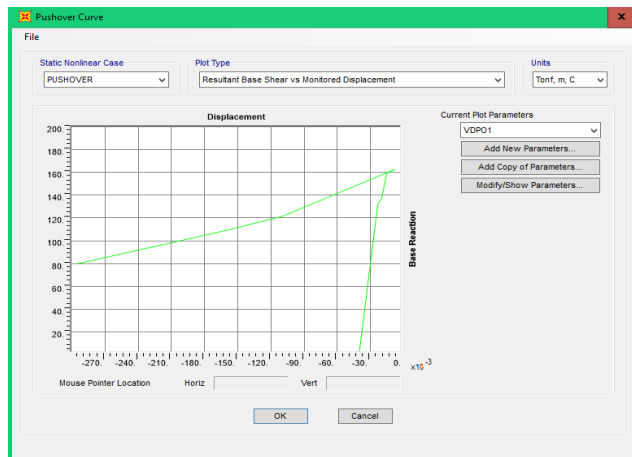


Figura 10. Gráfica Desplazamiento vs Reacción en la base.  
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

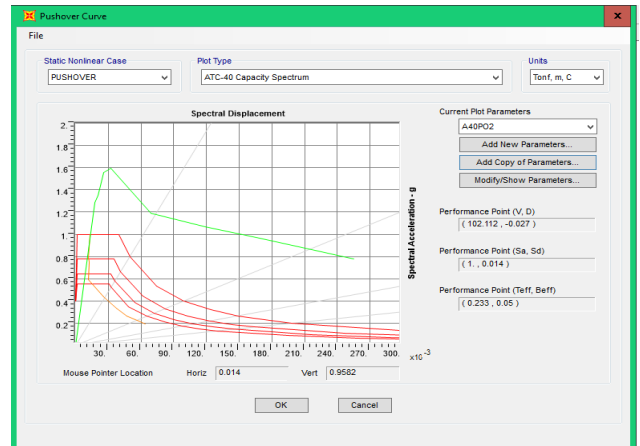


Figura 11. Punto de intersección de los espectros de demanda y la curva de capacidad.  
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

En la Fig. 11 el punto de intersección de los espectros de demanda y la curva de capacidad se conoce como punto de desempeño. El espectro de demanda se muestra en color verde y la curva de capacidad en color naranja, el desempeño de la estructura está dado por  $0.014 \text{ m}$  de desplazamiento y  $0.9582 \text{ g}$ . Este punto representa el límite donde el arco puede trabajar sin formar rótulas plásticas.

Finalmente, la Fig. 12 muestra las posibles rótulas plásticas que se generaron en nueve pasos del Pushover, llevando al arco a su colapso total.

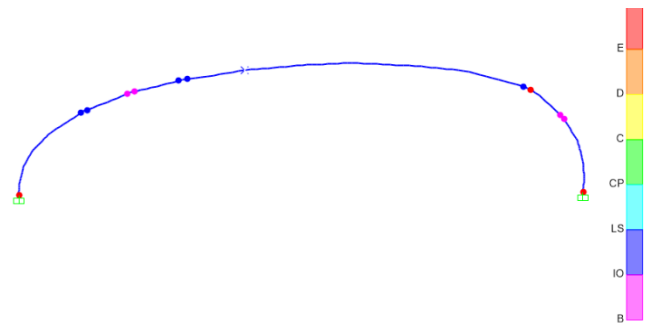


Figura 12. Gráfica que muestra las rótulas plásticas formadas en nueve pasos.  
Fuente: Los autores, SAP 2000 v20.

## 2.2 Estudios para identificar patologías en el templo

Continuando con los estudios realizados en este templo, se instalaron sensores para registrar vibración ambiental, humedad y temperatura, debido a que son variables que afectan a las estructuras antiguas y que generan patologías que degradan a los materiales, haciéndolos más vulnerables ante la acción sísmica. También, se realizó el levantamiento topográfico de la fachada principal, porque se tenía la duda si el sismo del 19 de septiembre de 2017, había provocado un desplazamiento horizontal de la fachada. Por último, se realizó un estudio fotogramétrico para identificar posibles daños en el exterior del templo, difíciles de identificar a simple vista.

### 2.2.1 Registro de temperatura del ambiente, humedad relativa y vibración ambiental.

Se solicitaron los permisos correspondientes al Rector del templo de Nuestra Señora de la Merced, para ingresar al interior de las instalaciones y seleccionar los espacios donde se instalarían los sensores mencionados en el apartado anterior. En la Fig. 13 se observa humedad en la zona del coro.



Figura 13. Patologías en la zona del coro.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

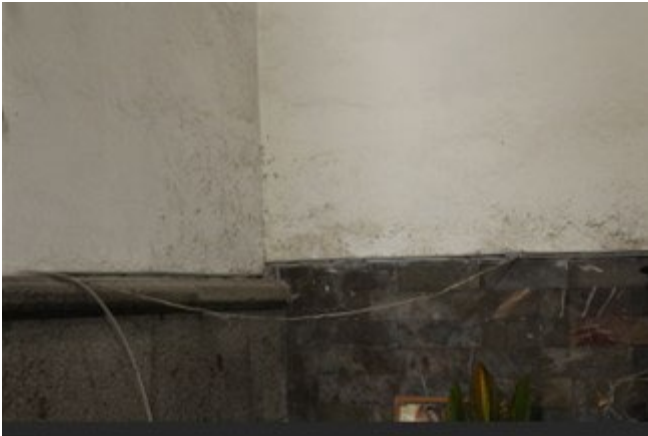


Figura 14. Patologías en la zona de la sacristía.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

En la sacristía existen agrietamientos, tal como se observa en la Fig. 14.

Después de realizar la inspección visual se definieron los espacios donde se instalarían tres dispositivos con los sensores integrados. Estos sensores fueron construidos por estudiantes de electrónica. La Fig. 15 muestra uno de esos dispositivos.

Se propuso instrumentar con un dispositivo (Sensor 1) la cúpula Fig. 16, ya que es un elemento estructural (macroelemento) que vibra de forma independiente respecto a toda la estructura y que forma parte de la configuración estructural del templo. Se ha documentado que, durante sismos extraordinarios, las cúpulas han presentado deficiente comportamiento estructural, formándose fisuras, grietas e incluso, han colapsado.



Figura 15. Dispositivo con los sensores integrados (temperatura, humedad y vibración).  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 16. Sensor 1 instalado en el interior de la cúpula.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.



Figura 17. Sensor 2 instalado en la zona del coro.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.





Figura 18. Sensor 3 instalado en la sacristía.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

El segundo dispositivo (Sensor 2) se instaló en la zona del coro Fig. 17, debido a las patologías que presenta originadas por variables ambientales y de origen mecánico (fisuras, agrietamientos, desplazamientos, etc.).

El tercer dispositivo (Sensor 3) se instaló en la sacristía Fig. 18, pues es un lugar cerrado, sin ventilación y que presenta patologías por humedad y variación de temperatura.

En las Figs. 19 - 27, se muestran parte de los resultados de los registros de los sensores 1, 2 y 3 durante el día 21 de noviembre de 2023 y sus correspondientes coeficientes de correlación para determinar qué influencia tienen estas variables meteorológicas en esas zonas del templo y su relación con la degradación de los materiales. Los sensores fueron construidos por estudiantes de electrónica y las figuras incluidas en este documento, corresponden a la etapa de su calibración. Como se puede observar existen correlaciones congruentes según la localización de los sensores.

En la ciudad de Puebla, el año 2023 se caracterizó por el incremento de la temperatura ambiental comparada con años anteriores y la posibilidad de lluvia durante el mes de noviembre, aumentando el porcentaje de la humedad ambiental. En la cúpula el coeficiente de correlación entre la temperatura ambiental y la humedad del ambiente es  $-0.74636496$ , valor que indica que las variables se relacionan negativamente, es decir, mientras la temperatura aumenta, la humedad disminuye y viceversa. En la zona del coro el coeficiente de correlación es  $-0.92219541$ , este valor indica una correlación negativa casi perfecta, ese lugar está bien ventilado, mientras la temperatura aumenta, la humedad disminuye. La sacristía es un lugar cerrado y poco ventilado, esta condición favorece a la correlación negativa de las variables estudiadas, el coeficiente de correlación es  $-0.83747653$ . Los coeficientes de correlación que se obtuvieron son congruentes con las climáticas en cada lugar.

En [10] se muestran los resultados de una investigación titulada “influencia de variables medioambientales en la humedad por capilaridad en muros de la iglesia Santa Lucía”. En este documento citan: En esta investigación se centró la atención en las variables hidro climáticas temperatura, humedad relativa, incidencia de los vientos y radiación solar. La temperatura contribuye a la evaporación del elemento afectado. Si las oscilaciones térmicas son significativas favorecen al aumento del deterioro de la edificación. Cuando la humedad relativa se encuentra por encima del 70%, se considera un peligro para el estado de las edificaciones, ya que mantiene elevados los niveles

de humedad, impidiendo la evaporación del elemento afectado, lo cual favorece el crecimiento de microorganismos.

En la ciudad de Puebla, el año 2023 se caracterizó por el incremento de la temperatura ambiental, comparada con años anteriores y la posibilidad de lluvia durante el mes de noviembre.

Los resultados que se obtuvieron son congruentes con las condiciones climáticas que se presentaron en esos días, sin olvidar que los sensores se encontraban en la etapa de pruebas y calibración. En las gráficas se observan valores menores de 70% de la Humedad Relativa, por lo cual, las zonas monitoreadas no se encuentran en peligro.



Figura 19. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 1.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

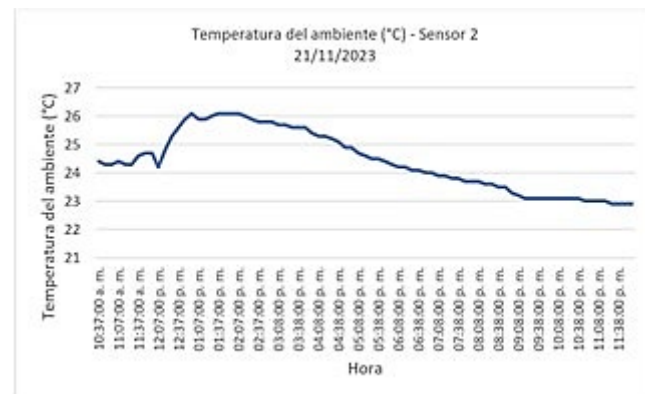


Figura 20. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 2.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.



Figura 21. Temperatura del ambiente. (°C), registro en el sensor 3.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.



Figura 22. Humedad relativa (%), registro en el sensor 1.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

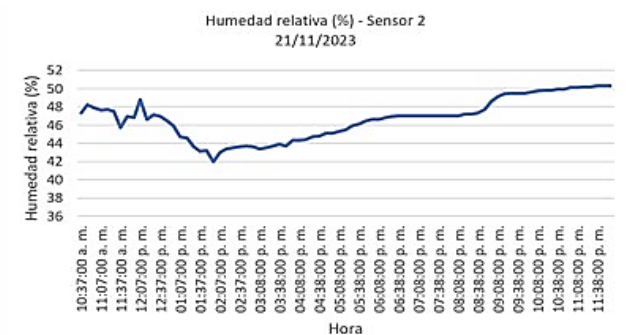


Figura 23. Humedad relativa (%), registro en el sensor 2.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

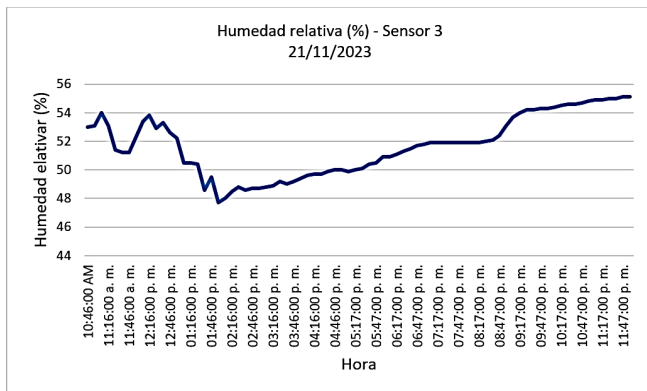


Figura 24. Humedad relativa (%), registro en el sensor 3.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

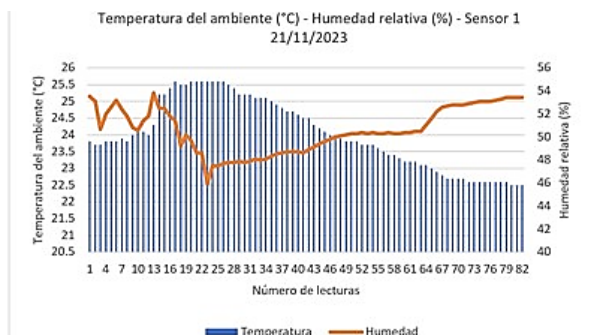


Figura 25. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 1. Coeficiente de correlación -0.74636496.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

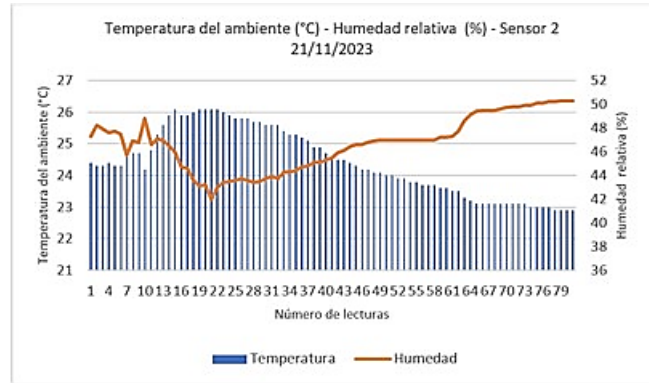


Figura 26. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 2. Coeficiente de correlación -0.92219541.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

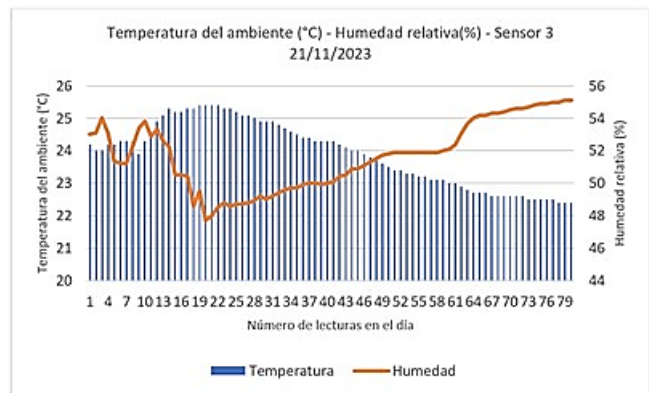


Figura 27. Temperatura ambiente (°C)-Humedad relativa (%), registro en el sensor 3. Coeficiente de correlación -0.83747453.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

Las gráficas de temperatura del ambiente muestran que las más altas temperaturas se encuentran entre las 12:40:00 p.m. y las 02:40:00 p.m., posteriormente, empiezan a descender. La humedad relativa desciende en ese intervalo y va aumentando en el resto del día. La variación de la temperatura no es significativa y la humedad relativa no rebasa el 70%, por lo tanto, estas variables no representan un riesgo para la edificación. Sin embargo, en los muros y en la bóveda de la zona del coro, así como en el exterior de la estructura, se observaron patologías del tipo mecánico provocadas por grietas y fisuras no reparadas en tiempo y forma, lo cual se infiere que fueron parte del origen de humedades. Para restaurar las áreas afectadas, se propone inyectar con mezcla de morteros y resinas epóxicas, las cavidades, vacíos o grietas, tratando previamente todas las zonas que presenten esas patologías, con el objetivo de mejorar las características del material y después aplicar pintura con efecto loto (nanolotos) que sea auto lavable, para proteger la estructura de la contaminación ambiental.

Los sensores también registraron vibración, entendiéndose como la vibración de un sistema o estructura, que puede ser causada por una perturbación instantánea y ajena a toda excitación permanente, en estas condiciones el sistema vibra por su estado natural, o pueden existir fuerzas



perturbadoras, que lo hagan vibrar, por ejemplo, el ruido o vibración ambiental proveniente del tráfico vehicular, oleaje, etc.

El modelo que describe el fenómeno de vibración, es un sistema masa-resorte, donde la masa posee características energéticas cinéticas, y el resorte, características restauradoras. Por tanto, para que un sistema vibre es necesario que posea por lo menos un elemento inercial (energía cinética) y un elemento restaurador (energía potencial). Los elementos restauradores se generalizan como elementos elásticos y elementos restauradores que sin ser elásticos tienen el mismo comportamiento, como lo es el péndulo (oscilador simple). Las ecuaciones básicas de la dinámica y el análisis del movimiento de este tipo de osciladores son:

La segunda ley de Newton eq. (1), donde  $F$  es la fuerza de inercia,  $m$  es la masa y  $a$  es la aceleración.

$$F = ma \tag{1}$$

La fuerza aplicada a sistemas elásticos está dada por eq. (2), donde  $F$  es la fuerza elástica,  $k$  es la rigidez y  $\Delta$  el desplazamiento.

$$F = k\Delta \tag{2}$$

La fuerza amortiguadora del movimiento eq. (3) donde  $F$  es la fuerza aplicada,  $C$  es el coeficiente de amortiguamiento y  $v$  la velocidad.

$$F = Cv \tag{3}$$

En el caso de una estructura sujeta a vibración, la respuesta está dada en deflexiones, esfuerzos, etc., y tales parámetros varían con el tiempo. De acuerdo con lo anterior, una diferencia importante entre el Análisis estático y el Análisis dinámico es que el análisis dinámico presenta soluciones (distintas) para cada instante de tiempo. Cuando a una estructura se le aplica la carga en forma dinámica, las deformaciones que varían con el tiempo producen aceleraciones, y de acuerdo al principio D'Alembert, inducen fuerzas de inercia, que resisten el movimiento del elemento. Entonces, el elemento queda sujeto a dos cargas: la fuerza externa  $P(t)$ , que causa el movimiento, y las fuerzas de inercia,  $F(t)$ , que resisten la aceleración inducida.

Las vibraciones, se miden generalmente, en unidades métricas de acuerdo con los requisitos ISO mostrados en la Tabla 3 [11].

Los parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración están estrechamente relacionados en los movimientos oscilatorios. Si se conoce la aceleración de un sistema, la velocidad y el desplazamiento de la vibración, se pueden obtener mediante integraciones de la señal, haciendo uso de softwares que realicen de forma rápida y confiable estas operaciones.

Tabla 3. Unidades según los requisitos ISO.

Desplazamiento	Felicidad	Aceleración
m, mm, $\mu$ m	m/s, mm/s	$m/s^2$

Fuente: Adaptado de Rodríguez Súnico-Manuel, 2005 [11].

Los sensores que se diseñaron y fabricaron para registrar la vibración ambiental en el templo de Nuestra Señora de la Merced, registran aceleraciones en las direcciones ortogonales X (este-oeste) e Y (norte-sur) y de lo expuesto anteriormente, las aceleraciones están relacionadas con los desplazamientos, la velocidad y el amortiguamiento de las estructuras.

Una de las características de los templos construidos en la época colonial, es su gran peso, debido al tipo de mampostería con que fueron construidos. Por tanto, una fuerza dinámica de gran magnitud, produciría aceleraciones, velocidades y desplazamientos relativamente grandes.

Las aceleraciones producidas por la vibración ambiental que afectan al templo, son muy bajas, debido al tipo de mampostería combinada (rocas de la región) y a las grandes dimensiones de las secciones transversales de los muros, principalmente. Por tanto, los niveles de aceleración, no representan un problema para la estabilidad y seguridad estructural del templo.

Las Fig. 28-32, muestran gráficas de aceleración registrada en los sensores 1 y 3.

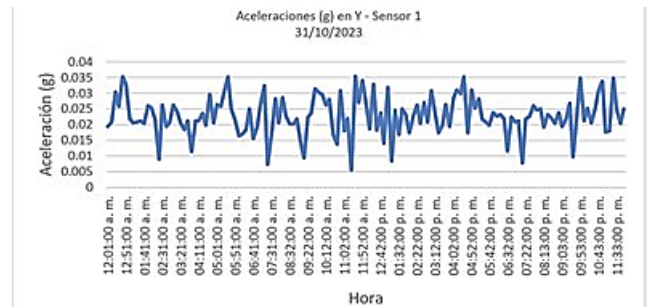


Figura 28. Aceleración máxima 0.03547226 g, hora 11:32:00 a. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

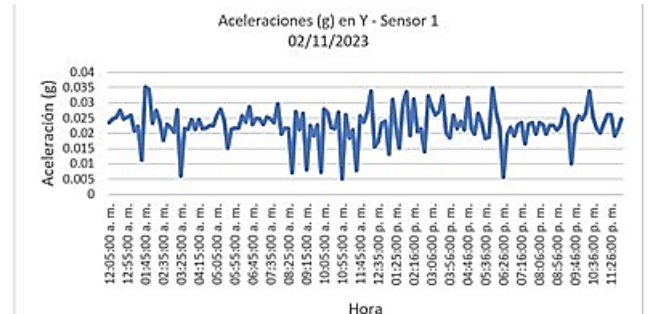


Figura 29. Aceleración máxima 0.034739838 g, hora 05:56:00 p. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

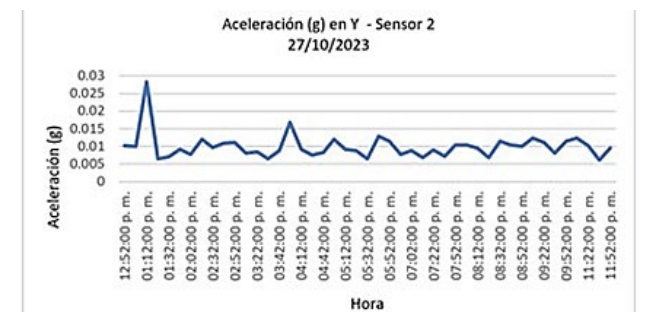


Figura 30. Aceleración máxima 0.028258615 g, hora 01:12:00 p. m. Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

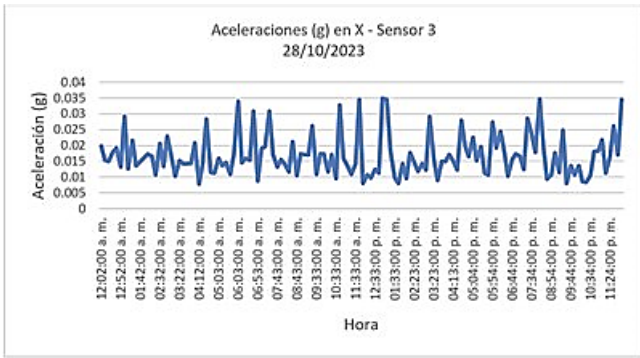


Figura 31. Aceleración máxima 0.034702846 g, hora 08:14:00 p. m.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

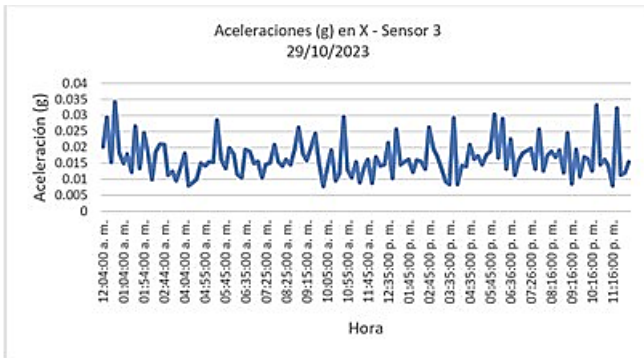


Figura 32. Aceleración máxima 0.034214565, hora 12:44:00 a. m.  
Fuente: Los autores, Microsoft Excel.

El templo se ubica en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla, Méx., donde el tráfico vehicular en horas pico es intenso. Las aceleraciones registradas en los tres sensores, cuyas gráficas se presentan como ejemplo, muestran un rango de variación entre 0.028258615 g y 0.03547226 g, sin olvidar que estos parámetros dependen del tiempo, es decir, de la hora de registro y de la vibración ambiental, lo cual significa que los desplazamientos de la estructura también son muy pequeños y que los registros de los sensores son consistentes.

### 2.3 Levantamiento topográfico del muro de la fachada principal

Se realizó el reconocimiento del inmueble con el apoyo de personal del templo, así como de estudiantes de servicio social, cuyo objetivo fue identificar las zonas de trabajo, los sitios de importancia y los lugares para estacionar los aparatos a utilizar para realizar, exclusivamente, el levantamiento topográfico del muro de la fachada principal, debido a que se observó un ligero desplazamiento, pero se tenía que comprobar a través de mediciones. En un templo, el muro de la fachada, las bóvedas y las cúpulas, entre otros, son macroelementos que trabajan de forma independiente, respecto a toda la estructura cuando es sometida a un sismo, por tanto, existe la posibilidad de que ese muro se haya desplazado al estar desligado.

La Fig. 33 muestra el equipo que se utilizó para realizar el levantamiento del interior de la fachada principal.



Figura 33. Levantamiento topográfico del interior de la fachada.  
Fuente: Fotografía tomada por Morales-González, 2023.



Figura 34. Levantamiento topográfico del exterior de la fachada.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

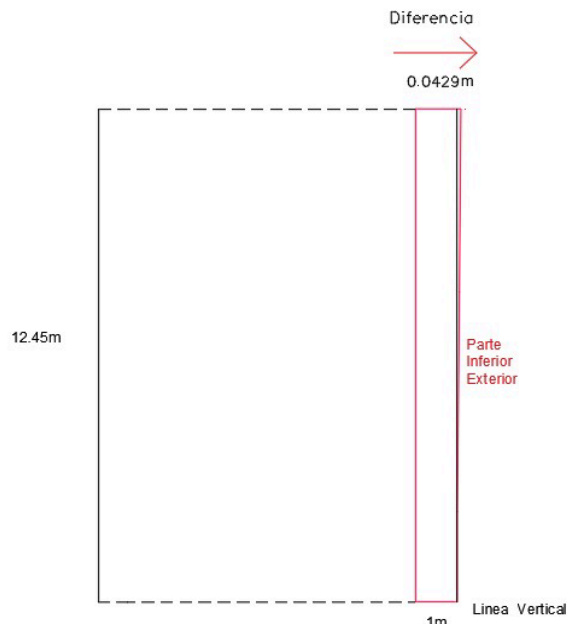


Figura 35. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 12.45 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

El levantamiento de la fachada se realizó con una estación total para recolectar puntos y saber si ésta perdía verticalidad respecto a los ejes X e Y. Los datos se exportaron a Auto CAD versión 2018, donde se modeló un muro totalmente vertical, paralelo a la fachada para comparar el cambio de distancias.

En la Fig. 34 se puede observar que hay líneas verticales dentro de la fachada exterior, esto se debe a que hay cambio de material o textura, lo que ocasionaba que fueran diferentes las coordenadas de referencia.

En la planta baja (acceso), el muro se encuentra desplazado hacia el oriente 0.0429 m, a una altura de 12.45 m, medida a partir del nivel de piso hasta el lecho inferior del entrepiso, tal como se muestra en la Fig. 35.

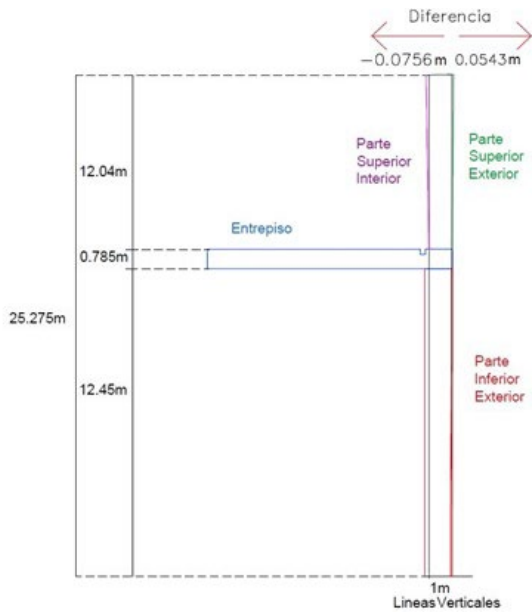


Figura 36. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 25.275 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

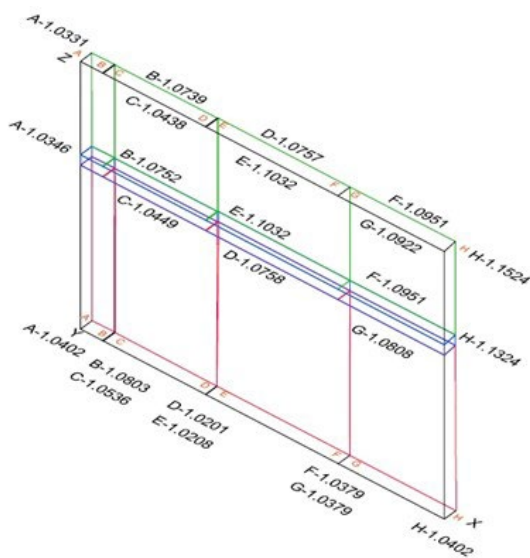


Figura 37. Croquis del desplazamiento de los muros de la fachada exterior con los desplazamientos totales.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

Posteriormente, se ejecutó el levantamiento topográfico del muro del coro medido a partir del entrepiso. El resultado del levantamiento y procesamiento de los datos, mostró que el muro se encuentra desplazado hacia el poniente en 0.0572 m, a una altura de 12.04 m, como se muestra en la Fig. 36.

Los detalles de los desplazamientos totales de la fachada exterior se observan en la Fig. 37 y se pueden consultar en la Tabla 4.

Tabla 4. Variación de coordenadas en el muro de la fachada exterior.

	Planta Inferior – Entrepiso (m)	Entrepiso – Planta Superior (m)	Planta Inferior – Planta Superior (m)
A	-0.0056	-0.0015	-0.0071
B	-0.0051	-0.0013	-0.0064
C	-0.0087	-0.0011	-0.0098
D	0.0557	0.0001	0.0556
E	0.0824	0	0.0824
F	0.0572	0	0.0572
G	0.0429	0.0114	0.0543
H	0.0921	0.02	0.1121

Fuente: Los autores.

Los desplazamientos en el interior de la fachada, del entrepiso al lecho inferior de la bóveda se muestran en la Fig. 38 y en la Tabla 5.

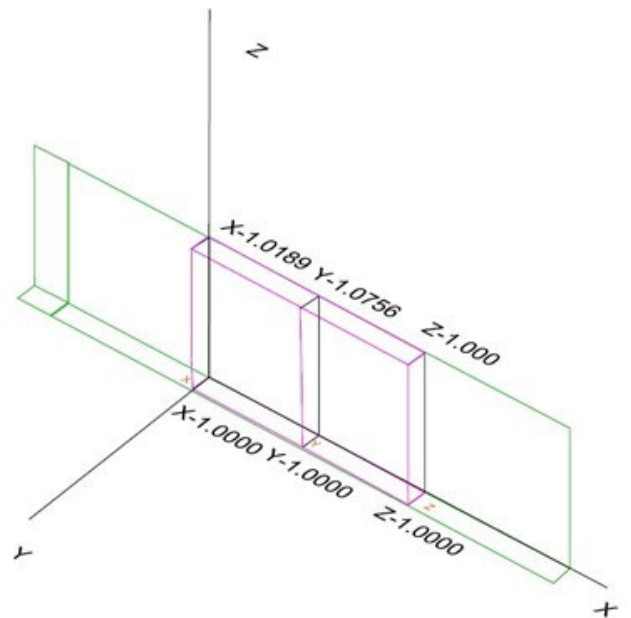


Figura 38. Croquis del desplazamiento del muro de la fachada a una altura de 25.275 m.

Fuente: Los autores, AutoCAD versión 2018.

Tabla 5. Desplazamientos en el interior de la fachada interior del coro.

Entrepiso – Planta Superior (m)
0.0189
0.0756
0

Fuente: Elaborada por Ávila-Cruz, 2023.



## 2.4 Levantamiento fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico sirvió para obtener información detallada del exterior de todo el templo y su geometría mediante el vuelo de un dron que realizó el reconocimiento ortofotográfico.



Figura 39. Calibración y configuración del dron.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

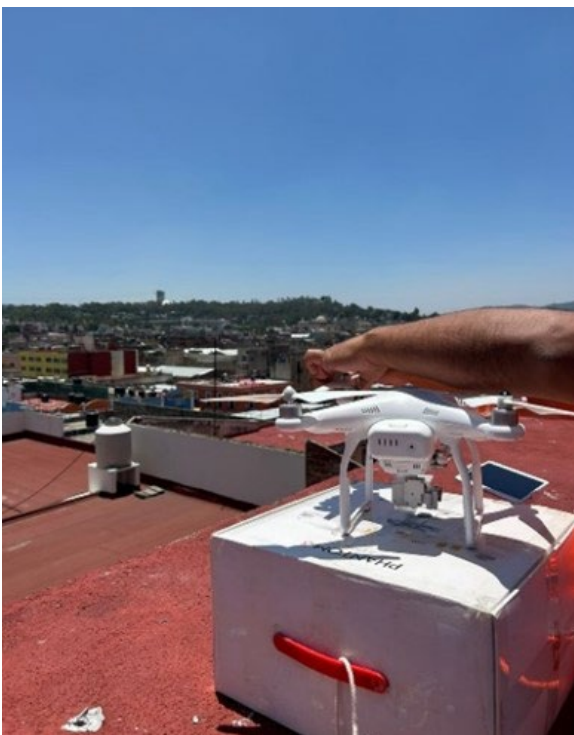


Figura 40. Orientando al dron para volar.  
Fuente: Fotografía tomada por Cárdenas-López, 2023.

El plan de vuelo del dron se hizo en la aplicación pix4d, en la Fig. 39 se ve el dron en el proceso de Calibración y configuración para realizar el reconocimiento, en la Fig. 40 se observa el dron listo para volar. Cuando el dron terminó el vuelo, se bajaron todas las fotos y su procesamiento se realizó el programa Agisoft Metashape, posteriormente se hizo el post proceso de corrección y se georeferenciaron para armar la ortofoto mostrada en la Fig. 41.

### Agisoft Metashape

Processing Report  
30 June 2023



Figura 41. Ortofoto del exterior del templo.  
Fuente: Los autores, Agisoft Metashape.

### Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.  
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
18.4001	12.3316	45.9946	22.1502	51.0503

Table 3. Average camera location error.  
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Figura 42. Ortofoto del exterior del templo.  
Fuente: Los autores, Agisoft Metashape.

La Fig. 42 muestra con detalle el estado físico de la fachada del templo, por ejemplo, desprendimiento de pintura, reparaciones inconclusas, fisuras, principalmente, y los errores de medición de las fotos tomadas por la cámara del dron.

Los estudios realizados en el templo de Nuestra Señora de la Merced son un referente para futuras investigaciones, formando parte del histórico que deberá guardarse en un expediente para futuras intervenciones, con el objetivo de contribuir a su conservación.

Las técnicas que se aplicaron se conocen como “no destructivas” debido a que no se daña físicamente a la estructura.

Los resultados obtenidos muestran que es una edificación con posibilidades de daño sísmico casi nulas, tomando en cuenta que es una edificación de gran peso por el tipo de mampostería utilizada para su construcción y las dimensiones de las secciones transversales de los muros. Pero, después del sismo del 19 de septiembre de 2017, los encargados del templo, tenían la idea de que el muro de la fachada principal se había desplazado, hecho que se corroboró con los resultados de las mediciones topográficas que se realizaron y que mostraron desplazamientos en ese muro.

Se recomienda seguir monitoreando el templo e implementar el uso de nuevas tecnologías para cocer su salud estructural en la línea del tiempo, ya que los materiales se van degradando con el tiempo, la contaminación ambiental de la zona, también influye. Además, de la constante vibración ambiental debida al constante tráfico de vehículos particulares y de carga.

El mantenimiento en tiempo y forma de templo será fundamental para reducir su vulnerabilidad ante eventos sísmicos extraordinarios y conservarlo como parte del Patrimonio Cultural del Estado de Puebla, México, declarado en 1987 por la UNESCO “Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Este trabajo se realizó con fines de investigación académica con el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (convenio 274/2023), y de las autoridades eclesíásticas del templo y personal de apoyo.

## Referencias

- [1] Servicio Geológico Mexicano, Sismología de México, Gobierno de México. [en línea], 2017. Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- [2] Centro Nacional de Prevención de Desastres. El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999, México, D.F., Centro Nacional de Prevención de Desastres. [en línea], 1999, pp. 158-168. Disponible en: <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/178-informetnicoelsismodetehuacandel15dejuliodede1999.PDF>
- [3] Reporte especial: Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23:49 Mw 8.2). [en línea], 2017. Recuperado de [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170907\\_Tehuantepec\\_M82.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf)
- [4] Reporte especial: Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M7.1). [en línea], 2017. México. Disponible en: [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170919\\_Puebla-Morelos\\_M71.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf)
- [5] Núñez, E. Detalla el INAH daños en 241 templos en Puebla tras sismo | e-consulta.com. E-consulta Puebla | Referencia Obligada. 2017. <https://www.e-consulta.com/nota/2017-11-20/ciudad/atlixco-el-municipio-con-mas-danos-en-monumentos-y-templos>
- [6] Carolina. Manual de Procedimientos del Patrimonio Monumental de Puebla para Efectos de Sismo. Scribd. [En línea]. S.f. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/360436591/Manual-de-Procedimientos-Del-Patrimonio-Monumental-de-Puebla-Para-Efectos-de-Sismo>
- [7] Leicht, H., Las calles de Puebla. Editorial: Secretaría de Cultura del Gobierno del Estado de Puebla, Ayuntamiento de Puebla. SIC MÉXICO, Sistema de Información Cultural. Gobierno de México. [En línea]. 2002. ISBN: 968-5122-54-7. [Citado el: 11-11-2021]. Disponible en: [https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=3230](https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=3230)
- [8] La Historia del Templo de la Merced de Puebla. [En línea]. 2020. Disponible en: [https://issuu.com/santuariodenustrasenoradelame/docs/los\\_mercedarios\\_en\\_puebla](https://issuu.com/santuariodenustrasenoradelame/docs/los_mercedarios_en_puebla)
- [9] NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C., [online]. 1997. Available at: <https://www.conservatiotech.com/FEMA-publications/FEMA273-1997.pdf>
- [10] Calderín-Cruz, Y., Hernández-Columbié, D., y Frómata-Salas, Z.P., Influencia de variables medioambientales en la humedad por capilaridad en muros de la iglesia Santa Lucía. Ciencia en su PC, 1(4), [En línea]. pp. 55-63, 2020. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181366194005/html/>
- [11] Rodríguez-Sunico, M., (2005). Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/fichero/Cap%C3%ADTulos%252F2+Conceptos+de+vibraciones.pdf>

**P. Máximo-Romero**, es profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería Estructural, línea de investigación en ingeniería estructural y patrimonio edificado, perfil PRODEP, miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales, miembro del Padrón de Investigadores de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP), asesora de programas Jóvenes Investigadores, Haciendo Ciencia en la BUAP, del programa Delfin. Publicaciones nacionales e internacionales y ponente en congresos nacionales e internacionales. Responsable de proyectos nacionales e internacionales. ORCID:0000-0002-2698-842X.

**R. Ramos-Aguilar**, es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería en el Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ciencias de la Tierra, líneas de investigación en ciencias de la tierra y atmosféricas, miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, registro de evaluadores acreditados CONAHCYT, Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, International Association of Hydrological Sciences, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Programa Delfin, PRODEP. Responsable del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Ponencias y publicaciones nacionales e internacionales, responsable de proyectos nacionales e internacionales. ORCID:0000-0001-5660-6608.

**M. Ávila-Cruz**, es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería, línea de investigación en geodesia. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID:0000-0002-8024-2119.

**V. Galindo-López**, es profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Posgrado en Ingeniería, línea de investigación en Mecánica. Perfil PRODEP. Miembro del Cuerpo Académico 344 Ciencias de la Tierra aplicada a la gestión de desastres naturales. Publicaciones nacionales e internacionales. ORCID:0000-0003-0112-2432.



**J.G.O. Muñoz-Flores**, es egresado del Colegio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Fue becado por el programa "Haciendo Ciencia en la BUAP, 2019" de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado. Actualmente es analista de calidad en Cemex concretos Tren Maya.  
ORCID: 0009-0000-8212-2850.

**L. Cárdenas-López**, es becaria del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.  
ORCID:0009-0006-8762-7683.

**A.E. Morales-González**, es becario del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.  
ORCID:0009-0006-8302-5108.

**A.A. Salas-Xochipa**. Es estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Becario del programa "Haciendo Ciencia en la BUAP primavera 2024".  
ORCID: 0009-0003-7444-8633.



# Evaluation of normalization methods applied to Short-Wavelength Infrared (SWIR) spectroscopy mineral databases from multiple instruments and for vectoring analysis exploration

Juan Camilo Paredes, Yan Carlos Trigos & Camilo Uribe-Mogollon

Eafit University, Medellín, Colombia. [jparedesa@eafit.edu.co](mailto:jparedesa@eafit.edu.co), [ytrigos@eafit.edu.co](mailto:ytrigos@eafit.edu.co), [uribemogollon@gmail.com](mailto:uribemogollon@gmail.com)

Received: March 12<sup>th</sup> 2024. Received in revised from: November 6<sup>th</sup> 2024. Accepted: November 8<sup>th</sup> 2024.

## Abstract

Over the past decade, short-wave infrared (SWIR) spectroscopy has made significant advances in detecting geochemical variations in minerals like white mica, alunite, and chlorite for exploring hydrothermal ore deposits. These variations provide valuable clues, indicating changes in temperature, pH, and fluid oxidation state towards the mineralized center. However, small calibration differences among devices challenge data integration. This study evaluates the 2200 nm Al-OH absorption feature in four white mica SWIR spectroscopy databases collected by TerraSpec™ and OreXpress™ from samples at the Grasshopper porphyry prospect. It evaluates three normalization methodologies: rescaling, mean normalization, and Z-score, yielding p-values for successful data merging of up to 0.75. Findings suggest effective normalization methods across devices, reducing biases from uncalibrated spectrometers. This research offers a methodology to correct SWIR database biases, facilitating accurate data integration across instruments for vectoring analysis.

**Keywords:** Reflectance spectroscopy; SWIR; White mica; database normalization.

# Evaluación de métodos de normalización aplicados a bases de datos minerales de Espectrografía de Infrarrojo Cercano (SWIR) provenientes de múltiples instrumentos y para análisis de vectores de exploración

## Resumen

Durante la última década, la espectroscopía de infrarrojo de onda corta (SWIR) ha experimentado avances significativos en la detección de variaciones geoquímicas en minerales como la mica blanca, la alunita y la clorita para explorar depósitos de minerales hidrotermales. Estas variaciones proporcionan pistas valiosas, indicando cambios en la temperatura, el pH y el estado de oxidación del fluido hacia el centro mineralizado. Sin embargo, las pequeñas diferencias de calibración entre dispositivos representan un desafío para la integración de datos. Este estudio evalúa la característica de absorción del Al-OH a 2200 nm en cuatro bases de datos de espectroscopía SWIR de mica blanca recopiladas por TerraSpec™ y OreXpress™ a partir de muestras en el prospecto de pórfido Grasshopper. Se analizan tres metodologías de normalización: reescalado, normalización de la media y variable centrada reducida, obteniendo valores de p para la fusión exitosa de datos de hasta 0.75. Los hallazgos sugieren métodos de normalización efectivos entre dispositivos, reduciendo sesgos de espectrómetros no calibrados. Esta investigación ofrece una metodología para corregir sesgos de la base de datos SWIR, facilitando la integración precisa de datos entre instrumentos para análisis de vectores.

**Palabras clave:** Espectroscopía de reflectancia; SWIR; Mica blanca; normalización de bases de datos.

## 1 Introduction

The use of shortwave infrared (SWIR) spectroscopy to identify changes in the geochemistry of alteration minerals that can be used as markers for the search for hydrothermal ore deposits has made major strides in the last ten years

[1,2]. SWIR spectroscopy is a technique that collects reflectance spectra in the range of 1300-2500 nm caused by vibrational process of molecular bonds such as OH, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, Al-OH, Mg-OH, and Fe-OH [3]. These bonds have a distinctive absorption feature and are usually present in the structure of alteration minerals including

**How to cite:** Paredes, J.C., Trigos, Y.C., and Uribe-Mogollon, C., (2024). Evaluation of normalization methods applied to Short-Wavelength Infrared (SWIR) spectroscopy mineral databases from multiple instruments and for vectoring analysis exploration. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 56, pp. 47-53. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.113445>

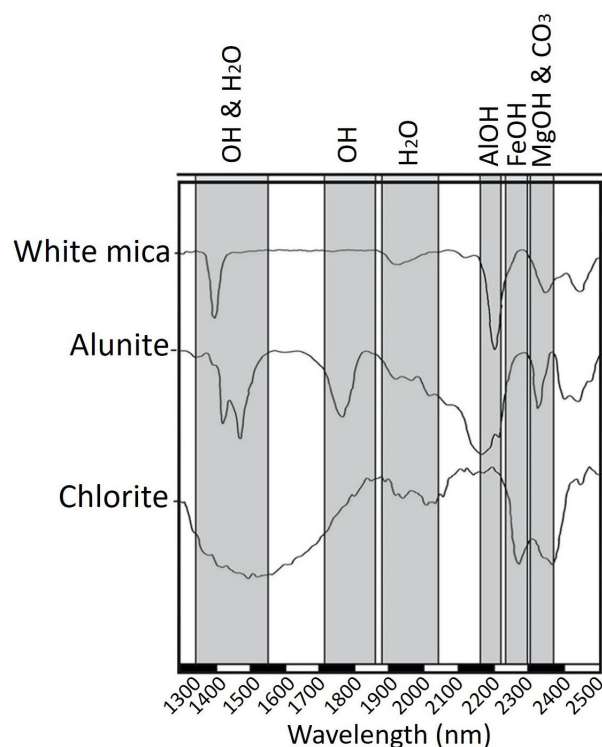


Figure 1. This image presents behavior plots of reflectance spectra for white mica, alunite, and chlorite, corrected using hull quotient. White mica is characterized by a distinctive Al-OH absorption feature at 2200 nm. Alunite exhibits a significant OH and H<sub>2</sub>O absorption feature at 1480 nm. In contrast, chlorite shows distinct dips for the Fe-OH absorption feature at 2250 nm and the Mg-OH feature at 2340 nm. These plots are valuable for identifying and distinguishing these minerals in geological studies.

Source: authors.

phyllosilicates, hydroxylated silicates, sulphates, and carbonates (Fig. 1) [4]. Studies of the variation of the spectral absorption features indicate changes in the mineral chemistry as a function of physicochemical conditions under which they were formed [5].

In the context of porphyry deposits, the study of the spectral variations in hydrothermal minerals such as white mica, alunite, and chlorite has provided relevant vectoring information towards the mineralized center produced by changes in temperature, pH, and/or oxidation state of the fluids [6-8]. For example, at the Copper Cliff porphyry Cu deposit in Montana, the wavelength position of the Al-OH spectral absorption feature at ~2200 nm in white micas proved effectiveness in the identification of two distinct phyllic alteration events: 1) an early green-colored expression associated with Fe-bearing micas and high grades of hypogene copper mineralization characterized by longer Al-OH absorption wavelengths (2206-2210 nm) at the deposit center, and 2) a later barren expression characterized by Fe-poor bearing white-colored micas and shorter Al-OH absorption wavelengths (2197-2206 nm). The difference in the location of the white mica Al-OH absorption feature between both phyllic alteration styles is principally controlled by chemical variations in the octahedral site within the white mica structure and attributed to redox changes in the system, where the early event was formed by oxidized

magmatic fluids and the latest by more reduced fluids [8].

Likewise, for alunite the wavelength position of the OH absorption feature at ~1480 nm has reported systematic trends in the range of 1478-1482 nm, with the longest wavelengths towards the intrusive center at the Lepanto lithocap in Philippines [6]. This increase in the wavelength position of the OH absorption feature in alunite is associated with a higher content of Na and lower K, following the Na/(Na+K) relationship which is related to a higher formation temperature (Chang et al., 2011). For chlorite, the Fe-OH absorption feature around 2250 nm and the Mg-OH located near 2340 nm showed systematic decreases from 2254 nm to 2249 nm and from 2343 nm to 2332 nm towards the center of the Batu Hijau Cu-Au porphyry system in Indonesia. The shifts in the wavelength position of the Fe-OH and Mg-OH absorption features correlate with variations in the content of Fe<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> in octahedral site of the chlorite and linked to fluid temperature [9].

The successful application of SWIR spectroscopy as a vectoring tool is based on the instrument precision. However, during data collection most exploration projects may use multiple SWIR instruments with different calibration settings. As a result, in cases when no inter-instrument calibration is performed, variability of the value of a spectral feature among SWIR instruments has been identified and the application of data for vector analysis is often difficult [5,10-11]. This issue opens the possibility to develop a methodology to compare, quantify and correct the SWIR databases biases for an accurate integration of data from multiple instruments, which is the focus of the present work.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Study case

To evaluate the different normalization approaches mentioned above, we have selected four SWIR databases taken from the work conducted by Uribe-Mogollon and Maher (2020) [11] at the Grasshopper porphyry prospect in Montana (Fig. 2). The spectral data correspond to white micas from a suite of eighty-five rock samples presenting distinctive phyllic alteration events and collected with two SWIR devices (1) OreXpress™, manufactured by Spectral Evolution, and (2) TerraSpec™ 4 Hi-Res Mineral Spectrometer, manufactured by Analytical Spectral Devices. For ensuring data reproducibility, it was employed in this research a measurement methodology for OreXpress™ and TerraSpec™ devices with a 20-mm probe window, conducting 50 repeat measurements on six samples under identical conditions. Additionally, the remaining samples underwent 10 repeat measurements, contributing to the overall reliability of the study. Detailed information regarding the methodology and context of the samples can be found in the cited source.

The four databases in this study are: 1) OreXpress™ 13MAR2018 (number of samples=85), 2) TerraSpec™ 14FEB2018 (number of samples =35), 3) TerraSpec™ 25FEB2018 (number of samples =85), and 4) TerraSpec™ 13MAR2018 (number of samples =85).

All databases present the same number of samples (85 samples), except for TerraSpec™ 14FEB2018 where only a sub-suite of 35 samples was measured.

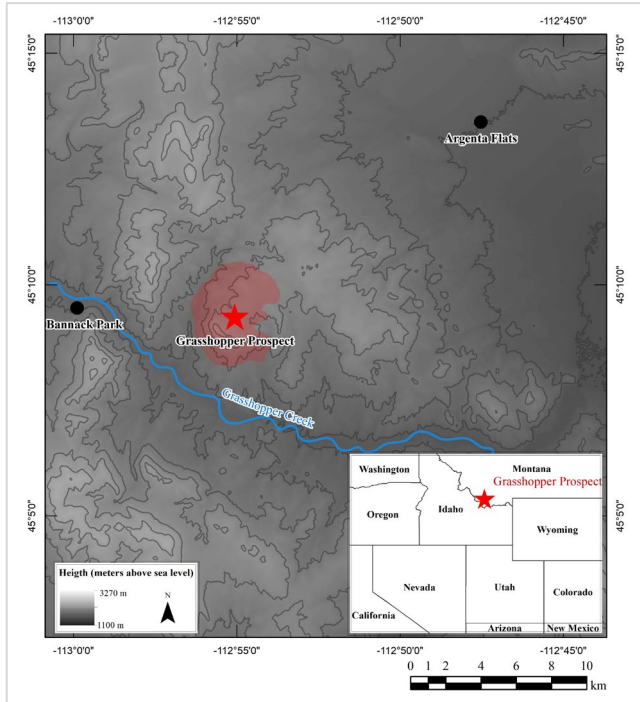


Figure 2. Location of the Grasshopper Porphyry prospect in Montana. In color red is signaled the boundaries of the porphyry. Source: adapted from Uribe-Mogollon and Maher (2020).

## 2.2 Python script: data arrangement, visualization plots and statistical tables

The spectral data of each sample consists of a CSV file containing the reflectance percentage of each wavelength in the range of 1300 to 2500 nm. Since the wavelength position of the white mica Al-OH spectral absorption feature is at ~2200 nm, a Python script was built to extract it in each sample in all databases. This would be the wavelength position where the reflectance percentage is closer to 0%. In addition to the extraction of the spectral feature, the Python script creates frequency tables, histograms, and Kernel density estimation (KDE) plots to visualize the distribution of the data in each database, and a statistical table with parameters such as the mean, median, standard deviations, quantiles, minimum, and maximum values. All the above products are essential to the selection of the database of reference and the normalization method to be applied.

It is noteworthy that KDE is preferred for a better representation of the distribution of the data [13-15], and it is used in this study to compare between the reference database and the normalized databases. The advantage of KDE is that, contrary to histograms, the shape of the data is not lost by the placement of bins, as kernels are centered on each data point. For more information about the KDE calculation and bandwidth selection please refer to Appendix A.

## 2.3 Application of statistical methods

Statistical normalization refers to data transformation processes in which databases on different value ranges are adjusted to one in reference, or changes in the probability of distribution are made to align the databases to one in reference. The following are the statistical normalization methods used in this study.

### 2.3.1 Rescaling normalization

Also known as min-max normalization, this method consists in the range normalization of independent variables, adjusting the minimum and maximum values in a database to one in reference. It is expressed as the eq. (1) [12]:

$$x(normalized) = \frac{(x - y) * (b - a)}{(z - y)} + a, \quad (1)$$

where the value of a data point in the initial database is represented by (x), the mini-mum and maximum values from the reference database are represented by (a) and (b) respectively, and the initial database minimum and maximum value are correspondingly represented by (y) and (z).

### 2.3.2 Mean normalization

The mean normalization method allows the transformation and fit of a database to one in reference by using a conjunction of its means. It is expressed in the eq. (2) [12]:

$$x(normalized) = \mu_R + (X - \mu_i), \quad (2)$$

where the value of a data point in the initial database is represented by (x), the mean value from the reference database is represented by ( $\mu_R$ ), and the initial database mean value is represented by ( $\mu_i$ ).

### 2.3.3 Z-score normalization

Also known as a standard score, this normalization technique allows the standardization of the standard deviation in relation to the mean of the reference database. It is expressed in the eq. (3) [12]:

$$x(normalized) = \mu_R + (X - \mu_i) * \sigma_R / \sigma_i, \quad (3)$$

where the value of a data point in the initial database is represented by (x), the mean value from the reference database is represented by ( $\mu_R$ ), the initial database mean value is represented by ( $\mu_i$ ), and the standard deviation from the reference database and the initial database is represented by ( $\sigma_R$ ) and ( $\sigma_i$ ) respectively.

Table 1.

Descriptive statistics for the SWIR databases from Grasshopper.

Statistical parameter	Terraspec™ 14FEB2018	Terraspec™ 25FEB2018	Terraspec™ 13MAR2018	OreXpress™
Count	35.0	85.0	85.0	85.0
Ave	2202.1	2201.6	2201.5	2203.6
Median	2202.0	2201.0	2201.0	2203.0
Min	2197.0	2194.0	2194.0	2197.0
Max	2207.0	2208.0	2208.0	2210.0
StdDev	2.9	3.9	4.0	3.7
Q1	2199.0	2198.0	2198.0	2200.0
Q3	2205.0	2205.0	2205.0	2207.0

Source: the authors.

### 3 Results

#### 3.1 Descriptive statistics

Table 1 shows the descriptive statistics for each of the SWIR databases from the Grasshopper prospect. TerraSpec™ 25FEB2018 and TerraSpec™ 13MAR2018 present almost identical statistical parameters. However, the average and median values of these are 2 nm lower than OreXpress™. The minimum and maximum values for the TerraSpec™ 25FEB2018 and TerraSpec™ 13MAR2018 are 2194 and 2208 nm respectively, whereas for the OreXpress™ these are 2197 and 2210 nm.

TerraSpec™ 14FEB2018 has an average and median values of 2202 nm, which is 1 nm longer than TerraSpec™ 25FEB2018 and TerraSpec™ 13MAR2018, and 1 nm shorter than OreXpress™. The minimum value for TerraSpec™ 14FEB2018 and OreXpress™ is 2197 nm. However, the maximum value for the TerraSpec™ 14FEB2018 is 2207, which is 3 nm shorter than OreXpress™.

In terms of the standard deviation, it is observed that TerraSpec™ 14FEB2018 has the lowest value (2.9) among all SWIR databases, but it also has the lowest number of samples (n=35). The best standard deviation between the databases presenting equal number of samples (n=85) is found in the OreXpress™ (3.7). Therefore, this has been selected as the database of reference to use in the normalization methods. Fig. 3 shows the histograms of all TerraSpec™ databases plotted against the OreXpress™, and Fig. 4 shows all databases plotted as KDE density functions.

#### 3.2 Normalization methods

Fig. 5 shows each TerraSpec™ database normalized to the reference OreXpress™ database using, (A) rescaling normalization, (B) mean normalization, and (C) z-score normalization. The descriptive statistical parameters of the normalized database are shown in Tables 2, 3, and 4. After the application of the rescaling normalization method, Fig. 5-A and Table 2 present the TerraSpec™ databases with the respectively normalized 2197 nm and 2210 nm minimum and maximum values of the OreXpress™ database. For the mean normalization method, it can be observed in Fig. 5-B and Table 3 that all the TerraSpec™ databases means coincide with the OreXpress™ (2203.6 nm) mean. Finally, Fig. 5-C and Table 4 show the z-score normalization where all TerraSpec™ databases present a standard deviation of 3.7 and a mean value of 2203.6 nm like the OreXpress™ database.

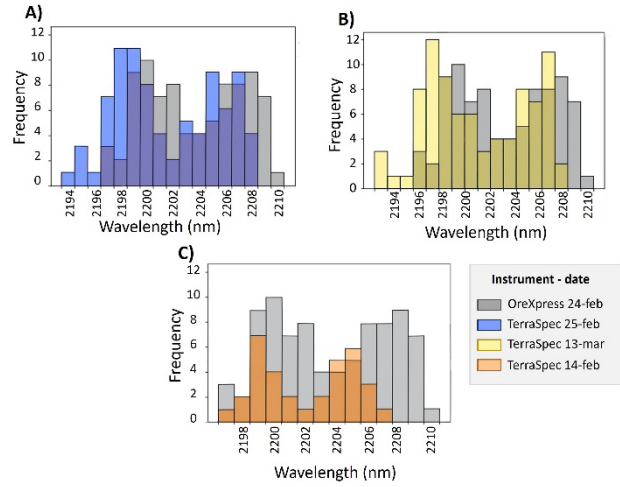


Figure 3. This Figure displays histograms illustrating the minimum wavelength positions for each TerraSpec™ sampling dataset on specific dates, comparing them to the minimums from the OreXpress™ dataset. The Figure contrasts the OreXpress™ database (shown in grey) with three TerraSpec™ datasets: (A) TerraSpec™ 25FEB2018 (depicted in blue), (B) TerraSpec™ 13MAR2018 (in yellow), and (C) TerraSpec™ 14FEB2018 (in orange). Notably, there is a consistent 2 nm difference observed between the two devices.

Source: authors.

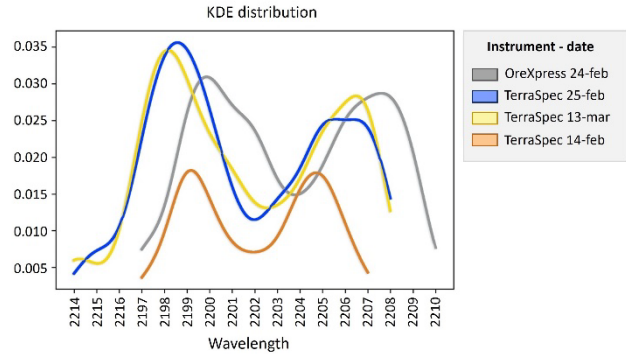


Figure 4. Graph presenting the KDE distribution for each database from the Grasshopper porphyric prospect. In the Figure is compared the OreXpress™ database (grey) against TerraSpec™ 25FEB2018 (blue), TerraSpec™ 13MAR2018 (yellow), and TerraSpec™ 14FEB2018 (orange). It can also be observed the generalized 2 nm discrepancy between both devices.

Source: authors.

#### 3.3 Method viability determination

Results of the K-S two sample test are presented in Table 5 as a comparison between each TerraSpec™ database versus OreXpress™ database. In this table is presented the null and alternative hypothesis validity between each normalization method applied to each sampling date from the TerraSpec™ databases referenced to the OreXpress™ database. The acceptance of these hypotheses is established by the (p) value, which is an equivalence for the maximum difference between the cumulative distributions and the sample size. With the establishment of a 0.05 acceptance value ( $\alpha$ ) (this value is commonly used in the scientific community for this type of test), it is determined that both databases have similar probability of distribution when the (p) value is equal to or larger than  $\alpha$  ( $H_0: p \geq \alpha$ ).



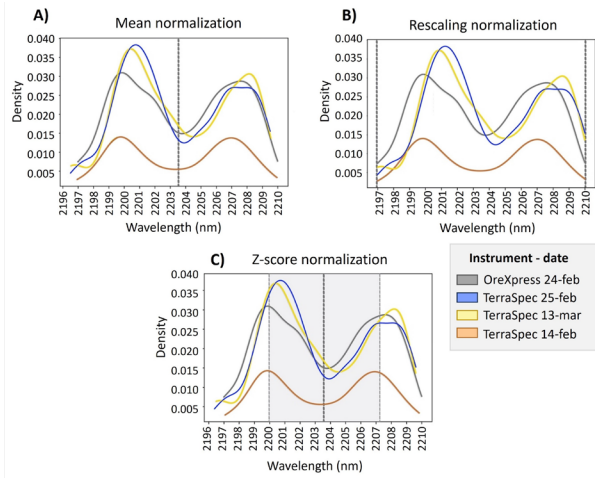


Figure 5. KDE plots of all TerraSpec™ databases from the Grasshopper porphyric prospect normalized to the reference OreXpress™ database by: (A) mean normalization with a dotted line representing the normalized mean value; (B) rescaling normalization with dotted lines representing the minimum and maximum values selected as normalization reference; and (C) z-score normalization with a grey area representing the normalized standard variation value. Source: authors.

Table 2. Statistical parameters after rescaling normalization.

Statistical parameter	Terraspec™ 14FEB2018 rescaling	Terraspec™ 25FEB2018 rescaling	Terraspec™ 13MAR2018 rescaling	OreXpress™ rescaling
Count	35.0	85.0	85.0	85.0
Ave	2203.6	2204.1	2204.0	2203.6
Median	2203.5	2203.5	2203.5	2203.0
Min	2197.0	2197.0	2197.0	2197.0
Max	2210.0	2210.0	2210.0	2210.0
StdDev	3.8	3.6	3.7	3.7
Q1	2199.6	2200.7	2200.7	2200.0
Q3	2207.4	2207.2	2207.2	2207.0

Source: the authors.

Table 3. Statistical parameters after mean normalization.

Statistical parameter	Terraspec™ 14FEB2018 mean norm.	Terraspec™ 25FEB2018 mean norm.	Terraspec™ 13MAR2018 mean norm.	OreXpress™ mean norm.
Count	35.0	85.0	85.0	85.0
Ave	2203.6	2203.6	2203.6	2203.6
Median	2203.5	2203.0	2203.1	2203.0
Min	2197.0	2196.5	2196.6	2197.0
Max	2210.0	2209.5	2209.6	2210.0
StdDev	3.8	3.6	3.7	3.7
Q1	2199.6	2200.2	2200.3	2200.0
Q3	2207.4	2206.7	2206.8	2207.0

Source: the authors.

Table 4. Statistical parameters after z-score normalization.

Statistical parameter	Terraspec™ 14FEB2018 z-score norm.	Terraspec™ 25FEB2018 z-score norm.	Terraspec™ 13MAR2018 z-score norm.	OreXpress™ z-score norm.
Count	35.0	85.0	85.0	85.0
Ave	2203.6	2203.6	2203.6	2203.6
Median	2203.5	2203.0	2203.1	2203.0
Min	2197.1	2196.4	2196.5	2197.0
Max	2209.8	2209.6	2209.6	2210.0
StdDev	3.7	3.7	3.7	3.7
Q1	2199.6	2200.2	2200.2	2200.0
Q3	2207.3	2206.8	2206.8	2207.0

Source: the authors.

Table 5. Comparison between the statistical results from the application of the K-S two simple test to each TerraSpec™ sampling date database versus OreXpress™ database.

P-Value	OreXpress™ vs Terraspec™ 14FEB2018	OreXpress™ vs Terraspec™ 25FEB2018	OreXpress™ vs Terraspec™ 13MAR2018
	Non-normalized data	0.038	0.017
Rescaling norm.	0.705	0.366	0.366
Mean norm.	0.705	0.366	0.477
Z-score norm.	0.705	0.366	0.477

Source: the authors.

The pre-normalization TerraSpec™ 25FEB and 13MAR database dates present (p) values results of 0.017 in the comparison against OreXpress™ database, and for TerraSpec™ 14FEB this result is 0.038 in comparison to OreXpress™ database. After the application of the normalization methods the test presents a (p) value of 0.366 in all the normalization methods for TerraSpec™ 25FEB vs OreXpress™, and in the TerraSpec™ 13MAR for the rescaling method. The z-score and mean normalization methods result in a (p) value of 0.477 in the TerraSpec™ 13MAR compared to the OreXpress™ database. In all the normalization methods the TerraSpec™ 14FEB obtained (p) values of 0.705.

#### 4 Discussion

Fig. 6 presents a graphical summary of the transformation methods in the form of boxplots. In these plots, the general statistical behavior can be observed by looking at the minimum, maximum, median, and mean values (shown as white dots). In Fig. 6-A, it is possible to observe the non-normalized data, where the disparity is evidenced in the mean values. For example, the OreXpress™ database mean deviates from the TerraSpec™ 14FEB database by 1.5 nm, and from the TerraSpec™ 25FEB database by 2.0 nm.

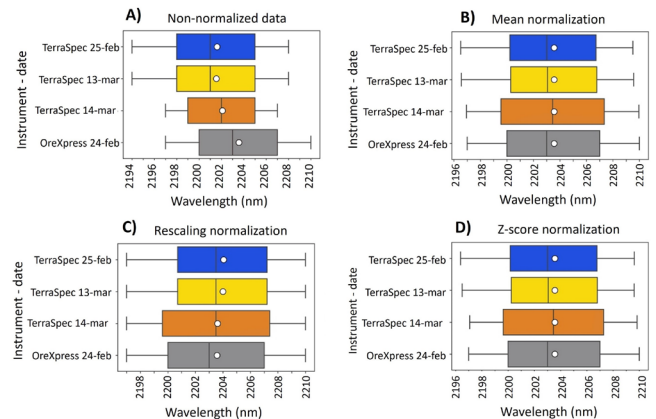


Figure 6. Boxplots from the Grasshopper porphyric prospect presenting: (A) non-normalized data, (B) data after the mean normalization method, (C) data after rescaling normalization method, and (D) data after z-score normalization method. In blue TerraSpec™ 25FEB, yellow TerraSpec™ 13MAR, orange TerraSpec™ 14FEB, and grey OreXpress™. Source: authors.

In Fig. 6-B, it is presented the TerraSpec™ databases transformation by the rescaling normalization method. In this case, we used the OreXpress™ 2197 nm minimum and 2210 nm maximum values as reference. TerraSpec™ 25FEB and TerraSpec™ 13MAR initially had 2194 nm as minimum value and 2208 nm as maximum value. In the same way, for TerraSpec™ 14FEB these values initially were 2197 nm and 2207 nm, respectively. By adjusting the range of the databases with respect to the OreXpress™, it was observed that the mean values of the TerraSpec™ databases changed. The mean value adjustment is approximately 0.5 nm or 67% for the TerraSpec™ 25FEB and TerraSpec™ 13MAR databases in comparison to the OreXpress™ database. For TerraSpec™ 14FEB, the mean value changed from 2201 nm to 2203.6 nm, by extending the maximum value to 2210 nm.

The mean normalization method is shown in Fig. 6-C, where all the TerraSpec™ databases mean values were set to the OreXpress™ database 2203 nm mean value. By transforming the means, it is observed a displacement in the minimum and maximum values. For example, the initial TerraSpec™ 25FEB which had a 2194 nm minimum and a 2208 nm maximum values were converted to 2196.5 and 2209.5 nm, respectively. The positive shift corresponds to ~2 nm of difference between the original and reference mean values. This same shift is observed in the other databases.

The z-score normalization is observed in Fig. 6-D. This method places the OreXpress™ 2203.6 nm mean value and 3.7 nm standard deviation value for reference in all the TerraSpec™ databases. As a consequence, there is an approximate difference of 0.1 nm in the minimum and maximum values for all normalized TerraSpec™ databases. In Fig. 5-C, the darker gray area that goes between 2199.9 and 2207.3 nm represents one standard deviation from the mean value, equivalent to 63% of the TerraSpec™ datapoints.

In general, similar results are observed in the application of the z-score and mean normalization methods. It can be noted a successful data adaptation after the application of the normalization methods, being in general the highest value for improvement for the TerraSpec™ 14FEB2018 and the lowest for the TerraSpec™ 25FEB2018. However, the rescaling normalization method is less reliable as it presents bigger differences in the distribution of the accumulated database values. This is especially visible in the gap at the “tails” in comparison to the mean normalization method (Fig. 7). In addition, the K-S two sample test supports that the mean and z-score normalization methods are the most reliable (Table 5).

Comparing TerraSpec™ 14FEB2018 database results in the Fig. 6 is noticeable how the database gets excessively deformed consequence of application of these normalization methods in a database which its wavelength range of distribution has a large difference in comparison to the base normalization database (in this case TerraSpec™ 14FEB2018 is 23,1% shorter than OreXpress™). Thus, as the method reshapes the database to be contained in the base normalization database it is not recommended the application of the normalization method in this type of databases.

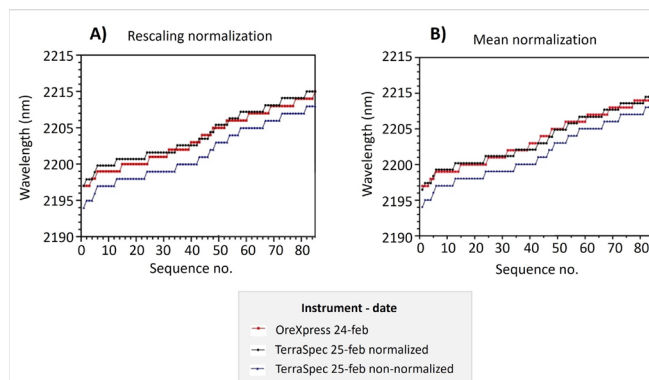


Figure 7. Low-to-high plot of variation comparing the sequence numbers from the wavelength position from the Grashopper porphyric prospect database after: (A) rescaling normalization method, and (B) mean normalization method. Each sample was assigned a sequential number. Source: authors.

## 5 Conclusion

The proposed goal of this research of developing a methodology that allows the normalization of databases from different uncalibrated spectrometers was achieved. It was developed a Python scrip that filters and organizes SWIR databases according to the desired absorption feature range and presents the results in visually convenient figures and tables with common statistical parameters. It was applied and discussed the rescaling normalization method, mean normalization method, and the z-score normalization method. In general, the most reliable methods to normalize are the mean normalization and z-score methods, because these unify the mean value and re-solve efficiently the data deviation as presented in the methods discussion. Having both the highest (p) values in the K-S two sample test and presenting the lowest relative deformation in the wavelength position variation comparison between databases. It is expected that the findings of this work will have a great impact in the mineral exploration industry by allowing better processing of SWIR databases and providing a tool that permits the creation of a normalized and more robust composite that is useful during the interpretation process of SWIR data as vectoring analysis. Future works should focus on the practical application of this methodology, in addition to other absorption features and minerals.

## References

- [1] Cohen, J.F., Compositional variations in hydrothermal white mica and chlorite from wall-rock alteration at the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada, 2011.
- [2] Halley, S., Dilles, J.H., and Tosdal, R.M., Footprints: hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *SEG Discovery*, (100), pp. 1-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2015-100.fea>
- [3] Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., and Vergo, N., High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8), pp. 12653-12680, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1029/JB095iB08p12653>
- [4] Pontual, S., Merry, N., and Gamson, P., Spectral interpretation field manual, G-MEX edition 3. Spectral Analysis guides for mineral exploration. 1997.
- [5] Thompson, A.J., Hauff, P.L., and Robitaille, A.J., Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG*

- Discovery, (39), pp. 1-27, 1999. DOI: <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1999-39.fea>
- [6] Chang, Z., Hedenquist, J.W., White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L., ... & Cuisson, A.L., Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106(8), pp. 1365-1398, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>
- [7] Xiao, B., Chen, H., Hollings, P., Wang, Y., Yang, J., and Wang, F., Element transport and enrichment during propylitic alteration in Paleozoic porphyry Cu mineralization systems: Insights from chlorite chemistry. *Ore Geology Reviews*, 102, pp. 437-448, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.020>
- [8] Uribe-Mogollon, C., and Maher, K., White mica geochemistry of the Copper Cliff porphyry Cu deposit: Insights from a vectoring tool applied to exploration. *Economic Geology*, 113(6), pp. 1269-1295, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4591>
- [9] Neal, L.C., Wilkinson, J.J., Mason, P.J., and Chang, Z., Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, pp. 179-198, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2017.10.019>
- [10] Chang, Z., and Yang, Z., Evaluation of inter-instrument variations among short wavelength infrared (SWIR) devices. *Economic Geology*, 107(7), pp. 1479-1488, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.7.1479>
- [11] Uribe-Mogollon, C., and Maher, K., White mica geochemistry: Discriminating between barren and mineralized porphyry systems. *Economic Geology*, 115(2), pp. 325-354, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4706>
- [12] Silverman, B.W., *Density estimation for statistics and data analysis*. Routledge, New York, 2018, 176 P. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315140919>
- [13] Danese, M., Lazzari, M., Murgante, B., Integrated geological, geomorphological and geostatistical analysis to study macroseismic effects of 1980 Irpinian Earthquake in urban areas (Southern Italy). In: Gervasi, O., Taniar, D., Murgante, B., Laganà, A., Mun, Y., Gavrilova, M.L., (eds), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2009*. ICCSA 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5592. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02454-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02454-2_4)
- [14] Barnett, R.M., and Deutsch, C.V., Multivariate imputation of unequally sampled geological variables. *Mathematical Geosciences*, 47(7), pp. 791-817, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9580-8>
- [15] Tian, X., Kong, Y., Gong, Y., Huang, Y., Wang, S., and Du, G., Dynamic geothermal resource assessment: integrating reservoir simulation and Gaussian Kernel density estimation under geological uncertainties. *Geothermics*, 120(103017), art. 103017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103017>

**J.C. Paredes**, he received the BSc. in Geology in 2022, and a postgraduate degree in Project Management in 2024, both from the Eafit University in Medellín, Colombia. He began his professional career working from 2022 to 2024 with the Calidra Group in mineral exploration and control for calcium mineral deposits. Currently, he is focusing his interests on information interpretation and geological exploration.  
ORCID: 0009-0000-8121-4446

**Y.C. Trigos**, he received the BSc. in Geology in 2022, from the Eafit University in Medellín, Colombia. He began his professional career working with Colas Quebec in Canada in the infrastructure sector, asphalt and quarries quality control.  
ORCID: 0009-0004-1846-8231

**C. Uribe-Mogollon**, is an economic geologist with expertise in mineral geochemistry and hydrothermal alteration for mineral exploration. He earned his Ph.D. in Earth and Environmental Sciences from the New Mexico Institute of Mining and Technology in 2019. His research focused on porphyry vectoring techniques in phyllic-altered rocks, identifying geochemical markers in white micas that serve as indicators of proximity to mineralized ore bodies.  
ORCID: 0009-0004-6036-2529

## Appendix A

### Kernel density estimation method calculation

Kernel is a non-parametric estimation technique which uses a weighting function to produce a continuous setting as a probability density function from a random variable. It produces a function for each datapoint that satisfies eq. (A1-A2):

$$a) \text{ Normalization: } \int_{-\infty}^{\infty} K(u) du = 1; \quad (A1)$$

$$b) \text{ Symmetry: } K(-u) = K(u) \text{ for all values of } u. \quad (A2)$$

The normalization of the kernel (K) parameters allows the construction of the kernel density estimation (KDE) function, and the symmetry is to ensure that the average of the KDE is the same as the original data sample.

With the weighting obtained for each datapoint, it is calculated the density of the probability with the eq. (A3) [12].

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (A3)$$

Where the density distribution ( $\hat{f}$ ) is the final function, the kernel (K) is a window function, the bandwidth (h) is the smoothing parameter of the function, and the number of datapoints (n) is determined by the data sample.

The bandwidth for the KDE selected is 0.5 as it reduces the mean integrated squared error. It was obtained using the rule-of-thumb [12] bandwidth estimator at the OreXpress™ dataset, resulting as an average of the application in the Gaussian-like distribution shapes produced by the dataset division by its mean and choosing the one with the lowest value.

The result is a function that estimates the probability density of the initial variables, allowing smoothing the data and providing the probability shape of each dataset.



# Balance hídrico climático de estaciones meteorológicas Puyo y Aeropuerto Río Amazonas

Ricardo Vinicio Abril-Saltos <sup>a</sup>, Jairo Miguel Maldonado-Eraza <sup>b</sup>, Brigitte Tatyana Pérez-Tuti <sup>b</sup>, Mayerling Kirina Toscano-Guatatoca <sup>b</sup>, Keyla Fernanda Palacios-Guerra <sup>b</sup> & Cesar Bladimir Pérez-Noguera <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador [rvabril@uea.edu.ec](mailto:rvabril@uea.edu.ec)

<sup>b</sup> Profesional independiente, Pastaza, Ecuador. [jaiross23@gmail.com](mailto:jaiross23@gmail.com), [tatyperecita18@gmail.com](mailto:tatyperecita18@gmail.com), [mayerling036@gmail.com](mailto:mayerling036@gmail.com), [keylap1997@gmail.com](mailto:keylap1997@gmail.com), [perezbladimir1996@outlook.es](mailto:perezbladimir1996@outlook.es)

Recibido: 28 junio 2024. Recibido en formato revisado: 8 noviembre 2024. Aceptado: 12 noviembre 2024.

## Resumen

En la Amazonía las variables meteorológicas presentan oscilaciones en las últimas décadas. El presente trabajo tuvo como objetivo conocer el balance hídrico climático de las estaciones meteorológicas Aeropuerto río Amazonas en la parroquia Shell y la estación meteorológica Puyo en la parroquia Veracruz para el período 1981- 2021. Se trabajó con la base de datos 1981-2021 de la estación Río Amazonas y con la base de datos abierta 1981-2019 y registros físicos 2020-2021 de la estación Puyo. Se analizaron las variables temperaturas media, máxima, mínima, humedad relativa media, temperatura de punto de rocío, velocidad del viento y precipitación, comparando sus valores anuales y mensuales y se realizó el balance hídrico climático. Ambas reportaron excedentes de precipitación respecto a la evapotranspiración potencial, la estación Río Amazonas reportó mayores valores de temperatura media, precipitación, temperatura de punto de rocío y velocidad del viento y en Puyo fueron humedad y temperatura mínima. Se concluye que la estación Río Amazonas presenta mayor evapotranspiración potencial que la estación Puyo.

*Palabras clave:* Amazonía; humedad; precipitación; temperatura.

# Climatic water balance of Puyo and Amazon River Airport weather stations

## Abstract

In the amazon, meteorological variables have shown oscillations in recent decades. The objective of this work was to know the climatic water balance of the Amazonas River Airport meteorological stations in the Shell parish and the Puyo meteorological station in the Veracruz parish for the period 1981-2021. We worked with the 1981-2021 database of the Río Amazonas station and with the open database 1981-2019 and physical records 2020-2021 from the Puyo station. The variables average, maximum, minimum temperatures, average relative humidity, dew point temperature, wind speed and precipitation were analyzed, comparing their annual and monthly values and the climatic water balance was carried out. Both reported surpluses of precipitation with respect to potential evapotranspiration, the Río Amazonas station reported higher values of average temperature, precipitation, dew point temperature and wind speed and in Puyo they were humidity and minimum temperature. It is concluded that the Río Amazonas station has greater potential evapotranspiration than the Puyo station.

*Key Words:* Amazon; moisture; rain; temperature.

## 1 Introducción

El cambio climático es un proceso, acelerado por la actividad antrópica, que genera alteraciones en el flujo radiativo. En este contexto, la Amazonía genera preocupación mundial, ya que los cambios de uso del suelo influyen en el balance de radiación y a su vez estos ecosistemas son sensibles al cambio. [1].

Desde el punto de vista climático, Ecuador es un caso especial en Sudamérica, al encontrarse en una región tropical, es afectada por la dinámica de los vientos alisios con la cordillera de Los Andes, teniendo en sus regiones interiores climas tropicales con abundante lluvia y otras casi desérticas por la ausencia de precipitaciones. Por su posición geográfica, se encuentra bajo la influencia de las corrientes de Humboldt y el fenómeno del Niño oscilación sur, el cual en la cuenca

**How to cite:** Abril-Saltos, R.V., Maldonado-Eraza, J.M., Pérez-Tuti, B.T., Toscano-Guatatoca, M.K., Palacios-Guerra, K.F., and Pérez-Noguera, C.B., (2024). Balance hídrico climático de estaciones meteorológicas Puyo y Aeropuerto Río Amazonas. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 56, pp. 54-60. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n56.115191>



amazónica genera una disminución de las precipitaciones. [2]

La evapotranspiración, incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), definida como el poder evaporante del complejo suelo- planta en condiciones edáficas estándar, evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar, Evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>) considerada como la evapotranspiración de cualquier cultivo exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua [3] y la evapotranspiración potencial (ETP) que es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por un terreno cubierto por vegetación cuando la cantidad de agua aplicada al suelo es ilimitada [4].

El balance hídrico climático, emplea los ingresos y salidas de agua por precipitación y evapotranspiración respectivamente [5]. Thornthwaite 1 considera los datos de evapotranspiración potencial, precipitación y agua retenida en el suelo a capacidad de campo [6]

La representatividad de una observación meteorológica como define la Organización Meteorológica Mundial [7] es el grado de exactitud con el que describe el valor de una variable necesaria para una finalidad específica y que en el caso de aplicaciones de pequeña escala o local la dimensión del área que será tomada en cuenta puede ser de 10km o menos. Estudios realizados en Quito, Ecuador, muestran que entre estaciones ubicadas hasta 20 km de distancia se pueden presentar correlaciones de 0,95 en precipitaciones y temperatura media, 0,83 en humedad relativa y 0,9 para heliofania [8]

El presente trabajo tuvo como objetivo conocer el comportamiento de las variables que influyen en la evapotranspiración y balance hídrico climático de las estaciones meteorológicas Shell y Puyo para el período 1981- 2021

## 2 Materiales y métodos

La estación meteorológica Puyo se encuentra ubicada en la parroquia Veracruz del Cantón Pastaza, sus coordenadas latitud sur 1°30'20.61"S, longitud 77°57'30.03"O ubicada a una altura de 959 m.s.n.m. La estación meteorológica del Aeropuerto Río Amazonas con coordenadas latitud 1°30'12.78"S y longitud 78° 4'3.33"O está ubicada a una altura de 1057 m.s.n.m. y con una distancia lineal de 12 km entre ambas estaciones. Su ubicación y área de representatividad se observa en la Fig. 1.

Se utilizó información del periodo 1981 a 2021, de la estación meteorológica Puyo y la estación meteorológica Aeropuerto Río Amazonas. Para la estación meteorológica Puyo, se revisó la base de datos abierta del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del periodo 1981-2019 [9] , los anuarios meteorológicos publicados (INAMHI, 2022) [10] y los registros físicos del año 2020 al 2021. Para la estación meteorología Río Amazonas se utilizó la base de datos del periodo indicado [ 11]. De ambas se recopiló los registros de las variables: temperatura máxima, mínima y media; temperatura del punto de rocío, humedad relativa media, la precipitación mensual y velocidad del viento.

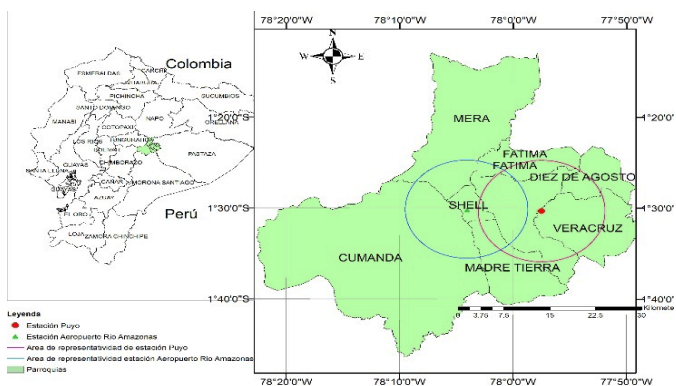


Figura 1. Ubicación y área de representatividad de las estaciones meteorológicas

Fuente: tomado de [9-11]

Se realizó un análisis con el coeficiente de correlación de Pearson que se simboliza con la letra R entre las estaciones y a través del programa TABLE CURVE 2D, se determinó la ecuación para el relleno de datos de pluviometría en la estación Puyo. Se procesó los datos mensuales, expresando los valores promedios anuales para las variables temperatura, humedad, temperatura de punto de rocío, velocidad del viento y para la precipitación se consideró el valor acumulado anual, los datos fueron expresados a través de una dispersión xy con una hoja de cálculo Excel, se determinó la ecuación que mejor presente el mejor ajuste de estos datos en función del coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, considerando los modelos lineal, exponencial, logarítmico, polinómico y potencial, se aplicó un análisis de varianza con prueba T student, con el programa SPSS para determinar si existieron diferencias estadísticamente significativas entre en ambas estaciones.

Se realizó un control de calidad de los datos meteorológicos, identificando picos que sobrepasen ± 3 desviaciones estándar de la media, los cuales fueron descartados de la serie.

Para el cálculo de la ETP se aplicó el método de Thronthwaite [6] en el cual se utilizó la ecuación 1

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (1)$$

Donde:

i= Índice de calor mensual

t= temperatura media mensual en °C

Se obtuvo el índice de calor anual (I) sumando los valores mensuales y con la ecuación 2 se procedió al cálculo de la evapotranspiración potencial:

$$ETP = 16\left[Ka \frac{10t}{I}\right]^a \quad (2)$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial mensual en mm

I= sumatoria del índice de calor

a=Función compleja de I

a= 675 10<sup>-9</sup> I<sup>3</sup> - 771 10<sup>-7</sup> I<sup>2</sup> + 1972 10<sup>-5</sup> I + 0.49239

Ka= Constante que depende de la latitud y el mes del año, se consideró los valores para 0° de latitud, ya que ambas estaciones se encuentran a 1°30 min S

Para obtener el balance hídrico se utilizó el método de Thornthwaite, C. W., y Mather, J. R. (1955) [12], empleando la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación (P). El cálculo de la reserva se determinó con la diferencia entre los valores de la precipitación y la evapotranspiración potencial, considerando lo planteado por [13] donde reporta para la zona suelos con textura franco arenosos y franco arcillosos y [14], quienes indican una capacidad de almacenamiento del suelo de 150mm para suelos franco arenosos y 250 mm para suelos franco arcillosos, se estableció una capacidad máxima de reserva de 200 mm para la zona, e identificando si presentan excedente hídrico (P> ETP) o déficit (P<ETP). Para el cálculo de la escorrentía o drenaje, se estimó para el primer mes el 50% del excedente hídrico y para el resto de meses, el 50% del excedente hídrico del mes más el 50% de la escorrentía del mes anterior.

Se estimó el índice de humedad (Ih) con la Ecuación (3), el índice de escasez con la ecuación 4 y el Índice global de Humedad con la Ecuación 5 [6]

$$Ih = \frac{S}{ETP} \times 100 \quad (3)$$

$$Ia = \frac{D}{ETP} \times 100 \quad (4)$$

$$Im = Ih - 0.6 Ia \quad (5)$$

Donde:

Ih: Índice de humedad

Ia: Índice de escasez

Im: Índice global de humedad

S: Excedentes (mm)

D: Déficit (mm)

ETP: Evapotranspiración potencial (mm)

También se realizó el análisis de variables que influyen en la evapotranspiración como humedad relativa, temperatura del punto de rocío, temperaturas máximas y mínimas diarias, velocidad del viento, describiéndose, su comportamiento con los valores promedios anuales y mensuales.

Los datos faltantes de temperatura de punto de rocío, fueron estimados a través de la ecuación 6 [15] y los de humedad relativa a través de las ecuaciones 7, 8 y 9 [3]

$$Td = \sqrt[8]{\frac{HR}{100}} \cdot [112 + (0,9T)] + (0,1T) - 112 \quad (6)$$

Td: Temperatura de punto de rocío en °C

HR: Humedad relativa

T: Temperatura del aire

$$e_a = e^o(Tmin) = 0.611 \exp \left[ \frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right] \quad (7)$$

$$e^o(T) = 0.618 \exp \left[ \frac{17.27 T}{T + 237.3} \right] \quad (8)$$

$$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} \cdot 100 \quad (9)$$

T: Temperatura media del aire

T min: Temperatura mínima del aire

HR: humedad relativa

e°: Presion de saturacion de vapor

e<sub>a</sub>: Presión real de vapor

### 3 Resultados

La temperatura, (Fig. 2.) muestra que la estación Shell es 0,6°C más caliente que la estación Puyo en el promedio multianual del a temperatura media, en ambas estaciones, se reporta una tendencia de incremento de la temperatura media de 0,5°C en los 41 años del período evaluado, donde los datos reportan que el modelo cubico, obtuvo un mayor valor de coeficiente de determinación R<sup>2</sup> con respecto a los modelos lineal y cuadrático.

Para las temperaturas absolutas máximas, la estación Puyo, no muestra tendencia de incremento, pero la estación Shell presenta una tendencia de incremento de 1.5°C en el período evaluado entre 1981 y 2021. las temperaturas máximas registradas son en la estación de Shell 35.2°C en 2020 y la estación Puyo tuvo en 30.3 °C en 1998, mientras que en la mínima absoluta la estación de Puyo en 1990 reporta un valor de 9.5 y la estación Shell en 2014 un valor de 10°C. Los valores medios mensuales (Fig. 3), muestran para ambas estaciones al mes de octubre como el que reporta mayor temperatura media y máxima, mientras que el mes más frío es julio, y en las temperaturas mínimas los valores más bajos se reportan en el período julio a septiembre.

La humedad relativa (Fig. 4) muestra una tendencia de disminución desde el año 1982 en las estaciones Shell y Puyo, donde se observa que ambas marcan una disminución de aproximadamente un 3% de humedad relativa en el período evaluado, donde se observa mayor humedad relativa en la estación Puyo con un rango entre los 91% la cual ha ido decreciendo proporcionalmente hasta 88%, mientras que en Shell el mismo se encuentra entre los 86 y 78%, mostrando una mayor variabilidad que la estación Puyo. La temperatura de

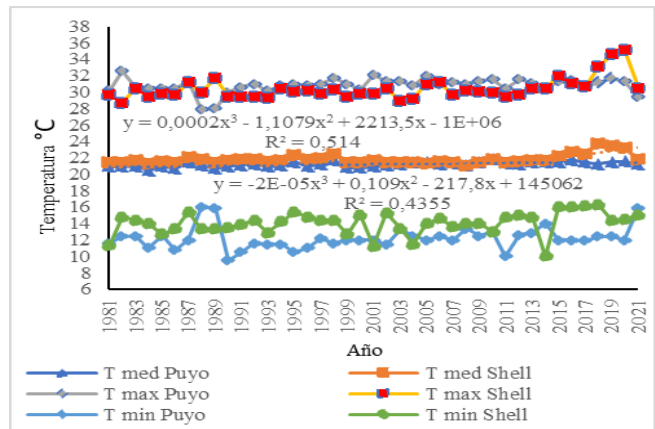


Figura 2. Comportamiento histórico de las temperaturas medias y extremas Fuente: [9-11].

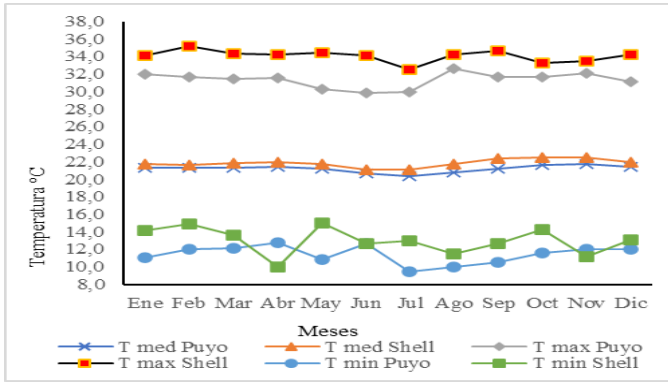


Figura 3. Valores promedio mensuales de temperatura periodo 1981-2021  
Fuente: [9-11]

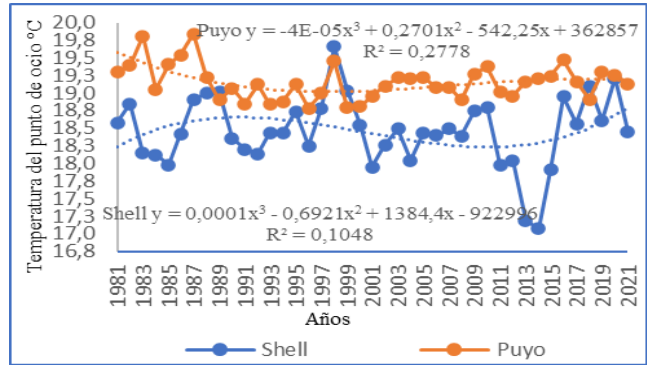


Figura 5. Comportamiento histórico de la temperatura de punto de rocío  
Fuente: [9-11]

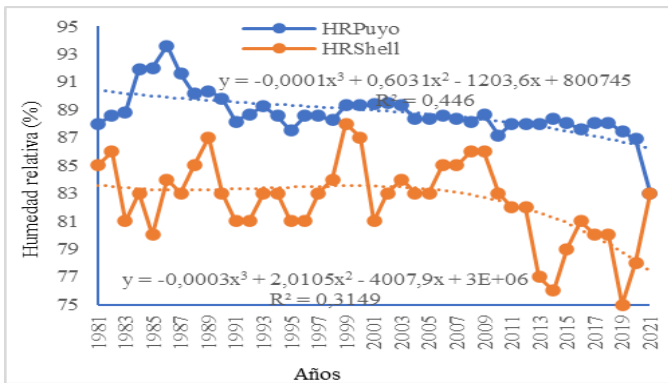


Figura 4. Comportamiento histórico de la humedad relativa  
Fuente: [9-11]

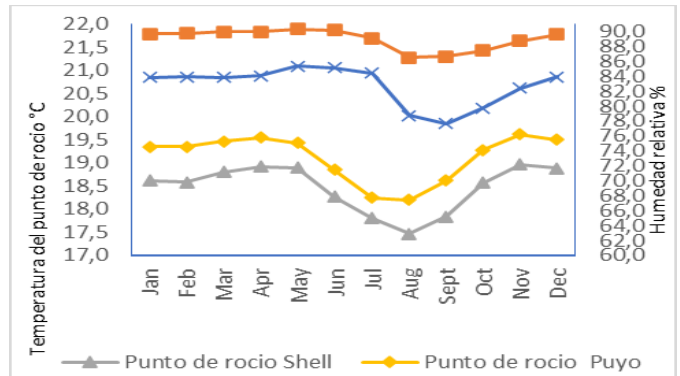


Figura 6. Valores promedio mensual de temperatura de punto de rocío y humedad relativa periodo 1981-2021  
Fuente: [9-11]

punto de rocío en la estación Puyo muestra valores estables en el periodo evaluado, ubicándose alrededor de 19.1 °C, mientras que en la estación meteorológica Shell, presentan una tendencia a disminución de 0,5 °C con temperaturas que han disminuido de 18.7 a 18.2 °C

La humedad relativa, muestra mayor variabilidad, teniéndose en el año 2018 con un valor de 87%, el valor más alto de humedad relativa en la estación de Puyo fue de 94% en 1986 y la estación de Shell tuvo 87% en 1999, además la humedad relativa mínima registrada en la estación de Puyo es 86.7% en 2020 a diferencia de la estación e Shell la cual registro la humedad relativa mínima en 2014 con un 76%.

En el análisis histórico la temperatura de punto de rocío muestra mayores valores en la estación Puyo, teniendo los registros de menor magnitud entre 1988 a 1998, el cual a su vez reporta mayores valores en la estación Shell. (Fig.5), En cuanto a las medias mensuales (Fig.6), en ambas estaciones los períodos más húmedos corresponden en la época de abril a julio, seguidos de la temporada más seca de agosto a octubre.

En la velocidad del viento promedio (Fig. 7), la estación Shell muestra valores superiores, que se encuentran entre 1.5 y 3.5m/s, mientras que en Puyo estos valores se encuentran entre 0.2 y 0.5 m/s ambas presentan una tendencia de incremento en el periodo evaluado. la velocidad de viento máxima registrada en la estación de Shell en 1998 y 1999 tuvo un valor de 7.33 m/s a diferencia de la estación de Puyo que registro un valor de

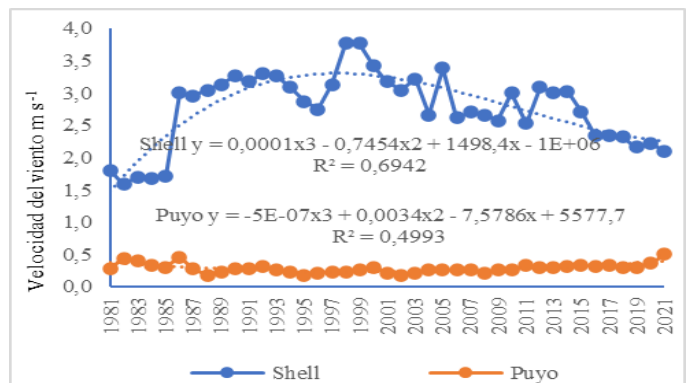


Figura 7. Comportamiento de la velocidad del viento promedio anual  
Fuente: [9-11]

1.90 en 2018, lo referente a velocidad de viento mínimas la estación de Puyo registro 0.18 en los años de 1988,1995 y 2002, y en la estación de Shell la velocidad de viento mínima se registró en 1982 con un valor de 3.08 m/s

Los valores mensuales de la velocidad del viento (Fig 8) en Shell, presentan al periodo entre abril y junio y en Puyo entre mayo y julio como los de menor velocidad, mientras que la mayor velocidad se reporta entre agosto y septiembre en Shell y septiembre a noviembre en Puyo.

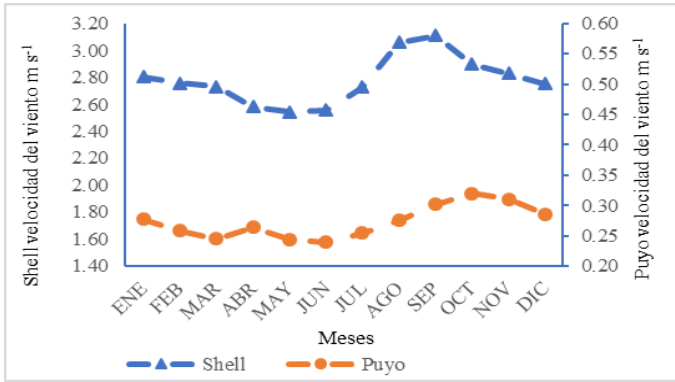


Figura 8. Velocidad del viento, promedios mensuales periodo 1981-2021  
Fuente: [9-11]

Para la precipitación, las estaciones reportaron un coeficiente de correlación de 0.95, teniéndose la ecuación para el relleno de datos faltantes mensuales de la estación Puyo en función de la estación Shell  $x = 205.74 + 0.00088 x^2$ . En la Fig. 9 se muestran las precipitaciones anuales de las estaciones meteorológicas de Shell y Puyo desde el año 1982 – 2020 en las cuales en la estación de meteorológica de Shell la media de la precipitación es de 5600 mm, donde se observa una disminución de los valores en el periodo evaluado, mientras tanto en la estación meteorológica de Puyo se puede observar un incremento en las precipitaciones con una media de 4631 mm al año, la máxima precipitación en la estación

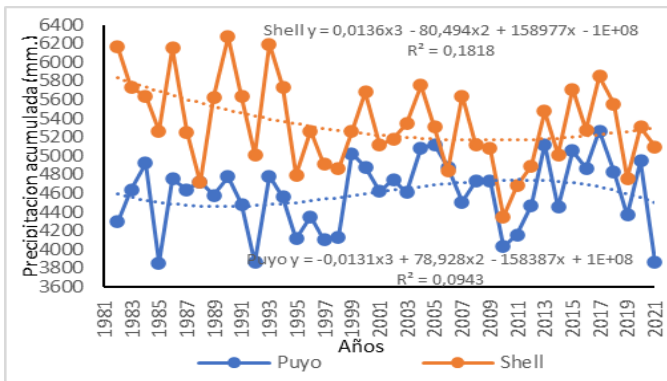


Figura 9 Precipitación anual  
Fuente: [9-11]

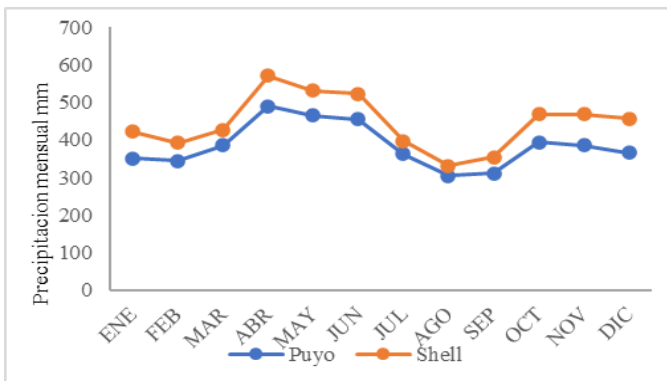


Figura 10 Precipitación promedios mensuales periodo 1981-2021  
Fuente: [9-11]

meteorológica de Shell es de 6270.6 mm en el año de 1990 mientras que en la estación de meteorológica de Puyo la máxima precipitación de 5260.4 mm en el año de 2017 y el registro de las mínimas precipitaciones se da en la estación de Shell 4351.5 mm en el año de 2010 mientras que en la estación de Puyo se registra en el año 1985 con un valor de 3855.5 mm anuales. La Fig. 10 muestran los promedios de precipitación mensual, donde se observa en ambas estaciones como el período de mayor precipitación entre abril a junio, mientras que los meses de menor precipitación están en el período comprendido entre agosto y septiembre.

La precipitación es la única variable que muestra comportamiento diferente en ambas estaciones mientras en Puyo aumenta, en Shell disminuye, presenta en ambas estaciones correlaciones diferentes con la temperatura de Punto de rocío, que en Puyo mantiene una tendencia estable y en Shell presenta una disminución para el período evaluado, por lo cual en esta última estación se requiere que la temperatura disminuya a valores más bajos para alcanzar punto de rocío.

En el balance hídrico climático, ambas estaciones no reportan déficits en el período evaluado (Fig. 11), debido a las altas precipitaciones en las estaciones evaluadas, presentando los excedentes y el gasto/drenaje la misma tendencia que la precipitación donde la estación en la estación Shell se tiene una tendencia a disminución, mientras que en la estación Puyo muestra tendencia de incremento

La Fig. 12, muestra el índice global de humedad, donde la estación Shell, muestra una tendencia a la disminución, mientras que la estación Puyo mantiene sus valores dentro de un rango.

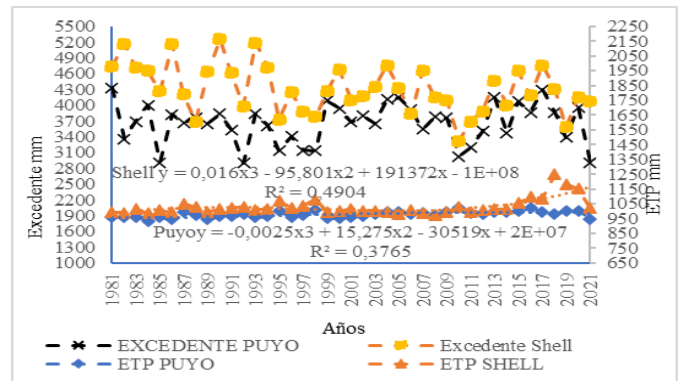


Figura 11 Excedentes y evapotranspiración potencial  
Fuente: [9-11]

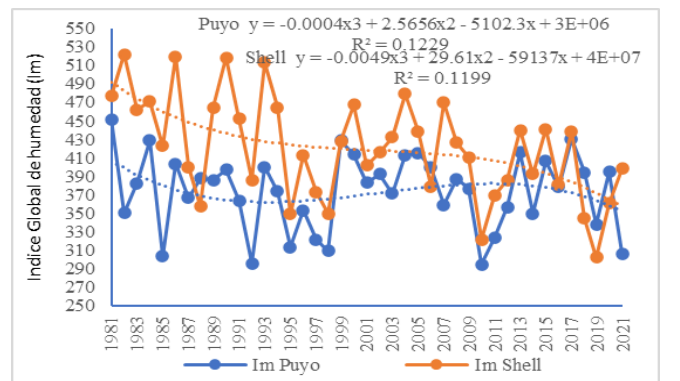


Figura 12 Índice Global de humedad  
Fuente: [9-11]



Los estadísticos de ambas estaciones se reportan en la tabla 1 donde se puede observar que, la estación Shell muestra mayores valores de desviación estándar con respecto a la estación Puyo, teniéndose también que entre ambas estaciones se reportan diferencias significativas para  $p \leq 0.001$  reportando mayores valores en valor medio la estación Shell para temperaturas media y mínima, precipitación y velocidad del viento.

El análisis de correlación de Pearson (Tabla 2), muestra que en las dos estaciones las variables presentan diferentes niveles de correlación, únicamente la correlación negativa de la

temperatura media con la humedad relativa muestra el mismo nivel de significancia (0.01). Se muestran correlaciones al 0.01 en la estación Puyo entre la temperatura del punto de rocío con la temperatura media y al 0.05 con la velocidad del viento. En Shell la temperatura media reporta correlaciones significativas al 0.01 con las temperaturas máxima y mínima de igual forma la temperatura de punto de rocío con a la humedad media, mientras que la temperatura máxima y mínima, reportan una correlación significativa al 0.05.

#### 4 Discusión

[16] plantea para Ecuador un incremento de temperaturas de 0.8 °C para la temperatura media, 1.4 °C en la temperatura máxima absoluta y 1°C en la temperatura mínima

El grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), plantea que entre 1901 al 2005, hubo una tendencia de incremento de la temperatura global de 0.75°C, mientras que en las precipitaciones se prevé un aumento en las regiones ubicadas en el hemisferio norte, y una disminución en las regiones ubicadas hacia el sur, sin embargo a escala local, los modelos climáticos pueden arrojar resultados variados en una misma zona de estudio [2], esta tendencia queda demostrada en el presente trabajo, donde en dos estaciones meteorológicas, situadas a menos de 20Km de distancia, muestran un comportamiento diferente en cuanto a sus tendencias en las precipitaciones.

A diferencia de lo planteado por [17] en estudios realizados en la cuenca del río Jubones, las estaciones Puyo y Shell, no muestran épocas secas, pero concuerdan con este autor al indicar que en épocas húmedas la precipitación incrementa con la altura, donde para el presente caso, la estación Shell, muestra mayores valores de precipitación que la estación Puyo

La evapotranspiración calculada en la Shell se incrementa cada año, aun así no es superior a la precipitación a pesar que esta tienen una tendencia a disminuir, por esta razón la diferencia que existe entre la precipitación y la evapotranspiración es mayor a la reserva que existe en el suelo. En la estación Puyo existe una mayor evapotranspiración, pero también la precipitación supera a estos valores, generando excedentes.

[18] menciona que en los últimos años ha existido una variación de temperatura por lo cual la precipitación en la cuenca del Amazonas ha tenido un gran cambio, en cuanto a la intensidad de lluvia en la época de humedad y prolongadas épocas de sequía, estas últimas anteriormente tenían un periodo de duración de tres meses y medio a cuatro, pero actualmente son más largos, reportándose en los últimos años 2 sequías del siglo y dos inundaciones del siglo, eventos que se evidenciaban una vez cada siglo, mientras que en la actualidad debido al incremento de temperatura estos eventos son más frecuentes y de manera prolongada, esta información corrobora los resultados obtenidos que la precipitación en el puyo en estos últimos años está en aumento a diferencia en la Shell que anteriormente existían grandes precipitaciones y en estos últimos años tiene una tendencia a disminuir.

La estación del Puyo al encontrarse a una altitud de 959 m.s.n.m. la velocidad de viento es mucho menor, debido a que se encuentra en una planicie y alejada de los vientos de la cuenca del río Pastaza, la velocidad máxima del viento

Tabla 1. Estadísticos de las variables evaluadas

	Temperatura media °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Temperatura punto de rocío °C	Humedad relativa %	Precipitación mm	Velocidad del viento m s <sup>-1</sup>
<b>Valor de p</b>	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001	≤0,001
	<b>Puyo</b>						
<b>Media</b>	21,2 b	31,1 a	11,9 b	19,1 a	88,9 a	4631,9b	0,27b
<b>Desv. Est.</b>	0,31	0,62	0,92	0,23	1,40	354,99	0,06
	<b>Shell</b>						
<b>Media</b>	21,8 a	30,4 b	14,1 a	18,5 b	82,6 b	5345,8 a	2,8 a
<b>Desv. Est.</b>	0,60	1,36	1,33	0,48	2,65	460,67	0,55

Fuente: [9-11]

Tabla 2. Análisis de correlación

	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura punto de rocío	Humedad relativa	Precipitación	Velocidad del viento	
<b>Puyo</b>	T. media	0,259	0,293	0,526**	-0,671**	-0,007	0,013
	T. máxima		0,273	0,183	-0,213	-0,115	-0,308
	T. mínima			0,127	-0,251	0,098	-0,012
	T. rocío				0,245	0,001	0,328*
	H. relativa Precip.					0,035	0,216 0,247
<b>Shell</b>	T. media	0,766**	0,424**	0,095	-0,449**	-0,187	-0,188
	T. máxima		0,329*	0,055	-0,291	-0,163	-0,237
	T. mínima			0,053	-0,041	0,026	-0,221
	T. rocío				0,548**	-0,012	0,065
	H. relativa Precip.					0,097	0,193 -0,157

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Fuente: [9,10,11]

promedio máxima registrada es de 1,9m/s, mientras que la estación meteorológica ubicada en Shell se acentúa en una meseta que se ve influenciada por las corrientes de aire producidas por el río Pastaza por esta razón la velocidad promedio máxima registrada en esta estación es de 7.33m/s.

La región también es influenciada por el fenómeno del niño oscilación sur (ENOS), el cual ha presentado eventos en forma moderada en los años 1986-1987; 1994-1995; 2002-2003. Y en forma fuerte en los años: 1972-1973; 1982-1983; 1991-1992 y 1997-1998 [19]. En la región amazónica las precipitaciones disminuyeron ante la presencia del fenómeno, pero las lluvias se presentaron con mayor intensidad [20] e incluso en otras regiones de la amazonía, pueden llegar a presentarse periodos de sequía [21]. Esto coincide con los resultados presentados en este trabajo en los periodos 91 92 y 97, 98 donde a pesar de presentarse el fenómeno del Niño, en las estaciones Shell y Puyo, se presenta una disminución de las precipitaciones

## 5 Conclusiones

En las variables de temperatura, media y extremas en los promedios anuales, ambas estaciones presentan una tendencia de incremento de 0,5 °C para el período evaluado, lo cual influye también sobre la temperatura del punto de rocío en Puyo y la humedad relativa en ambas estaciones.

La precipitación en sus valores acumulados anuales, muestra un comportamiento diferente en ambas estaciones, lo cual principalmente se debe a los cambios en la tendencia de la temperatura del punto de rocío.

Los parámetros velocidad del viento y heliofanía muestran variabilidad además de una tendencia de incremento en ambas estaciones.

La estación meteorológica de Shell, presenta una mayor tasa de evapotranspiración potencial ETP con respecto al Puyo, manteniéndose un paralelismo entre ellas y ambas muestran una tendencia de incremento, y a su vez ambas estaciones no se presentan déficits, y que al igual que las precipitaciones en el periodo evaluado, presentan un comportamiento inverso de Shell con respecto a Puyo.

## Referencias

- [1] Tiria, L.N., Bonilla, J.S., and Bonilla, C.A., Transformación de las coberturas vegetales y uso del suelo en la llanura amazónica colombiana: el caso de Puerto Leguizamo, Putumayo (Colombia). Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 27(2), pp. 286-300, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.70441>
- [2] García-Garizábal, I., Romero, P., Jiménez, S., and Jordá, L., Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático. DYNA, 84(203), pp. 37-44, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.59600>
- [3] Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M., Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje, 56. 2006.
- [4] Segura, M., y Ortiz, C., Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas- mínimas y altitud Tecnología y Ciencias del Agua 8, pp. 93-108, 2017. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-06>
- [5] Ruiz, O., Arteaga, R., Vázquez, M., Ontiveros, R., and López, R., Balance Hídrico y Clasificación Climática del Estado de Tabasco, México. Universidad y Ciencia, 28(1), pp. 1-14. 2012.
- [6] Méndez, M., Vergara, G., Casagrande, G. y Bongianino, S., Clasificación climática de la región agrícola de la provincia de La Pampa, Argentina, Semiárida, Revista de la Facultad de Agronomía UNL Pam 31(2), pp. 09-20. 2021.

- [7] Organización Meteorológica Mundial (OMM): Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológica (2010 ed.). Génova: OMM 2010.
- [8] Gaona, G., y Quentin, E., Homogeneidad y variabilidad espacial de series meteorológicas del área del proyecto "Ciudad del Conocimiento - Yachay". Avances. 5(2), pp.22-34, 2013. DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.v5i2.138>
- [9] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Catálogo de datos abiertos INAMHI, [Fecha de referencia 21 de julio del 2021] Disponible en: <https://www.datosabiertos.gob.ec/dataset/?q=inamhi>.
- [10] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Anuarios meteorológicos [Fecha de referencia 22 de marzo del 2022] Disponible en: <https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>
- [11] Dirección General de Aviación Civil, Gestión de Meteorología aeronáutica 2022. Datos meteorológicos proporcionados a Ricardo Abril. 2022.
- [12] Thornthwaite, C.W., and Mather, J.R., The Water Balance. Publications in Climatology, 8(1), pp.5-86. 1955:
- [13] Beltrán, A.C., Abril, R.V., y Paredes, E.R., Influencia de la cobertura vegetal en las características hidrológicas del Río Pindo. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 43(4), pp. 13–26, 2022.
- [14] Santillán, E., Dávila, G., De Anda-Sánchez, J., y de Jesús Díaz-Torres, J., Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonos, Veracruz, México. Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 8(3), pp. 104-117, 2013.
- [15] Tejada-Martínez, A., La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Colima, Universidad de Colima, 2018.
- [16] Bustamante, D.P., Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo- Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida 26(2), pp.15-27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.02>
- [17] Matovelle, C., Andreo, B. y Mudarra, M., Análisis de la influencia de la altitud en los eventos de máxima precipitación en una cuenca del Pacífico: tendencias y variabilidad. Información Tecnológica. 32(6), pp. 3-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000600003>
- [18] Chiaretti, D., Cambio climático provoca caos en la Amazonía [Fecha de referencia 22 de marzo del 2015] Disponible en: <https://www.dw.com/es/cambio-climático-provoca-caos-en-la-amazonía/a-1889837>
- [19] Paladines, G.A., Paladines, N.B., Paltán, V.M., Pazmiño V.N., Pedroza W.H., Portilla, P.P., Rivera, C.E., y Acurio F.D., Fenómeno del niño historia y perspectivas. Rev. Fac. Cienc. Méd. Univ. Cuenca. 33(3), pp. 110-115, 2015.
- [20] Hidalgo, M., Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS CienciAmérica 6(2), pp. 32-37, 2017.
- [21] Vázquez-Panduro, I.L., Rejas-Ayuga, J.G., Rotunno-Filho, O.C., and Barbosa, H., Análisis del comportamiento de la precipitación estimada a partir de datos TRMM sobre áreas de intensa deforestación en la Amazonía legal en el periodo 2001-2013. Ciencias Espaciales, 10(1), pp. 216–239, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v10i1.5822>

**R.V. Abril-Saltos**, Dr en Ciencias Agrícolas, Profesor titular Universidad Estatal Amazónica, Investigador Agregado.  
ORCID: 0000-0003-1544-4360

**J.M. Maldonado-Eraza**, MSc. en Sistemas Integrados de Información de la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y la Responsabilidad Social Corporativa. Meteorólogo Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.  
ORCID: 0000-0002-2003-9610

**B.T. Pérez-Tuti**, Ing. Ambiental, Técnico empresa Arca continental  
ORCID: 0000-0002-9383-245X

**M.K. Toscano-Guatoca**, Ing. Ambiental, administradora Centro turístico Gringo Yaku.  
ORCID: 0000-0002-8809-0930

**K.F. Palacios-Guerra**, Ing. Ambiental, Profesional Independiente.  
ORCID: 0009-0006-5825-2894

**C.B. Pérez-Noguera**, Ing. Ambiental, Profesional Independiente.  
ORCID: 0009-0006-5821-5356

## Editorial – Primer Encuentro

Néstor Ricardo Rojas-Reyes

### Clasificación de recursos minerales: caso de estudio sobre un proyecto minero vetiforme de bajo volumen

Luis Hernán Sánchez-Arredondo & Andrés López-Gómez

### Evaluación del contenido de materia orgánica y sus efectos, por registros geofísicos en el ejemplo de pozos petroleros del sector Varadero Oeste, Cuba

Olga Castro-Castiñeira & Ronal Barcala-Alvarez

### 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

### Diagnóstico del estado físico de una edificación religiosa del siglo XVI dañada por sismo

Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Víctor Galindo-López, José G. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustín Salas-Xochipa

### Evaluación de métodos de normalización aplicados a bases de datos minerales de Espectrografía de Infrarrojo Cercano (SWIR) provenientes de múltiples instrumentos y para análisis de vectores de exploración

Juan Camilo Paredes, Yan Carlos Trigos & Camilo Uribe-Mogollon

### Balance hídrico climático de estaciones meteorológicas Puyo y Aeropuerto Río Amazonas

Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Jairo Miguel Maldonado-Eraza, Brigitte Tatyana Pérez-Tuti, Mayerling Kirina Toscano-Guatatoca, Keyla Fernanda Palacios-Guerra & Cesar Bladimir Pérez-Noguera

## Editorial – First Meeting

Néstor Ricardo Rojas-Reyes

### Mineral resource classification: case study of a low volume vetiform mining project

Luis Hernán Sánchez-Arredondo & Andrés López-Gómez

### Organic matter content evaluation and its effects, by well logs. Case study of Western Varadero sector, Cuba

Olga Castro-Castiñeira & Ronal Barcala-Alvarez

### 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

Marcos Enrique Pazo-Arango

### Physical diagnostic of a 16th century religious building damaged by an earthquake

Patricia Máximo-Romero, Rogelio Ramos-Aguilar, Víctor Galindo-López, José G. Muñoz-Flores, Lorena Cárdenas-López, Argenis Eduardo Morales-González & Alan Agustín Salas-Xochipa

### Evaluation of normalization methods applied to Short-Wavelength Infrared (SWIR) spectroscopy mineral databases from multiple instruments and for vectoring analysis exploration

Juan Camilo Paredes, Yan Carlos Trigos & Camilo Uribe-Mogollon

### Climatic water balance of Puyo and Amazon River Airport weather stations

Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Jairo Miguel Maldonado-Eraza, Brigitte Tatyana Pérez-Tuti, Mayerling Kirina Toscano-Guatatoca, Keyla Fernanda Palacios-Guerra & Cesar Bladimir Pérez-Noguera