



Vigilada Mineducación

**ANÁLISIS DE LAS EVIDENCIAS DE MIGRACIÓN DEL MAGMATISMO DE ARCO EN EL
OCCIDENTE COLOMBIANO DURANTE EL CRETÁCICO SUPERIOR**

**Analysis of the evidences of arc magmatism migration in Western Colombia during the Upper
Cretaceous**

Maria Fernanda Alzate Giraldo

Proyecto de grado

Asesor

Camilo Bustamante Londoño

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA

GEOLOGÍA

MEDELLÍN

2023

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 4 |
| ABSTRACT | 4 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 2. GENERALIDADES..... | 9 |
| 2.1 PREGUNTA..... | 9 |
| 2.2 HIPÓTESIS | 9 |
| 3. OBJETIVOS..... | 9 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | 9 |
| 4. METODOLOGÍA | 9 |
| 5. RESULTADOS | 10 |
| 5.1 DIGITALIZACIÓN DE DATOS GEOCRONOLOGÍA U/PB | 10 |
| 5.2 GEOQUÍMICA | 12 |
| 6. DISCUSIÓN..... | 14 |
| 7. CONCLUSIÓN | 19 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 20 |
| ANEXOS..... | 27 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Modelo de evolución tectónica del Noroccidente de los Andes durante el Cretácico tardío al Paleoceno. Tomado de Botero et al. (2023)..... | 7 |
| Figura 2. Mapa de localización de las rocas de afinidad oceánica y continental separadas por el Sistema de Fallas Romeral, a lo largo de la Cordillera Occidental y Central. Modificado de Bustamante et al. (2017)..... | 8 |
| Figura 3. A. Mapa de distribución de las edades U/Pb de rocas ígneas cretácicas presentes en el occidente colombiano. B. Diagrama Edad de cristalización de los cuerpos ígneos vs distribución geográfica (longitud). Elaboración propia a partir de la geocronología U/Pb tomada de Rodríguez et al. (2023), Ordóñez et al. (2011), Leal (2011), Agencia Nacional de Hidrocarburos & Universidad de Caldas (2011) y Zapata (2013), unidades y fallas geológicas tomadas del Servicio Geológico Colombiano (2020)..... | 12 |
| Figura 4. Diagrama de Ba/LA vs Th/Yb de las muestras obtenidas de las rocas ígneas analizadas a lo largo de este trabajo. Elaboración propia a partir de la geoquímica tomada de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005), Rodríguez et al. (2012a; 2012b) y las relaciones geoquímicas de Woodhead et al. (2001). | 13 |
| Figura 5. Diagrama de Rb/Zr vs Nb de las muestras obtenidas de las rocas ígneas analizadas a lo largo de este trabajo. Elaboración propia a partir de la geoquímica tomada de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005), Rodríguez et al. (2012a; 2012b) y las relaciones geoquímicas de Brown et al. (1984). | 14 |
| Figura 6. Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de la Tonalita de Buriticá y el Batolito de Santa Fe. Elaboración propia a partir de datos isotópicos tomados de Weber et al. (2015). | 16 |
| Figura 7. Sección esquemática, distancia vs profundidad, de una zona de subducción y sus partes (trincheras, antearco, arco magmático y retroarco). Tomado de Stern (2010). | 17 |

Resumen

A lo largo de la Cordillera Occidental se encuentran, separadas por el Sistema de Fallas Romeral, rocas de afinidad oceánica al oeste y de afinidad continental al este, producto de las interacciones entre las placas Caribe, Farallón y Suramericana. Estas rocas presentan edades en el rango desde el Cretácico Superior hasta el Paleógeno Inferior, lo que implica que la formación de estos cuerpos ígneos plutónicos se dio de manera simultánea, y de dos arcos magmáticos de diferentes fuentes. La evolución tectónica de esta zona aún no es totalmente clara, ya que se plantean dos modelos geológicos donde se tienen dos ambientes de subducción de distinta distribución espacial, debido a que se propone que ambas están inclinadas hacia el este, o que una de ellas se encuentra buzando hacia el oeste. [Rodríguez et al. \(2023\)](#) proponen que, mediante el estudio de edades de cristalización de los cuerpos ígneos presentes en la Cordillera Occidental, durante el Cretácico Superior hubo un evento de migración por subducción, y a raíz de esto sugieren que la distribución de ambas subducciones es hacia el este. En este trabajo se realizan análisis que demuestran que las condiciones no fueron propicias para la ocurrencia de tal evento.

Palabras claves: Sistema de arco intraoceánico, migración, zonas de subducción, erosión por subducción.

Abstract

Along the Western Cordillera are located rocks of oceanic affinity to the west, and rocks of continental affinity to the east, separated by the Romeral Fault System, as a product of interactions between the Caribbean, Farallon, and South American plates. These rocks present ages ranging from Upper Cretaceous to the Lower Paleogene, implying that the formation of these plutonic igneous bodies occurred simultaneously, originated from two distinct magmatic arcs. The tectonic evolution of this zone is not fully clear yet, as two geological models are proposed where there are two subduction environments of different spatial distribution, due to some authors suggest that both subductions are dipping to the east, while others suggest that one of them is dipping to the west. [Rodríguez et al. \(2023\)](#) propose that, through the study of crystallization ages of igneous bodies in the Western Cordillera, there was a subduction migration event during the Upper Cretaceous, and because of this, they suggest that the distribution of both

subductions is towards the east. This study includes analyses that demonstrate that the conditions at this time were not favorable for the occurrence of such event.

Key words: Intraoceanic arc system, migration, subduction zones, subduction erosion.

1. Introducción

El movimiento de las placas tectónicas ocasiona interacciones entre los bordes de estas modificando su disposición espacial a lo largo del tiempo, lo que resulta en la formación de diversos ambientes geológicos, como es el caso de los sistemas de arcos intraoceánicos. Los márgenes convergentes entre placas oceánicas generan arcos de islas, en donde la corteza oceánica más vieja ($> \sim 145$ Ma), subduce bajo la corteza oceánica más joven (Stern, 2010). Los sistemas de arco intraoceánico se producen si la subducción tiene velocidades mayores a 2cm a^{-1} durante el tiempo necesario para que la placa subducida alcance profundidades de 100 a 150 km, creando condiciones propicias para que el manto se funda parcialmente y se genere magmatismo (Stern, 2010).

Los arcos magmáticos son sistemas dinámicos, que a lo largo del tiempo pueden experimentar reconfiguraciones espaciales. Esto se debe a: i) la maduración del sistema de arco intraoceánico, donde la actividad ígnea está concentrada en la zona del frente volcánico (en los primeros Ma, esta actividad se concentra cerca al antearco) e incluso puede extenderse hasta el retroarco (Stern, 2010); y ii) a la migración del arco magmático, la cual se debe principalmente a los cambios de la cinemática de las placas tectónicas lo que genera cambios en la geometría de la subducción (Cross y Pilger, 1982) (cambios en el ángulo de la placa que subduce), y modificaciones en la placa superior (erosión de la subducción) (Stern, 2010; Gianni y Pérez, 2021).

La evolución tectónica durante el Cretácico Superior entre las placas Caribe, Farallón y Suramericana ha sido ampliamente discutida. Actualmente, estas interacciones se explican localmente mediante dos modelos geológicos evolutivos (Figura 1), en los que se proponen dos zonas de subducción con diferentes configuraciones: i) ambas subduciendo hacia el este (Taboada et al., 2000; Restrepo-Pace et al., 2004; Rodríguez et al., 2023), y ii) una subduciendo hacia el oeste y la otra hacia el este (Thompson et al., 2004; Villagómez et al., 2011; Villagómez y Spikings, 2013; Weber et al., 2015; Zapata et al., 2017; Zapata et al., 2018; León, 2022; Botero et al., 2023).

En la Cordillera Occidental de Colombia, el estudio de la geocronología de las rocas ígneas plutónicas sugiere dos fuentes de subducción que ocurrieron de manera simultánea (Villagómez y Spikings, 2013; Bustamante et al., 2016; Zapata et al., 2017; Botero et al., 2023), ya que a lo largo de esta se encuentran rocas intrusivas de afinidad oceánica (al oeste) y continental (al este), separadas por el Sistema de Fallas Romeral (Figura 2), con edades del Cretácico Superior y del Paleógeno Inferior (Bayona et al., 2012; Zapata et al., 2017; Botero et al., 2023). Rodríguez et al. (2023) proponen que, durante esta época, la tectónica estaba definida por la configuración de dos subducciones hacia el este, sustentada en la distribución espacial de las edades de cristalización de diferentes cuerpos ígneos que afloran en el occidente colombiano, los cuales, internamente, muestran algunas edades más jóvenes hacia el este. Con base en esto, dichos autores sugieren que las condiciones fueron propicias para que se produjera una migración del magmatismo en el arco intraoceánico. Sin embargo, dicho modelo no satisface las características de un arco que migra hacia el continente, como la creación de un nuevo arco, o la erosión de la margen continental, y destrucción del basamento más antiguo (Stern, 1991).

En este trabajo se realizará una revisión de las edades de cristalización de las rocas plutónicas localizadas a lo largo de la Cordillera Occidental, con el fin de determinar si la distribución de las edades de cristalización, que se dieron durante el Cretácico Superior y el Paleógeno Inferior, son suficientes para argumentar que existió la migración del arco magmático insular en el occidente colombiano.

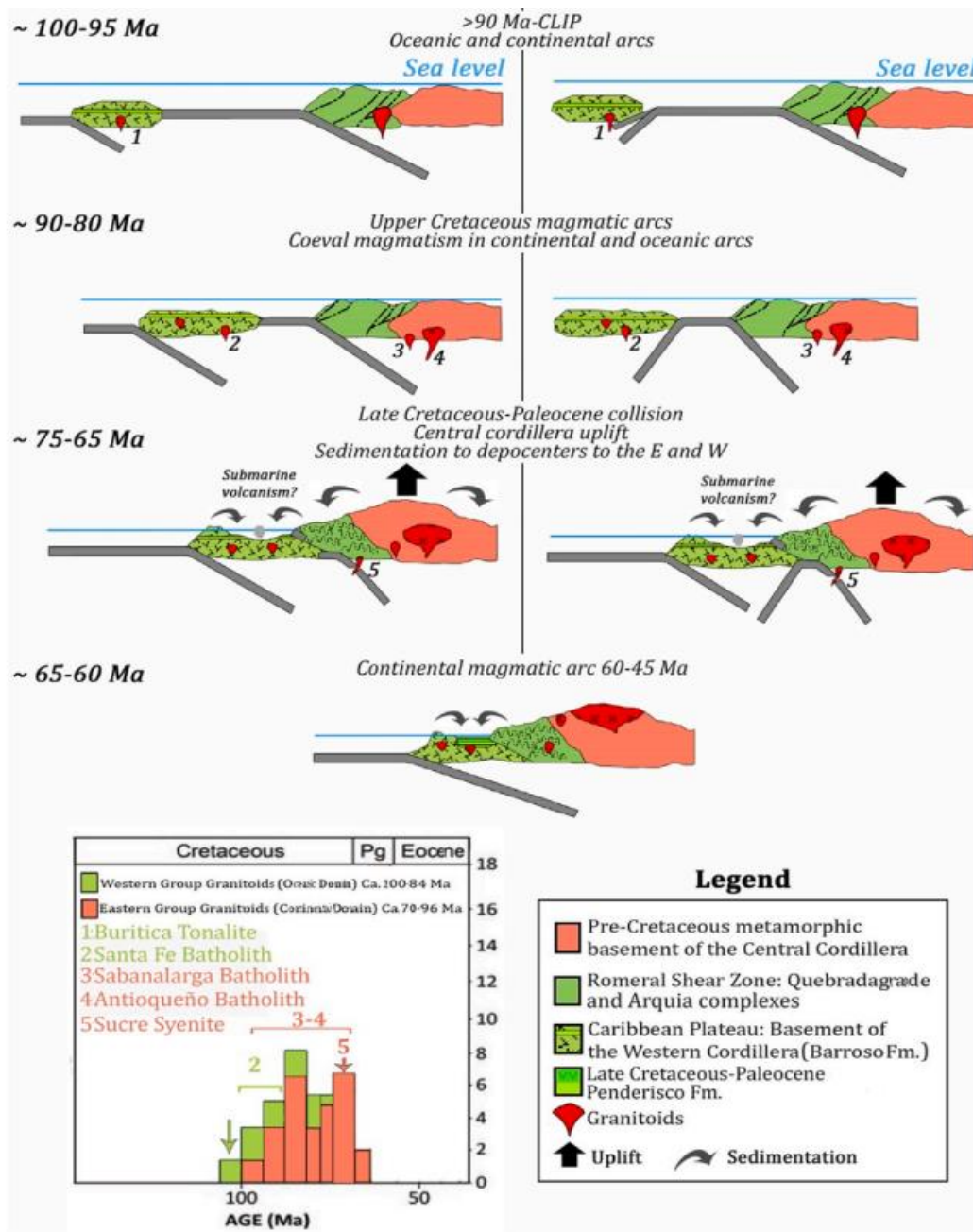


Figura 1. Modelo de evolución tectónica del Noroccidente de los Andes durante el Cretácico tardío al Paleoceno. Tomado de Botero et al. (2023).

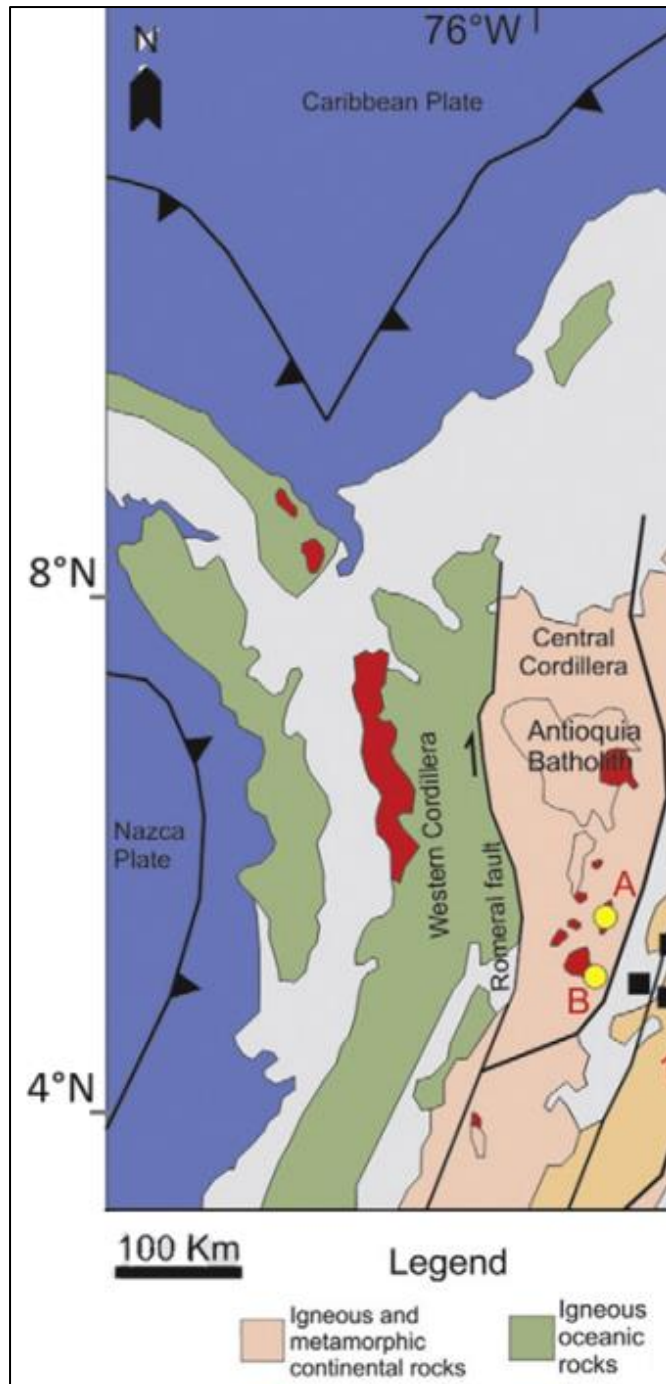


Figura 2. Mapa de localización de las rocas de afinidad oceánica y continental separadas por el Sistema de Fallas Romeral, a lo largo de la Cordillera Occidental y Central. Modificado de Bustamante et al. (2017).

2. Generalidades

2.1 Pregunta

¿Las condiciones tectónicas durante el Cretácico superior fueron propicias para que se produjera una migración del magmatismo en el arco intraoceánico que estuvo activo en el occidente de Colombia?

2.2 Hipótesis

La distribución de los datos de cristalización de las rocas ígneas, del arco insular Cretácico del occidente de Colombia, no se ajusta a un modelo de migración en el magmatismo hacia el este.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Determinar si es posible proponer una migración del arco magmático durante el Cretácico Superior y Paleógeno Inferior en el occidente colombiano, con base en la distribución espacial y temporal de los plutones que se encuentran a lo largo del occidente colombiano.

3.2 Objetivos específicos:

- Comprender la distribución espacial de las rocas ígneas plutónicas, por medio de sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de establecer relaciones entre posibles escenarios de formación.
- Determinar si la cristalización de las rocas ígneas, presentes en el occidente colombiano, se ajusta al modelo preexistente de migración de arco magmático propuesto por Rodríguez et al. (2023).
- Analizar si la geoquímica en roca total, especialmente en los elementos traza, es compatible con rocas que fueron sometidas a una migración en el magmatismo de arco por erosión por subducción.

4. Metodología

Se realizó una recopilación de información bibliográfica para tener un contexto de las condiciones tectónicas en el occidente colombiano durante el Cretácico Superior, con el fin de

analizar las diferentes propuestas evolutivas que muestran la configuración de las placas a lo largo del Cretácico Superior y el Paleógeno Inferior. Posteriormente, se compilaron 33 datos geocronológicos, en el rango entre 100 y 58 Ma, obtenidos mediante dataciones de U/Pb en circones procedentes de muestras de rocas ígneas plutónicas inalteradas teniendo en cuenta la distribución espacial y la representatividad de cada cuerpo. Por medio del programa ArcGIS Pro, se digitalizaron las edades de cristalización de las rocas, para realizar un análisis de su distribución espacial teniendo en cuenta las distancias máximas de separación entre ellas. Los datos geocronológicos de U/Pb en circones que se recopilaron y digitalizaron fueron tomados de muestras de la Tonalita de Buriticá, Tonalita La Noque, Gabro de Palmar, Andesita de Guarco, Gabro de Caicedo, Batolito de Buga, Granulita de Pantanillo, Formación Barroso, Tonalita de Sabaletas, Tonalita de Fondas, Batolito de Santa Fe (Rodríguez et al., 2023), Batolito de Santa Bárbara (Ordóñez et al., 2011), Stock de Irra, Plutón Jejenes (Leal, 2011), Stock de Mistrató (Agencia Nacional de Hidrocarburos & Universidad de Caldas, 2011), y el Gabro de Altamira (Zapata, 2013). Además, a partir de la geoquímica en roca total y datos isotópicos que fueron recopilados de 61 muestras tomadas de la Tonalita de Buriticá (Lesage, 2011; Weber et al., 2015; Zapata et al., 2017; Correa et al., 2018), el Batolito de Santa Fé (Geoestudios, 2005; Geoestudios, 2006; Lesage, 2011; Rodríguez et al., 2012a; Rodríguez et al., 2012b; Weber et al., 2015; Zapata et al., 2017; Correa et al., 2018), la Tonalita de La Noque y el Pórfido de Guarco (Correa et al., 2018), se realizaron diagramas para categorizar la madurez del sistema de arco intraoceánico y para analizar la influencia de los sedimentos o de los fluidos en la fusión parcial del manto.

5. Resultados

5.1 Digitalización de datos geocronología U/Pb

Al digitalizar las 33 edades de cristalización obtenidas mediante el método U/Pb que fueron recopiladas, del Cretácico Superior y Paleógeno Inferior, de las rocas ígneas intrusivas presentes en la Cordillera Occidental del arco insular (Anexo 1), se realizaron mediciones de las distancias de separación entre ellas. Como se observa en la Figura 3A, teniendo presente la baja precisión de las medidas al ser tomadas desde un sistema de información geográfica, la distancia máxima horizontal entre estas rocas es de 138.56 km, y la separación horizontal en el área donde más se encuentra la densidad de las muestras es de 21.9 km.

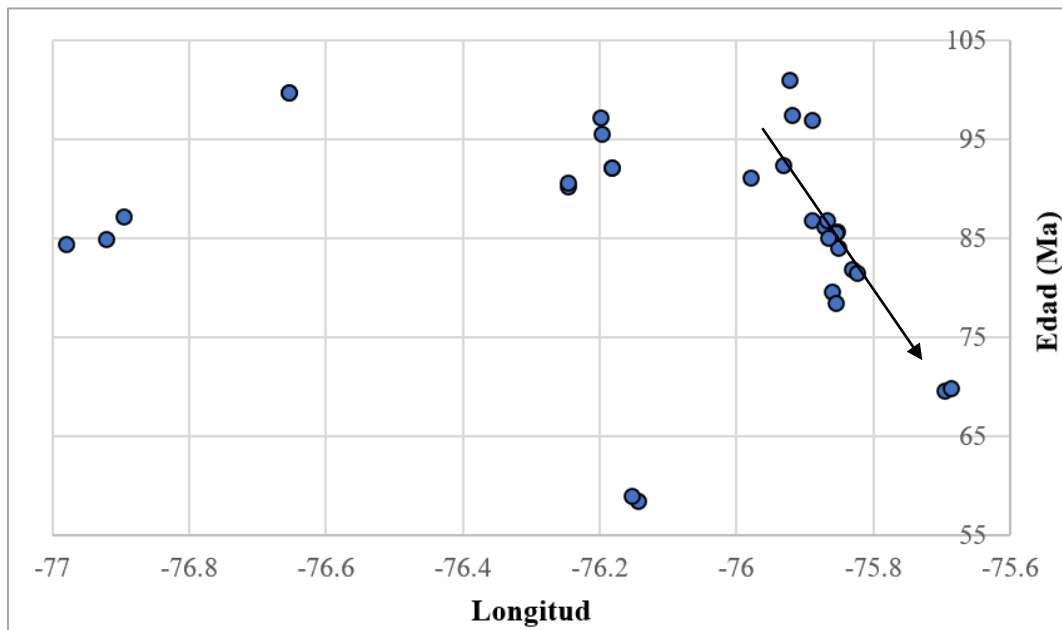
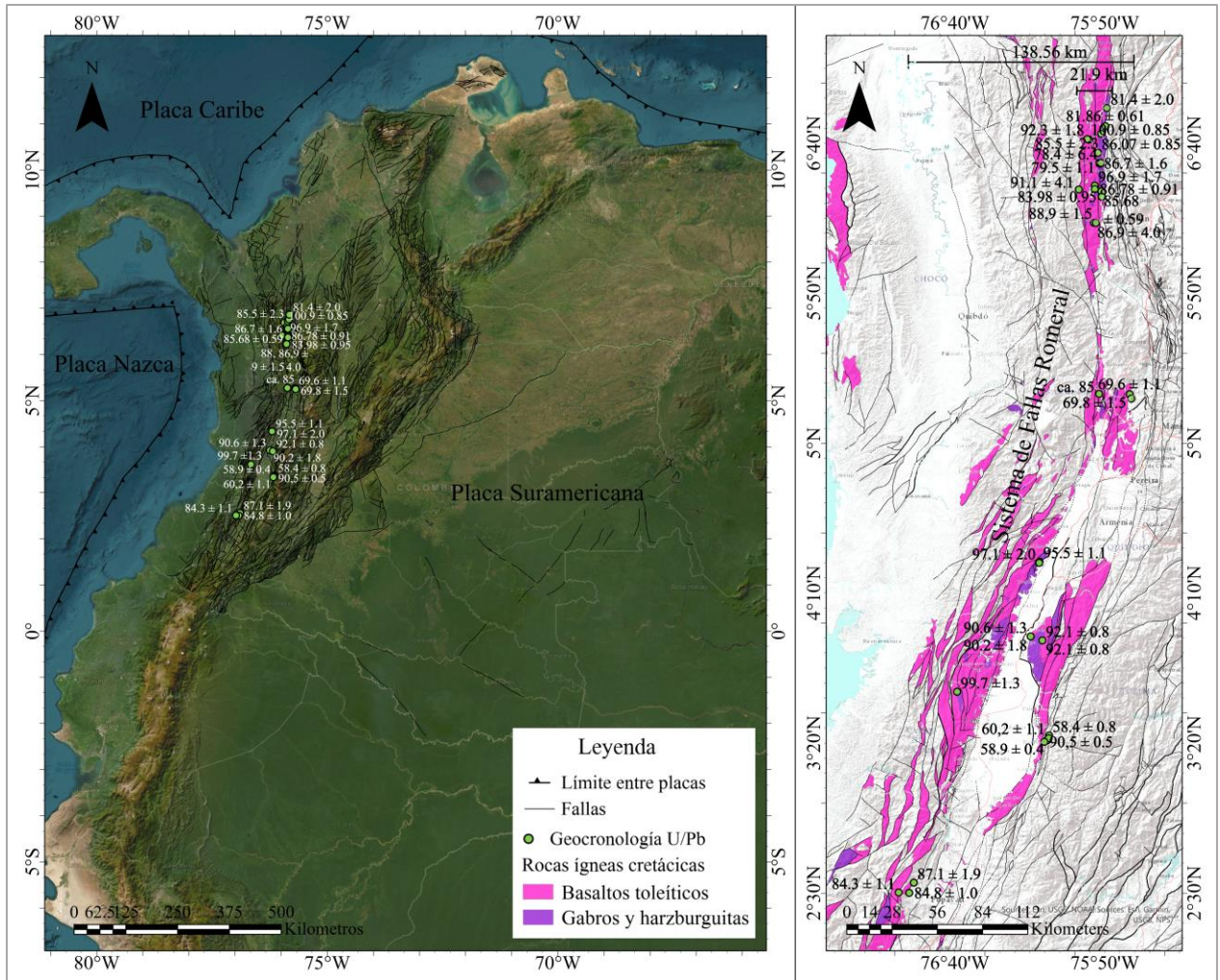


Figura 3. A. Mapa de distribución de las edades U/Pb de rocas ígneas cretácicas presentes en el occidente colombiano. **B.** Diagrama Edad de cristalización de los cuerpos ígneos vs distribución geográfica (longitud). Elaboración propia a partir de la geocronología U/Pb tomada de Rodríguez et al. (2023), Ordóñez et al. (2011), Leal (2011), Agencia Nacional de Hidrocarburos & Universidad de Caldas (2011) y Zapata (2013), unidades y fallas geológicas tomadas del Servicio Geológico Colombiano (2020).

Se realizó un diagrama donde se relacionó la edad de cristalización de cuerpos ígneos insulares estudiados con su distribución geográfica (longitud), para mayor facilidad en la interpretación de estas distribuciones (Figura 3B). A partir de este gráfico, se puede determinar que espacialmente no se observa una tendencia significativa donde las edades de cristalización de estas rocas aumenten o disminuyan en alguna dirección, excepto desde la longitud -76.00 hasta -75.65 aproximadamente, donde las edades de cristalización se vuelven menores hacia el este. Sin embargo, la distancia horizontal entre el dato más antiguo (100.9 ± 0.85 Ma) y el más joven (78.4 ± 6.4 Ma), de las muestras que presentan la tendencia, es de 7.08 km, y corresponden a la Tonalita de Buriticá y el Batolito de Santa Fe. En las longitudes que se encuentran más al oeste, desde -76.00 hasta -77.00, no se distingue un patrón definido que sugiera un rejuvenecimiento de las edades.

5.2 Geoquímica

Por medio de la geoquímica en roca total de 51 muestras, tomada de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005; 2006), Rodríguez et al. (2012a; 2012b) (Anexo 2), se elaboraron diagramas de elementos traza para determinar características que presentan los sistemas de arco intraoceánicos, como la incorporación de fluidos o sedimentos en la fuente del magma, y el nivel de madurez del arco magmático.

Los diagramas que relacionan los elementos Th/Yb vs Ba/La, se utilizan como indicadores para diferenciar si la fuente del magma tiene contribuciones de sedimentos o fluidos, ya que la tendencia de la incorporación de estos últimos en la subducción indica un fluido extremadamente homogéneo que contrasta con la variabilidad química que se observa en los sedimentos que están siendo subducidos (Woodhead et al., 2001). Estas relaciones se basan en que, los sedimentos y los fundidos derivados de ellos se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de Th/Yb, ya que estos elementos son inmóviles en los fluidos; mientras que el Ba es extremadamente móvil en comparación con el La, lo que significa que los fluidos derivados del *slab* tienden a mostrar altas concentraciones de Ba/La (Plank y Langmuir, 1998; Woodhead et al., 2001).

La Figura 4 evidencia que hay altas concentraciones de Ba/La, lo que indica que en la zona de subducción se tiene una mayor incorporación de fluidos derivados del *slab* que generaron la fusión parcial de las rocas, y no por los sedimentos subducidos.

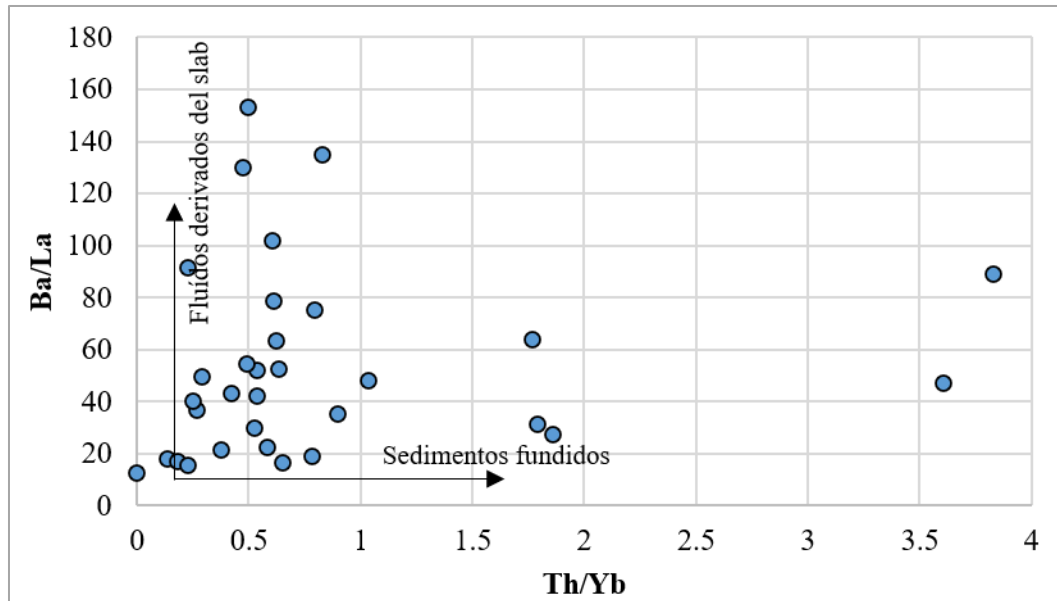


Figura 4. Diagrama de Ba/LA vs Th/Yb de las muestras obtenidas de las rocas ígneas analizadas a lo largo de este trabajo. Elaboración propia a partir de la geoquímica tomada de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005), Rodríguez et al. (2012a; 2012b) y las relaciones geoquímicas de Woodhead et al. (2001).

Los diagramas que relacionan a Rb/Zr vs Nb se utilizan para analizar el efecto de la cristalización fraccionada y la composición de la fuente (Brown et al., 1984). El aumento del Rb representa cristalización fraccionada, mientras que la cristalización fraccionada del Zr explica el valor constante o decrecimiento de este elemento con la madurez del arco, y como consecuencia, la concentración de Nb en una relación Rb/Zr podría reflejar la contribución de la fuente del manto hacia zonas más distales de la trinchera (Brown et al., 1984; Duque et al., 2019).

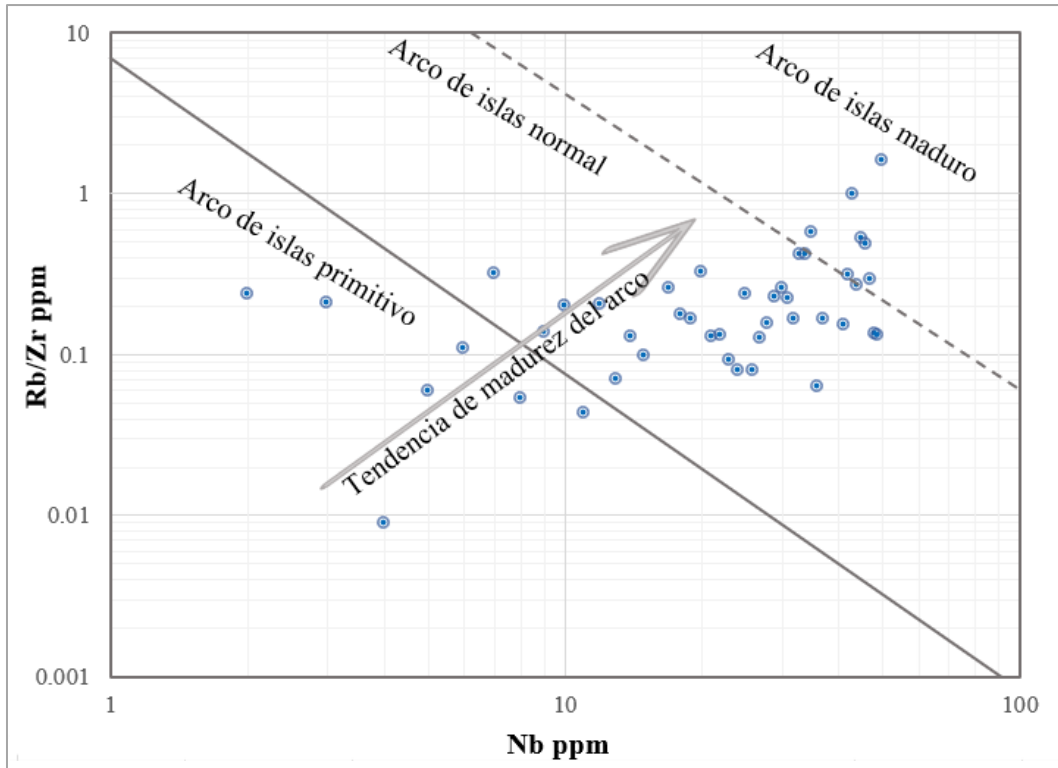


Figura 5. Diagrama de Rb/Zr vs Nb de las muestras obtenidas de las rocas ígneas analizadas a lo largo de este trabajo. Elaboración propia a partir de la geoquímica tomada de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005), Rodríguez et al. (2012a; 2012b) y las relaciones geoquímicas de Brown et al. (1984).

La Figura 5 muestra que la tendencia en el aumento, tanto en la relación Rb/Zr como en el Nb, sugiere un aumento de la madurez del sistema de arco intraoceánico, por lo que se podría esperar una participación del magmatismo más concentrada a lo largo del frente volcánico e incluso en el retroarco.

6. Discusión

Por medio de los datos compilados, se demuestra que la tendencia de la distribución de las edades de cristalización no permite concluir la ocurrencia de un evento de migración de magmatismo a lo largo del occidente colombiano durante el Cretácico Superior y el Paleógeno inferior, y que el estudio de la distribución de las edades de cristalización de los cuerpos ígneos oceánicos no es suficiente para argumentar la existencia de este fenómeno.

Rodríguez et al. (2023) proponen que en esta época hubo un evento de migración de arco magmático a lo largo del occidente colombiano, lo cual utilizan como argumento para soportar la

configuración tectónica de dos zonas de subducción simultáneas hacia el este, sustentada en la distribución espacial de las edades de cristalización de diferentes rocas ígneas que se encuentran a lo largo de esta zona. Esta hipótesis es dada principalmente a partir del estudio geocronológico U/Pb en circones de las rocas mencionadas anteriormente, pero sin considerar la paleogeografía, ya que no se tiene en cuenta las condiciones tectónicas que se dieron durante el Cretácico Superior y tampoco que actualmente la zona se encuentra altamente fallada. Como resultado no se realizó un análisis significativo de las modificaciones estructurales y espaciales que afectaron los cuerpos ígneos que se encuentran a lo largo de la Cordillera Occidental, al ser sometidos a procesos de acreción y fragmentación debido a la interacción entre las placas tectónicas y que finalmente esto contribuyó a la configuración espacial actual de estas rocas (Montes et al., 2019). Para que esta reconfiguración espacial del arco magmático se presente en sentido oeste-este, debió ocurrir una erosión de la subducción, lo que conlleva a un colapso de la corteza del antearco en el canal de la subducción (Stern, 2020), lo que se evidenciaría en la geoquímica de estos cuerpos ígneos.

Cuando la fuente del manto de los magmas está relacionada con la deshidratación de la placa inferior de la zona de subducción, hidratando la placa superior, la geoquímica de la roca muestra un enriquecimiento de elementos solubles en fluidos acuosos, como el Ba, Rb y Sr, y relativamente bajo contenido de elementos menos móviles, como el Ti, Zr y Hf (Stern, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 4 se evidencia que las rocas ígneas estudiadas presentan señales geoquímicas que indican que la fusión parcial del manto se da predominantemente por el contenido de fluidos en el *slab*, y no por una gran cantidad de sedimentos en este. Si la zona frontal de la placa que está siendo subducida se estuviera erosionando significativamente, se generaría un colapso de la estructura del borde del antearco, que ocasionaría que una gran cantidad de sedimentos entre al canal de la subducción (Stern, 2020), lo cual se debería reflejar en la geoquímica de las muestras de las rocas estudiadas, con un incremento en la cantidad de contaminación en la fuente del subarco por la incorporación de la corteza del antearco en la cuña del manto, y se evidenciaría en composiciones más evolucionadas según los isótopos de Sr y Nd (Stern, 2010). Sin embargo, Weber et al. (2015) presentan 10 resultados isotópicos de muestras del Batolito de Santa Fé y la Tonalita de Buriticá (Anexo 3), en donde se observan valores entre 0.5129 y 0.5130 de $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ y bajas proporciones de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Figura 6). Estos valores son contrarios a los que se esperaría durante un proceso de erosión por

subducción, ya que están más cercanos a una fuente de manto empobrecido, que no sufrió asimilación de corteza.

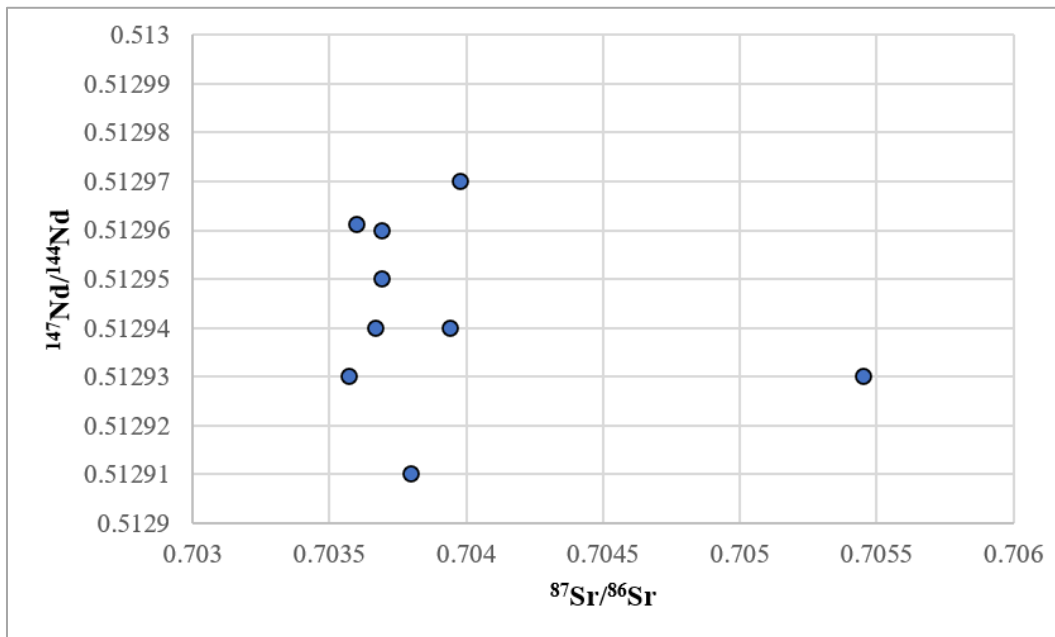


Figura 6. Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de la Tonalita de Buriticá y el Batolito de Santa Fe. Elaboración propia a partir de datos isotópicos tomados de Weber et al. (2015).

Además, la erosión por subducción típicamente ocurre en los márgenes de límites convergentes entre una placa continental y una oceánica (Stern, 1991), principalmente en zonas áridas donde hay menor cantidad de fluidos y sedimentos hidratados que no generan un efecto lubricante entre la interfaz de las placas (Stern, 2011). Para hacer un análisis de lo anterior, se debe tener presente la paleogeografía de los cuerpos ígneos que actualmente se encuentran localizados a lo largo de la Cordillera Occidental, y que, durante el Cretácico, hacían parte de un sistema de arco intraoceánico. En la Figura 4 se evidencia que la mayoría de las muestras presentan elevadas concentraciones de Ba/La, lo cual indica que estas rocas tienen alto contenido de Ba (elemento móvil), y no de Th/Yb (las altas concentraciones de esta relación son características de los sedimentos y los fundidos derivados de ellos), lo que apunta a un mayor contenido de fluidos derivados del *slab* en la subducción que generaron la fusión parcial del manto (Zhao et al., 2019; Woodhead et al., 2001), contrario a lo que se observaría en una erosión por subducción, donde la geoquímica evidenciaría la contaminación del manto originada por los sedimentos que genera el antearco y que entran al canal de subducción (Stern, 2020).

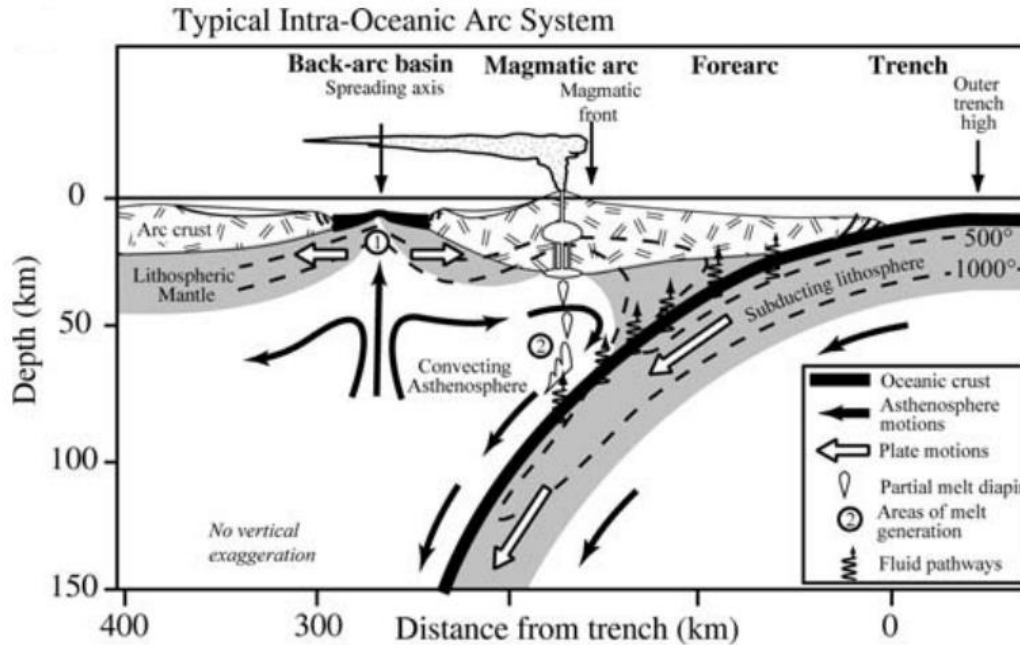


Figura 7. Sección esquemática, distancia vs profundidad, de una zona de subducción y sus partes (trinchera, antearco, arco magmático y retroarco). Tomado de Stern (2010).

Al realizar mediciones de la separación horizontal entre los cuerpos ígneos que se encuentran en el occidente colombiano, al oeste del Sistema de Fallas Romeral, como se observa en la Figura 3A, se obtuvo una distancia de 138.56 km entre todas las muestras digitalizadas, y una de 21.9 km en la zona que presenta mayor densidad de muestreo. Las separaciones medidas no se consideran lo suficientemente significativos para afirmar la existencia de una migración de arco magmático, ya que el ancho promedio de un sistema de arco intraoceánico, desde la trinchera hasta el frente arco magmático, es de aproximadamente 250 km (Figura 7) (Tatsumi, 2005; Stern, 2010). Asimismo, al revisar la Figura 3B, se contempla que la diferencia entre las edades de cristalización de las rocas muestreadas no es lo suficientemente clara para indicar una tendencia donde estas disminuyan hacia el este como indican Rodríguez et al. (2023).

Por otro lado, las reconfiguraciones espaciales que pueden sufrir los sistemas de arco intraoceánicos, tienden a que las edades de cristalización se hagan menores a medida que los cuerpos ígneos se alejen de la zona de la trinchera, ya que con el tiempo estos sistemas sufren un proceso de maduración (Stern, 2010). En las etapas iniciales de los arcos magmáticos, el magmatismo se concentra en la zona del antearco, mientras que, en las etapas de maduración, se concentra a lo largo del frente volcánico e incluso en el retroarco (Stern, 2010). Al hacer el

análisis de la Figura 5, se observa que la geoquímica de las rocas plutónicas indica que estas hicieron parte de un sistema de arco insular normal con tendencia a un arco intraoceánico maduro. Teniendo presente lo anterior, al realizar un análisis de la distribución geográfica (longitud) en relación con las edades de cristalización de estos cuerpos ígneos intrusivos, no se observa una tendencia significativa donde estas edades disminuyan hacia el este (Figura 3B).

El occidente colombiano ha tenido varias modificaciones durante el Mesozoico, debido a los cambios en la configuración tectónica. Durante el Cretácico Tardío, hubo una serie de eventos acrecionales como resultado de las interacciones entre el Plateau del Caribe, y las placas Suramericana y Farallón (Jailard, 2022 en da Silva et al., 2023; Spikings et al., 2015). Esto se evidencia con la presencia de rocas intrusivas de afinidad oceánica y continental en la Cordillera Occidental con edades del Cretácico Superior y del Paleógeno Inferior, separadas por el Sistema de Fallas Romeral (Bayona et al., 2012; Zapata et al., 2017; Botero et al., 2023). Estas rocas se formaron de manera simultánea ya que tienen edades de cristalización similares, lo que sugiere que hubo dos eventos contemporáneos de subducción que generarían dos arcos magmáticos de diferentes fuentes, uno continental y otro oceánico (Villagómez y Spikings, 2013; Zapata et al., 2017; Botero et al., 2023). El plutonismo de afinidad oceánico ha sido atribuido al proceso de fusión parcial del Plateau del Caribe por la interacción con la placa Suramericana (Vallejo et al., 2006; Zapata et al., 2017; León, 2022).

La vergencia de las dos zonas de subducción que se presentaron en el Cretácico Superior y en el Paleógeno Inferior, ha sido discutida por diferentes autores en gran medida. La evolución tectónica, que implica las interacciones entre las placas en el occidente colombiano, se explica principalmente mediante dos modelos geológicos evolutivos, donde las configuraciones de las dos zonas de subducción buzan hacia el este (Restrepo-Pace et al., 2004; Botero et al., 2023; Rodríguez et al., 2023), o una se inclina al oeste y la otra hacia el este (Thompson et al., 2004; Villagómez et al., 2011; Villagómez y Spikings, 2013; Weber et al., 2015; Zapata et al., 2017; Zapata et al., 2018; León, 2022; Botero et al., 2023), como se observa en la Figura 1. Rodríguez et al. (2023) afirman que, la formación de las rocas plutónicas que se encuentran a lo largo de la Cordillera Occidental, debido a su ubicación espacial, sus edades de cristalización y su profundidad relativa de generación de fundidos, fueron el resultado de un evento de migración de magmatismo en sentido oeste-este. Esto es utilizado por Rodríguez et al. (2023) para justificar la

polaridad de las subducciones, donde determinan que el modelo de dos *slabs* inclinados hacia el este es el más indicado. Lo anterior no es argumento suficiente para proponer una migración, ya que según los análisis de la geoquímica podría tratarse principalmente de un proceso de maduración normal del sistema de arco magmático, por otro lado, el análisis de la distribución de los cuerpos ígneos no muestra una tendencia significativa, y sumado a eso, no se tuvo presente la paleogeografía, lo cual es fundamental para entender que durante el Cretácico los plutones se formaron en un arco intraoceánico que, por su cantidad de fluidos que funcionan como lubricantes en la interfaz de las placas, no permitiría una fuerte erosión por subducción que sustenten la migración. Además, en el estudio realizado por Zapata et al. (2017), donde comparan las características geoquímicas de rocas plutónicas que han sido relacionadas con procesos de fusión parcial del plateau, como los gabros (Gabro de Altamira), determinan que son similares a la Tonalita de Buriticá y al Batolito de Sabanalarga (Weber et al., 2015; Zapata et al., 2017), mientras que la geoquímica de las andesitas presentan valores más altos de Th/Yb en concordancia con un arco magmático en una etapa de maduración mayor (Whattam y Stern, 2011; Zapata et al., 2017).

7. Conclusión

Las condiciones tectónicas durante el Cretácico Superior no son propicias para plantear un evento de migración de arco magmático hacia el este, como el propuesto por Rodríguez et al. (2023), ya que en su estudio solo se analizó la distribución espacial actual de las edades de cristalización de los cuerpos ígneos plutónicos que se encuentran a lo largo de la Cordillera Occidental de Colombia.

Por medio de los resultados obtenidos y los análisis realizados a lo largo de este trabajo, se evidencia una tendencia de altas concentraciones de la relación Rb/Zr y del Nb que sugieren un aumento de la madurez del arco magmático (Brown et al., 1984), lo que indica que se dio magmatismo en zonas más adentradas del sistema de arco intraoceánico, como en el frente volcánico o incluso en el retroarco. Además, se presentan altas concentraciones de la relación Ba/La y bajo contenido de la relación Th/Yb, lo que indica que en la zona de subducción se tiene una mayor incorporación de fluidos derivados del *slab* que generaron la fusión parcial de las rocas, y que no predominan los sedimentos subducidos (Woodhead et al., 2001; Kendrick et al., 2014). Si la migración del arco magmático hubiera ocurrido de oeste a este, implicaría erosión de

la subducción que generaría modificaciones en la placa superior de la zona de subducción por el colapso del borde del antearco, generando sedimentos que contaminan el canal de subducción.

8. Bibliografía

Agencia Nacional de Hidrocarburos, Universidad de Caldas. (2011). Estudio geológico integrado en la cuenca Tumaco onshore. Síntesis cartográfica, sísmica y análisis litoestratigráfico, petrográfico, geocronológico, termocronológico y geoquímico de testigos de perforación y muestras de superficie. Agencia Nacional de Hidrocarburos, inédito, 208 p. Manizales.

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Valencia, V., Ayala, C., Montenegro, O., Ibañez, M. (2012). Early Paleogene magmatism in the northern Andes: Insights on the effects of Oceanic Plateau-continent convergence. *Earth and Planetary Science Letters*, 331-332: 97-111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.015>

Botero, M., Vinasco, C.J., Restrepo, S.A., Foster, D.A., Kamenov, G.D. (2023). Caribbean-South America interactions since the Late Cretaceous: Insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic data in sedimentary sequences of the northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 123: 104231. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104231>

Brown, G.C., Thorpe, R.S., Webb, P.C. (1984). The geochemical characteristics of granitoids in contrasting comments on magma source. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 413-426. Disponible en: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0413>

Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C.J., Bayona, G., Lara, M., Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 277: 199-209. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>

Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C.J., Bayona, G., Lara, M., Valencia, V. (2016). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 227: 199-209. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>

- Cardona, A., Valencia, V., Bustamante, C., García, A., Ojeda, G., Ruiz, J., Saldarriaga, M., Weber, M. (2010). Tectonomagmatic setting and provenance of the Santa Marta Schist, northern Colombia: Insights on the growth and approach of Cretaceous Caribbean oceanic terranes to the South American continent. *Journal of South American Earth Science*, 29: 784-804. Disponible en: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<545:CO&SGLO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<545:CO&SGLO>2.0.CO;2)
- Correa, T.; Obando, M.G.; Zapata-Villada, J.P.; Rincón, Á.V.; Ortiz, F.H.; Rodríguez, G.; Cetina, L.M. (2018). *Geología del Borde Occidental de la Plancha 130, Santa Fe de Antioquia. Escala 1:50.000. Memoria Explicativa, Servicio Geológico Colombiano, Medellín.*
- Cross, T.A., Pilger, R.H. (1982). Controls of subduction geometry, location of magmatic arcs, and tectonics of arc and back-arc regions. *Geological Society of America Bulletin*, 93: 545-562. Disponible en: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<545:CO&SGLO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<545:CO&SGLO>2.0.CO;2)
- Duque, J., Bustamante, C., Solari, L.A. Gómez, A., Toro, G., Hoyos, S. (2019). Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: a record of Late Cretaceous to Eocene syn- to post-collisional arc magmatism in the Central Cordillera of Colombia. *Andean Geology*, 46 (1): 82-101. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV46n1-3120>
- Geoestudios. (2005). *Complementación geológica, geoquímica y geofísica de la parte occidental de las planchas 130 Santa Fe de Antioquia y 146 Medellín Occidental. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.*
- Gianni, M., Pérez, S. (2021). Geodynamic controls on magmatic arc migration and quiescence. *Earth Science Reviews*, 218: 103676. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103676>
- González, R., Oncken, O., Faccenna, C., Le Breton, E., Bezada, M., Mora, A. (2023). Kinematics and Convergent Tectonics of the Northwestern South America Plate During the Cenozoic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24: e2022GC010827. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2022GC010827>
- Huang, T.Y., Wang, Q., Wyman, D.A., Ma, L., Tang, G.J., Zhang, Z.P., & Dong, H. (2022). Subduction erosion revealed by Late Mesozoic magmatism in the Gangdese arc, South Tibet. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097360. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2021GL097360>

- Kendrick, M.A., Arculus, R.J., Danyushevsky, L.V., Kamenetsky, V.S., Woodhead, J.D., Honda, M. (2014). Subduction-related halogens (Cl, Br and I) and H₂O in magmatic glasses from Southwest Pacific Backarc Basins. *ELSEVIER*, 400: 165-176. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.021>
- Leal, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the colombian Andes: A tectono–magmatic approach. Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona, 989 p.
- León, S. (2022). Forearc basin evolution in response to a changing subduction system: Neogene to recent geological record of the Northwestern Colombian Andes. Universidad Nacional de Colombia.
- Lesage, G. (2011). Geochronology, Petrography, Geochemical Constraints, and Fluid Characterization of the Buriticá Gold Deposit, Antioquia Department, Colombia. MSc. Thesis, University of Alberta. <https://doi.org/10.7939/R35M0M>
- Montes, C., Rodríguez, A.F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: Northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198: 102903. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- Ordóñez, O., Restrepo, J.J., De Brito, R.S.C., Martens, U. Rodrigues, J.B. (2011). The late Paleocene age of the Santa Bárbara Batholith (Valle, Colombia) and its implications on the evolution of the Arquía Complex. XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias, p. 109.
- Pearce, J.A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4): 14-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Plank, T., Langmuir, C.H. (1998). The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3-4): 325–394. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Restrepo-Pace, P.A., Colmenares, F., Higuera, C., Mayorga, M. (2004). A Fold-And-Thrust Belt along the Western Flank of the Eastern Cordillera of Colombia - Style, Kinematics, and

Timing Constraints Derived from Seismic Data and Detailed Surface Mapping. AAPG Memoir, 82: 598–613. Disponible en: <https://doi.org/10.1306/m82813c31>

Rodríguez, G.; González, H.; Restrepo, J.J.; Martens, U.; Cardona, J.D. (2012a). Ocurrence of granulites in the northern part of the western cordillera of Colombia. *Boletín de Geología*, 34(2), 37-53.

Rodríguez, G.; Zapata, G. (2012b). Características del plutonismo Mioceno superior en el segmento norte de la cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 5-22.

Rodríguez, G., Correa, T., Ortiz, F.H, Tobón, M.J., Obando, M., Peláez, J.R. (2023). Nuevas edades, correlación y ciclo magmático de plutones de arco insular en el norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Geología*, 45(2): 15-33. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n2-2023001>

Servicio Geológico Colombiano (2020). Atlas Geológico de Colombia a escala 1:500.000. Geodatabase.

Spikings, R.A., Cochrane, R.S., Villagomez, D., Van der Lelij, D., Vallejo, C., Winkler, W., Beate, B., 2015. The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean large igneous province (290-75 Ma). *Gondwana Res.* 27, 95–139.

Stern, C.R. (1991). Role of subduction erosion in the generation of Andean magmas. *Geology*, 19: 78-81. Disponible en: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0078:ROSEIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0078:ROSEIT>2.3.CO;2)

Stern, C.R. (2010). The anatomy and ontogeny of modern intra-oceanic arc systems. *Geosciences Department*, 338: 7-34. Disponible en: <https://doi.org/10.1144/SP338.2>

Stern, C.R. (2020). The role of subduction erosion in the generation of Andean and other convergent plate boundary arc magmas, the continental crust and mantle. *Gondwana Research*, 88: 220-249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.006>

da Silva, S., Bustamante, A., Bustamante, C., Cardona, A., Juliani, C. (2023). Early Cretaceous subduction o fan oceanic plateau at the Northern Andes; geochemical, metamorphic, and

- cooling age constraints of the Raspas Metamorphic Complex. *Lithos*, 456-457: 107299. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107299>
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., et al. (2000). Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19 (5): 787–813. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>.
- Tatsumi, Y. (2005). The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. Institute for Research on Earth Evolution. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 15(7): 237-0061. Disponible en: doi: 10.1130/1052-5173(2005)015<4:TSFHIO>2.0.CO;2
- Thompson, P.M.E., Kempton, P.D., White, R.V., Saunders, A.D., Kerr, A.C., Tarney, J., and Pringle, M.S. (2004). Elemental, Hf–Nd isotopic and geochronological constraints on an island arc sequence associated with the Cretaceous Caribbean plateau: Bonaire, Dutch Antilles. *Lithos*, 74: 91-116. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.01.004>
- Vallejo, C., Spikings, R.A., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D., and Page, L. 2006. The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate. *Terra Nova*, 18(4): 264-269. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00688.x>
- Villagómez, D. (2010). Thermochronology, geochronology and geochemistry of the Western and Central cordilleras and Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The tectonic evolution of NW South America. PhD Thesis. Université De Genève. Disponible en: https://doi.org/10.13097/archive_ouverte/unige:14270
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4): 875-896. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Villagómez, D., Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous-Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, 160-161: 228-249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.008>

- Wagner, L.S., Jaramillo, J.S., Ramírez, L.F., Monsalve, G., Cardona, A., Becker, T.W. (2017). Transient slab flattening beneath Colombia. *Geophysical Research Letters*, 44(13): 6616-6623. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2017GL073981>
- Whattam, S.A., Stern, R.J. (2011). The ‘subduction initiation rule’: A key for linking ophiolites, intraoceanic forearcs and subduction initiation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(5): 1031-1045. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0638-z>
- Weber, M., Gómez-Tapias, J., Cardona, A., Duarte, E., Pardo-Trujillo, A., and Valencia, V.A. (2015). Geochemistry of the Santa Fé Batholith and Buriticá Tonalite in NW Colombia - Evidence of subduction initiation beneath the Colombian Caribbean Plateau. *Journal of South America Earth Science*, 62: 257-274. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.04.002>
- Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Davidson, J.P., Eggins, S.M. (2001). Hafnium isotope evidence form ‘conservative’ element mobility during subduction zone processes. *ELSEVIER*, 92(3): 331-346. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00453-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00453-8)
- Wright, J.E., and Wyld, S.J. (2011). Late Cretaceous subduction initiation on the eastern margin of the Caribbean-Colombian Oceanic Plateau: One Great Arc of the Caribbean. *Geosphere*, 7(2): 468-493. Disponible en: <https://doi.org/10.1130/GES00577.1>
- Zapata, J.P. (2013). Análisis petrográfico, geoquímico y geocronológico de la secuencia de rocas básicas de Altamira. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia.
- Zapata, J.P., Cardona, A., Restrepo, J.J., Martens, U. (2017). Geoquímica y geocronología de las rocas volcánicas básicas y el Gabro de Altamira, Cordillera Occidental (Colombia): Registro de ambientes de Plateau y arcos superpuestos durante el cretácico. *Boletín de Geología*, 39(2): 13-30. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017001>
- Zapata, S., Cardona, A., Jaramillo, J.S., Patiño, A., Valencia, V., León, S., Mejía, D., Pardo, A., Castañeda, J.P. (2018). Cretaceous extensional and compressional tectonics in the Northwestern Andes, prior to the collision with the Caribbean oceanic plateau. *Gondwana Research*, 66: 207-226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.10.008>

Zhao, L., Guo, F., Fan, W., Huang, M. (2019). Roles of subducted pelagic and terrigenous sediments in Early Jurassic mafic magmatism in NE China: Constraints on the architecture of paleo-pacific subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 2525–2550. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2018JB016487>

Zhang, Q., Guo, F., Zhao, L., Wu, Y. (2017). Geodynamics of divergent double subduction: 3-D numerical modeling of a Cenozoic example in the Molucca Sea region, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112: 3977-3998. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2017JB013991>

Anexos

Anexo 1. Geocronología U/Pb. Tomado de Leal (2011), Agencia Nacional de Hidrocarburos & Universidad de Caldas (2011), Ordóñez et al. (2011), Villagómez et al. (2010; 2011), Zapata (2013) y Rodríguez et al. (2023). [Anexos\Anexo 1. Geocronología U-Pb.xlsx](#)

Anexo 2. Geoquímica en roca total. Tomado de Lesage (2011), Weber et al. (2015), Correa et al. (2018), Geoestudios (2005), Rodríguez et al. (2012a; 2012b). [Anexos\Anexo 2. Geoquímica en roca total.xls](#)

Anexo 3. Datos isotópicos de la Tonalita de Buriticá y el Batolito de Santa Fe. Tomados de Weber et al., 2015.

| Muestra | Litología | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ |
|----------|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| JA-51-B | Dacita | 0.70545 | 0.51293 |
| JGT-118A | Dacita | 0.70394 | 0.51294 |
| AN-1993 | Tonalita | 0.70398 | 0.51297 |
| JA-108 | Tonalita | 0.70367 | 0.51294 |
| JA-74 | Tonalita | 0.70357 | 0.51293 |
| JA-146 | Cuarzodiorita | 0.7038 | 0.51291 |
| JFC-36C | Gabro | 0.70369 | 0.51296 |
| JFC-23A | Gabro | 0.7036 | 0.5129611 |
| JFC-25 | Gabro | 0.7037 | 0.5130462 |
| JFC-36D | Gabro | 0.70369 | 0.51295 |