

**SISMICIDAD E IMPLICACIONES SISMOTECTÓNICAS DE UNA ZONA DEL
CENTRO – ORIENTE DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
(VMM) Y NIDO SÍSMICO DE BUCARAMANGA**

Geól. Carlos Andrés Vergara Espinosa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Geofísica

Director

PhD. Manuel Alberto Flórez Torres

Codirector

PhD. Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga, Colombia

2024

Dedicatoria

Para mis padres, mi hermana y Mafe: su amor y apoyo han sido mi mayor impulso.

Gracias por creer en mí.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mis padres por ser mis pilares y por impulsarme a ser la persona que soy hoy. A Lalis, gracias por ser un ejemplo de disciplina y constancia que siempre he admirado y seguido, siempre me demuestras que vale la pena luchar por tus sueños. A mi novia, por su apoyo constante durante todo el proceso. A mis directores, Manuel Flórez y Elkin Salcedo, les expreso mi más sincero agradecimiento por su invaluable orientación, dedicación y ayuda en cada etapa de esta investigación. Y a mis colegas Daniel, Diego y Sergio simplemente gracias por su invaluable amistad.

Asimismo, agradezco al Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación (GIRG) de la escuela de Física por el acompañamiento durante la investigación. Este trabajo recibió el apoyo del proyecto 1216877806350 titulado “Modelo sismotectónico de la región centro oriente del Valle Medio del Magdalena como insumo al conocimiento de los modelos de exploración y desarrollo de campos de hidrocarburos”, financiado a través del acuerdo 785-2019 entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos, MINCIENCIAS y el Fondo Francisco José de Caldas.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Zona de Estudio.....	14
1.1. Cuenca del Valle Medio del Magdalena.....	15
1.2. Nido Sísmico de Bucaramanga.....	17
2. Datos Sísmicos	19
2.1. Estaciones sismológicas.....	19
2.2. Catálogos de sismicidad.....	21
2.3. Catálogo de formas de onda.....	24
3. Identificación de Fases Sísmicas	25
3.1. Ondas corporales.....	25
3.2. Identificación automática de fases sísmicas	26
3.2.1. Introducción a PhaseNet.....	27
3.2.2. Aplicación de PhaseNet a los datos de estudio.....	29
4. Relocalización Relativa de Sismos.....	31
4.1. Introducción a GrowClust.....	32
4.2. Aplicación de GrowClust a los datos de estudio	35
4.2.1. Datos de entrada	35
4.2.2. Datos de salida.....	39
5. Sismicidad y Sismotectónica de la Zona de Estudio	42
5.1. Geometría de la Placa de Nazca.....	42
5.2. Ley Gutenberg – Richter.....	50

5.2.1.	Parámetros de sismicidad	50
5.2.2.	Aplicación a los datos de estudio	51
6.	Discusión	60
7.	Conclusiones	62
8.	Datos y Recursos	64
	Referencias Bibliográficas.....	65
	Apéndices	70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de las estaciones sismológicas utilizadas en el trabajo de investigación</i>	20
Tabla 2. <i>Esquema de compilación de correlaciones cruzadas de entrada a GrowClust</i>	38
Tabla 3. <i>Modelo de velocidad 1D para la zona de estudio</i>	38
Tabla 4. <i>Sumario de relocalización de eventos con GrowClust para los datos de estudio</i>	40
Tabla 5. <i>Resumen de número de clústeres asociados a cantidad de eventos</i>	41
Tabla 6. <i>Resumen de inclinaciones de la placa de Nazca por corte</i>	46
Tabla 7. <i>Síntesis de los parámetros de sismicidad (ley GR) por cluster</i>	52
Tabla 8. <i>Síntesis de los parámetros de sismicidad (ley GR) de sismos someros y profundos</i>	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa de localización de la zona de estudio abarcando la cuenca VMM y el NSB</i>	14
Figura 2. <i>Mapa de Colombia con sus principales dominios tectónicos</i>	16
Figura 3. <i>Gráfica de incremento de estaciones sismológicas cercanas a la zona de estudio</i>	21
Figura 4. <i>Gráficas históricas de error en catálogos del SGC vs número de estaciones</i>	22
Figura 5. <i>Histograma de eventos del catálogo unificado final según fuente de información</i>	23
Figura 6. <i>Componentes crudos ZNE de un sismograma de la zona de estudio</i>	25
Figura 7. <i>Detección de tiempo de arribo de ondas P y S en un sismograma</i>	26
Figura 8. <i>Distribuciones de probabilidad de tiempo de arribo de fases sísmicas</i>	28
Figura 9. <i>Histograma de detección de arribos por estación y tipo de onda</i>	29
Figura 10. <i>Gráfica de phase score promedio por estación y tipo de onda</i>	30
Figura 11. <i>Histograma de phase score por tipo de onda para los datos de la zona de estudio</i> ...	31
Figura 12. <i>Proceso de relocalización de eventos sísmicos con GrowClust</i>	34
Figura 13. <i>Comparación de correlaciones cruzadas para datos de la zona de estudio</i>	37
Figura 14. <i>Análisis estadístico de métricas de relocalización GrowClust</i>	39
Figura 15. <i>Evolución del mapeo de eventos en cada fase del proyecto de investigación</i>	41
Figura 16. <i>Contornos de profundidad de la placa de Nazca vs catálogo de sismicidad</i>	43
Figura 17. <i>Mapa de líneas de corte en el polígono de estudio</i>	44
Figura 18. <i>Perfiles de profundidad en el polígono de estudio</i>	45
Figura 19. <i>Comparación de eventos no relocalizados y relocalizados en el NSB</i>	47
Figura 20. <i>Ajuste de opacidad para la identificación de zonas de máxima ocurrencia</i>	48
Figura 21. <i>Definición de clústeres profundos en base a relocalización de hipocentros</i>	49

Figura 22. <i>Definición de clústeres finales en base a localización y sismicidad</i>	53
Figura 23. <i>Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 1F</i>	54
Figura 24. <i>Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 2F</i>	55
Figura 25. <i>Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 3F</i>	56
Figura 26. <i>Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 4F</i>	57
Figura 27. <i>Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad de sismos someros</i>	58

Lista de Abreviaturas

CMT: Centroid Moment Tensor

FEM: Finite element model

FFT: Fast Fourier Transform

ISC: International Seismological Centre

LBS: Catálogo Línea Base de Sismicidad

Ley GR: Ley Gutenberg – Richter

M0: Magnitud de momento

MAXC: Máxima curvatura

Mb: Magnitud de onda corporal (body wave)

Mc: Magnitud de completitud

Ml: Magnitud local

NCEDC: Northern California Earthquake Data Center Catalog

NSB: Nido Sísmico de Bucaramanga

qndiffP: Tiempo diferencial de onda P

qndiffS: Tiempo diferencial de onda S

RSNC: Red Sismológica Nacional de Colombia

SGC: Servicio Geológico Colombiano

VMM: Valle Medio del Magdalena

Vp: Velocidad de onda P

Vs: Velocidad de onda S

XCOR: Correlación cruzada

Resumen

Título: Sismicidad e Implicaciones Sismotectónicas de una Zona del Centro – Oriente de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) y Nido Sísmico de Bucaramanga *

Autor: Carlos Andrés Vergara Espinosa **

Palabras Clave: Sismicidad, Sismotectónica, Aprendizaje Profundo, Relocalización, Ley Gutenberg – Richter, Cuenca del Valle Medio del Magdalena, Nido Sísmico de Bucaramanga

La cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) y el Nido Sísmico de Bucaramanga (NSB) son áreas de gran interés sismológico debido a su importancia en la comprensión de la sismicidad y la sismotectónica en el extremo noroccidental de Sudamérica. Este trabajo de investigación presenta un análisis sismológico de estas zonas combinando algoritmos y herramientas de programación. Se emplearon técnicas de aprendizaje profundo, como PhaseNet y GrowClust, para la detección automatizada de fases sísmicas y la relocalización relativa de sismos, respectivamente. Estas técnicas permitieron mejorar la resolución espacial de la distribución de eventos sísmicos profundos en la región del VMM y el NSB.

Además, se llevó a cabo un análisis de la distribución espacial de la sismicidad mediante mapas de planta, perfiles e imágenes 3D, lo que ayudó a agrupar tendencias de hipocentros y a entender la geometría de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Se aplicó la ley Gutenberg-Richter haciendo uso de ZMAP en Matlab para clasificar los eventos sísmicos en base a parámetros de sismicidad, identificando cuatro clústeres de sismos profundos en la zona de estudio. Se encontraron diferencias significativas en los parámetros de sismicidad entre clústeres, lo que sugiere una variabilidad en la actividad sísmica a lo largo de la región estudiada.

Por último, se propone una geometría para la placa de Nazca en área de interés, considerando un cambio en su rumbo limitado por una línea en dirección W – E. Además, se observa un rompimiento de la placa a 125 km de profundidad, evidenciado por cambios en el ángulo de inclinación, que da origen al NSB. Los hallazgos de este trabajo aportan a una comprensión más completa de la sismotectónica en el extremo noroccidental de Sudamérica y respaldan la necesidad de instalar nuevas estaciones sismológicas en la zona de estudio para obtener información más precisa sobre los eventos sísmicos y el tectonismo regional.

* Trabajo de Grado

** Escuela de Física. Maestría en Geofísica. Director: PhD. Manuel Alberto Flórez Torres. Codirector: PhD. Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Abstract

Title: Seismicity and Sismotectonic Implications of a Zone in the Central-Eastern Area of the Middle Magdalena Valley Basin (VMM) and Bucaramanga Seismic Nest*

Author(s): Carlos Andrés Vergara Espinosa**

Key Words: Seismicity, Seismotectonics, Deep Learning, Relocation, Gutenberg-Richter Law, Middle Magdalena Valley Basin, Bucaramanga Seismic Nest

The Middle Magdalena Valley Basin (MMVB) and the Bucaramanga Seismic Nest (BSN) are areas of great seismological interest due to their importance in understanding seismicity and seismotectonics in the northwestern end of South America. This research presents a seismological analysis of these areas combining algorithms and programming tools. Deep learning techniques, such as PhaseNet and GrowClust, were employed for automated detection of seismic phases and relative relocation of earthquakes, respectively. These techniques improved the spatial resolution of the distribution of deep seismic events in the MMVB and the BSN region.

Furthermore, an analysis of the spatial distribution of seismicity was conducted using maps, sections, and 3D images, aiding in clustering hypocenter trends and understanding the geometry of the Nazca Plate beneath the South American Plate. The Gutenberg-Richter law was applied using ZMAP in Matlab to classify seismic events based on seismicity parameters, identifying four clusters of deep earthquakes in the study area. Significant differences in seismicity parameters between clusters were found, suggesting variability in seismic activity across the studied region.

Finally, a geometry is proposed for the Nazca Plate in the area of interest, considering a change in its direction limited by a line in the W-E direction. Additionally, a plate breakage at a depth of 125 km is observed, evidenced by changes in the inclination angle, giving rise to the BSN. The findings of this work contribute to a more comprehensive understanding of seismotectonics in the northwestern end of South America and support the need to install new seismological stations in the study area to obtain more accurate information about seismic events and regional tectonism.

* Degree Work

** Physics School. Master's in Geophysics. Director: PhD. Manuel Alberto Flórez Torres. Codirector: PhD. Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Introducción

La cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) es de gran importancia en el ámbito sísmológico, ya que proporciona información crucial sobre la geometría de las placas en la región de subducción del extremo noroccidental de Sudamérica. Por otro lado, el Nido Sísmico de Bucaramanga (NSB) destaca como una de las áreas sísmicas más significativas a nivel mundial debido a su muy alta ocurrencia de eventos sísmicos de profundidad intermedia. Comprender la sismicidad y la sismotectónica en estas zonas es esencial para entender la interacción de las placas en la región de subducción de la esquina sudamericana y su influencia en el geodinamismo regional. En este estudio, llevamos a cabo un análisis sísmológico que integra diferentes catálogos sísmicos y herramientas de aprendizaje profundo para aportar al conocimiento del tectonismo de la zona de estudio.

Se emplearon técnicas avanzadas de aprendizaje profundo para la detección automatizada de fases sísmicas a partir de sismogramas registrados en estaciones cercanas al área de estudio, utilizando el algoritmo PhaseNet, el cual se basa en redes neuronales profundas. Asimismo, se implementó el algoritmo GrowClust para efectuar relocalizaciones relativas de sismos mediante un enfoque de clustering jerárquico que aprovecha las diferencias en los tiempos de llegada de las ondas sísmicas para agrupar los eventos y simultáneamente recalculan sus ubicaciones hipocentrales de manera más precisa. Esta técnica resulta especialmente útil para mejorar la resolución espacial de la distribución de los eventos sísmicos y entender mejor su distribución en la cuenca del VMM y el NSB.

Además, se realizó un análisis de ocurrencia de sismos en vistas de planta, perfiles e imágenes 3D para entender su distribución a lo largo de la zona de estudio y, de esta forma, visualizar y proponer una geometría de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana.

Asimismo, se aplicó la ley Gutenberg – Richter para agrupar eventos sísmicos en base a parámetros de sismicidad. Este análisis permitió identificar cuatro grupos distintos de sismos profundos en la cuenca del Valle Medio del Magdalena y el Nido Sísmico de Bucaramanga, analizados mediante la implementación del algoritmo ZMAP en Matlab.

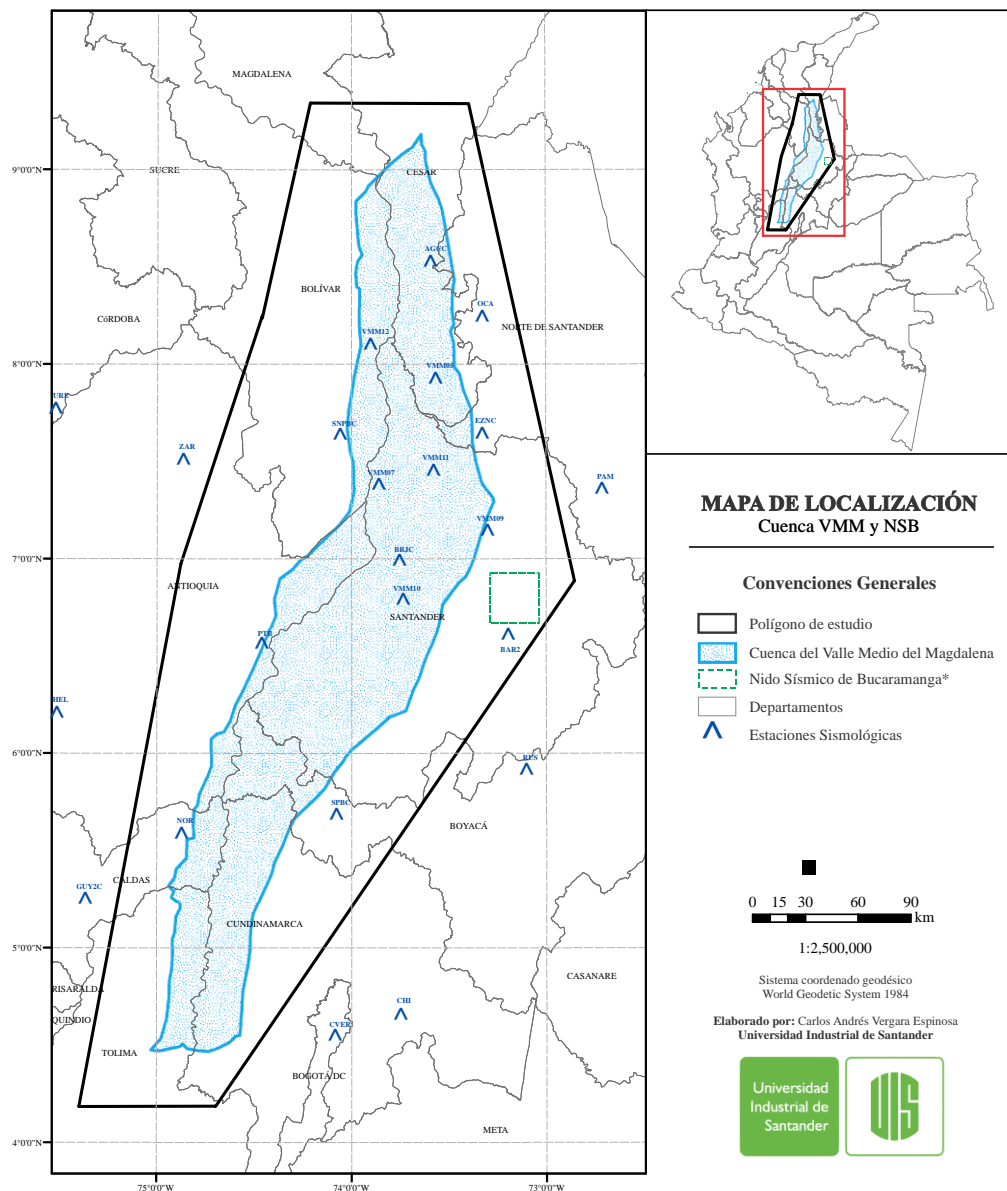
Se espera que los hallazgos de este estudio contribuyan a una comprensión más completa de la sismotectónica en el extremo noroccidental de Sudamérica. Esto, a su vez, respaldaría la necesidad de establecer nuevas estaciones sismológicas en la zona de estudio con el propósito de obtener información cada vez más precisa sobre los eventos sísmicos y el tectonismo de la región.

1. Zona de Estudio

El polígono de estudio definido para el desarrollo de esta investigación agrupa a la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) y un área adicional al oriente hacia la Mesa de Los Santos (Santander) donde se encuentra el Nido Sísmico de Bucaramanga (**Figura 1**).

Figura 1.

Mapa de localización de la zona de estudio abarcando la cuenca VMM y el NSB



1.1. Cuenca del Valle Medio del Magdalena

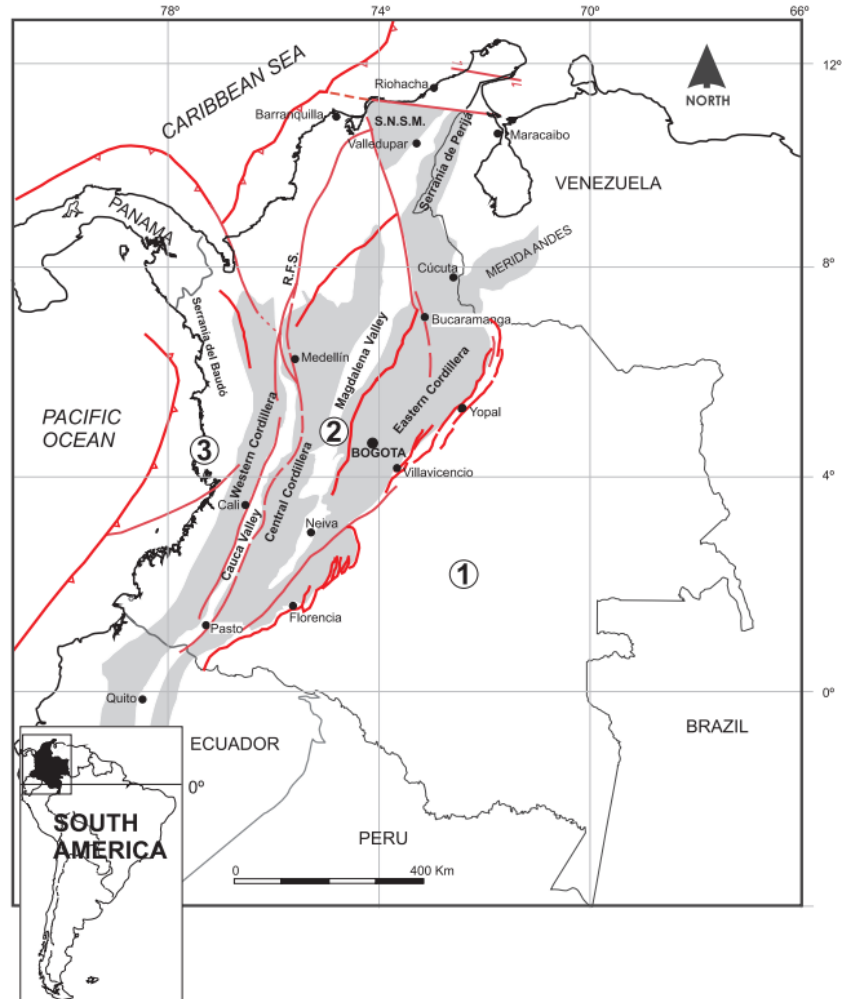
La cuenca del Valle Medio del Magdalena, con una extensión de 32,949 km², se ubica en el centro del valle del Río Magdalena, entre las cordilleras Central y Oriental de los Andes colombianos (**Figura 2**). Aunque es conocida por su importancia en la exploración y producción de hidrocarburos, recientemente ha sido objeto de estudios sismotectónicos y de sismicidad que se centran en los sismos profundos e intermedios de la región (p.e. [Londoño et al., 2010](#); [Chiarabba et al., 2015](#); [Londoño & Romero, 2017](#); [Londoño et al., 2019](#)), los cuales proporcionan información crucial sobre la dinámica del extremo noroccidental de Sudamérica y la configuración de las placas que se subducen bajo la placa continental.

Uno de los estudios más recientes de sismicidad en el VMM corresponde al trabajo de [Londoño et al. \(2019\)](#) quienes calcularon el b-value para toda la cuenca del VMM, obteniendo un valor de 1.02 ± 0.03 y una magnitud de completitud de 1.0 para el periodo comprendido entre 2014 y 2017. Además, mapearon la distribución de 7,073 sismos con el objetivo de determinar la inclinación de la placa Caribe bajo la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Como resultado, propusieron la ruptura de la placa del Caribe en tres segmentos, con un ángulo de inclinación (dip) variando entre 29° y 39°.

Desde el punto de vista de estructuras en superficie, la cuenca del VMM está delimitada al norte por la Falla de Bucaramanga y al sur por la Falla de Cambao. Presenta un basculamiento hacia el oriente con tendencia homoclinal y ocurrencia de pliegues y fallas ([Perez & Valencia, 1977](#) en [Mojica & Franco, 1990](#)). El VMM corresponde a una depresión asimétrica con dos márgenes diferentes. En el lado occidental, hay un borde pasivo con geometría monoclinal, mientras que hacia el este aumenta la deformación debido a esfuerzos compresivos ([Taborda, 1965](#) en [Mojica & Franco, 1990](#); [Martinez et al., 1988](#)).

Figura 2.

Mapa de Colombia con sus principales dominios tectónicos



Nota. 1. Región este. 2. Región central donde se ubica la cuenca del Valle Medio del Magdalena y Nido Sísmico de Bucaramanga. 3. Región oeste. Tomado de [Pardo et al. \(2007\)](#).

La mayoría de las cuencas en Colombia se formaron durante el Triásico Tardío, asociadas al rifting relacionado al rompimiento de Pangea, separando Norte y Sudamérica por el proto-Caribe ([Cooper et al., 1995](#); [Pardo et al., 2007](#)). El Valle Medio del Magdalena ha experimentado eventos tectónicos tanto distensivos como compresivos. Los eventos distensivos, que ocurrieron desde el Triásico Tardío hasta el Cretácico Superior, formaron un graben supracontinental con

subsistencia por tectónica de bloques, permitiendo la acumulación de sedimentos continentales. Durante el Jurásico Medio y el Cretácico Inferior, hubo transgresiones generales y actividad volcánica asociada, evidenciada por presencia de intrusiones, pórfidos e intercalaciones piroclásticas (Fabre, 1983 en Mojica & Franco, 1990).

La fase compresiva, iniciada en el Paleoceno y continuada hasta la actualidad, vio el levantamiento del macizo de Santander – Floresta en el Paleoceno Medio. Las paleo-fallas normales formadas durante los eventos distensivos fueron reactivadas e invertidas durante el Mioceno y Plioceno, sirviendo como planos de debilidad para el cabalgamiento de la Cordillera Oriental hacia el oeste (Fabre, 1983 en Mojica & Franco, 1990).

1.2. Nido Sísmico de Bucaramanga

Un Nido Sísmico se describe como una región con actividad sísmica significativamente mayor que su entorno circundante, siendo comunes en áreas de subducción a profundidades intermedias. El Nido Sísmico de Bucaramanga (NSB) se ubica adyacente al borde oriental de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (ver proyección en superficie del NSB en la **Figura 1**), con magnitudes $M \geq 6.0$. Este nido representa aproximadamente el 60% de la actividad sísmica anual registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) (Chicangana & Vargas, 2008).

Es una de las áreas sismológicas más importantes globalmente debido a la alta frecuencia de eventos sísmicos profundos, concentrados en un volumen relativamente reducido en comparación con otros sismos de características similares (Zarifi et al., 2007). Aunque se han realizado diversos estudios sobre el NSB, persisten muchas incógnitas debido a la complejidad tectónica del extremo noroccidental de Sudamérica.

Prieto et al. (2012) realizan comparaciones entre diferentes nidos sísmicos, como Vrancea, Hindu Kush y Bucaramanga, y sintetizan los análisis previos sobre el tectonismo que influye en el origen del NSB. Entre las diversas teorías presentadas, Cortes & Angelier (2005), Pennington (1983) y Taboada et al. (2000) sugieren que el NSB está exclusivamente relacionado con la subducción de la placa del Caribe, mientras que la influencia de la subducción de la placa de Nazca se limita al sur del nido.

En contraste, van der Hilst & Mann (1994) proponen que el Nido Sísmico de Bucaramanga está únicamente asociado a la placa de Nazca. Chiarabba et al. (2015) llevan a cabo un modelo tridimensional de velocidad en la zona para definir la geometría de la litósfera que subduce bajo los Andes colombianos. Encuentran un "slab tear" en dirección E-W que divide la placa de Nazca en una sección de alta inclinación al sur y un "flat slab" al norte. Concluyen que, en base a la distribución de la sismicidad observada, el NSB se relaciona principalmente con la subducción de la placa de Nazca, mientras que la subducción de la placa del Caribe se localiza al norte del nido.

Por otro lado, Zarifi et al. (2007), utilizando un modelo tridimensional de elementos finitos (FEM), argumentan que la complejidad y el origen del NSB resultan de la colisión de las losas de subducción con diferentes ángulos de inclinación (25° al norte y 50° al sur) del bloque norte de los Andes, lo que implica una interacción entre las placas de Nazca y del Caribe y sugieren que el nido se localiza en la losa norte debido a su inclinación aproximada de 29° .

Debido a los marcados contrastes de velocidad de ondas P (V_p), Chicangana & Vargas (2008) postulan la existencia de un entorno frágil entre los 80 y 160 km de profundidad. Los perfiles focales de terremotos revelan un aumento notable en la actividad sísmica dentro de este rango, lo que sugiere una zona de colisión litosférica. Además, el análisis de tomografía indica un incremento en la velocidad de ondas P (V_p) entre los 100 y 120 km, lo que respalda la hipótesis

de la presencia de un cuerpo rígido sublitosférico asociado a un fragmento litosférico remanente de la antigua placa Farallón.

Referente a análisis de sismicidad del NSB, se han realizado diferentes cálculos de b-value. [Frohlich et al. \(1995\)](#) utilizaron los catálogos ISC (International Seismological Centre), CMT (Global Centroid Moment Tensor) y Schneider (1984), recalcularon las magnitudes de M_0 a M_b , y encontraron un b-value de 2.0 para el periodo entre 1964 y 1994. Por otro lado, [Prieto et al. \(2012\)](#) emplearon los catálogos ISC y RSNC para el periodo de 2000 a 2010, establecieron relaciones lineales entre las magnitudes de ambos catálogos para corregir las magnitudes locales (M_l) y calcularon un b-value de 1.6, coincidiendo con el trabajo de [Frohlich & Nakamura \(2009\)](#).

2. Datos Sísmicos

La obtención y la correcta integración datos sísmicos es fundamental en investigaciones de sismicidad y sismotectónica, ya que determinan la confiabilidad de los resultados. Como base de esta investigación, se emplearon fuentes de información nacionales e internacionales para la recopilación de catálogos de sismicidad y sismogramas registrados en estaciones sismológicas cercanas a la zona de estudio.

2.1. Estaciones sismológicas

En Colombia, el ente regulador de información sísmica es la Red Sismológica Nacional (RSNC), quien se encarga de proporcionar información de los eventos sísmicos ocurridos en el territorio. Al 2023, la red cuenta con más de 175 estaciones sismológicas y acelerográficas instaladas en lugares estratégicos que monitorean la actividad sísmica 24 horas al día y brindan

información como catálogos de sismicidad, formas de onda, mecanismos focales, mapas de intensidad instrumental e información de movimiento fuerte.

La **Figura 1** expone la ubicación de las estaciones sismológicas próximas a la zona de estudio y la **Tabla 1** sintetiza la clasificación de las estaciones cuya información fue usada para el desarrollo de este trabajo de investigación según su tipo de instrumento.

Tabla 1.

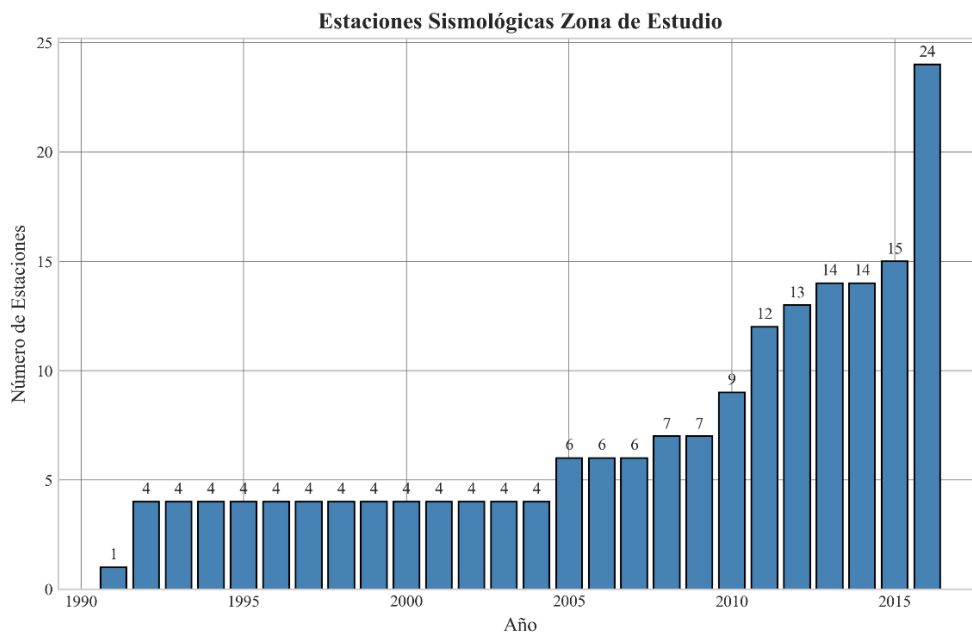
Clasificación de las estaciones sismológicas utilizadas en el trabajo de investigación

Red	Estación	Clasificación por banda de registro			
		Sensor de velocidad de banda ancha	Acelerómetro	Sismómetro de corto periodo	Sismómetro de movim. fuerte
CM	AGCC	x			
CM	BAR2	x	x	x	
CM	BRJC	x	x		
CM	CHI	x		x	
CM	CVER	x	x		
CM	EZNC	x		x	
CM	GUY2C	x	x		
CM	HEL	x		x	
CM	NOR	x	x	x	
CM	OCA	x	x	x	
CM	PAM		x	x	
CM	PTB	x	x		
CM	RUS	x		x	
CM	SNPBC	x		x	
CM	SPBC	x	x		
CM	URE	x	x		x
CM	VMM05	x			
CM	VMM07	x			
CM	VMM09	x			
CM	VMM10	x			
CM	VMM11	x			
CM	VMM12	x			
CM	YPLC	x	x		
CM	ZAR	x			

Al observar la evolución de la instalación de estaciones sismológicas cerca del VMM y NSB, se nota un notable incremento desde 2010, alcanzando su punto máximo en 2016 con un total de 24 estaciones (**Figura 3**). Debido a esto y a las restricciones en la disponibilidad de datos de formas de onda, los análisis de sismicidad se llevaron a cabo para el período entre el 1 de enero de 2016 y el 31 de diciembre de 2021.

Figura 3.

Gráfica de incremento de estaciones sismológicas cercanas a la zona de estudio



Nota. Los códigos de las estaciones utilizadas se encuentran en la **Tabla 1**.

2.2. Catálogos de sismicidad

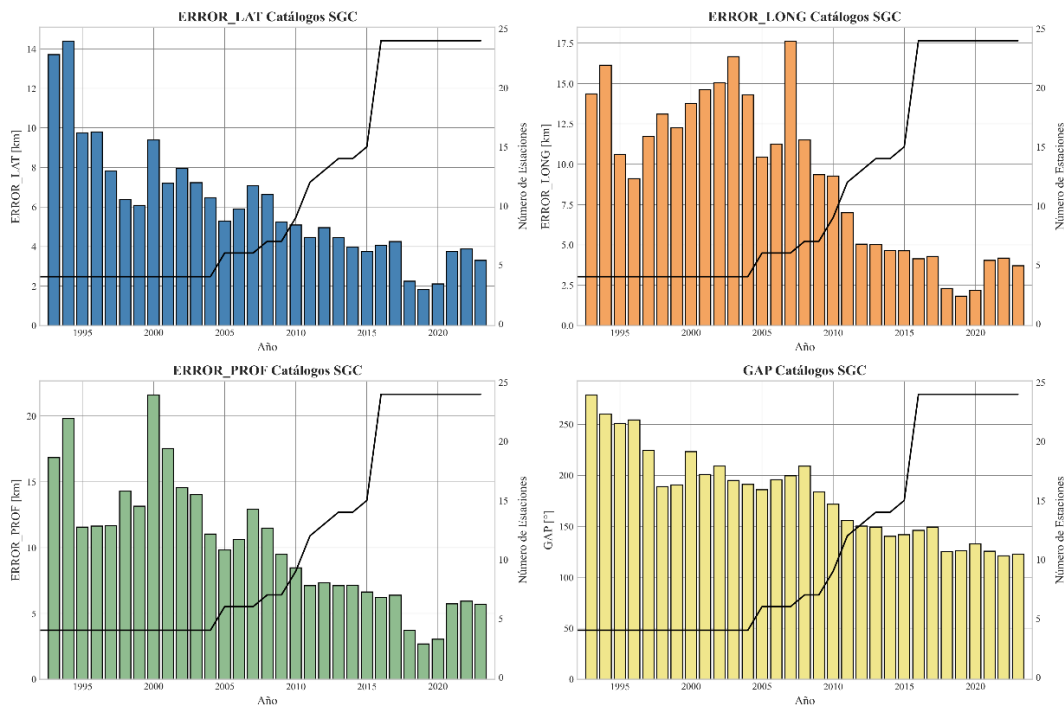
Se recopilaron e integraron eventos sísmicos de diversos catálogos nacionales (Colombia) e internacionales que contaban con información básica de eventos sísmicos como: fecha, hora, latitud, longitud, profundidad, magnitud, tipo de magnitud y errores asociados. Los datos fueron obtenidos de las siguientes fuentes: 1. Catálogo sísmico del Servicio Geológico Colombiano (1993

– 2018); 2. Catálogo sísmico reciente del Servicio Geológico Colombiano – SGC- (2018 – 2023); 3. Catálogo de sismicidad del SGC de la Línea Base General del Valle Medio del Magdalena y La Loma Cesar (1993 – 2021); 4. Reviewed International Seismological Centre -ISC-Bulletin (1980 – 2021). Los detalles de las fuentes utilizadas para la descarga de información se encuentran en la sección ‘Datos y Recursos’.

Al realizar una revisión detallada de los errores en latitud, longitud, profundidad y GAP de los catálogos del SGC, se identificó que los eventos de mayor confiabilidad corresponden a sismos registrados después de 2010. Esta mejora en la calidad del dato se puede atribuir al gran aumento en el número de estaciones sismológicas instaladas cerca de la zona de estudio (**Figura 4**).

Figura 4.

Gráficas históricas de error en catálogos del SGC vs número de estaciones



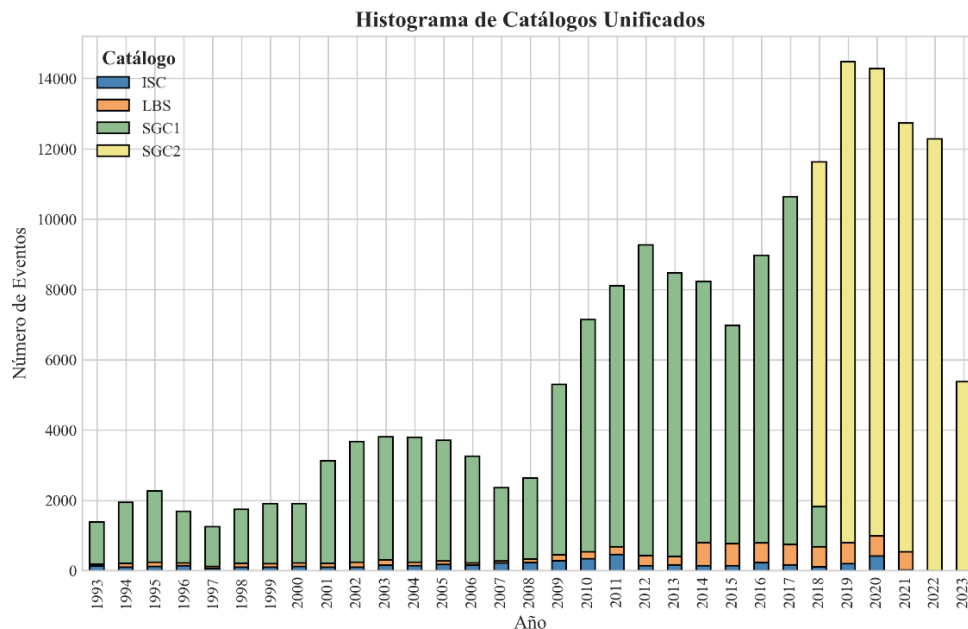
Nota. Las gráficas corresponden únicamente a los catálogos nacionales del SGC. Se destaca la notable mejora en la precisión de la ubicación de los eventos a partir del año 2010.

Los eventos consignados en el catálogo internacional del ISC, provienen de agencias sismológicas de todo el mundo (incluyendo la Red Sismológica Nacional de Colombia) y son sometidos a revisión y relocalización (cuando hay suficiente información) por parte de analistas expertos. Por esta razón, se considera esta fuente de información como altamente confiable para posteriores análisis de sismicidad.

Considerando la posibilidad de que un mismo evento pudiera estar incluido en diferentes catálogos, se llevó a cabo la identificación y eliminación de sismos que se registraran dentro de una ventana temporal de dos minutos, asumiendo que correspondían a eventos duplicados. El catálogo resultante consolidado después del acondicionamiento de información constó de un total de 184,689 eventos registrados entre el 6 de enero de 1980 y el 14 de junio de 2023 (**Figura 5**).

Figura 5.

Histograma de eventos del catálogo unificado final según fuente de información



Nota. ISC: International Seismological Centre, LBS: Línea Base de Sismicidad, SGC1: SGC 1993 – 2018, SGC2: SGC 2018 – 2023. Se omiten datos de 1980 a 1992 provenientes del ISC.

2.3. Catálogo de formas de onda

Un sismograma es un registro gráfico de las ondas sísmicas producidas por un evento sísmico. Este registro es obtenido por las estaciones sismológicas que están distribuidas en diferentes ubicaciones alrededor de una zona en particular. Los sismogramas varían de una estación a otra, ya que dependen de la distancia entre el hipocentro del sismo y la estación. Por lo anterior, las estaciones más cercanas al evento registran ondas más fuertes y de mayor duración, mientras que las más lejanas registran ondas más débiles y atenuadas.

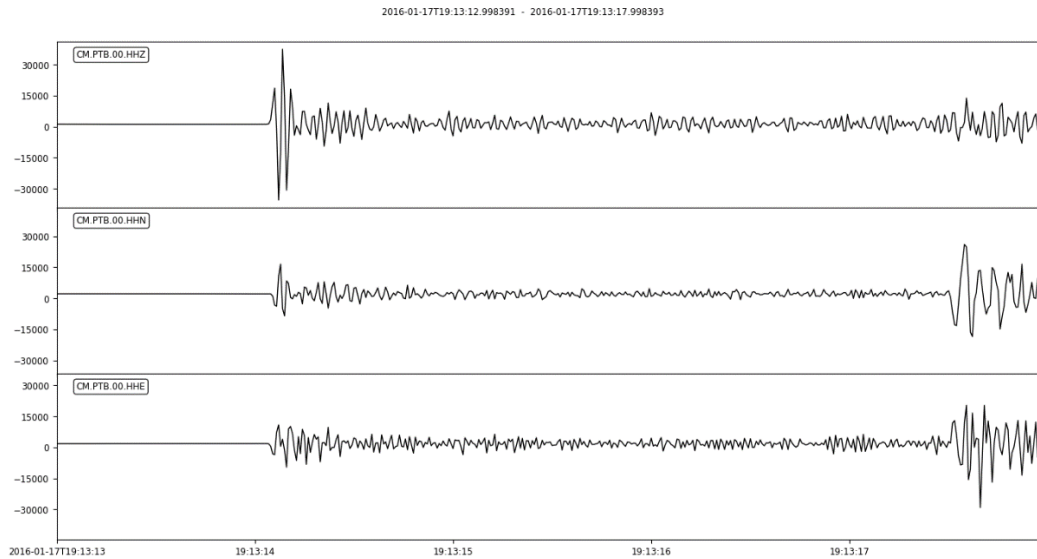
Cuando hay un número significativo de estaciones cercanas, se reduce la posibilidad de que un evento sísmico pase desapercibido o no sea registrado adecuadamente. Además, la triangulación de las señales provenientes de diferentes estaciones permite una localización más precisa del hipocentro y una mejor caracterización del evento sísmico en términos de magnitud y profundidad.

El Servicio Geológico Colombiano ofrece de manera accesible las formas de onda registradas por fecha y estación de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), en formato .mseed. Este estándar facilita el almacenamiento y la transferencia de datos sísmicos en forma de series de tiempo digital.

La obtención masiva de más de 2TB de sismogramas se realizó mediante la implementación de un script de Obspy en los datos del SGC. Esto permitió una descarga eficiente de archivos .mseed, obteniendo los registros diarios entre 2016 y 2021 de las 24 estaciones empleadas en este proyecto. Los sismogramas contienen información de tres componentes crudos (ENZ – East, North, Vertical), que representan la dirección de la vibración del suelo en tres dimensiones (**Figura 6**).

Figura 6.

Componentes crudos ZNE de un sismograma de la zona de estudio



Nota. Ejemplo de las componentes de un sismograma de cuatro segundos de la estación PTB dentro de la zona de estudio.

3. Identificación de Fases Sísmicas

En el ámbito de la sismología, el término "picking" se utiliza para describir el proceso de identificación y registro de ondas sísmicas en los sismogramas generados por estaciones sismológicas. Este proceso se realiza mediante la detección de tiempos de llegada (o tiempos de arribo) principalmente de ondas corporales originadas por un evento sísmico.

3.1. Ondas corporales

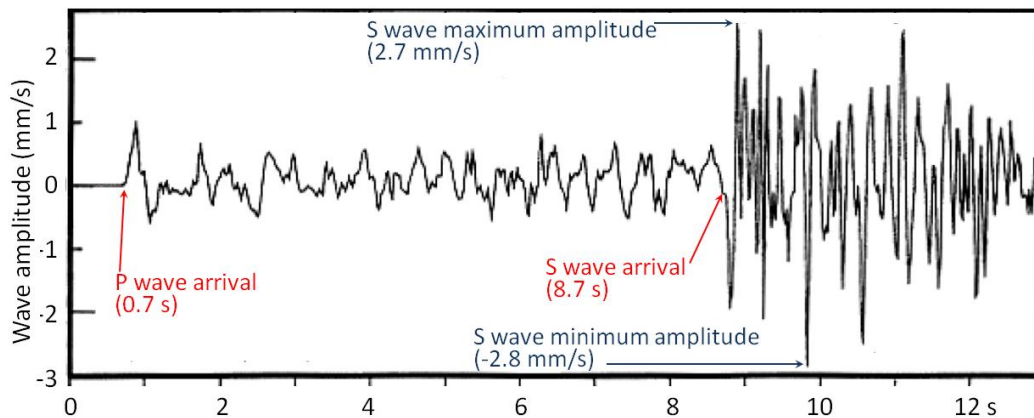
Las ondas corporales (ondas P y S) son ondas elásticas que se propagan al interior de la Tierra. En los métodos de prospección por reflexión y refracción, estas ondas constituyen la fuente principal de información utilizada para visualizar la estructura interna del planeta. Al propagarse

desde el origen del evento sísmico en todas las direcciones, generan una esfera de expansión cuyo tamaño está determinado por el tiempo transcurrido desde que se produjo el evento (Sheriff, 2002).

Este fenómeno físico es esencial para entender y analizar los eventos sísmicos. Cuando ocurre un terremoto, las ondas sísmicas se propagan a través de la Tierra, proporcionando valiosa información sobre su ubicación y magnitud. Las ondas P (primarias, compresionales) son las primeras en alcanzar una estación sismológica, seguidas por las ondas S (secundarias, de cizalla) (Figura 7). El análisis de estas ondas permite determinar tanto la estructura profunda de la Tierra (capas internas y placas tectónicas) como estructuras superficiales (fallas geológicas).

Figura 7.

Detección de tiempo de arribo de ondas P y S en un sismograma



Nota. Ondas P y S de un sismo pequeño ocurrido cerca de la Isla Vancouver en 1997. Tomado de Earle (2012).

3.2. Identificación automática de fases sísmicas

La determinación precisa de los tiempos de arribo de las ondas P y S es esencial para calcular los hipocentros de los eventos sísmicos. Históricamente, esta tarea ha sido realizada de manera manual por analistas expertos. Sin embargo, a medida que se incrementa el número de

sensores sísmicos, la labor de los analistas se vuelve más compleja y demorada, dado que la identificación manual de las fases se torna más ardua. Además, surge la posibilidad de que diferentes analistas interpreten las fases de manera distinta, introduciendo cierta imprecisión en el análisis sísmológico (Zhu & Beroza, 2018).

3.2.1. Introducción a PhaseNet

Para abordar la problemática anterior, se han explorado diversas alternativas con el objetivo de lograr la identificación automática de tiempos de arribo en sismogramas. Los enfoques varían desde métodos basados en parámetros estadísticos como STA (Short-Term-Average), LTA (Long-Term-Average), amplitud, desviación estándar, asimetría y curtosis (p.e. Allen, 1978; Akazawa, 2004; Ross & Ben-Zion, 2014), hasta la implementación de algoritmos computacionales basados en Machine Learning y redes neuronales artificiales (p.e. Zhu & Beroza, 2018; Mousavi et al., 2020).

A pesar de los avances significativos en la identificación automática de tiempos de arribo de ondas P, la detección precisa de arribo de ondas S sigue siendo un desafío en la sísmología automatizada al ser más complejas y menos notables en los sismogramas que las ondas P.

En el marco de esta investigación, se empleó el algoritmo PhaseNet, (Zhu & Beroza, 2018), el cual se basa en U-Net, una red de segmentación semántica de imágenes biomédicas. PhaseNet es una red neuronal profunda diseñada para llevar a cabo la identificación automática de los tiempos de llegada de las ondas P y S, entrenada a partir de múltiples interpretaciones realizadas por analistas expertos y programada en el entorno de Python.

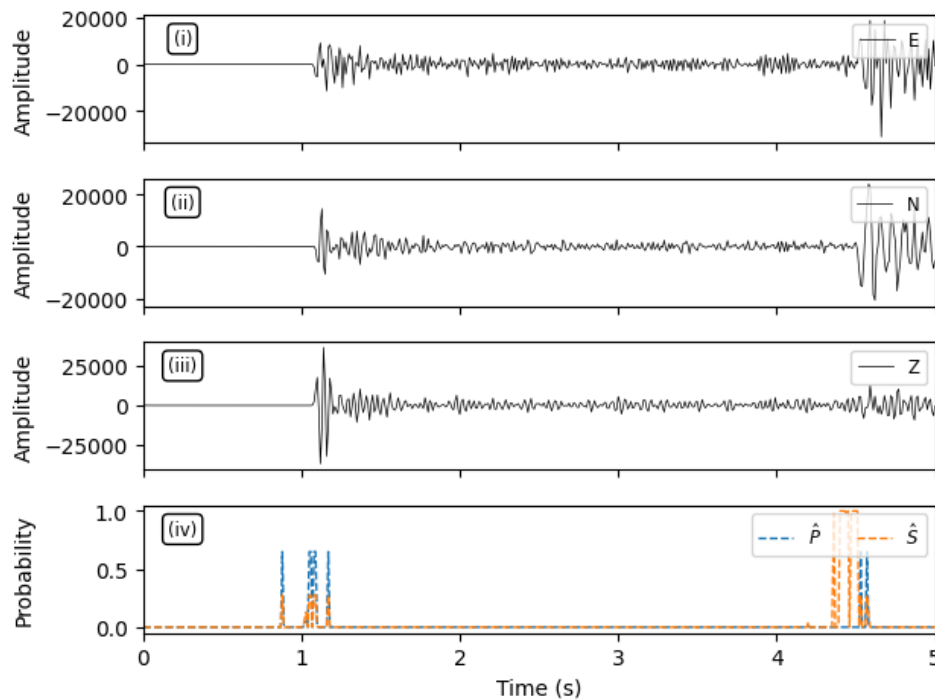
Una de las principales ventajas de emplear redes neuronales en la identificación de ondas sísmicas complejas reside en su capacidad para autodeterminar las características relevantes al

analizar datos etiquetados, como señales y ruido. Además, el modelo fue entrenado utilizando un extenso catálogo que comprende casi 800,000 registros procedentes del Northern California Earthquake Data Center Catalog (NCEDC) en formas de onda muestreadas a 100 Hz (Zhu & Beroza, 2018), mismo muestreo de la mayoría de los datos del presente trabajo de investigación.

El algoritmo PhaseNet toma como datos de entrada los tres componentes crudos de los sismogramas (ENZ). Como resultado, proporciona los tiempos de arribo de las ondas P y S que correspondan con los picos de las distribuciones finales de predicción (**Figura 8**), Además, devuelve el porcentaje de probabilidad que indica la correspondencia entre el tiempo detectado y el tiempo de llegada real (phase score).

Figura 8.

Distribuciones de probabilidad de tiempo de arribo de fases sísmicas



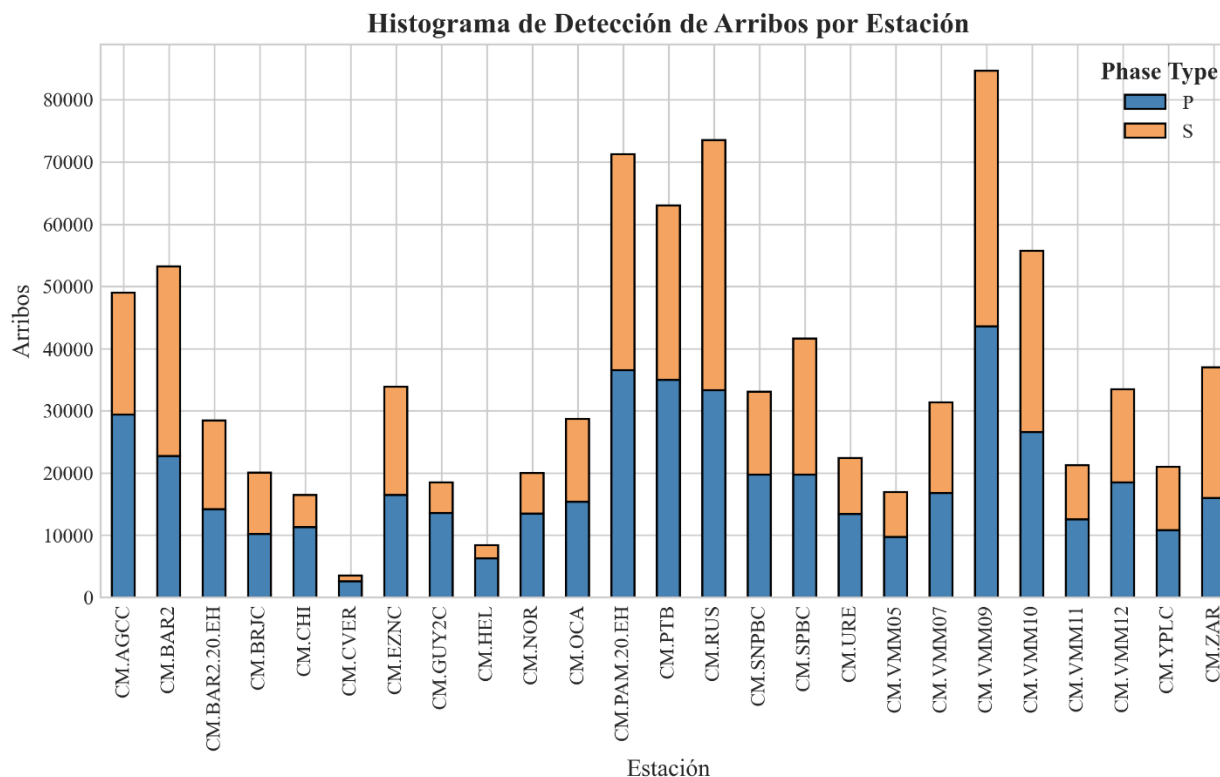
Nota. Resultado de distribución de probabilidad para un evento ocurrido en la zona de estudio en el 2016 y registrado en la estación PTB.

3.2.2. Aplicación de PhaseNet a los datos de estudio

Se desarrolló un código que mejoró significativamente la eficiencia y el tiempo de cómputo del algoritmo PhaseNet para los datos recopilados en la zona de estudio. Se observó que la estación VMM09 registró el mayor número de tiempos de arribo detectados utilizando PhaseNet (**Figura 9**). Además, se destacó que esta misma estación presentó las probabilidades más altas de llegada tanto para las ondas P como para las S, según el promedio de phase score por tipo de onda y estación (**Figura 10**).

Figura 9.

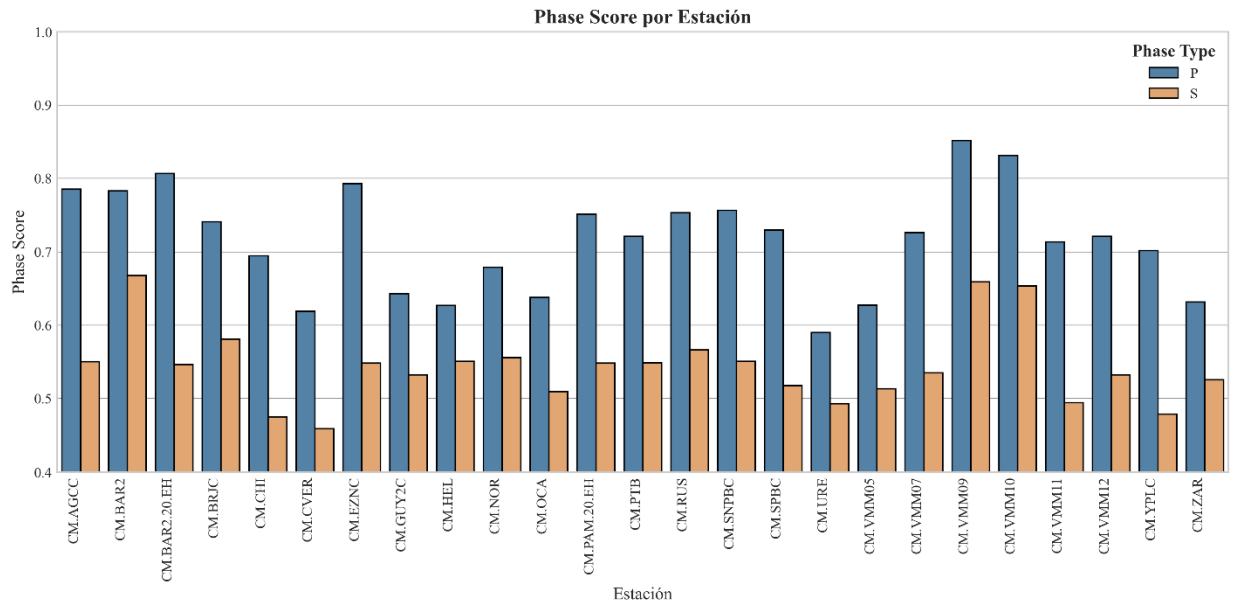
Histograma de detección de arribos por estación y tipo de onda



Nota. Se destaca la mayor cantidad de detecciones de ambos tipos de onda en la estación VMM09 debido a su cercanía al NSB.

Figura 10.

Gráfica de phase score promedio por estación y tipo de onda



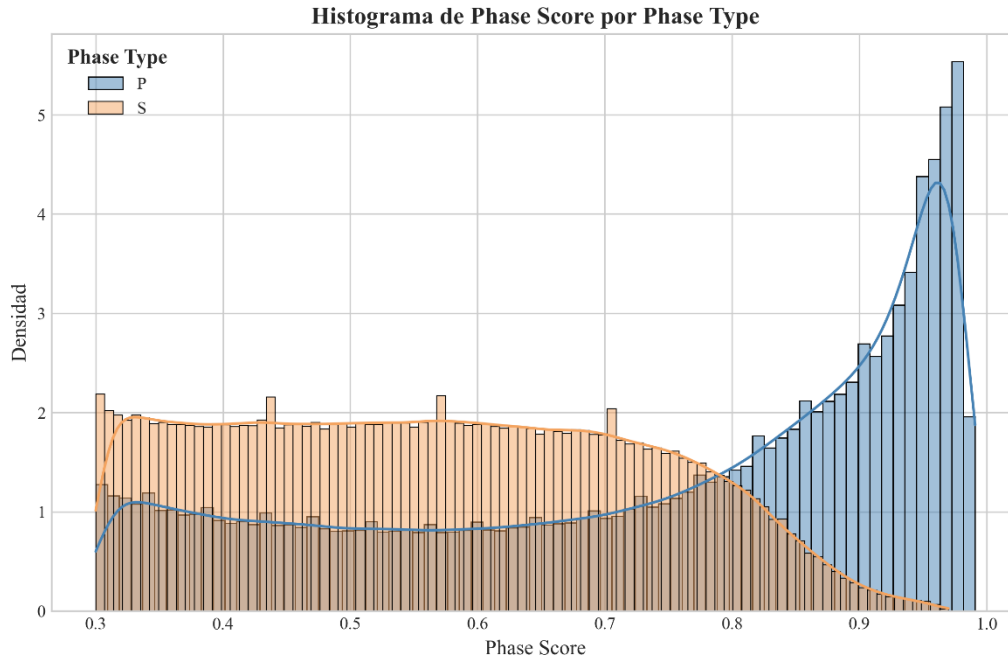
Nota. En general, hay mayor certeza en las detecciones de ondas P que de ondas S. Igualmente, la estación VMM09 es la que presenta mayor confiabilidad.

Este fenómeno puede atribuirse a la proximidad de la estación sismológica al Nido Sísmico de Bucaramanga, ya que las ondas sísmicas llegan con mayor energía y son más fácilmente detectables. Al elaborar histogramas de frecuencia de phase score por tipo de onda (**Figura 11**), se notó un pico cerca del 98% en las ondas P, lo cual indica una alta confiabilidad en los tiempos de arribo de las ondas primarias para la zona de estudio. Por otro lado, en el histograma de las ondas S no se observa ningún pico, y la distribución de phase score es uniforme entre el 30% y el 75%, lo que sugiere detecciones con mayor incertidumbre.

Por último, se confirmó el excelente rendimiento del algoritmo utilizando los datos recopilados, ya que de los 72,723 eventos sísmicos registrados en la zona entre 2016 y 2021, se logró detectar los tiempos de arribo de al menos una fase en 71,494 sismos.

Figura 11.

Histograma de phase score por tipo de onda para los datos de la zona de estudio



Nota. Se evidencian mejores valores de phase score en ondas P que en ondas S, asociado a la facilidad de identificar ondas primarias en los sismogramas.

4. Relocalización Relativa de Sismos

La localización precisa de hipocentros es esencial para llevar a cabo análisis de sismicidad y sismotectónica de manera confiable. Los sismos de baja profundidad (<50 km) proporcionan valiosa información sobre fallas y estructuras, mientras que los sismos profundos (>50 km) ofrecen datos relevantes sobre tectonismo, geodinámica y geometría de placas. El enfoque principal de este trabajo de investigación son sismos intermedios y profundos, asociados a la cuenca del Valle Medio del Magdalena y el Nido Sísmico de Bucaramanga.

4.1. Introducción a GrowClust

En este contexto, GrowClust emerge como un algoritmo de código abierto desarrollado en Fortran, diseñado para llevar a cabo la relocalización relativa de sismos mediante un enfoque de clustering jerárquico. Este método permite agrupar y reubicar simultáneamente eventos de catálogos de gran tamaño en clusters específicos, basándose en tiempos de viaje diferenciales, valores de correlaciones cruzadas y la localización de estaciones sísmicas (Trugman & Shearer, 2017).

Investigaciones previas han validado la eficacia de GrowClust al resolver estructuras tanto planas como lineales, como fallas geológicas, placas tectónicas, y otras formaciones estructurales, incluso cuando se dispone de datos sísmicos dispersos (Koper et al., 2018; Skoumal et al., 2020; Trugman et al., 2023). Además, GrowClust toma un enfoque alternativo que no requiere inversión explícita de matrices, y optimiza con la norma L1 los residuos de tiempo de viaje diferencial, mejorando su robustez frente a valores atípicos de datos (Shearer, 1997; Skoumal et al., 2019).

Matemáticamente, GrowClust se basa en que la localización de un terremoto utilizando datos de llegada de fases sísmicas puede plantearse como un problema inverso en el que el objetivo es minimizar las diferencias de los residuos (r_k) entre los tiempos de arribo observados (tt_k) y los predichos ($\hat{tt}_k(m_i)$) desde la fuente (m_i) hasta un conjunto de estaciones sismológicas en superficie (k) (**Ecuación 1**).

$$\text{minimize } \|r_k\| = \|tt_k - \hat{tt}_k(m_i)\| \quad (1)$$

El tiempo de arribo predicho ($\widehat{tt}_k(m_i)$), depende tanto de la velocidad in-situ de la estructura como de la ubicación hipocentral del sismo (i), el cual se puede parametrizar en términos de posición hipocentral (x_i, y_i, z_i) y tiempo de origen (T_i) acorde a la **Ecuación 2**.

$$m_i = (x_i, y_i, z_i, T_i) \quad (2)$$

Los algoritmos de rutina implementados en ejercicios de relocalización suelen considerar los eventos como independientes, resolviendo el problema inverso de la **Ecuación 1** para cada sismo (i) por separado. Avances recientes en computación, han permitido aplicar técnicas de correlación cruzada para extraer tiempos de viaje diferenciales de forma precisa (**Ecuación 3**).

$$dtt_{ij,k} = tt_{j,k} - tt_{i,k} \quad (3)$$

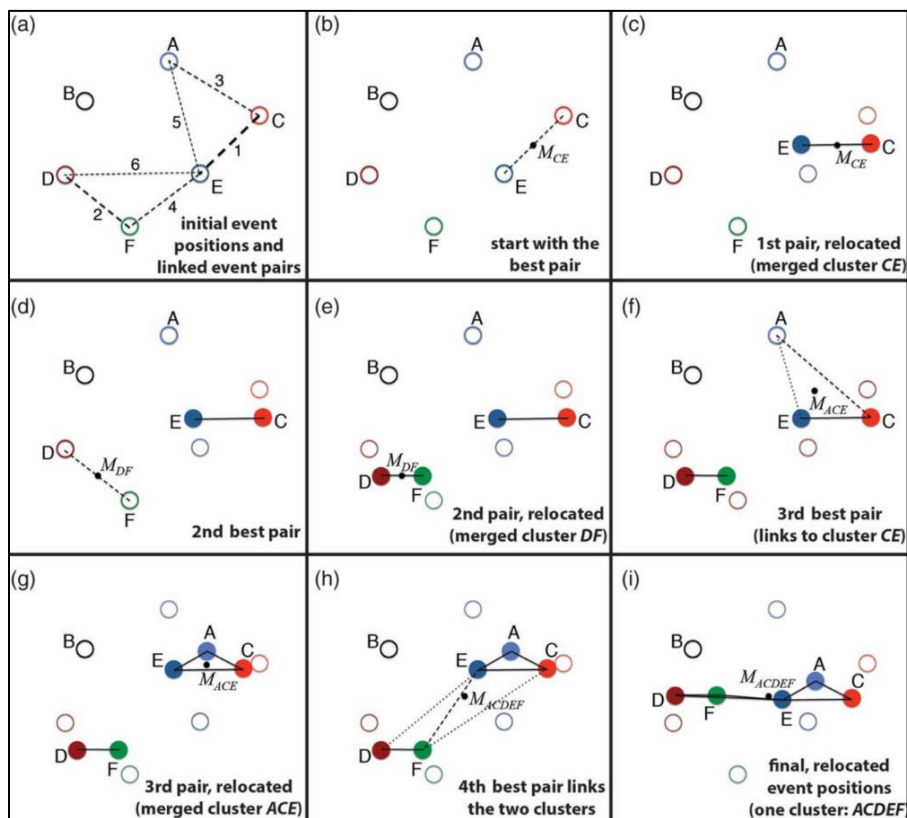
Donde (i, j) son pares de eventos observados en una estación en común (k). Con el set de observaciones de tiempos diferenciales, se puede reformular la **Ecuación 1** como un nuevo problema inverso, de mayor escala, cuyo nuevo objetivo es minimizar los residuos entre tiempos de viaje diferenciales (**Ecuación 4**), obteniendo resultados mucho más precisos que asumiendo tiempos de viaje absolutos (Trugman, 2022).

$$\text{minimize } \|dr_k\| = \|dtt_{ij,k} - \widehat{dtt}_k(m_i, m_j)\| \quad (4)$$

Finalmente, GrowClust aplica un algoritmo de agrupamiento híbrido y jerárquico que agrupa simultáneamente eventos en clústeres basados en similitud de formas de onda y reubica cada evento con respecto a su clúster (**Figura 12**). Además, implementa una técnica de remuestreo no paramétrica para estimar las incertidumbres de ubicación, lo que permite tener control de los resultados de salida en base a su confiabilidad (Efron y Tibshirani, 1994; Trugman, 2022).

Figura 12.

Proceso de relocalización de eventos sísmicos con GrowClust



Nota. El potencial de GrowClust radica en la integración simultánea de correlaciones cruzadas de tiempos diferenciales de viaje con algoritmos de clustering jerárquico para la relocalización de sismos. Tomado de Trugman & Shearer (2017).

4.2. Aplicación de GrowClust a los datos de estudio

Para ejecutar GrowClust, se necesitan varios elementos iniciales clave: un catálogo de eventos unificado (SGC – LBS - ISC); una lista de coordenadas de estaciones sismológicas; un archivo de correlaciones cruzadas de formas de onda entre pares de eventos con fases sísmicas registradas en estaciones sismológicas comunes (estos datos se basan en los tiempos de arribo obtenidos de PhaseNet); un modelo de velocidad 1D para la zona de interés; la definición de parámetros de tiempos de viaje; y los parámetros finales de configuración de GrowClust. Después del procesamiento de la información, GrowClust devuelve los sismos relocalizados según los criterios de entrada, junto con estadísticas de los datos y los clústeres identificados.

4.2.1. Datos de entrada

GrowClust requiere la carga del catálogo de sismicidad, en este caso el catálogo unificado de la sección 2.2. de la presente investigación. El catálogo proporciona información básica de cada evento, incluyendo un identificador único (que debe coincidir con los ID's del archivo de correlación cruzada), así como su ubicación precisa en términos de latitud, longitud y profundidad, junto con su tiempo de origen. Es importante destacar que variables adicionales como magnitud, tipo de evento, errores, RMS, y otras más, son omitidas internamente por el algoritmo y no se modifican al final del proceso de relocalización.

Asimismo, es necesaria la carga de los nombres y coordenadas (latitud y longitud) de las estaciones sismológicas usadas en el archivo de correlaciones cruzadas (**Apéndice A**) (Trugman, 2022).

La base y archivo más importante del algoritmo GrowClust corresponde a la compilación de correlaciones cruzadas de formas de onda de pares de eventos (dentro de una esfera de 20 km de radio) observados en estaciones en común. En este caso, en lugar de comparar directamente las formas de onda en el dominio del tiempo, se calculan las diferencias de tiempo entre las llegadas de las ondas sísmicas en la estación.

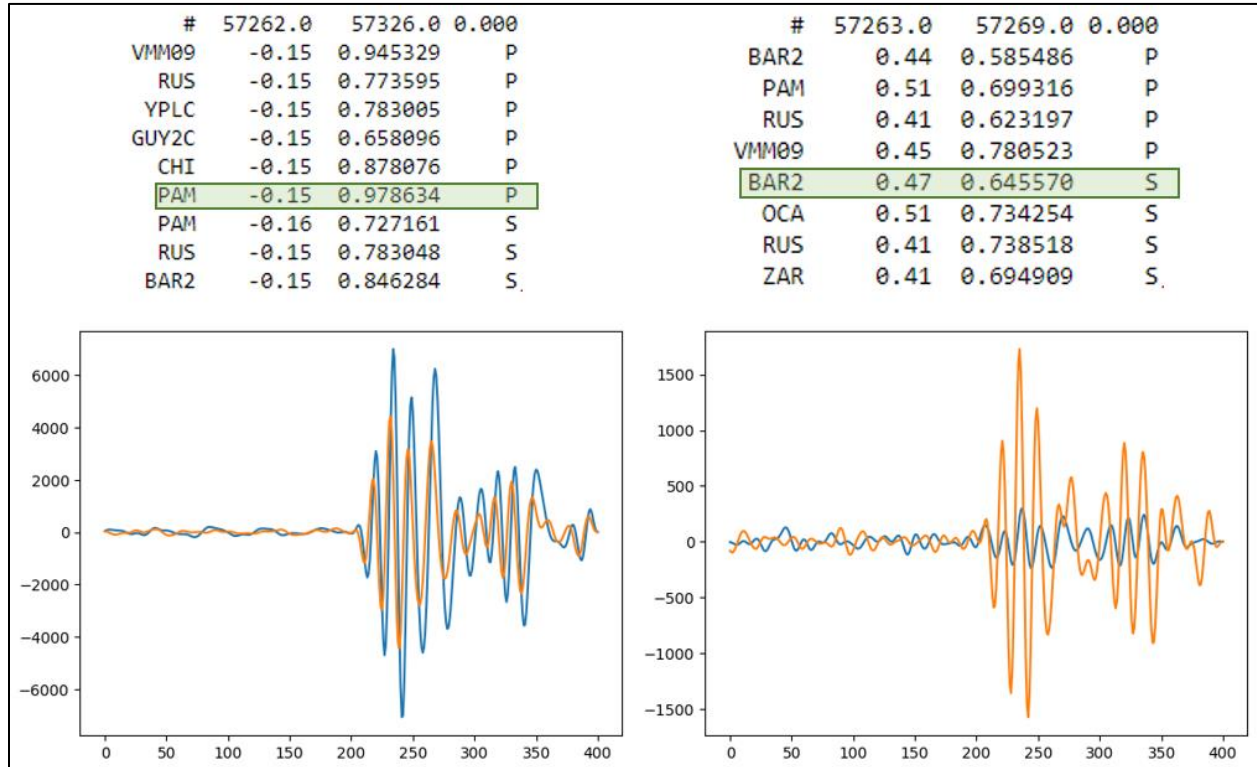
La correlación cruzada de tiempos diferenciales implica alinear las formas de onda de manera que los primeros arribos se superpongan lo mejor posible. El desplazamiento temporal entre las señales comparadas se conoce como ‘lag’, se suele expresar en segundos y puede ser positivo o negativo dependiendo la dirección del desplazamiento temporal. En el caso de este proyecto, un ‘lag’ positivo indica que la segunda señal se desplaza hacia delante de la primera señal y un valor negativo el proceso contrario.

Una vez alineadas las formas de onda de los eventos, se calcula el grado de correlación entre las formas de onda del par de eventos sísmicos utilizando la transformada de Fourier y la transformada inversa de Fourier para mejorar la eficiencia computacional del código. Matemáticamente, se convierte el dominio de tiempo a dominio de frecuencia, se multiplican punto a punto las señales transformadas y se devuelven al dominio del tiempo (inversa de Fourier) para calcular la similitud entre las señales sísmicas (Kulkarni, 2002, Cheng et al., 2021). La **Figura 13** expone un ejemplo con los datos de estudio de los conceptos asociados a correlaciones cruzadas en ondas sísmicas.

El archivo final de entrada a GrowClust consta de la información expuesta en la **Tabla 2**: identificadores del par de eventos, estación o estaciones en común, tiempo diferencial (lag), valor de correlación cruzada y fase sísmica (P o S).

Figura 13.

Comparación de correlaciones cruzadas para datos de la zona de estudio



Nota. Ejemplos de correlaciones cruzadas en pares de eventos con fases sísmicas registradas en estaciones en común. En la primera fila se encuentran los identificadores de los eventos, seguido del código de cada estación común, lag, valor de correlación cruzada y tipo de onda. A la izquierda, un ejemplo de buena correlación (97.86%) en similitud de formas de onda. A la derecha una moderada correlación (64.55%).

Tabla 2.*Esquema de compilación de correlaciones cruzadas de entrada a GrowClust*

#	ID1	ID2	
Estación 1	lag 1	XCOR 1	Fase sísmica 1
Estación 2	lag 2	XCOR 2	Fase sísmica 2
Estación 3	lag 3	XCOR 3	Fase sísmica 3

Nota. Ejemplo esquemático de resultado de correlación cruzada en pares de eventos registrados en tres estaciones en común.

Por último, es necesario introducir un modelo de velocidad 1D (**Tabla 3**). GrowClust utiliza subrutinas de viajes de rayo para construir tablas de tiempos de viaje de ondas P y S en grillas uniformemente espaciadas en profundidad y rango (Z y X) acorde a parámetros de tiempos de viaje (**Apéndice B**) (Trugman, 2022). Para los datos de la zona de estudio, el modelo de velocidad se adaptó del análisis de sismicidad del VMM de Londoño et al., (2019).

Tabla 3.*Modelo de velocidad 1D para la zona de estudio*

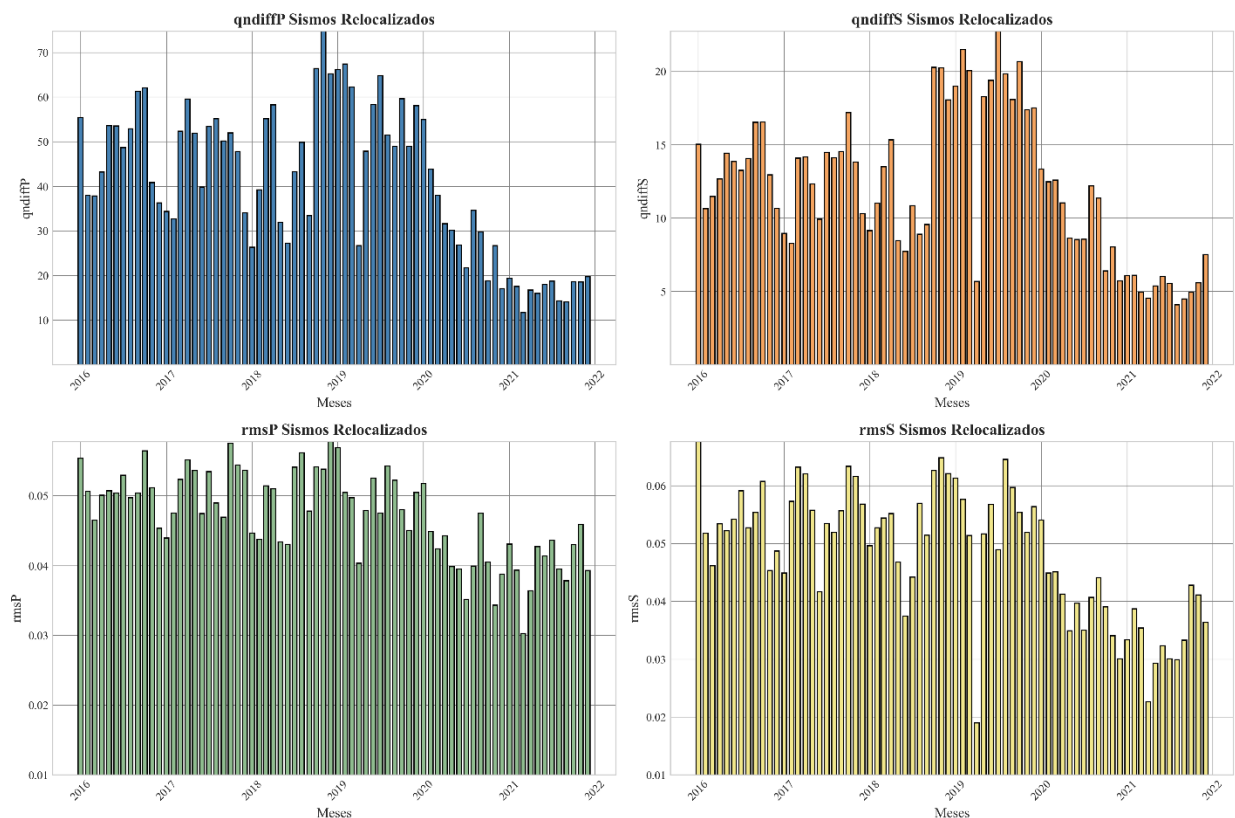
Profundidad (km)	Velocidad (km/s)
0 - 2	5.31
2 - 10	6.41
10 - 20	6.48
20 - 40	7.22
4 - 100	8.03
100 - 220	8.28
>220	8.35

4.2.2. Datos de salida

Como resultado principal, se genera un nuevo catálogo a partir de la lista de eventos iniciales, con tiempos de origen y posiciones (latitud, longitud, profundidad) relocalizados. Entre las métricas obtenidas, se incluyen estadísticas como los tiempos diferenciales de las ondas P y S ($qndiffP$, $qndiffS$) y los residuales de RMS de los tiempos diferenciales para las ondas P y S ($rmsP$, $rmsS$). Se observa una tendencia a la disminución de los tiempos diferenciales y de los residuales RMS del 2020 al 2021 (**Figura 14**).

Figura 14.

Análisis estadístico de métricas de relocalización GrowClust



Nota. Síntesis de las métricas resultantes de la relocalización de eventos sísmicos para la zona de estudio. Nótese la mejora en la relocalización de eventos desde el 2020.

Debido a los parámetros definidos y al número limitado de estaciones cercanas a la zona de estudio, se lograron relocalizar casi la mitad de los eventos iniciales (32,682 de 71,494 sismos), los cuales se agruparon en 3,162 clústeres que oscilan entre 2 y 100 eventos cada uno.

Las **Tablas 4 y 5** presentan de manera resumida los resultados de esta relocalización para el catálogo completo desde 2016 hasta 2021 en la zona de estudio. Además, la **Figura 15** ilustra la evolución del mapeo de eventos, comenzado con la construcción del catálogo unificado inicial, seguido por los eventos con arribos detectados por PhaseNet, y terminando con los eventos finales relocalizados con GrowClust. Se evidencia que la mayoría de los eventos descartados corresponden a sismos someros (<50 km de profundidad) que tienden a registrarse en menos estaciones sísmicas por su limitado alcance de propagación a comparación de sismos profundos.

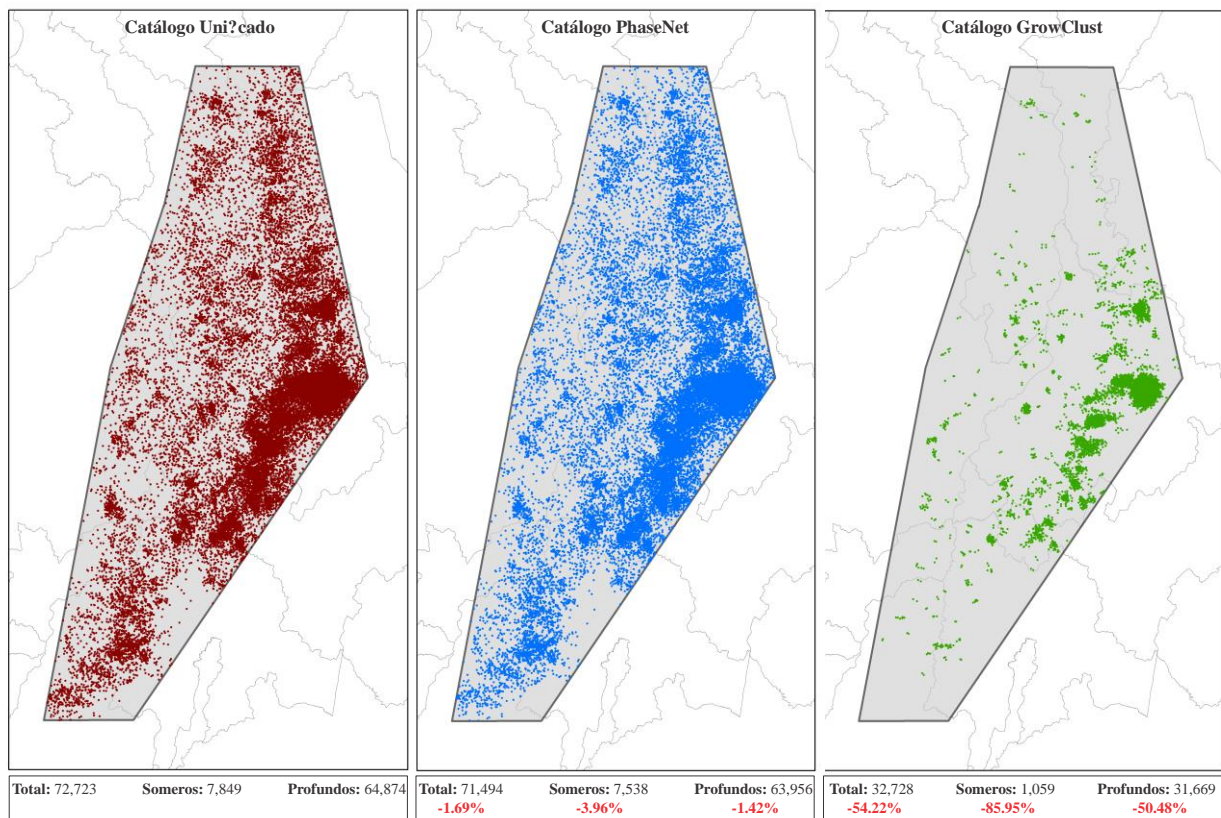
Tabla 4.

Sumario de relocalización de eventos con GrowClust para los datos de estudio

Número de eventos del catálogo inicial	71,494
Número de eventos relocalizados	32,682
Número de pares de eventos de entrada	11,769,859
Número de pares de eventos utilizados	4,563,520
Número de datos de XCOR usados (P)	7,788,477
Residuales RMS de tiempos diferenciales (P)	0.1463
Residual medio de tiempos diferenciales (P)	0.0010
Número de datos de XCOR usados (S)	2,521,108
Residuales RMS de tiempos diferenciales (S)	0.2123
Residual medio de tiempos diferenciales (S)	0.0016

Tabla 5.*Resumen de número de clústeres asociados a cantidad de eventos*

Número de clústeres ≥ 2 eventos	2,510
Número de clústeres ≥ 5 eventos	384
Número de clústeres ≥ 10 eventos	158
Número de clústeres ≥ 20 eventos	65
Número de clústeres ≥ 50 eventos	28
Número de clústeres ≥ 100 eventos	17

Figura 15.*Evolución del mapeo de eventos en cada fase del proyecto de investigación*

5. Sismicidad y Sismotectónica de la Zona de Estudio

Una vez consolidada la base de datos final con los eventos sísmicos relocalizados, se llevó a cabo una interpretación de la configuración de la placa de subducción utilizando la distribución de hipocentros en el área de estudio. Además, se agruparon los eventos en base a su relocalización para realizar análisis de sismicidad con énfasis en la ley de Gutenberg – Richter.

5.1. Geometría de la Placa de Nazca

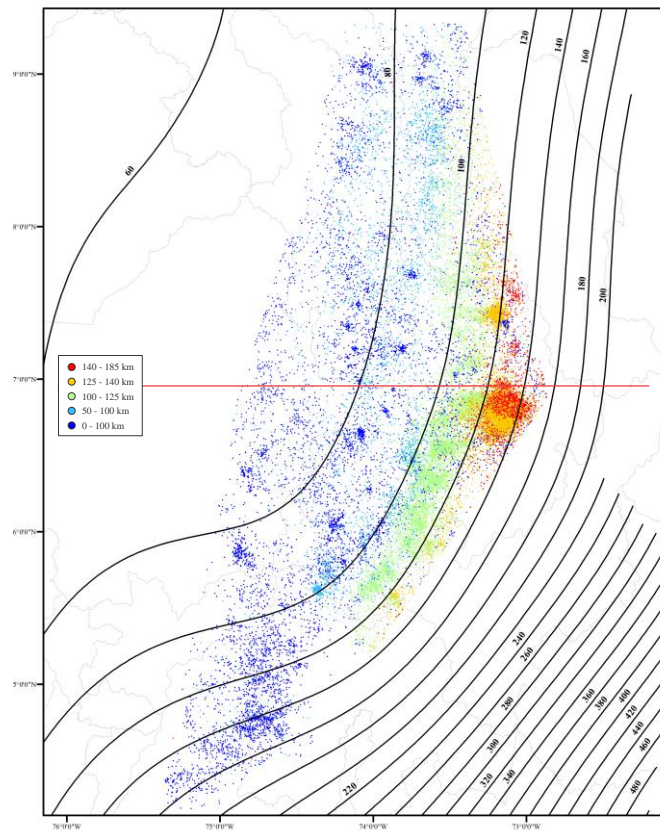
Para validar los resultados obtenidos, se compararon las ubicaciones de los sismos con los contornos de profundidad de la placa de Nazca proporcionados por el USGS y se encontró correspondencia. La **Figura 16** muestra los contornos finales de la placa de Nazca, integrando tanto los sismos relocalizados como los no relocalizados.

Los contornos fueron la base para la orientación de perfiles dentro de la zona de estudio, ya que se buscó siempre cortar transversalmente el rumbo de la placa de subducción para encontrar inclinaciones reales (o las más cercanas al valor real). En este caso, se identificó un cambio en el rumbo de la placa de subducción marcado con una línea roja en dirección E – W en la **Figura 16**. El área norte se profundiza en sentido W – E mientras que el área sur (donde se encuentra el Nido Sísmico de Bucaramanga) profundiza en dirección NWW – SEE.

Se destaca que la inclinación de la placa de subducción al sur del límite W – E es menor a la inclinación la sección sur, corroborando la existencia de un ‘flat slab’ al norte del Nido Sísmico de Bucaramanga.

Figura 16.

Contornos de profundidad de la placa de Nazca vs catálogo de sismicidad

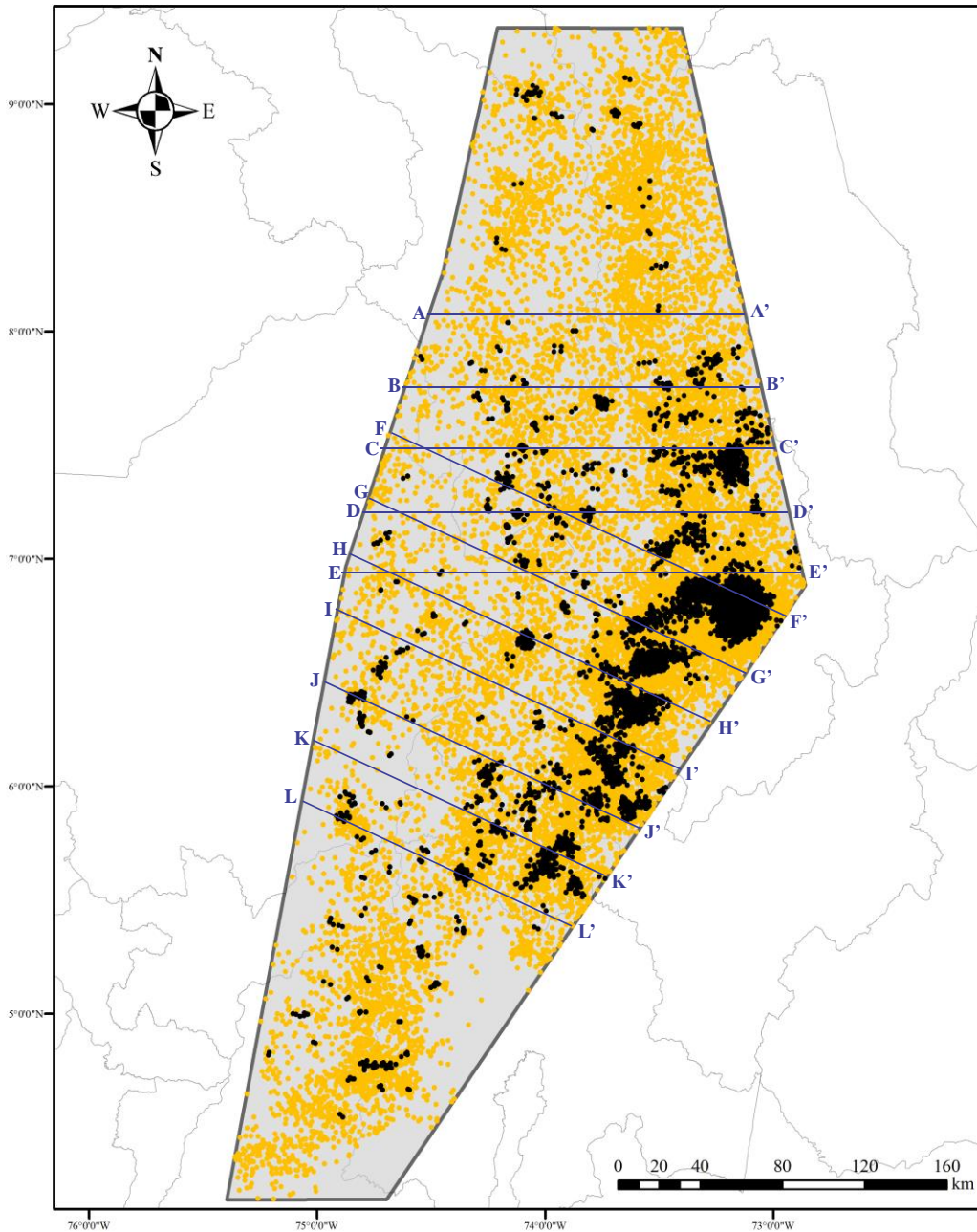


Nota. La placa al norte de la línea roja se profundiza en sentido W – E, mientras que al sur se profundiza del NWW al SEE. Los contornos se tomaron del portafolio de datos GIS del USGS.

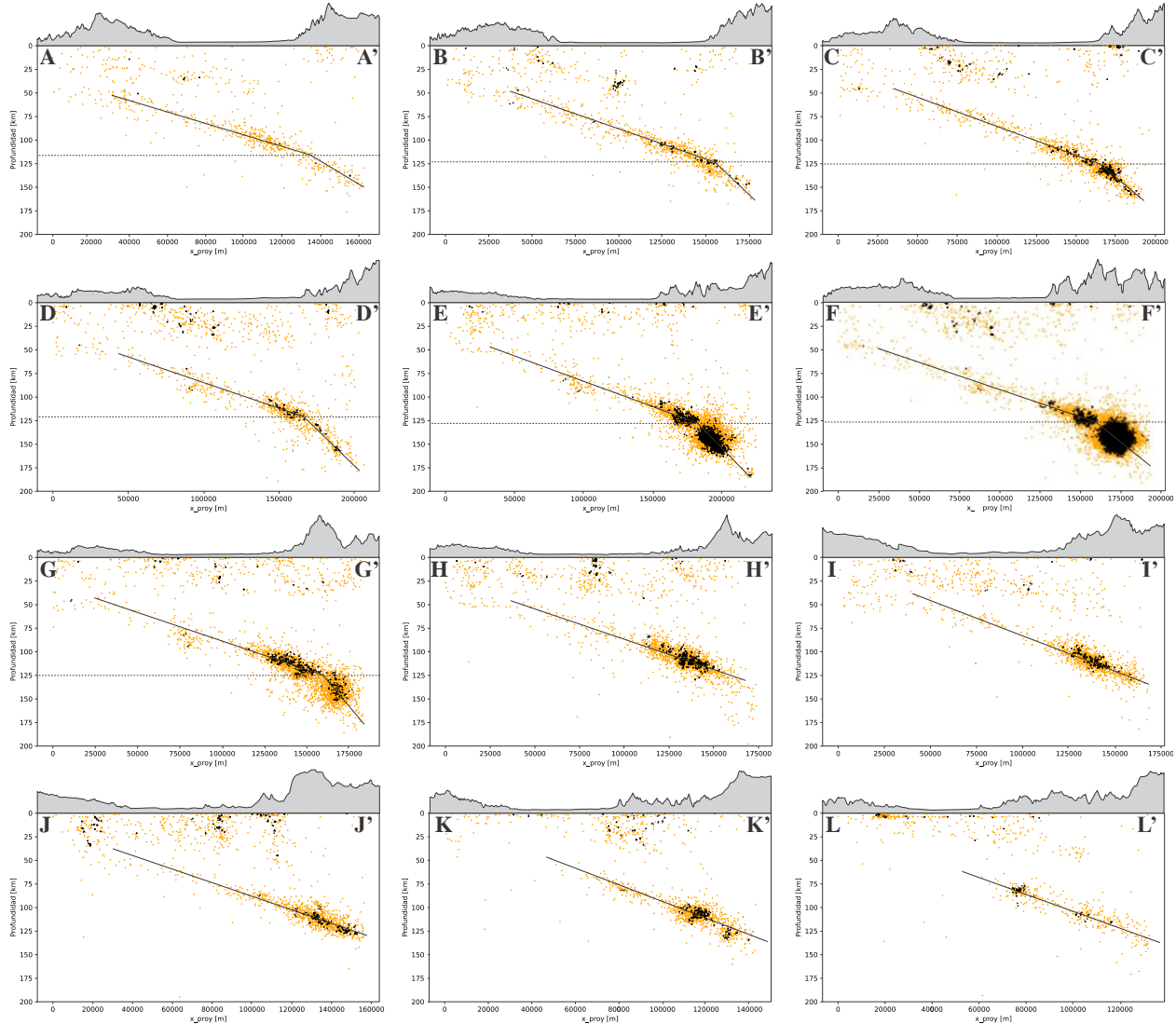
Finalmente, se realizaron 12 cortes en toda la zona de estudio, incluyendo sismos relocalizados y no relocalizados, topografía y ángulos de inclinación (**Figuras 17 y 18**). Para conseguir proyectar los sismos sobre las líneas de corte, fue necesario realizar un ejercicio de conversión de coordenadas geográficas a planas. Al analizar a detalle la geometría de la placa de subducción, se destaca el aumento en la inclinación de la placa de Nazca por debajo de los 125 km de profundidad, característica que se logró identificar al utilizar la base de datos de sismos relocalizados. Los resultados por corte se sintetizan en la **Tabla 6**.

Figura 17.

Mapa de líneas de corte en el polígono de estudio



Nota. Mapa de planta de los 12 cortes expuestos en la Figura 18. Los puntos naranjas corresponden a sismos no relocalizados; los puntos negros a sismos relocalizados.

Figura 18.*Perfiles de profundidad en el polígono de estudio*

Nota. Los cortes se generaron en dirección transversal al rumbo de la placa de subducción. Por esto, los cortes A – A', B – B', C – C', D – D' y E – E' se presentan casi en dirección W – E; mientras que los cortes F – F', G – G', H – H', I – I', J – J', K – K' y L – L' cuentan con dirección NWW – SEE. Los puntos naranjas corresponden a sismos no relocalizados y los puntos negros a eventos relocalizados. Nótese el cambio en la inclinación a aproximadamente 125 km.

Tabla 6.*Resumen de inclinaciones de la placa de Nazca por corte*

Corte	Dip 1 [°]	Dip 2 [°]
A – A'	30.98	53.37
B – B'	34.41	55.70
C – C'	31.59	52.27
D – D'	28.35	58.96
E – E'	28.69	56.15
F – F'	29.62	55.37
G – G'	30.92	64.85
H – H'	33.15	N/A
I – I'	36.87	N/A
J – J'	36.64	N/A
K – K'	41.63	N/A
L – L'	41.84	N/A

Nota. Dip 1 hace referencia a la inclinación de la placa de subducción a profundidades menores a 125 km, mientras que Dip 2 corresponde a profundidades mayores a 125 km. Del corte H al L no se presentan valores de Dip 2 ya que la placa se profundiza por fuera del polígono de estudio hacia el oeste.

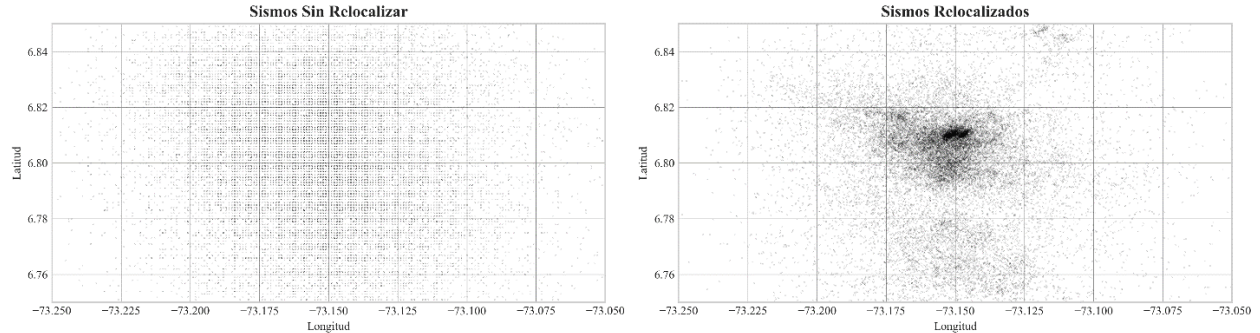
Un análisis similar para la cuenca del VMM fue realizado por [Londoño et al. \(2019\)](#), quien calculó inclinaciones aparentes (con cortes en dirección E – W a lo largo de toda la cuenca) de la placa de subducción en la zona, pero determinando un único valor por corte, asumiendo una placa

con inclinación constante a profundidad, encontrando valores entre 29° y 37° . En contraste, en el presente trabajo se identificaron inclinaciones de 28° a 42° (para profundidades entre 50 y 125 km), aumentando la inclinación hacia el sur. Por su parte, se encontraron inclinaciones entre 52° y 65° grados en la sección profunda de la placa de subducción (mayor a 125 km de profundidad).

Asimismo, como producto del análisis de relocalización, fue posible visualizar de forma más detallada el Nido Sísmico de Bucaramanga y agrupaciones (clusters) de sismos, logrando suprimir el efecto de cuadrícula (Figura 19). Del mismo modo, al modificar valores de opacidad (alpha), se consigue identificar el área de mayor ocurrencia de sismos dentro del NSB (Figura 20).

Figura 19.

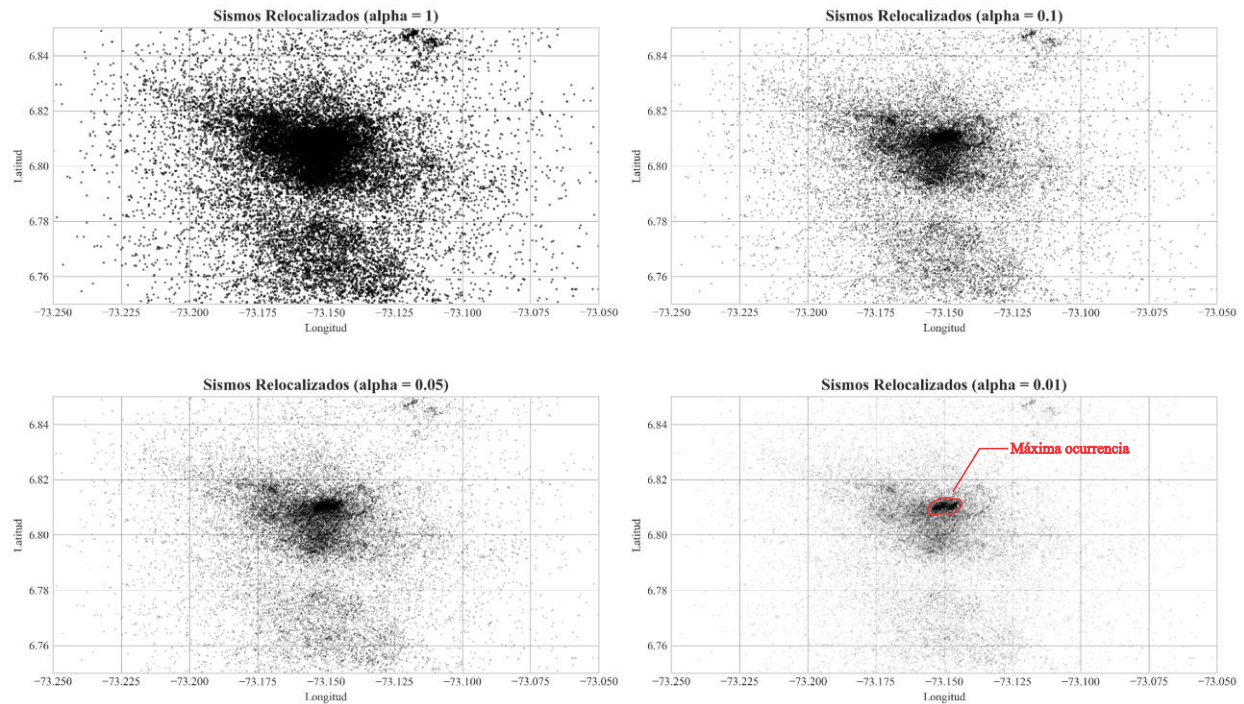
Comparación de eventos no relocalizados y relocalizados en el NSB



Nota. Como producto del ejercicio de relocalización, fue posible corregir el efecto de grilla o cuadrícula de las localizaciones originales.

Figura 20.

Ajuste de opacidad para la identificación de zonas de máxima ocurrencia

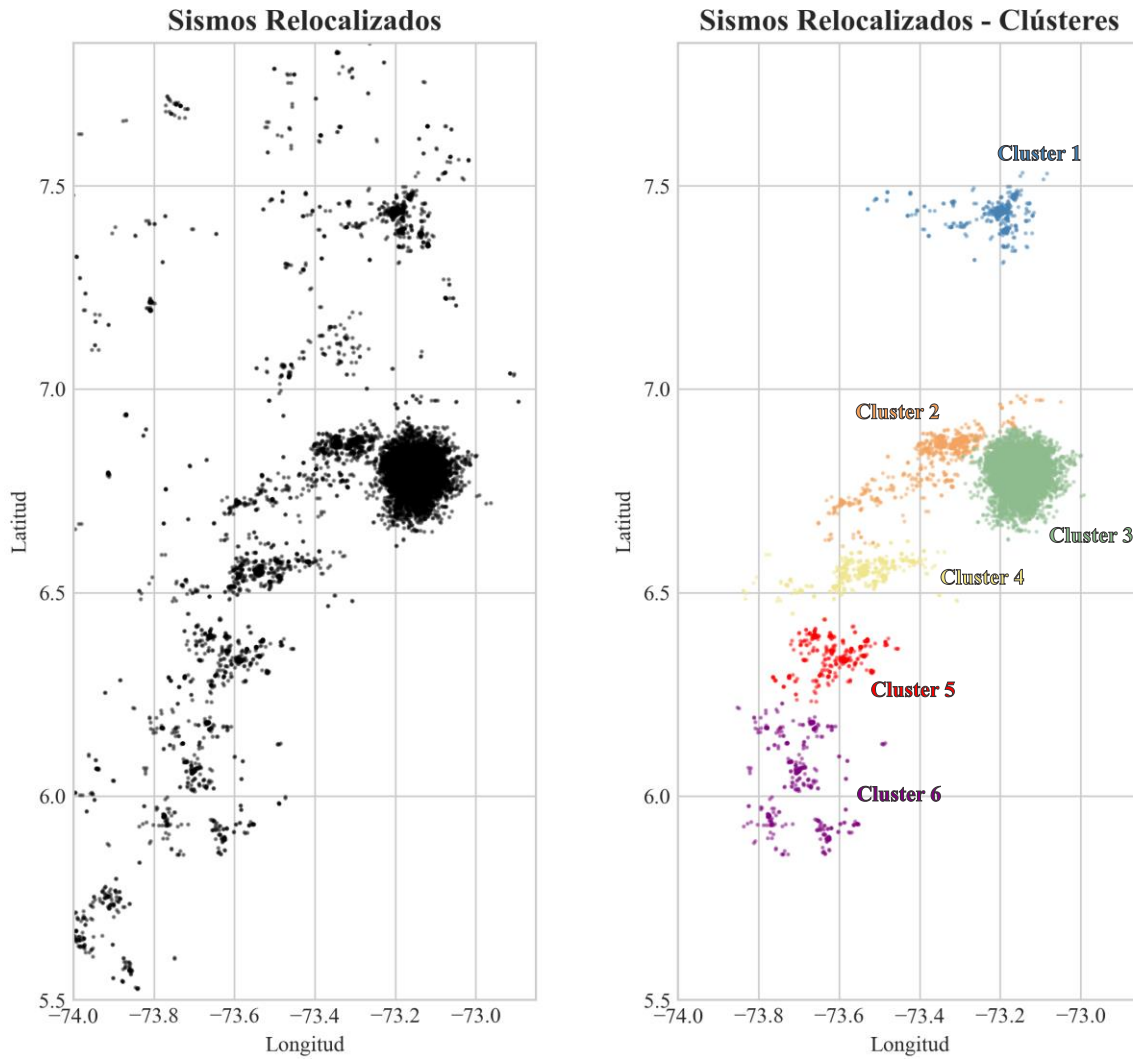


Nota. A partir del ajuste de los valores de alpha, es posible identificar la zona con mayor ocurrencia de eventos sísmicos dentro del NSB.

A partir de la relocalización de eventos sísmicos profundos (de más de 50 km de profundidad), se pudieron agrupar los sismos en seis tendencias según sus áreas de ocurrencia, las cuales constituyen la entrada para los análisis de sismicidad con la ley de Gutenberg-Richter en la sección posterior (**Figura 21**).

Figura 21.

Definición de clústeres profundos en base a relocalización de hipocentros



Nota. Los grupos se definieron en base a la ubicación de los eventos profundos (>50 km).

5.2. Ley Gutenberg – Richter

La ley de Gutenberg-Richter es un modelo que relaciona la ocurrencia de terremotos con su respectiva magnitud. Fue propuesta por Ishimoto e Ida en 1939 en Japón y por Gutenberg y Richter en 1944 y 1954, respectivamente, en Estados Unidos. Se utiliza para establecer el patrón de sismicidad de una zona a partir de la **Ecuación 5**.

$$\log N (\geq m) = a - bm \quad (5)$$

Con esta, se define la distribución relativa del tamaño de los terremotos teniendo en cuenta que el logaritmo del número acumulado de sismos, correspondiente a la expresión $N(\geq m)$, en una región de tiempo específica, que supera cada grado de magnitud m , varía de manera lineal con este parámetro utilizando dos constantes, a y b (Gómez, 2015).

5.2.1. Parámetros de sismicidad

El valor a (a -value) funciona como indicador de la cantidad total de energía liberada por los sismos en una región específica, ya sea por cantidad de eventos o por altas magnitudes. Por su parte, la constante b (b -value) corresponde a la pendiente de la recta, indicando así la proporción de sismos grandes frente a pequeños. Si b aumenta, entonces disminuye la proporción y habría una menor concentración de esfuerzo en la zona; mientras que si disminuye, aumentaría la proporción y, así mismo, lo haría la concentración de esfuerzo. De esta manera se afirma que existe una relación inversa entre la pendiente y el nivel de esfuerzo (Gómez, 2015).

Generalmente, el valor de b se encuentra en un rango de $0.8 < b < 1.2$, sin embargo, depende de la región estudiada, siendo este considerado una medida del esfuerzo promedio de la zona analizada. Asimismo, se ha sugerido que la variabilidad en el b -value se asocia a grados de fracturamiento, y las propiedades del material ante concentraciones de esfuerzo (Godano et al., 2014).

La magnitud de completitud (M_c) es la magnitud mínima en la que el 100% de los sismos son detectados exitosamente dentro de una región (Woessner & Wiemer, 2005). En otras palabras, es la magnitud desde la cual se tienen en cuenta los eventos sísmicos para el análisis de la ley GR.

El método elegido para estimar la magnitud de completitud fue el de Máxima Curvatura (MAXC), este consiste en definir M_c como el punto obtenido de la primera derivada de la curva frecuencia-magnitud, correspondiente a la magnitud en la que se hayan registrado mayor número de terremotos. Sin embargo, este método tiende a subestimar el valor de M_c , especialmente para distribuciones de frecuencia-magnitud gradualmente curvadas (Mendoza, 2012).

5.2.2. Aplicación a los datos de estudio

ZMAP es un algoritmo divulgado inicialmente en 1994 y programado en Mathworks, enfocado en realizar análisis de catálogos de sismicidad. Entre las numerosas aplicaciones que tiene, se encuentran el mapeo de catálogos sísmicos, generación de histogramas, ejecución de la ley Gutenberg – Richter y determinación de parámetros de sismicidad (a -value, b -value y M_c) (Wiemer, 2001).

Tomando como referencia los seis clústeres profundos de la **Figura 21**, se procedió a realizar un análisis de la Ley GR, calculando para cada escenario los parámetros b-value, a-value y magnitud de completitud haciendo uso del código abierto Zmap en Matlab. Al comparar los valores de los parámetros de sismicidad por grupo, se lograron identificar similitudes entre los clusters 1 y 2; 4 y 5 (**Tabla 7**); los cuales se unificaron obteniendo cuatro grupos finales en base a criterios de localización y sismicidad (**Figura 22**).

Tabla 7.

Síntesis de los parámetros de sismicidad (ley GR) por cluster

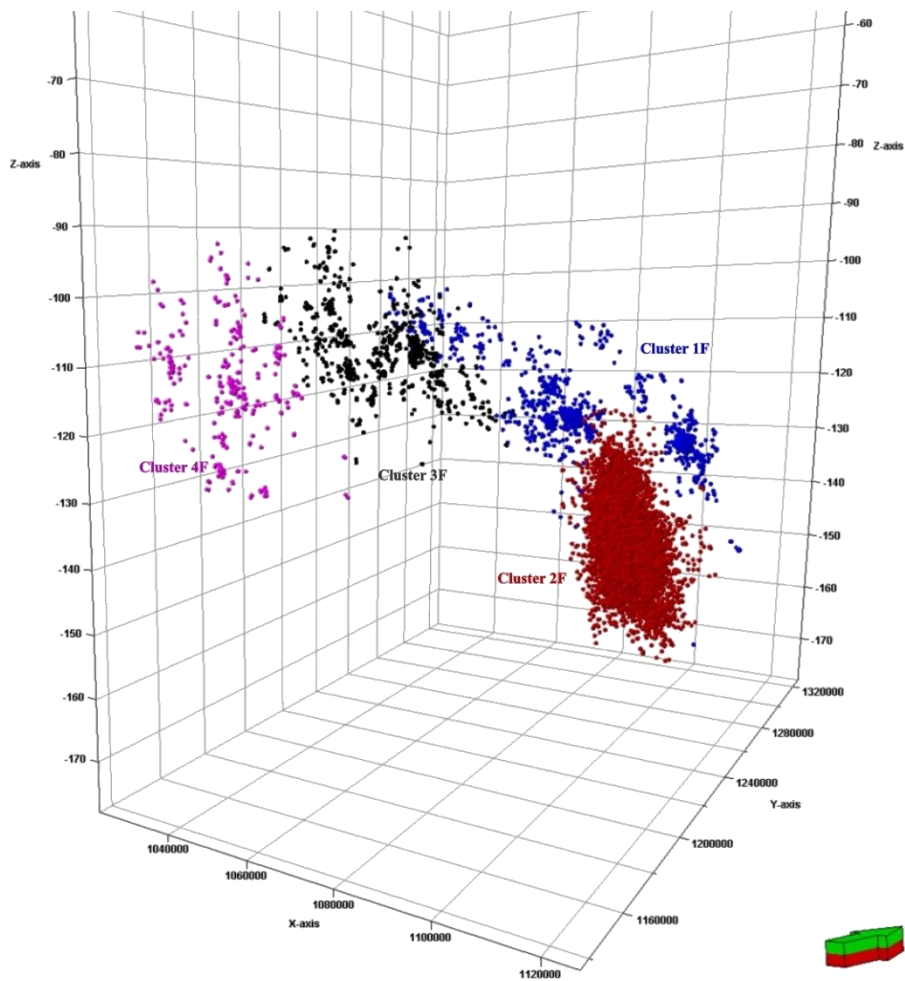
Clúster	Mc	b-value	Error b-value	a-value
1	2.1	1.38	± 0.08	5.275
2	2.1	1.34	± 0.05	5.438
3	2.1	1.06	± 0.01	6.524
4	2.1	1.08	± 0.05	4.812
5	2.1	1.12	± 0.06	4.699
6	2.1	1.44	± 0.08	5.387

Nota. Debido a la similitud en todos los parámetros de sismicidad entre los clústeres 1 y 2; 4 y 5, se decidió agruparlos para obtener una clasificación final en base a localización de hipocentros y valores de sismicidad. En todos los escenarios se identificó una magnitud de completitud de 2.1. El Clúster 3 se asocia al NSB.

El catálogo de sismicidad unificado integraba múltiples tipos de magnitudes, con predominancia de magnitudes locales (MI) y de cuerpo (Mb). Para homogeneizar los análisis sísmicos, se llevó a cabo una regresión lineal para ajustar calcular la relación entre tipos de magnitudes y convertir las magnitudes locales a magnitudes de cuerpo.

Figura 22.

Definición de clústeres finales en base a localización y sismicidad

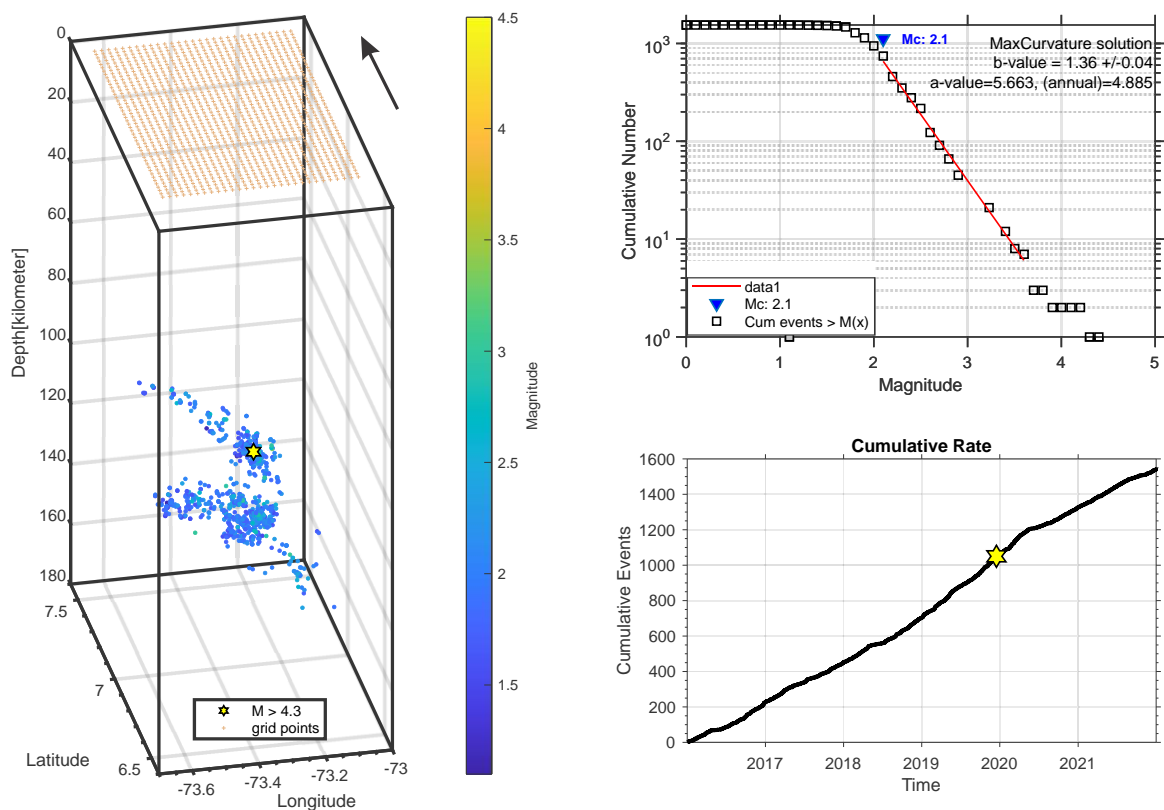


Nota. Los cuatro clústeres finales (1F, 2F, 3F y 4F) responden a los criterios de ubicación de hipocentros y parámetros de sismicidad.

Al analizar la ley Gutenberg – Richter para el conjunto de eventos del Cluster 1F (**Figura 23**), se encontró un b-value de 1.36 con incertidumbre de 0.04. Lo anterior indica una predominancia de terremotos de mayor magnitud ($M > 3.6$) en comparación de los terremotos de menor magnitud. Asimismo, el moderado valor de a-value (5.663) puede implicar una actividad sísmica promedio en comparación de otras áreas.

Figura 23.

Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 1F

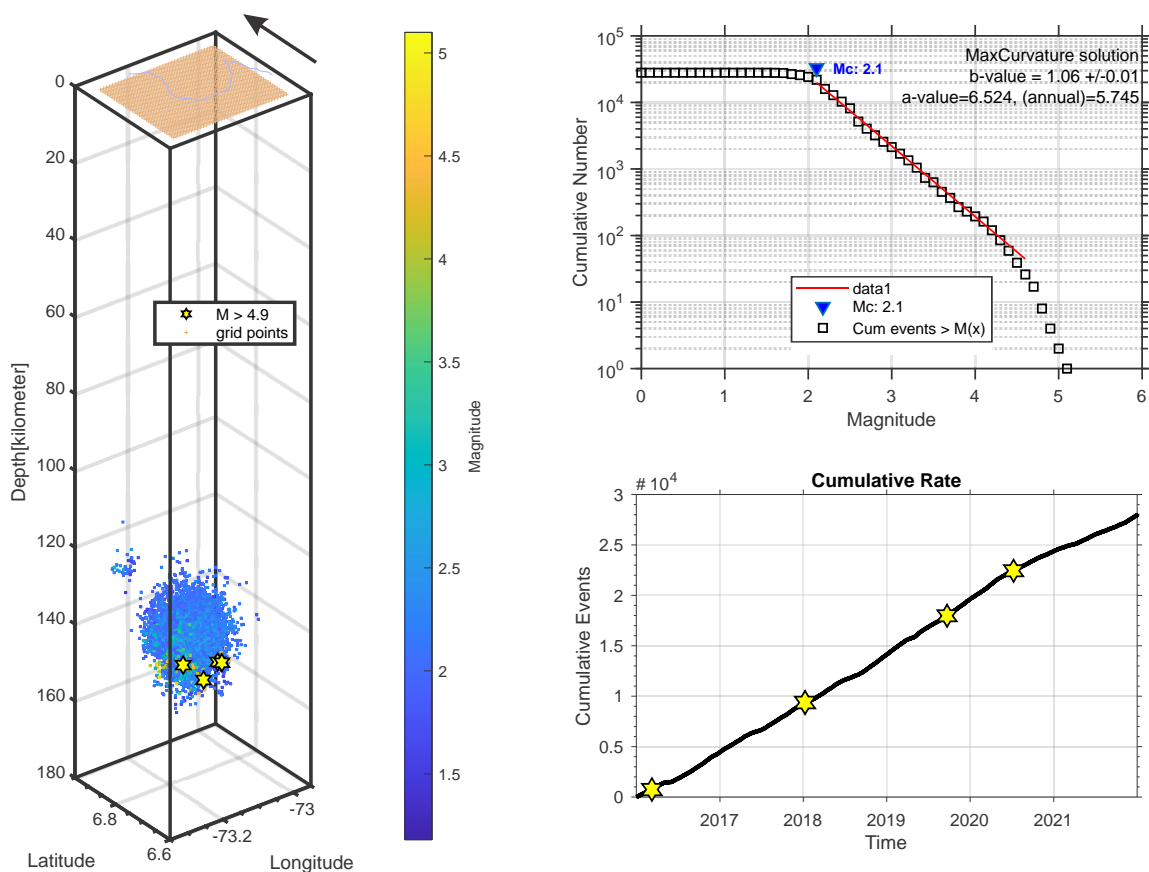


Nota. El Cluster 1F responde a los criterios de localización y parámetros de sismicidad y agrupa a los clústeres 1 y 2 de la sección anterior (únicamente localización).

El Clúster 2F (**Figura 24**) corresponde al Nido Sísmico de Bucaramanga y es la agrupación con mayor número de eventos de este trabajo de investigación. Se encontró un b-value cercano a 1 (1.06) con baja incertidumbre (0.01), lo cual es indicador de distribución equilibrada de sismos de alta y baja magnitud. Además, presenta el a-value más alto entre todos los grupos (6.524), asociado a la gran cantidad de energía liberada por eventos sísmicos del NSB.

Figura 24.

Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 2F

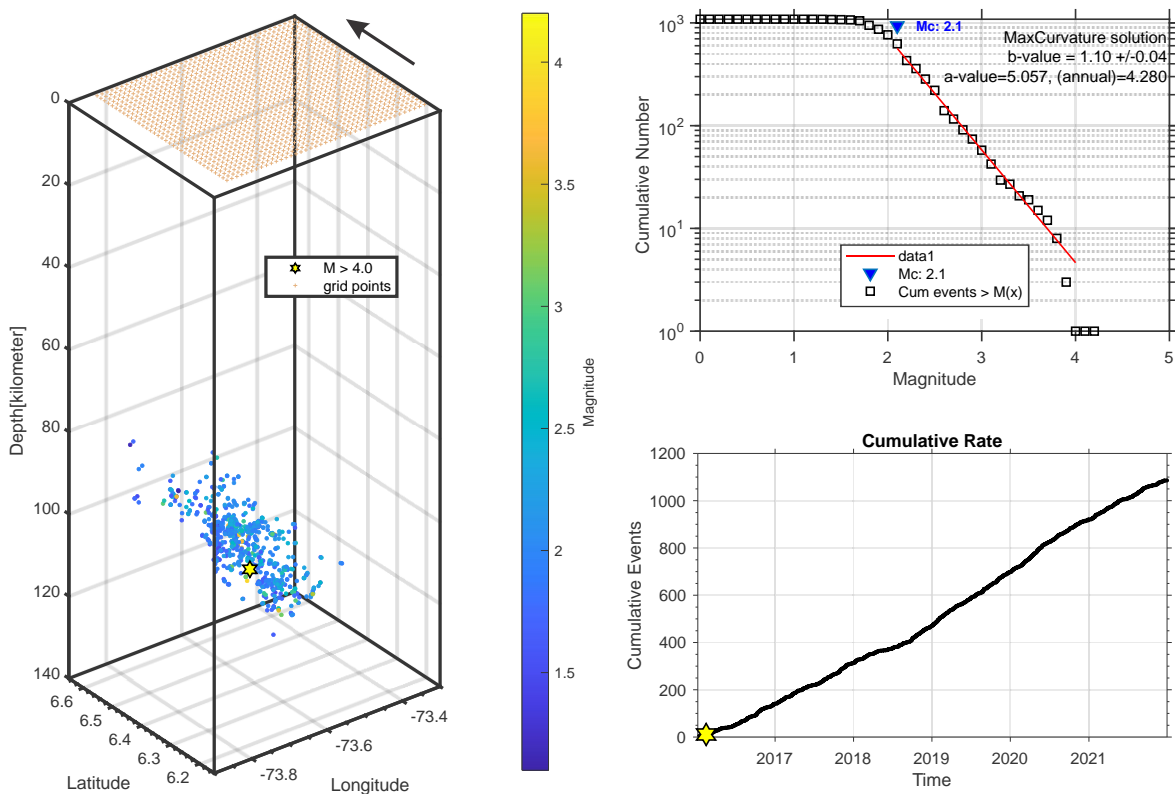


Nota. El Cluster 2F responde a los criterios de localización y parámetros de sismicidad y corresponde al Nido Sísmico de Bucaramanga.

Con respecto al Clúster 3F (**Figura 25**), ubicado en el límite sur del Nido Sísmico de Bucaramanga, se observa un aumento del b-value acompañado de una disminución del a-value. Se calculó un b-value de 1.10, lo que sugiere una distribución equilibrada entre sismos de alta y baja magnitud en esta región. La reducción del a-value a 5.057 podría atribuirse a una menor actividad sísmica y, por ende, a una liberación de energía menor en comparación con otras áreas.

Figura 25.

Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 3F

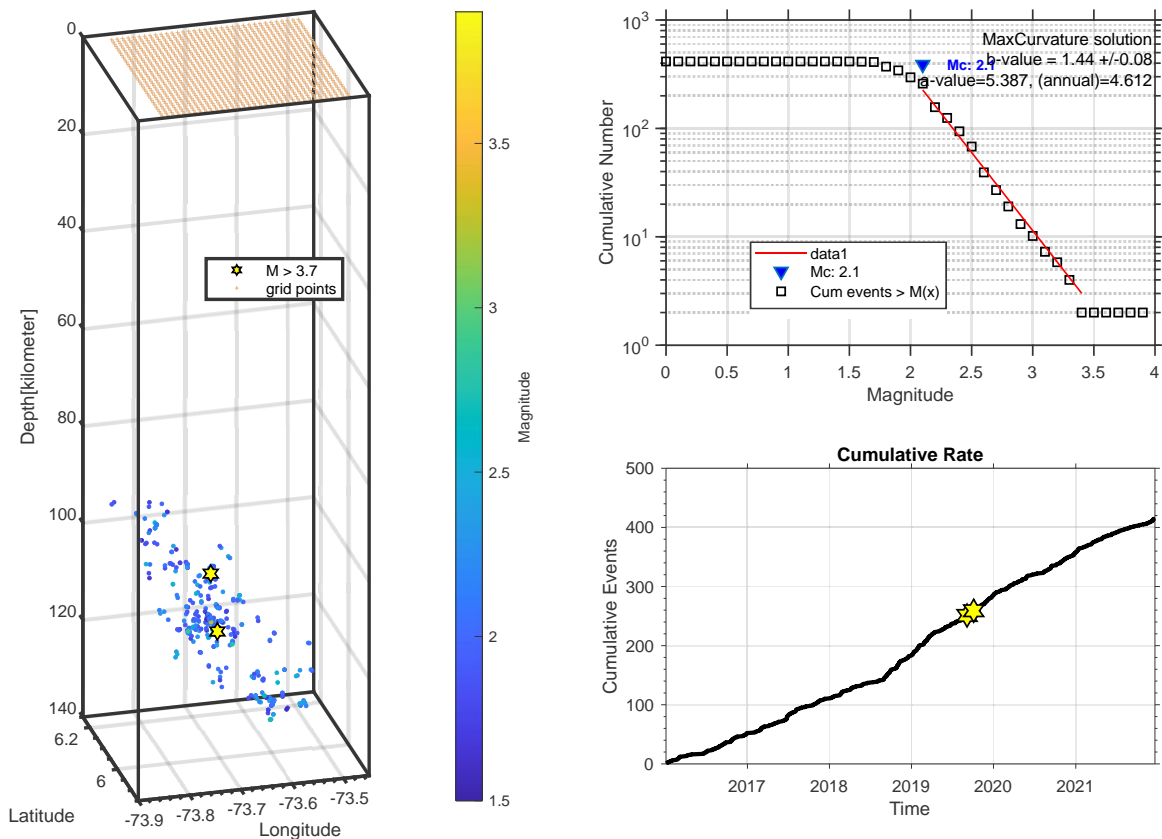


Nota. El Cluster 3F responde a los criterios de localización y parámetros de sismicidad y agrupa a los clústeres 4 y 5 de la sección anterior (únicamente localización).

En la zona más hacia el sur, relacionada con el Clúster 4F (**Figura 26**), aumenta el b-value a 1.44 (margen de error de 0.08). Esto indica predominancia de sismos de mayor magnitud ($M > 3.4$) con respecto a sismos de menor magnitud. Asimismo, se encontró un a-value de 5.387 considerado como moderado por actividad sísmica promedio. En términos generales se identifican ciertas similitudes en los parámetros de sismicidad del Clúster 4F con el Clúster 1F, ya que presentan distanciamiento al NSB.

Figura 26.

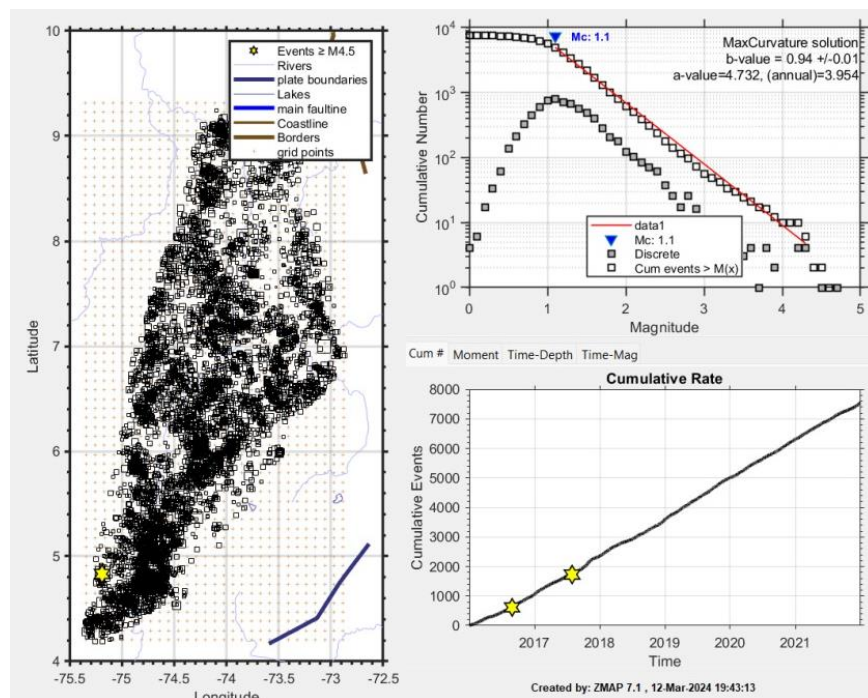
Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad del Clúster 4F



Al comparar los resultados anteriores (clústeres de sismos profundos) con los parámetros de sismicidad en sismos someros (**Figura 27**), se identifica una disminución del b-value a 0.94 (incertidumbre de 0.01), indicando predominancia de sismos de menor magnitud con respecto a sismos de mayor magnitud. La disminución del a-value se asocia la baja tasa de actividad sísmica con respecto a los clústeres de sismos profundos. El M_c es 1.1, lo cual sugiere una mayor confiabilidad en la detección de sismos de baja magnitud. La **Tabla 8** sintetiza los resultados finales de los análisis de la ley Gutenberg – Richter para sismos profundos y someros.

Figura 27.

Ley Gutenberg – Richter y parámetros de sismicidad de sismos someros



Nota. El análisis de la ley GR para sismos someros se realizó con el catálogo de sismos no relocados debido a la poca cantidad de información de sismos relocados menores a 50 km de profundidad.

Tabla 8.*Síntesis de los parámetros de sismicidad (ley GR) de sismos someros y profundos*

Clúster	Mc	b-value	Error b-value	a-value
1F	2.1	1.36	± 0.04	5.663
2F	2.1	1.06	± 0.01	6.524
3F	2.1	1.10	± 0.04	4.280
4F	2.1	1.44	± 0.08	5.387
Someros	1.1	0.94	± 0.01	4.732

Nota. Los clústeres 1F, 2F, 3F y 4F corresponden a sismos profundos.

6. Discusión

El presente trabajo de investigación ha integrado herramientas de programación y aprendizaje profundo a la rama de la sismología. Se observa que PhaseNet cuenta con un rendimiento notable en la detección de fases sísmicas, logrando identificar al menos una fase sísmica en el 96% de los eventos someros y el 98% de los eventos profundos del catálogo unificado de sismicidad. Sin embargo, se identifica una oportunidad de mejora en el rendimiento del algoritmo GrowClust, especialmente en la interpretación de estructuras superficiales mediante la relocalización de eventos someros ya que, para los datos de estudio, se lograron relocalizar el 15% de los eventos someros y el 50% de los eventos profundos. Lo anterior puede relacionarse con la poca densidad de estaciones sismológicas cercanas al VMM y NSB y se espera una mejora significativa al integrar la información obtenida durante la nueva campaña de instalación de estaciones en VMM.

Los resultados obtenidos tras la ejecución de los algoritmos mencionados, junto con el mapeo de hipocentros, proporcionan una visión de la geometría de la placa de Nazca, partiendo del supuesto de que los sismos profundos en la zona de estudio tienen su origen en el contacto entre esta placa y la placa Sudamericana. Se observan similitudes con la propuesta de 'slab tear' de [Chiarabba et al. \(2015\)](#), donde se aprecia un cambio en la orientación de la placa de Nazca tanto por encima como por debajo de una línea de orientación W – E (**Figura 16**), lo cual puede relacionarse con una ruptura que altera la geometría de la placa, incrementando su inclinación de aproximadamente 30° en la sección norte a unos 40° en la sección sur (**Figura 18**).

Además, al analizar los resultados de agrupación, se observa un incremento en la inclinación de la placa de Nazca, alcanzando más de 53° a una profundidad de aproximadamente 125 km, sugiriendo la presencia de una ruptura en la placa. En contraste a las conclusiones de

Zarifi et al. (2007), quienes sugieren que el NSB se encuentra en la losa norte, se propone que el NSB se origina justo debajo de la ruptura a los 125 km de profundidad y se asocia con el sector sur. De esta manera, las premisas de nuestro estudio sugieren que la placa de Nazca experimenta dos cambios en su geometría en la zona de estudio: una ruptura siguiendo una línea de orientación W – E, y otra ruptura por debajo de los 125 km (**Tabla 6**).

Los resultados del análisis de la ley GR también permiten identificar implicaciones sismotectónicas. En términos generales, los sismos superficiales asociados a la cuenca del VMM muestran un valor de b inferior a 1 y una magnitud de completitud cercana a 1 (**Tabla 8**), coincidiendo con los análisis previos realizados por Londoño et al. (2019). Estos bajos valores de b en el VMM sugieren que la actividad sísmica está principalmente compuesta por eventos de pequeña magnitud, sin una presencia significativa de sismos de gran magnitud. Esto podría indicar un régimen tectónico activo, donde la deformación se acumula en fallas y se libera frecuentemente a través de sismos de baja magnitud.

Las diferencias entre los parámetros de sismicidad de los cuatro clústeres de sismos profundos indican claramente que el NSB (Clúster 2F) exhibe características particulares que lo distinguen de las tendencias sísmicas de las regiones cercanas. En este estudio, se calculó un b -value de 1.06 y un a -value de 6.524 para el NSB, lo que sugiere una distribución equilibrada de sismos de diversas magnitudes, un rasgo típico de áreas tectónicamente estables. Los valores obtenidos difieren de los presentados en estudios como Frohlich et al. (1995) y Frohlich & Nakamura (2009), posiblemente debido al uso de diferentes tipos de magnitud en el cálculo de los parámetros.

7. Conclusiones

Este trabajo de investigación ha proporcionado una visión integral de la sismicidad y sismotectónica en la cuenca del Valle Medio del Magdalena y el Nido Sísmico de Bucaramanga, utilizando técnicas avanzadas de aprendizaje profundo y análisis sísmicos.

Se unificó un catálogo de sismicidad mediante la recopilación de eventos de diferentes fuentes de información nacionales (SGC) e internacionales (ISC). Asimismo, se detectaron tiempos de arribo de fases sísmicas mediante la aplicación de PhaseNet, encontrando al menos una fase de aproximadamente el 97% de los eventos del catálogo de sismicidad unificado. Se demuestra la confiabilidad de ejecución del algoritmo a los datos de estudio por las altas distribuciones de probabilidad de ondas P (aproximadamente 98%) y moderadas de onda S (30 al 75%).

GrowClust ha demostrado ser una herramienta muy efectiva para la relocalización relativa de sismos de profundidad intermedia, incluso cuando se cuenta con un número limitado de estaciones. Se logró mitigar el efecto de la cuadrícula en aproximadamente el 50% de los eventos con profundidades superiores a 50 km, permitiendo además la agrupación de los hipocentros en seis clústeres basados en su nueva localización.

Por otra parte, es trascendental instalar nuevas estaciones sismológicas cerca de la zona de estudio, dada la importancia del Nido Sísmico de Bucaramanga y la cuenca del Valle Medio del Magdalena para comprender el tectonismo en el extremo noreste de Sudamérica. Esto se vuelve aún más crucial para lograr la relocalización de sismos someros asociados a fallas superficiales, los cuales no son capturados de manera precisa con el limitado número de estaciones sismológicas actualmente disponibles.

El análisis del mapeo de eventos sísmicos permitió proponer una geometría para la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta propuesta se fundamenta en la identificación de una ruptura en la placa que se extiende en dirección W – E, provocando un cambio en su orientación e inclinación. Además, se destacó la presencia de otra ruptura a una profundidad aproximada de 125 km, la cual origina el Nido Sísmico de Bucaramanga en la sección sur y ocasiona un significativo incremento en la inclinación de la placa de Nazca en sus secciones más profundas.

Por último, los eventos sísmicos relocalizados en profundidad fueron agrupados en cuatro clústeres finales, utilizando criterios de ubicación y parámetros de sismicidad obtenidos mediante ZMAP, así como conversiones de magnitud a Mb. Para el Nido Sísmico de Bucaramanga, se identificaron b-values de 1.06, a-values de 6.524 y magnitud de completitud de 2.1 (ambiente tectónico estable dominado por sismos en el contacto de placas). En el caso de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, predominan los sismos someros, con un b-value de 0.94, a-value de 4.732 y Mc de 1.1 (régimen tectónico activo dominado por fallas).

8. Datos y Recursos

Los catálogos de sismicidad nacionales utilizados en este trabajo se encuentran abiertos al público en la página del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en <http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php> y el catálogo internacional del International Seismological Centre Bulletin está disponible en <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/>.

La descarga masiva de formas de onda por estación se realizó implementando un script de Obspy a los datos de la página del SGC: <http://sismo.sgc.gov.co:8080/fdsnws/dataselect/1/builder>.

El script en Python y la documentación de la red neuronal profunda de PhaseNet se encuentra en el siguiente repositorio de GitHub: <https://github.com/AI4EPS/PhaseNet/blob/master/docs/README.md>

El makefile de Fortran y la documentación del algoritmo de relocalización GrowClust se encuentra en el siguiente repositorio de GitHub: <https://github.com/dttrugman/GrowClust>

Se organizó un repositorio público de GitHub donde se encuentran los códigos programados y el catálogo final con sismos relocalizados y no relocalizados en formato .csv. Se define una columna denominada nbrach. Cuando nbrach = 1, el evento no se relocalizó. Cuando nbrach > 1, el evento se relocalizó: https://github.com/cvergara3/seismology_thesis_vmm_nsb.git

Referencias Bibliográficas

- Akazawa, T. (2004). Technique for automatic detection of onset time of P- and S-phases in strong motion records. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver. Vol. 786, pp. 786.
- Allen, R. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 68, No. 5, p. 1521–1532. <https://doi.org/10.1785/BSSA0680051521>.
- Cheng, W., Liu, L. & Wang, G. (2021). A new method for estimating the correlation of seismic waveforms based on the NTFT. Geophysical Journal International, Vol. 226, Issue 1, p. 368 – 376. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab047>.
- Chiarabba, C., De Gori, P., Faccenna, C., Speranza, F., Seccia, D., Dionicio, V., & Prieto, G. (2016). Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol. 17, p. 16-27. <https://doi.org/10.1002/2015GC006048>.
- Chicangana, G. & Vargas, C. (2008). Seismotectonic analysis of the Bucaramanga Seismic Nest, Colombia. 7th International Symposium on Andean Geodynamics, p. 128 – 131.
- Cortés, M. & Angelier, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. Tectonophysics, Vol. 403, Issues 4 – 5, p. 29 – 58. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.03.020>.
- Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. & Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, Vol. 79, No. 10, p. 1421 – 1443.

- Earle, S. (2012). *Physical Geology – 2nd Edition*. Victoria, B.C. BCcampus.
- Efron, B & Tibshirani, R. (1995). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall, 430 p.
- Frohlich, C., Kadinsky-Cade, K. & Davis, S. (1995). A reexamination of the Bucaramanga Nest. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, p. 1622–1634.
- Frohlich, C. & Nakamura, Y. (2009). The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: how similar and how different? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 173, p. 365–374. <https://doi:10.1016/j.pepi.2009.02.004>.
- Godano, C., Lippiello, E. & de Arcangelis, L. (2014). Variability of the b value in the Gutenberg – Richter distribution. *Geophysical Journal International*, Vol. 199, Issue 3, p. 1765 – 1771. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu359>.
- Gómez, Y. (2015). *Análisis de Parámetros Sísmicos de Dos Series Ocurridas en el Sur y Este de España*. Universidad Politécnica de Madrid, 90 p.
- Koper, K., Pankow, K., Pechmann, J., Hale, J., Burlacu, R., Yeck, W., Benz, H., Herrman, R., Trugman, D. & Shearer, P. (2018). Afterslip enhanced aftershock activity during the 2017 earthquake sequence near Sulphur Peak, Idaho. *Geophysical Research Letters*. Vol. 45, Issue 11, p. 5352-5361.
- Kulkarni, S. (2002). *Frequency Domain and Fourier Transforms*. Lecture Notes for ELE201 Introduction to Electrical Signals and Systems, 21 p.
- Londoño, J., Bohórquez, O. & Ospina, L. (2010). Tomografía sísmica 3D del sector de Cúcuta, Colombia. *Boletín de Geología*. Vol. 32, No. 1, p. 107–124.
- Londoño, J. & Romero, J. (2017). Local magnitude scale for Valle Medio del Magdalena region, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 80, p. 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.033>.

- Londoño, J., Quintero, S., Vallejo, K., Muñoz, F. & Romero, J. (2019). Seismicity of Valle Medio del Magdalena Basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 92, p. 565 – 585. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.003>.
- Martinez, W., Rubio, W. & Taborda, A. (1988). Ideas sobre la Geología Estructural del Noreste de Colombia y su Relación con los Campos de Petróleo. *European Association of Geoscientists & Engineers*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.114.018>.
- Mendoza, A. (2012). Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 127 p.
- Mojica, J. & Franco, R. (1990). Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana*, No. 17, p. 41 – 64.
- Mousavi, S., Ellsworth, W., Zhu, W., Chuang, L., & Beroza, G. (2020). Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature communications*, Vol. 11, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>.
- Pardo, A., Barrero, D., Vargas, C. & Martínez, J. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. *Agencia Nacional de Hidrocarburos*, 92 p. <https://doi.org/10.1029/2020JB020693>
- Pennington, W. (1983). Role of shallow phase changes in the subduction of oceanic crust. *Science*, Vol. 220, p. 1045 – 1047. <https://doi.org/10.1126/science.220.4601.1045>.
- Prieto, G., Beroza, G., Barrett, S., López, G. & Florez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics* 570 – 571, p. 42 – 56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.019>.

- Ross, Z., & Ben-Zion, Y. (2014). Automatic picking of direct P, S seismic phases and fault zone head waves. *Geophysical Journal International*. Vol. 199, Issue 1, p. 368-381. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu267>.
- Shearer, P. (1997). Improving local earthquake locations using the L1 norm and waveform cross correlation: Application to the Whittier Narrows, California, aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), p. 8269–8283. <https://doi:10.1029/96JB03228>.
- Sheriff, R. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Vol. 13. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802969>.
- Skoumal, R., Kaven, J., Barbour, A., Wicks, C., Brudzinski, M., Cochran, E. & Rubinstein, J. (2020). The Induced Mw 5.0 March 2020 West Texas Seismic Sequence. *JGR Solid Earth*, Vol.126, Issue 1, p. 1 – 17.
- Skoumal, R., Kaven, J. & Walter, J. (2019). Characterizing seismogenic fault structures in Oklahoma using a relocated template-matched catalog. *Seismological Research Letters*, Vol. 90, No. 4, p. 1535–1543. <https://doi.org/10.1785/0220190045>.
- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19, Issue 5, p. 787–813. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>.
- Trugman, D. (2022). *GrowClust: A Computer Program for the Relative Relocation of Earthquake Hypocenters*. User Guide, Version 1.4, Nevada Seismological Laboratory, University of Nevada, Reno, 21 p.

- Trugman, D., Chamberlain, C., Savvaidis, A. & Lomax, A. (2023). GrowClust3D.jl: A Julia Package for the Relative Relocation of Earthquake Hypocenters Using 3D Velocity Models. *Seismological Research Letters* 2022, Vol. 94, No. 1, p. 443–456. <https://doi.org/10.1785/0220220193>
- Trugman, D., & Shearer, P. (2017). GrowClust: A hierarchical clustering algorithm for relative earthquake relocation, with application to the Spanish Springs and Sheldon, Nevada, earthquake sequences. *Seismological Research Letters*. Vol. 88, No. 2A, p. 379-391.
- van der Hilst, R. & Mann, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, Vol. 22, No. 5, p. 451–454. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022%3C0451:TIO%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022%3C0451:TIO%3E2.3.CO;2).
- Wiemer, S. (2001). A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72, No. 2, p. 373 – 382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>.
- Woessner, J. & Wiemer, S. (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, p. 684 – 698. <https://doi.org/10.1785/0120040007>.
- Zarifi, Z., Havskov J. & Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest. *Tectonophysics*, No. 443, p. 93 – 105. doi:10.1016/j.tecto.2007.06.004.
- Zhu, W. & Beroza, G. (2018). PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*, Vol. 216, Issue 1, p. 261–273. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy423>.

Apéndices

Apéndice A. Lista de estaciones sismológicas utilizadas con código y localización

Estación	Latitud	Longitud
URE	7.752	-75.533
VMM11	7.438	-73.571
PAM	7.34	-72.7
VMM05	7.907	-73.557
NOR	5.564	-74.869
PTB	6.54	-74.456
AGCC	8.512	-73.585
VMM10	6.767	-73.725
SPBC	5.652	-74.072
SNPBC	7.623	-74.046
GUY2C	5.224	-75.365
VMM09	7.127	-73.29
RUS	5.893	-73.083
VMM07	7.36	-73.852
EZNC	7.626	-73.317
ZAR	7.492	-74.858
HEL	6.191	-75.529
CHI	4.63	-73.737
OCA	8.239	-73.319
VMM12	8.086	-73.889
YPLC	5.397	-72.38
BAR2	6.592	-73.182
BRJC	6.973	-73.744
CVER	4.521	-74.074

Apéndice B. Parámetros de construcción de tabla de tiempos de viaje

Parámetro	Valor	Descripción (Trugman & Shearer, 2017)
vpvs_factor	5.31	Relación Vp/Vs
rayparam_min	0.0	Parámetro mínimo de rayo (fase P) para cálculos de tiempo de viaje
tt_dep0	0	Profundidad mínima de los eventos
tt_dep1	220	Profundidad máxima de los eventos
tt_ddep	2	Espaciamiento en profundidad
tt_del0	0	Distancia X mínima (evento – estación)
tt_del1	950	Distancia X máxima (evento – estación)
tt_ddel	2	Espaciamiento en distancia X

Apéndice C. Parámetros de configuración de tolerancia del algoritmo GrowClust

Parámetro	Valor	Descripción (Trugman & Shearer, 2017)
rmin	0.0	Coefficiente mínimo de correlación cruzada
delmax	9000	Distancia máxima de estación para uso de tiempo diferencial
rmsmax	10	Máximo residual de tiempo diferencial RMS para cluster
rpsavgmin	0	Mínimo coeficiente de correlación cruzada promedio para mantener par
rmincut	0	Mínimo coeficiente de correlación cruzada para mantener tiempo diferencial
ngoodmin	1	Mín. número de tiempos diferenciales con $xcor\ r \geq rmin$ para mantener par
iponly	0	(0 o 2) para mantener tiempos diferenciales de fases P y S; o (1) solo fase P