

**Análisis de procedencia de los depósitos aflorantes en el área de Bucaramanga
(Santander) mediante minerales pesados**

Carlos Santiago Angulo Camargo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Dr. Giovanni Jiménez Díaz

Doctor en Geodinámica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por regalarme la vida, acompañarme en cada paso y darme la fortaleza para
llegar hasta aquí.

A mi nona Myriam, por su amor incondicional, por sus palabras de aliento y por creer
siempre en mí, incluso en los momentos más difíciles, recordándome que era capaz de lograr
grandes cosas.

A mis padres, Ana y Carlos, por su amor sempiterno, su entrega incansable, su respaldo
permanente y por ser la base de todo lo que soy. De manera especial, a mi padrastro Eleazar, por
su cariño, esfuerzo constante y por sus enseñanzas, que han marcado mi camino.

A toda mi familia, en especial a mis tías, por estar siempre presentes, por su apoyo
sincero y por no soltarme nunca la mano.

A mis amigos, particularmente a los del grupo de clase de los jueves, por la amistad, las
risas en cada momento, el ánimo y por hacer este proceso más llevadero.

A mis profesores, por su guía, su paciencia y por ser un ejemplo tanto en lo académico
como en lo humano.

A mi novia, Angélica, por su amor inefable, su confianza, por acompañarme con apoyo y
caminar conmigo en esta etapa del camino.

Y a mi perro Bruno, por su compañía silenciosa y por enseñarme el valor de la lealtad
más pura, aquella que se entrega sin esperar nada a cambio.

A todos ustedes, gracias de corazón. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Se expresa un agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a la Escuela de Geología de la UIS por la financiación de las secciones delgadas y los análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), los cuales se realizaron en el Parque Tecnológico Guatiguará (UIS), así como por el préstamo del Laboratorio de Petrografía Avanzada.

Un agradecimiento especial a los docentes Dilan Martínez y Leonardo Palmera por sus valiosos comentarios, y al compañero Juan Pablo Murillo por su acompañamiento durante las salidas de campo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Geológico	18
2.1 Geología Estructural	18
2.2 Estratigrafía.....	19
3. Metodología	22
3.1 Trabajo de campo.....	23
3.2 Trabajo de Laboratorio	24
3.2.1 Tamizaje granulométrico de las muestras	24
3.2.2 Concentración de minerales pesados	25
3.2.3 Fracción concentrada en sección delgada	27
3.2.4 Conteo de granos.....	28
3.2.5 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	28
4. Resultados	29
4.1 Descripción de los afloramientos.....	29
4.2 Paleocorrientes	30
4.3 Conteo de clastos	33
4.4 Minerales pesados.....	36

5. Discusión de resultados.....	40
5.1. Ambiente de depósito	40
5.2. Composición litológica de los clastos.....	40
5.3. Fracción arena.....	42
5.4. Análisis de minerales pesados	43
5.5. Presencia de glauconita.....	47
5.6. Oro nativo y aleación Cu-Zn.....	48
6. Conclusiones.....	50
7. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros operativos utilizados en la batea automática en espiral	26
Tabla 2. Peso de las fracciones pesada magnética y no magnética.	36
Tabla 3. Conteo de granos de minerales livianos y pesados.	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización regional del área de estudio.	11
Figura 2. Mapa geológico local del área de estudio.	13
Figura 3. Modelos de procedencia para los depósitos de Bucaramanga.	14
Figura 4. Imágenes representativas de las etapas metodológicas.	22
Figura 5. Fotografías en campo de la imbricación de los clastos.	31
Figura 6. Diagramas de rosas de las direcciones de paleocorrientes.	32
Figura 7. Resultados obtenidos en las siete estaciones analizadas.	35
Figura 8. Imágenes petrográficas de las secciones delgadas.	38
Figura 9. Imágenes obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).	39

Resumen

Título: Análisis de procedencia de los depósitos aflorantes en el área de Bucaramanga (Santander) mediante minerales pesados*

Autor: Carlos Santiago Angulo Camargo**

Palabras Clave: Procedencia sedimentaria, Sistemas aluviales, Minerales pesados, Macizo de Santander.

Descripción:

Los depósitos del Abanico de Bucaramanga han sido interpretados a partir de áreas fuente contrastantes, sin embargo, no existe un consenso claro sobre su procedencia. En este estudio se analizan siete afloramientos mediante la integración de la descripción sedimentológica, la medición de paleocorrientes, el conteo de clastos y el análisis de minerales pesados, con el fin de interpretar el área fuente. Los resultados muestran depósitos mal seleccionados, con soporte matricial y clastos imbricados de manera local, que indican un sentido general de transporte hacia el oeste. La composición de clastos y de la matriz evidencia un dominio de aportes sedimentarios reciclados, con contribuciones subordinadas de rocas metamórficas e ígneas. El conjunto de minerales pesados está dominado por zircón y acompañado por minerales de afinidad metamórfica e ígnea, e incluye la presencia de oro nativo y de una aleación Cu-Zn en una de las estaciones muestreadas.

Con base en estos resultados, se propone que los depósitos corresponden a sistemas aluviales proximales generados por flujos hiperconcentrados bajo condiciones de alta energía y alimentados por una procedencia regional compleja, dominada por aportes de unidades sedimentarias Mesozoicas, así como del basamento del Macizo de Santander. Adicionalmente, la identificación de oro nativo y de una aleación Cu-Zn constituye un indicador directo de procedencia desde el Distrito Minero Vetas-California, lo que respalda firmemente una fuente dominante oriental para los depósitos del área de estudio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Giovanny Jiménez Díaz. Doctor en Geodinámica.

Abstract

Title: Provenance analysis of deposits cropping out in the Bucaramanga area (Santander) using heavy minerals*

Author: Carlos Santiago Angulo Camargo**

Key Words: Sedimentary provenance, Alluvial systems, Heavy minerals, Santander Massif.

Description:

The deposits of the Bucaramanga Fan have been interpreted from contrasting source areas; however, there is no clear consensus on their origin. In this study, seven outcrops are analyzed through the integration of sedimentological description, paleocurrent measurements, clast counts, and heavy mineral analysis, in order to interpret sediment provenance. The results show poorly sorted deposits with matrix support and locally imbricated clasts, indicating a general westward transport direction. Clast and matrix composition evidences a dominance of recycled sedimentary contributions, with subordinate inputs from metamorphic and igneous rocks. The heavy mineral assemblage is dominated by zircon and accompanied by minerals of metamorphic and igneous affinity, and includes the presence of native gold and a Cu–Zn alloy in one of the sampled stations.

Based on these results, the deposits are interpreted as proximal alluvial systems generated by hyperconcentrated flows under high-energy conditions and fed by a complex regional provenance, dominated by contributions from Mesozoic sedimentary units as well as from the basement of the Santander Massif. Additionally, the identification of native gold and a Cu–Zn alloy constitutes a direct indicator of provenance from the Vetas-California Mining District, strongly supporting a dominant eastern source for the deposits in the study area.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Geology Department. Director: Giovanny Jiménez Díaz. Ph.D. in Geodinamics.

Introducción

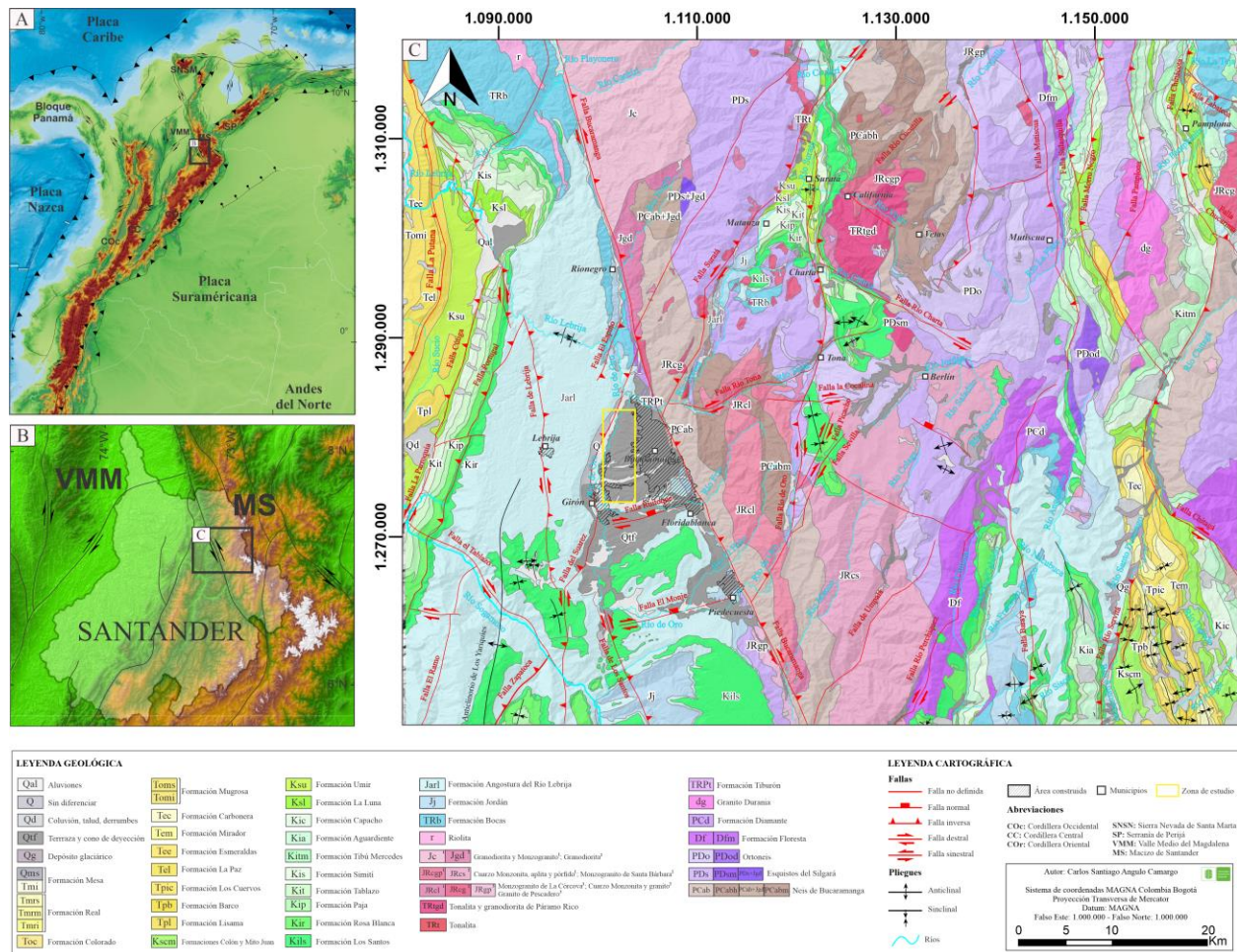
La procedencia de un depósito detrítico se refiere al origen del sedimento y la consideración de los factores que han contribuido a su formación. La naturaleza litológica del área fuente constituye el factor primordial que determina las características texturales y composicionales del sedimento; sin embargo, factores adicionales como el contexto tectónico, los procesos de meteorización, los mecanismos de transporte y el ambiente de depositación modulan la señal litológica del área fuente (Arche, 2010; Caracciolo, 2020).

Una de las técnicas que demuestra ser efectiva para determinar el área fuente de los sedimentos es el análisis de minerales pesados. Los minerales pesados son aquellos minerales accesorios con una densidad mayor a 2,9 g/cm³ (Mange & Maurer, 1992; Garzanti & Andò 2019).

El flanco oeste de la Cordillera Oriental en el área de Bucaramanga (Santander), está estructuralmente controlado por las fallas de Bucaramanga y del Suárez (Figura 1). La configuración de estas estructuras origina una depresión limitada por fallas normales con rumbo noreste, algunas de las cuales presentan reactivación con componente dextral (Jiménez et al., 2015; Velandia, 2017).

Figura 1.

Mapa de localización regional del área de estudio.



Nota. (A) Contexto geodinámico del noroeste de Suramérica, mostrando las placas Suramericana, de Nazca y del Caribe, así como la posición de los Andes Septentrionales y la ubicación general del área de estudio (modificado de Gómez et al., 2020). (B) Ubicación del área de estudio en el departamento de Santander, resaltando el flanco oeste de la Cordillera Oriental, a partir de un modelo digital de elevación ALOS RTC de 30 m (modificado de Alaska Satellite Facility, 2015). (C) Mapa geológico local del flanco oeste de la Cordillera Oriental, mostrando las principales unidades geológicas, a partir de la Cartografía Geocientífica del Servicio Geológico Colombiano (SGC), cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona (Ward et al.,

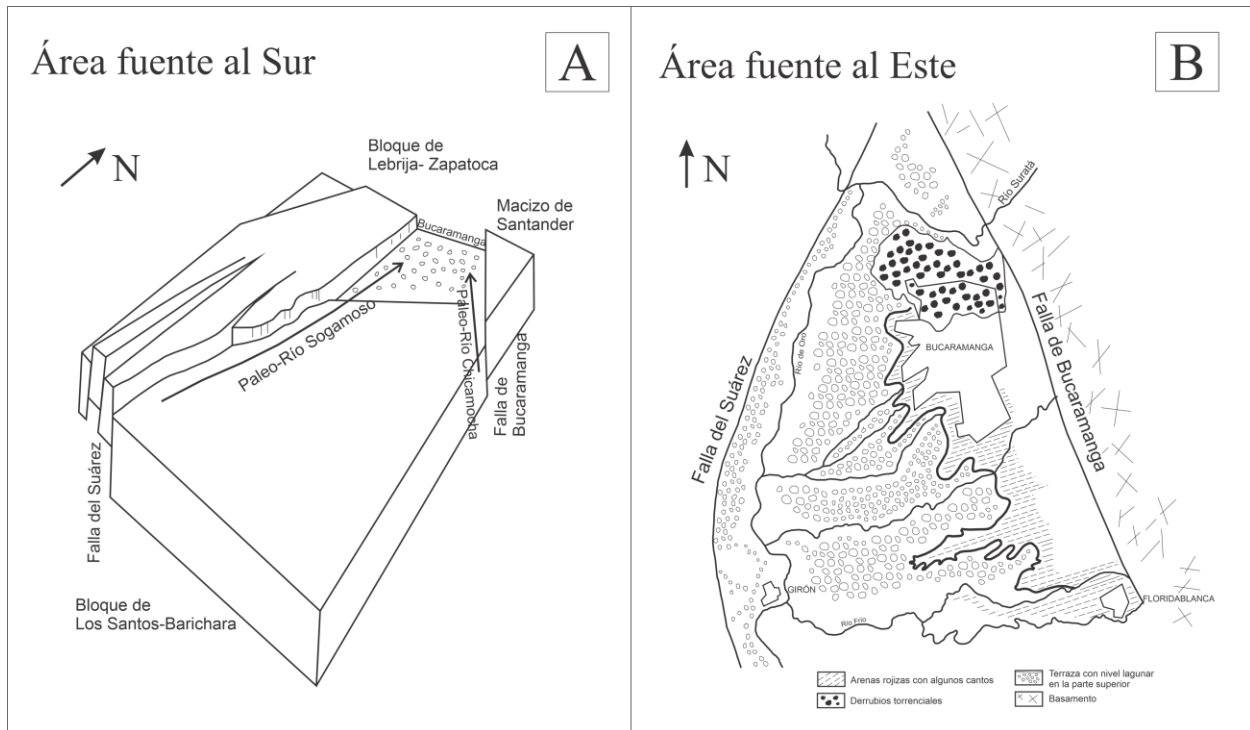
1973), estructuras tectónicas y la distribución de los depósitos de Bucaramanga, junto con la localización específica del área de estudio.

Este contexto estructural permitió el registro de unos depósitos conocidos como el Abanico de Bucaramanga (Figura 2), el cual está constituido, de base a techo, por el Miembro Órganos, conformado por conglomerados polimícticos con intercalaciones limo-arenosas; el Miembro Finos, integrado por niveles arcillosos y areniscas finas subhorizontales; el Miembro Gravoso, compuesto por niveles gravosos y gravoarenosos; y el Miembro Limos Rojos, formado por areniscas arcillosas y limolitas de color rojo (Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear [INGEOMINAS], 2001).

De acuerdo a Julivert (1958) y De Porta (1959), se proponen dos posibles áreas de aporte de los sedimentos que conforman los depósitos de Bucaramanga (Figura 3).

Figura 3.

Modelos de procedencia para los depósitos de Bucaramanga.



Nota. (A) Área fuente ubicada al sur (modificado de Julivert, 1958). (B) Área fuente ubicada al este (modificado de De Porta, 1959).

Julivert (1958) sugirió que la evolución de la Zona de Mesas y Cuestas (Figura 3A), junto con la actividad de las fallas de Bucaramanga y del Suárez, son responsables de las direcciones de flujo de los ríos Suárez, Sogamoso y Chicamocha hacia el norte (Figura 3A), además de la formación de una cuenca en el área de Bucaramanga, Girón, Chocó y Piedecuesta (Figura 1), en la cual se depositan sedimentos fluviales. Julivert (1958) propuso que el área fuente de los sedimentos está localizada al sur y fueron transportados al norte por el paleo-Río Sogamoso y el paleo-Río Chicamocha (Figura 1).

En contraste, De Porta (1959) sugirió que la red hidrográfica es determinada por el Río de Oro y el curso inferior del Río Suratá en dirección este-oeste, proponiendo a este último como la principal fuente de sedimentos torrenciales (Figura 3B). La zona de depositación de los sedimentos se ubica donde el Río Suratá cambia su dirección de flujo (Figura 3B), proceso reforzado por la actividad neotectónica de la Falla de Bucaramanga, la cual desplaza el cauce del río, como lo muestran los datos reportados en Jiménez et al. (2015) (Figura 1).

Trabajos más recientes en los depósitos del área metropolitana de Bucaramanga por Solano (2016), a partir de análisis sedimentológico al sur de Río Frío; García & Añez (2017), mediante el estudio de rasgos geomorfológicos de los ríos Chicamocha y Suárez; Franco & Ramírez (2018), con una reconstrucción ambiental en los miembros Órganos, Finos y Gravoso; y Contreras & Osma (2018), a partir de la caracterización sedimentológica en el Miembro Órganos apoyan el modelo inicial de Julivert (1958). Por otro lado, Garnica & Niño (2015), basados en caracterización sedimentológica del Miembro Órganos; Arévalo & Rincón (2016), mediante el análisis sedimentológico del Miembro Pre-Órganos (calcáreo); y Schmalbach & Rincón (2018), a partir de la caracterización de niveles epiclásticos del Miembro Órganos, respaldan la propuesta de De Porta (1959). En consecuencia, no existe un consenso claro sobre la procedencia de los sedimentos que conforman los depósitos de Bucaramanga.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la procedencia de los depósitos aflorantes en el área de Bucaramanga mediante la integración de descripción sedimentológica, registro de estructuras sedimentarias como la imbricación de clastos, análisis textural y composicional de clastos, y la caracterización de minerales pesados, con el fin de determinar el área fuente, así como la dirección y el sentido de flujo que dieron origen a los sedimentos.

El análisis de procedencia sedimentaria desarrollado en esta investigación no solo contribuye al entendimiento geológico la región de Bucaramanga, sino que también aporta información relevante para la evaluación del potencial económico asociado a los materiales fuente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la procedencia de los sedimentos de los depósitos del Abanico de Bucaramanga mediante el estudio integrado de direcciones de paleocorrientes, textura y composición de clastos y minerales pesados.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar las direcciones de paleocorrientes de los sedimentos a partir del análisis de la imbricación de clastos.

Caracterizar la textura y composición litológica de los clastos en los depósitos del Miembro Órganos del Abanico de Bucaramanga.

Identificar la asociación de los minerales pesados presentes en los depósitos del Miembro Órganos del Abanico de Bucaramanga a través de técnicas petrográficas.

2. Marco Geológico

2.1 Geología Estructural

El desarrollo inicial de la Cordillera Oriental estuvo controlado por estructuras Mesozoicas, producto de un régimen tectónico extensional. Entre ellas se destacan las fallas de Bucaramanga y del Suárez, asociadas a procesos de rifting y extensión en un contexto de back-arc durante la subducción de la Placa Farallón bajo las placas de América del Norte y del Sur (Sarmiento-Rojas et al., 2006; Martini & Ortega-Gutiérrez, 2016; Bayona et al., 2020). Algunos modelos tectónicos consideran la Falla de Bucaramanga y la Falla de Santa Marta como una sola estructura, la cual, junto con las fallas de Boconó y Oca, ambas con desplazamiento dextral, delimita el Bloque de Maracaibo (Irving, 1971; Toro, 1990; Mora & García, 2006; López et al., 2008). Sin embargo, Ujueta (2003), basado en datos geofísicos, recomienda tratar las fallas de Bucaramanga y Santa Marta de forma independiente debido a la falta de evidencia de conexión a profundidad.

La Falla de Bucaramanga es una estructura regional, con componente de rumbo sinistral y actividad neotectónica (París & Romero, 1994; Diederix et al., 2008, 2009; Veloza et al., 2012; Jiménez et al., 2015). En su tramo sur separa el Macizo de Santander, de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Ward et al., 1973; Montes & Sandoval, 2001; Diederix et al., 2009) (Figura 1).

Por su parte, la Falla del Suárez divide longitudinalmente en dos unidades estructurales de segundo orden la Zona de Mesas y Cuestas (Julivert, 1958). Esta falla presenta una cinemática inversa con vergencia hacia el este, componente sinistral y actividad neotectónica (Montes & Sandoval, 2001). Velandia (2017) propone la Falla de Lebrija como una estructura regional

inversa con componente sinistral, paralela a la Falla de Bucaramanga al oeste, y propuso denominar Falla de Girón al límite norte de la Falla del Suárez, caracterizándose por una cinemática normal con componente dextral. Sin embargo, Jiménez et al. (2015) consideran que la Falla del Suárez termina hacia el norte contra la Falla de Bucaramanga. Entre las fallas de Bucaramanga y del Suárez se encuentran, de norte a sur, las fallas de Ruitoque y El Monje, ambas con cinemática normal y componente dextral, las cuales delimitan y separan las “mesas” de Bucaramanga, Ruitoque y Los Santos (Velandia, 2017).

2.2 Estratigrafía

El basamento metamórfico del Macizo de Santander está constituido por las siguientes unidades litológicas: el Neis de Bucaramanga, de edad Mesoproterozoico Tardío a Neoproterozoico Temprano, la Formación Silgará (s.l.) y el Ortoneis, estas dos últimas de edad Ordovícico temprano. Dichas unidades representan eventos metamórficos asociados a las orogénias Grenvilliana y Famatiniana, respectivamente (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Cordani et al., 2005; Mantilla et al., 2016). Mantilla et al. (2016) propusieron escindir la Formación Silgará en tres unidades diferenciadas: Esquistos del Silgará (s.s.), Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro, con base en sus diferencias litológicas, edades de depositación del protolito y eventos orogénicos. Este basamento metamórfico es intruido por el Granito de Durania, de edad Silúrico (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001).

Suprayacen a estas unidades metamórficas, rocas sedimentarias del Devónico Medio (Formación Floresta), Carbonífero–Pérmico (Formación Diamante) y Triásico (Formación Tiburón) (Royero & Clavijo, 2001).

Hacia el Triásico Tardío a Jurásico Temprano se desarrolló un importante magmatismo de arco de margen continental que afectó el basamento metamórfico. Este magmatismo está representado por plutones graníticos y cuerpos hipoabisales riolítico–riodacíticos alargados, con una orientación preferencial norte–noroeste, los cuales corresponden al Grupo Plutónico de Santander (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Rodríguez et al., 2020). Simultáneamente, el registro sedimentario está representado por las formaciones Bocas (Triásico Tardío) y Jordán (Jurásico Temprano), que evidencian una sedimentación continental de carácter lacustre, con desarrollo de actividad volcánica sinsedimentaria (Alarcón & Rodríguez, 2019; Alarcón et al., 2020).

El Grupo Girón, nombre propuesto por Etayo-Serna (1989), está compuesto por las formaciones Angostura del Río Lebrija (Jurásico Tardío) y Los Santos (Cretácico Temprano), y corresponde a una sucesión de rocas sedimentarias continentales que suprayacen en discordancia angular regional a la Formación Jordán (Ward et al., 1973; Alarcón et al., 2020; Bayona et al., 2020). Por su parte, el intervalo comprendido entre las formaciones Rosa Blanca y Umir, según la nomenclatura de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, corresponde a una sucesión marino somera dominada por ambientes epicontinentales y de plataforma continental (ambientes neríticos), con variaciones en la profundidad y en las condiciones de ventilación durante el Cretácico (Royero & Clavijo, 2001).

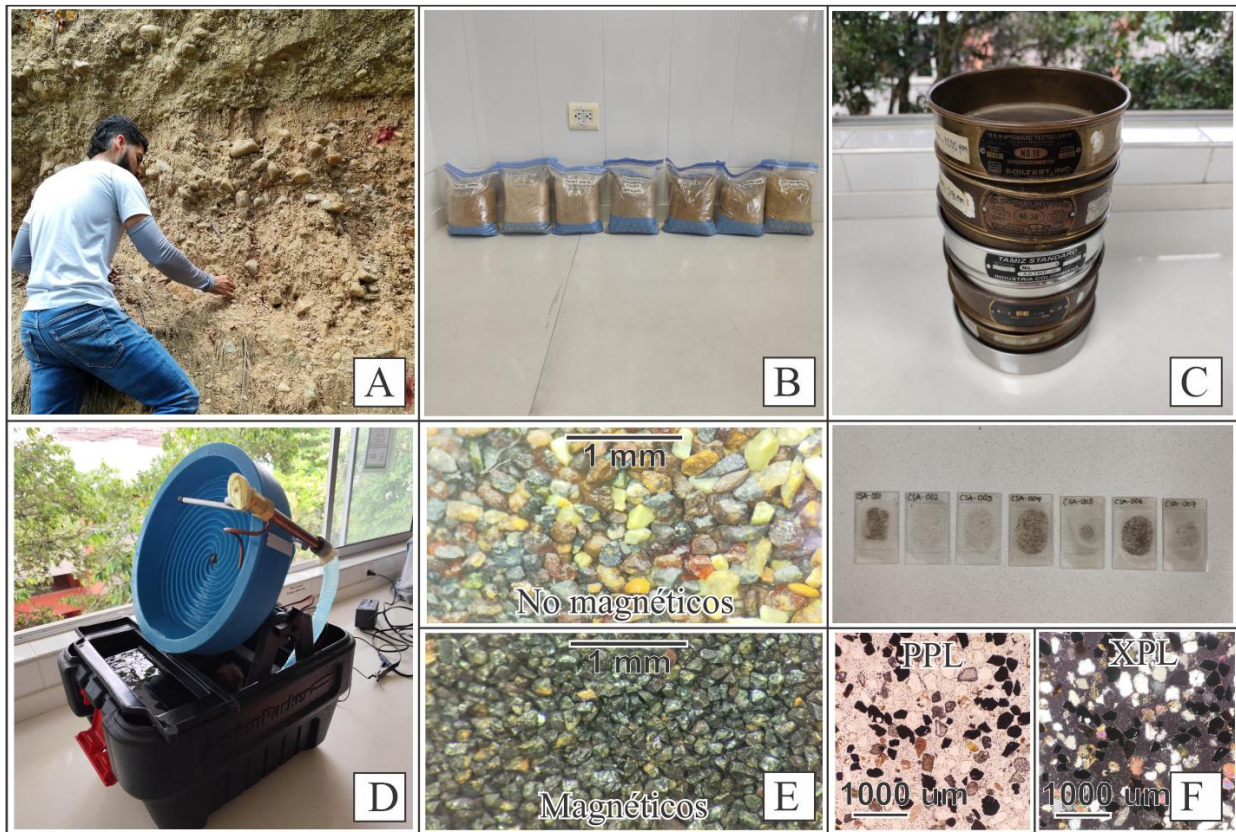
Finalmente, pequeños volúmenes de diques y stocks de pórfido granodiorítico cortan varias de las unidades previamente mencionadas en el Distrito Minero Vetas-California. Estos cuerpos ígneos han sido datados como Mioceno Tardío, y la superposición de la alteración magmático–hidrotermal y la mineralización asociada se ha asignado a una edad de 10,9 Ma o menor (Mantilla et al., 2009, 2012, 2013).

En posición estratigráfica superior, se encuentran los depósitos definidos como el Abanico de Bucaramanga (Figura 2). De acuerdo a INGEOMINAS (2001), el máximo espesor del Abanico de Bucaramanga es de aproximadamente 250 m en el sector oeste. La edad de estos depósitos, basada en dataciones paleomagnéticas publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce–Suárez, ha sido estimada como Plio–Pleistoceno (INGEOMINAS, 2001), aunque hasta el momento no se han obtenido restricciones de edad. De acuerdo a Jiménez et al. (2015), la edad estimada del Abanico de Bucaramanga, con base en datos de magnetoestratigrafía es de 0.8 Ma. Los depósitos de Bucaramanga han sido subdivididos, de base a tope, en cinco miembros: Calcáreo, Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos. No obstante, la distribución del Miembro Calcáreo no es uniforme ni presenta límites estratigráficos claros, por lo cual se considera parte del Miembro Órganos (Hubach, 1952; INGEOMINAS, 2001) (Figura 2).

3. Metodología

El estudio se desarrolló mediante una combinación de trabajo de campo, fase de laboratorio y análisis de datos, orientados a la caracterización textural, composicional y de procedencia de los depósitos analizados, cuyas principales etapas se ilustran en la Figura 4.

Figura 4. Imágenes representativas de las etapas metodológicas.



Nota. (A) Registro sedimentológico en afloramientos; (B) muestras de arena recolectadas y empacadas por afloramiento; (C) separación granulométrica de arenas mediante tamizado; (D) concentración de minerales pesados mediante batea automática en espiral; (E) fracciones magnéticas y no magnéticas obtenidas en el proceso de separación; y (F) secciones delgadas empleadas para el análisis petrográfico.

3.1 Trabajo de campo

Se realizó una revisión de artículos científicos, informes técnicos y tesis de grado relacionados con la zona de estudio (Garnica & Niño, 2015; Arévalo & Rincón, 2016; Solano, 2016; Franco & Ramírez, 2018; Contreras & Osma, 2018; Schmalbach & Rincón, 2018; Gutiérrez & Pico, 2020). Con apoyo de Google Earth y cartografía geológica realizada por INGEOMINAS (2001), se identificaron accesos adecuados y afloramientos no intervenidos previamente. Los sectores seleccionados fueron posteriormente verificados en campo para evaluar su estado de exposición, correspondiendo principalmente al Miembro Órganos del Abanico de Bucaramanga; de manera subordinada, en un único afloramiento, se reconocieron los miembros Finos y Gravoso (Figura 2).

El trabajo de campo comprendió la descripción de afloramientos, la medición de paleocorrientes, el conteo de clastos, y la recolección de muestras sedimentarias. Se establecieron siete estaciones de muestreo, codificadas como SC-X (donde X corresponde al número consecutivo, Figura 2B). En cada estación se registraron coordenadas mediante GPS, se tomaron fotografías y se describieron las características generales del afloramiento, así como la textura y composición de los depósitos (Figura 4A).

Las paleocorrientes se determinaron a partir de la imbricación de clastos. Se obtuvieron orientaciones aproximadas empleando los puntos cardinales como referencia (Nichols, 2009). Para los afloramientos que presentaban imbricación, se obtuvieron entre 15 y 20 mediciones de dirección, las cuales fueron representadas en diagramas de rosas en el software Stereonet. Los datos se ingresaron utilizando el tipo “Planos” y el formato “Rumbo/Buzamiento”. Dado que las paleocorrientes sólo consideran el dato de rumbo, se asignó un buzamiento constante de 1° a todas las mediciones con el fin de desprestigiar el buzamiento. Las capas en las que se encuentran

los clastos son horizontales, por lo que no se necesita hacer correcciones a las direcciones medidas.

El conteo de clastos se realizó mediante una cuadrícula de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, subdividida cada 10 cm en sentido vertical y horizontal, generando un total de 100 puntos de conteo coincidentes con los nodos de la malla, de acuerdo con la metodología propuesta por Howard (1993). Este procedimiento reduce la subjetividad del observador. Se estableció un tamaño mínimo de 2.5 cm para los clastos, por debajo del cual la identificación resulta poco confiable.

En cada estación se recolectaron muestras representativas de la fracción arena, tomadas en el mismo punto del conteo de clastos. Cada muestra tuvo un peso mínimo de 3 kg. Previamente, se removieron aproximadamente 20 cm de la superficie del afloramiento con el fin de evitar material alterado por meteorización. Las muestras fueron etiquetadas con el código correspondiente a cada estación (Figura 4B).

3.2 Trabajo de Laboratorio

Las etapas de laboratorio siguieron parcialmente la metodología propuesta por Trinidad et al. (2016) y Bustamante (2017).

3.2.1 Tamizaje granulométrico de las muestras

Las muestras se trituraron manualmente con martillo geológico hasta obtener fragmentos menores de 2 mm, empleando un tamiz artesanal como control granulométrico. Las herramientas se limpiaron antes y después del procesamiento de cada muestra para evitar contaminación cruzada, y el material resultante se almacenó en bolsas debidamente etiquetadas.

Posteriormente, cada muestra se separó en fracciones granulométricas de >1 mm, 1–0.59 mm, 0.59–0.25 mm, 0.25–0.104 mm, 0.104–0.063 mm y <0.063 mm (Figura 4C). Cada fracción fue etiquetada y almacenada individualmente.

Los tamices se limpiaron entre muestras utilizando un baño ultrasónico Elmasonic S 450 H, aplicando la función Degas durante 10 minutos y la función Sweep a 35 °C durante 25 minutos, lo que garantizó la completa remoción de residuos y optimizó la eficiencia del proceso.

Se trabajó exclusivamente con las fracciones 0.59–0.25 mm, 0.25–0.104 mm y 0.104–0.063 mm, en las cuales se concentran preferencialmente los minerales pesados. Esta selección se basó en las recomendaciones de Garzanti & Andò (2019), quienes destacan la importancia de abarcar un rango granulométrico amplio para evitar sesgos en la concentración.

Con el fin de asegurar la comparabilidad entre muestras, se estandarizó la masa de material procesado según el menor peso disponible entre las muestras de una misma fracción: 800 g para la fracción 0.59–0.25 mm, 400 g para 0.25–0.104 mm y 150 g para 0.104–0.063 mm. Este procedimiento garantizó la representatividad y comparabilidad de los resultados. Finalmente, cada fracción fue lavada repetidamente en un recipiente plástico hasta eliminar completamente las partículas tamaño lodo y el material flotante.

3.2.2 Concentración de minerales pesados

La separación de minerales pesados se efectuó en el Laboratorio de Petrografía Avanzada de la Escuela de Geología UIS, mediante concentración mecánica utilizando una batea automática en espiral (Desert Fox Automatic Gold Panning Machine), en reemplazo de líquidos densos (Figura 4D). Esta técnica fue seleccionada por razones de seguridad, economía y disponibilidad, además de permitir un procedimiento controlado y reproducible.

No obstante, este procedimiento no elimina completamente los minerales de menor densidad, por lo que la fracción concentrada puede incluir minerales relativamente livianos. En consecuencia, la interpretación de los resultados se fundamenta principalmente en la presencia, asociación y variación relativa de minerales diagnósticos de procedencia, más que en sus abundancias absolutas, evitando comparaciones directas con estudios que emplean separación mediante líquidos densos.

Dado que el fabricante no especifica condiciones óptimas de operación, se realizó una calibración empírica ajustando los parámetros en función del comportamiento observado en cada fracción granulométrica. La eficiencia de concentración se incrementa cuando los granos compiten con partículas de tamaño similar; en caso contrario, la diferencia de tamaño puede enmascarar el efecto de la densidad relativa.

Los parámetros controlados fueron: ángulo de inclinación (ajustado manualmente con transportador y regla), velocidad de rotación (determinada marcando la rueda y contando las revoluciones por minuto con cronómetro), caudal de agua (medido recolectando el flujo de descarga durante 30 segundos y extrapolando a litros por minuto) y velocidad de alimentación (controlada con cronómetro y cuchara dosificadora para mantener un flujo constante).

Para cada fracción granulométrica se realizaron ajustes experimentales con el fin de maximizar la recuperación de minerales pesados y garantizar la trazabilidad experimental. Los parámetros óptimos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros operativos utilizados en la batea automática en espiral.

Fracción (mm)	Ángulo (°)	Rotación (RPM)	Caudal (L/min)	Alimentación (s)
0.59–0.25	45-50	17.00	2.70	60

0.25–0.104	40-45	15.75	2.32	40
0.104–0.063	35-40	14.75	1.35	20

La variación de los parámetros respondió al comportamiento diferencial de cada fracción: los granos más gruesos (0.59–0.25 mm) requirieron mayores valores de ángulo, rotación, caudal y velocidad de alimentación, los cuales disminuyeron progresivamente hacia las fracciones más finas (0.25–0.104 mm y 0.104–0.063 mm).

Posteriormente, el concentrado obtenido para cada fracción granulométrica se dejó secar durante 48 horas a temperatura ambiente. Una vez secos, los concentrados fueron separados en fracciones magnéticas y no magnéticas (Figura 4E), empleando un imán de neodimio. Cada fracción se almacenó en frascos debidamente etiquetados y previamente pesados para su posterior análisis.

3.2.3 Fracción concentrada en sección delgada

Se seleccionaron siete muestras, correspondientes a cada estación de campo, y se utilizó la fracción no magnética del intervalo 0.25–0.104 mm, debido a la mejor concentración de minerales pesados obtenida. Aunque la fracción 0.59–0.25 mm también presentó una concentración significativa de minerales pesados, se priorizó la fracción fina por su mayor representatividad en estudios de procedencia (Garzanti & Andò, 2019). En contraste, en la fracción 0.104–0.063 mm la eficiencia de la batea fue limitada, observándose una proporción elevada de granos livianos.

Las secciones delgadas fueron elaboradas en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Los portamuestras debidamente rotulados se colocaron sobre una plancha de calentamiento a 60 °C, añadiendo una cantidad representativa de muestra

impregnada con resina epoxi. Una vez fraguada la resina, las muestras fueron pulidas en el equipo PetroThin hasta destapar los granos, adheridas con pegamento cerámico y dejadas en secado durante 12 horas. Posteriormente, se realizó el corte y desbaste inicial hasta alcanzar un espesor de 100 μm , seguido de un desbaste final hasta 30 μm . Finalmente, las secciones se cubrieron con bálsamo de Canadá, se limpiaron con xilol y se marcaron con el código correspondiente a cada estación (Figura 4F).

3.2.4 Conteo de granos

Se realizó un conteo de 300 granos en cada sección delgada bajo el microscopio petrográfico de luz transmitida. Con el propósito de determinar la distribución relativa de la fracción de minerales pesados, los datos obtenidos fueron normalizados al 100 %, considerando únicamente los minerales pesados identificados, excluyendo los minerales livianos y los líticos.

3.2.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Con el fin de identificar la composición química de granos puntuales de la fracción pesada, se realizó Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en dos granos de aspecto metálico seleccionados de la estación SC-5, en el Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará. El análisis tuvo un carácter cualitativo y se utilizó como apoyo a la interpretación de procedencia.

4. Resultados

4.1 Descripción de los afloramientos

Los afloramientos SC-1, 3, 4, 5, 6 y 7 corresponden al Miembro Órganos (Figura 2) y exhiben características sedimentológicas similares. Estos afloramientos moderadamente meteorizados, consisten de capas conglomeráticas gruesas a muy gruesas de espesor, de geometría interna masiva, intercaladas con niveles arenosos y limosos de espesor medios a gruesos. Los contactos entre capas son principalmente difusos a irregulares, y algunos netos. Se presenta desarrollo de cárcavas.

Los niveles analizados corresponden a depósitos de diamictita de arenisca cuarzosa, de guijos a guijarros, predominando estos últimos (algunos afloramientos tienen cantos), mal calibrada (>2), predominan clastos subredondeados a redondeados de baja esfericidad y contactos flotantes a tangenciales. Soportados en una matriz de arena fina a media cuarzosa (**Q**) (Figura 7C), de color 5Y 8/4 amarillo grisáceo, mal calibrada (1), granos subangulares y esfericidad baja. Dos afloramientos presentan ligeros cambios, el SC-1 tiene matriz feldespato-lito-cuarzosa (**fLQ**), y el SC-4 exhibe mejor calibrado (0.5), con granos subredondeados y esfericidad media a alta.

El afloramiento SC-2 difiere de los anteriores perteneciendo su parte inferior al Miembro Finos (Figura 2). Se trata de un depósito areno lodoso, color 5Y 8/1 gris amarillento a 5Y 8/4 amarillo grisáceo, con alternancia de capas de arena media a gruesa, algunas con gránulos y guijos de espesor medio, con capas de arena muy fina lodosa de espesor medio a muy grueso, de geometría interna masiva y los contactos varían entre netos y difusos. Corresponde a una arena feldespato-cuarzosa (**FQ**), de grano fino lodosa ligeramente granular, mal calibrada (1), con

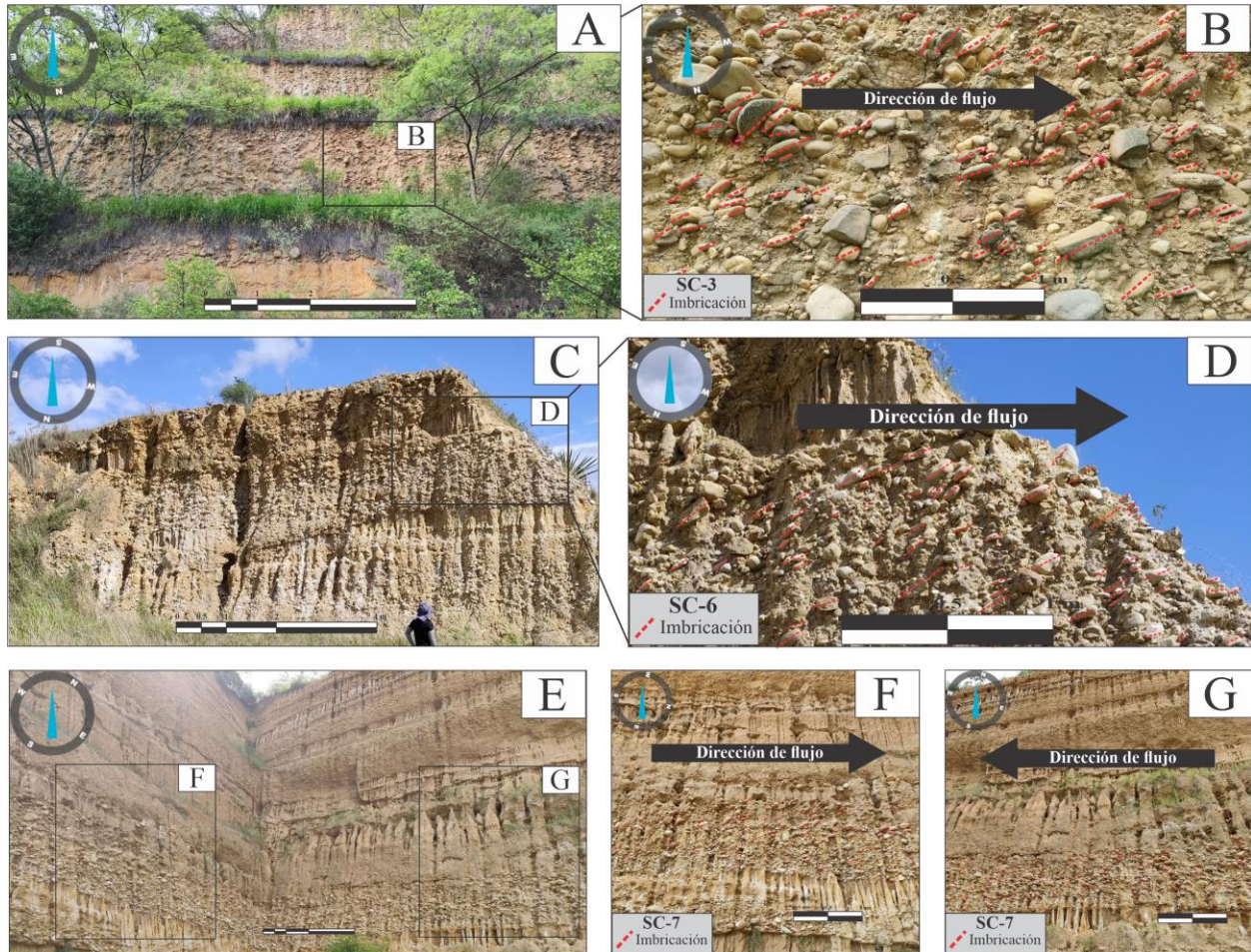
granos subangulares de baja esfericidad y contactos tangenciales, incluyendo plagioclasa alterada en tamaño de arena muy gruesa.

Hacia la parte superior del afloramiento SC-2 aflora un nivel correspondiente al Miembro Gravoso (Figura 2), donde se realizó el conteo de clastos de la estación. La capa es de espesor grueso y presenta un contacto irregular con la capa areno lodosa subyacente. Consiste en un depósito de diamictita de arenisca cuarzosa con predominio de guijarros subredondeados de baja esfericidad, contenidos en una matriz lodosa muy meteorizada de color 10YR 5/4 marrón amarillento moderado.

4.2 Paleocorrientes

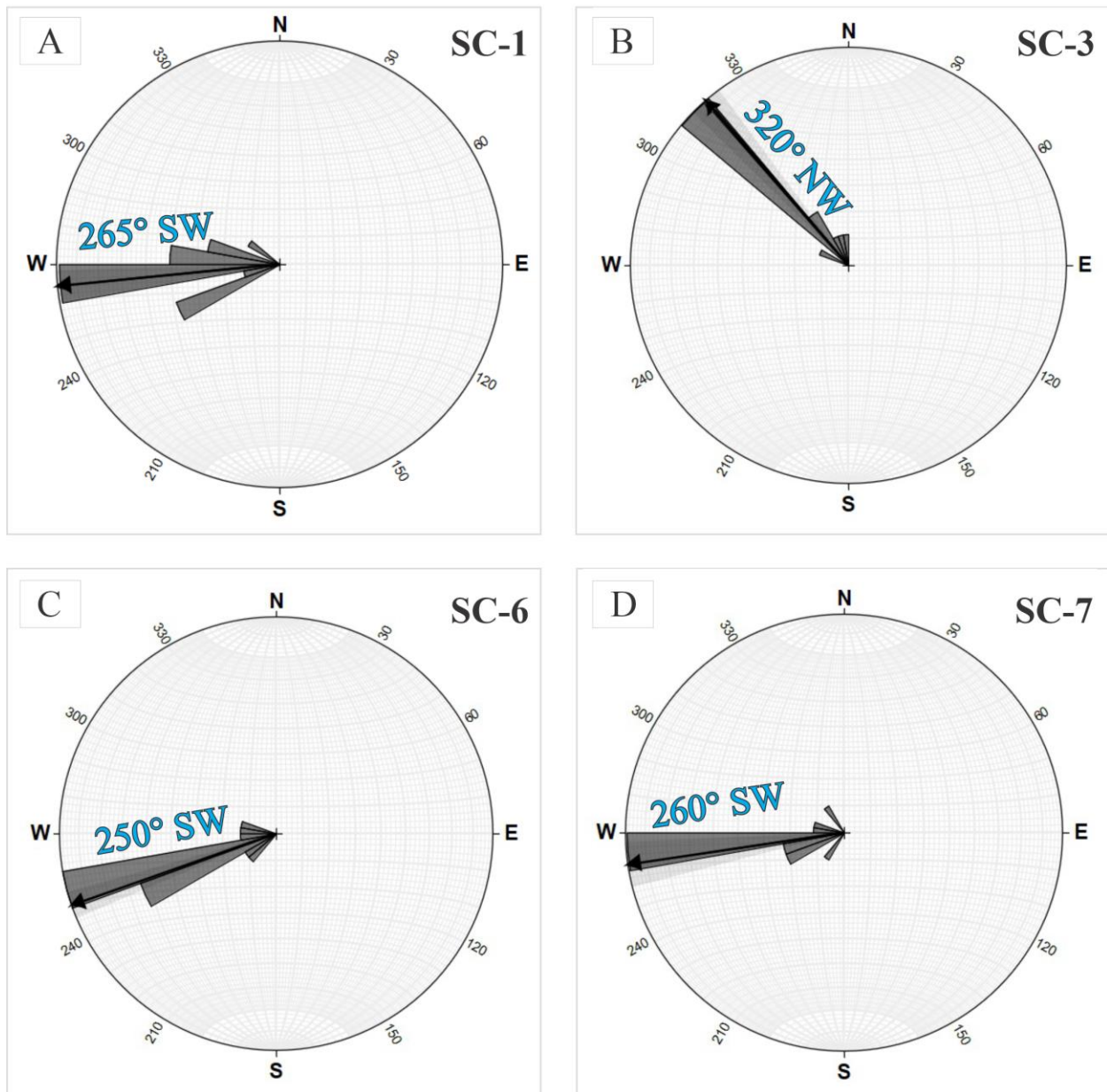
Las imbricaciones de los clastos medidas en cuatro estaciones indican direcciones dominantes hacia el suroeste (Figura 5). Las estaciones SC-1 ($\approx 265^\circ$ SW), SC-6 ($\approx 250^\circ$ SW) y SC-7 ($\approx 260^\circ$ SW) muestran tendencias similares, mientras que SC-3 presenta una orientación distinta de $\approx 320^\circ$ NW (Figura 2B y 6).

Figura 5. *Fotografías en campo de la imbricación de los clastos.*



Nota. (A-B) vista general y detalle del afloramiento SC-3; (C-D) vista general y detalle del afloramiento SC-6; y (E-G) vista general y detalle del afloramiento SC-7.

Figura 6. Diagramas de rosas de las direcciones de paleocorrientes.



Nota. Las direcciones fueron obtenidas a partir de la imbricación de clastos y ploteadas en Stereonet para las cuatro estaciones analizadas: (A) estación SC-1; (B) estación SC-3; (C) estación SC-6 y (D) estación SC-7.

4.3 Conteo de clastos

La textura de los clastos muestra un patrón similar en las siete estaciones (Figura 7B). En términos de redondez, dominan los clastos subredondeados representando el 48 % del total, seguidos por los redondeados (34 %), los subangulares (16 %), y en menor proporción bien redondeado y angular (<3 %). En términos de esfericidad, predomina baja (≈ 61 %), seguida de media (29 %) y finalmente alta (10 %).

Composicionalmente predominan litologías sedimentarias, seguidas en menor proporción litologías metamórficas e ígneas, además de clastos de cuarzo (Figura 7A).

Las rocas sedimentarias constituyen ≈ 76 % del total de los clastos. Arenisca cuarzosa es la litología dominante en todas las estaciones, representando ≈ 64 % de todos los clastos, con los valores más altos en SC-2 (97 %), SC-4 y SC-7 (75 % cada una). Otras litologías sedimentarias ocurren en menor proporción, como Arenisca de grano muy fino rojiza (≈ 6 %), Lodolita silícea gris (≈ 3 %), Chert (≈ 1 %), y otras litologías como Lodolita blanca, Conglomerado, Arenisca con impresión de restos fósiles y Mudstone están presentes cada una en proporciones menores (<1%).

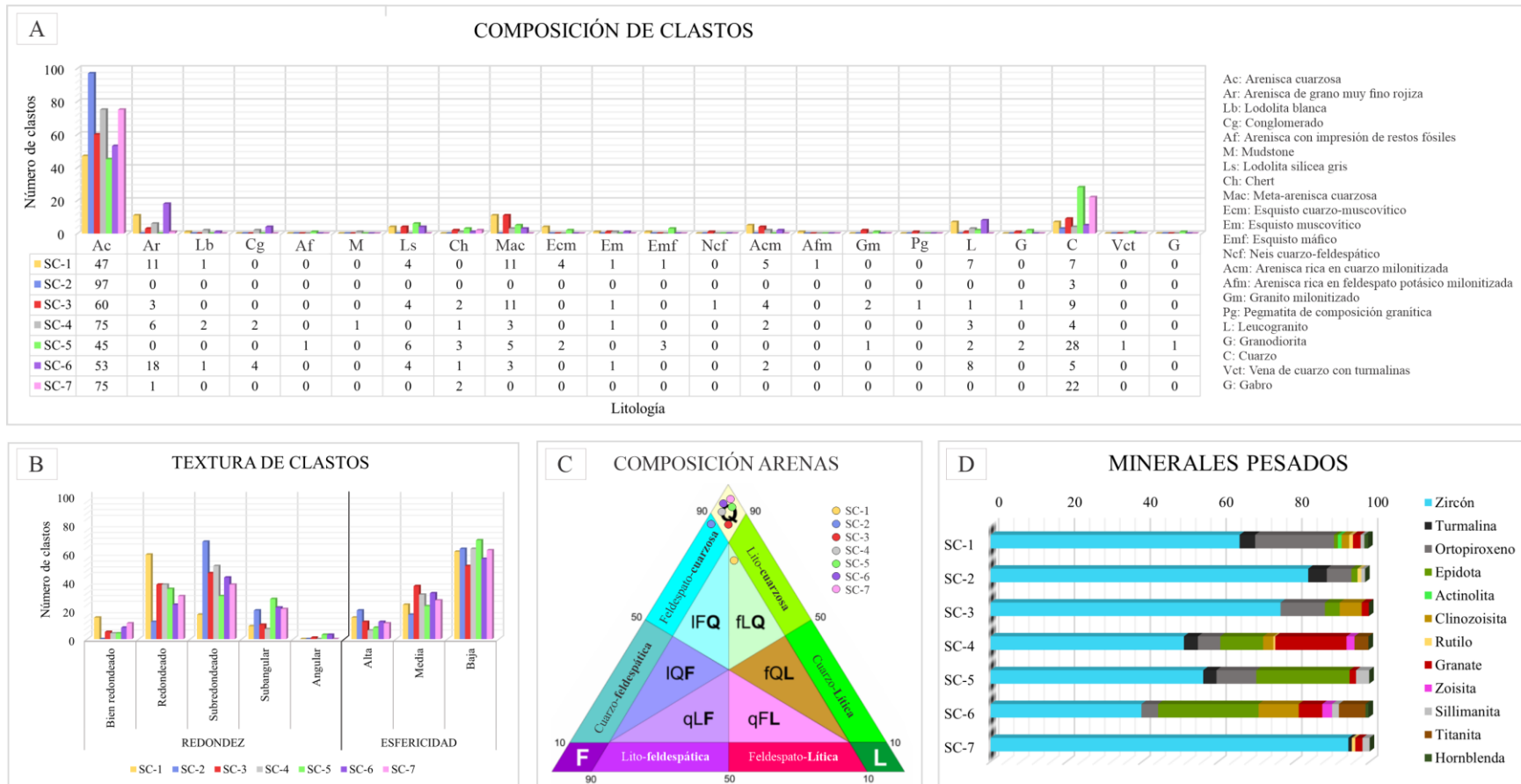
Las rocas metamórficas representan ≈ 9 % del total de los clastos. La litología dominante es Meta-arenisca cuarzosa (≈ 5 %), seguido de Arenisca rica en cuarzo milonitizada (≈ 2 %) presentándose estas dos en mayores proporciones en SC-1 y SC-3, mientras que litologías como Esquisto cuarzo-muscovítico, Esquisto muscovítico, Esquisto máfico, Neis cuarzo-feldespático y Arenisca rica en feldespato potásico milonitizada están presentes en proporciones menores (<1%).

Las rocas ígneas, incluyendo en esta categoría la Vena de cuarzo con turmalinas, corresponde ≈ 4 % del total de los clastos. Destaca Leucogranito (≈ 3 %), con presencia notable en

SC-1, y SC-6, mientras que Pegmatita de composición granítica, Granodiorita, Gabro y la Vena de cuarzo con turmalinas aparecen en proporciones menores (<1 %).

Finalmente, los clastos de Cuarzo representan ≈ 11 % del total de los clastos, con los valores más altos en SC-5 (28 %) y SC-7 (22 %).

Figura 7. Resultados obtenidos en las siete estaciones analizadas.



Nota. A) Composición de clastos; (B) textura de clastos; (C) diagrama triangular modificado de Garzanti (2016) con la composición de las arenas; y (D) minerales pesados identificados y su abundancia relativa en cada estación.

4.4 Minerales pesados

Los pesos de las fracciones pesada magnética y no magnética obtenidas por intervalo granulométrico en cada estación se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Peso de las fracciones pesada magnética y no magnética.

Estación	Fracción	0.59–0.25 mm (g)	0.25–0.104 mm (g)	0.104–0.063 mm (g)
SC-1	Magnética	4.2313 (0.53%)	1.6357 (0.41%)	0.6033 (0.40%)
	No magnética	3.4911 (0.44%)	0.9438 (0.23%)	0.1267 (0.08%)
SC-2	Magnética	0.0245 (0.003%)	0.1947 (0.05%)	— ^a
	No magnética	2.6680 (0.33%)	1.4624 (0.36%)	— ^a
SC-3	Magnética	0.5651 (0.07%)	1.0146 (0.25%)	0.0501 (0.03%)
	No magnética	0.7450 (0.09%)	0.9654 (0.24%)	0.0378 (0.02%)
SC-4	Magnética	3.1296 (0.39%)	9.9944 (2.50%)	0.2102 (0.14%)
	No magnética	0.9734 (0.12%)	3.0723 (0.77%)	0.0369 (0.02%)
SC-5	Magnética	1.8621 (0.23%)	0.4402 (0.11%)	0.2503 (0.17%)
	No magnética	1.5592 (0.19%)	0.1288 (0.03%)	0.6193 (0.41%)
SC-6	Magnética	15.3339 (1.92%)	13.2633 (3.31%)	0.3947 (0.26%)
	No magnética	5.1536 (0.64%)	2.2976 (0.57%)	0.6434 (0.43%)
SC-7	Magnética	0.1839 (0.02%)	0.4557 (0.11%)	0.0413 (0.03%)
	No magnética	1.4149 (0.18%)	0.4478 (0.11%)	0.1189 (0.08%)

Nota. Los valores corresponden al peso de la fracción pesada obtenida tras el proceso de concentración en batea. Los porcentajes entre paréntesis representan la proporción respecto al peso total del sedimento inicial de cada muestra.

a El símbolo “-” indica ausencia de material recuperado en el intervalo granulométrico correspondiente.

Los resultados del conteo de granos por estación de muestreo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Conteo de granos de minerales livianos y pesados.

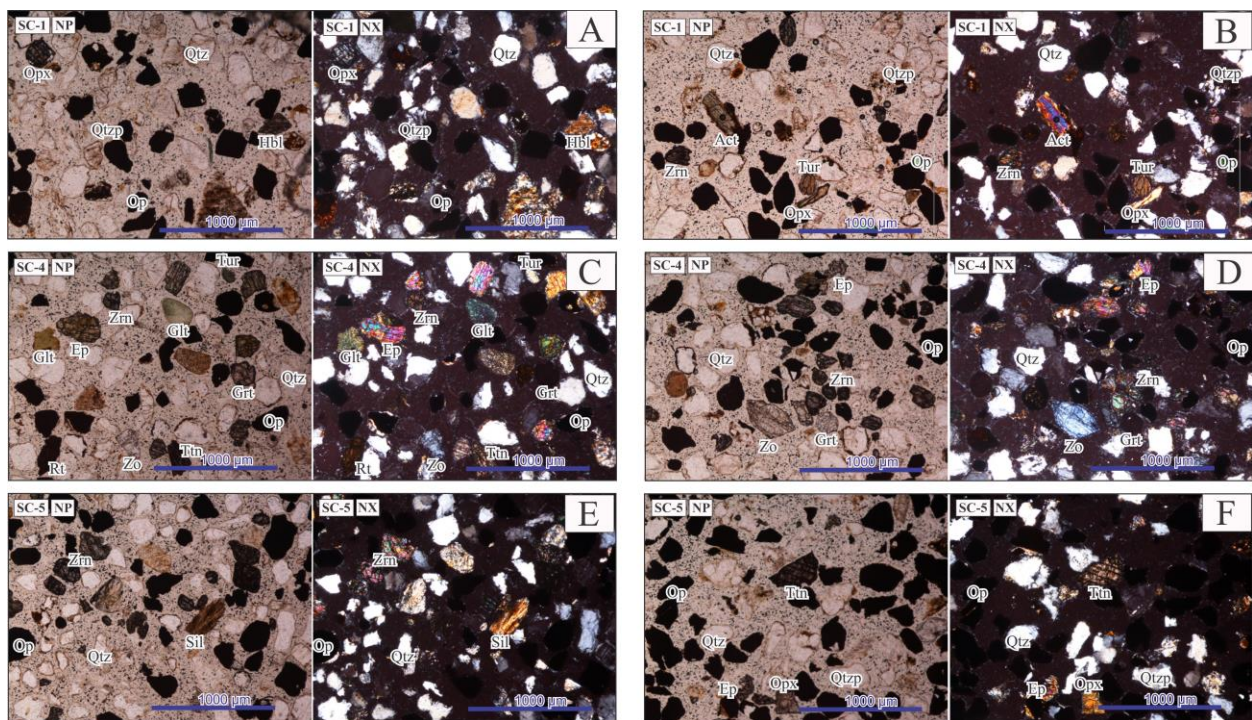
Estación	Qtz	Qtzp	Fp	Mc	Pl	Ls	Li	Lm	Op	Zrn	Tur	Ms	Opx	Glt	Ep	Cht	Act	Bt	Czo	Chl	Cal	Rt	Grt	Zo	Sill	Ttn	Hbl
SC-1	91	24	2	1	0	0	1	6	53	63	4	10	20	1	1	4	1	7	2	2	2	1	2	0	1	0	1
SC-2	162	36	2	0	0	1	0	0	30	51	3	1	4	6	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
SC-3	115	12	34	24	6	0	0	18	20	39	0	10	6	3	2	1	0	5	3	1	0	0	1	0	0	0	0
SC-4	55	5	0	0	0	0	0	2	38	95	7	4	11	10	21	0	0	0	5	0	0	1	35	4	0	7	0
SC-5	124	13	8	1	5	0	0	2	85	32	2	4	6	0	14	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0
SC-6	53	16	2	1	2	0	0	4	94	45	0	4	5	7	30	2	0	2	12	0	0	0	7	3	2	8	1
SC-7	110	8	0	5	2	1	0	1	41	101	1	23	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0	2	0	0

Nota. Qtz: cuarzo; Qtzp: cuarzo policristalino; Fp: feldespato potásico; Mc: microclina; Pl: plagioclasa; Ls: lítico sedimentario; Li: lítico ígneo; Lm: lítico metamórfico; Op: mineral opaco; Zrn: zircón; Tur: turmalina; Ms: muscovita; Opx: ortopiroxeno; Glt: glauconita; Ep: epidota; Cht: chert; Act: actinolita; Bt: biotita; Czo: clinozoisita; Chl: clorita; Cal: calcita; Rt: rutilo; Grt: granate; Zo: zoisita; Sill: sillimanita; Ttn: titanita; Hbl: hornblenda.

Se reconocieron doce especies de minerales pesados (Figura 7D). El zircón es dominante en todas las estaciones constituyendo entre 39,8 % y 94,4 % del total, registra los valores más altos en SC-2 (83,8 %) y SC-7 (94,4 %). En segundo lugar, aparecen minerales cuya importancia

relativa varía entre estaciones: la epidota presenta máximos valores en SC-5 (24,6 %) y SC-6 (26,5 %), mientras el ortopiroxeno destaca en SC-1 (20,8 %) y SC-3 (11,7 %). El granate es relevante en SC-4 (18,8 %) y la clinozoisita en SC-3 (5,8 %) y SC-6 (10,6 %). Los demás minerales (turmalina, titanita, sillimanita, zoisita, rutilo, hornblenda y actinolita) aparecen de forma subordinada variando entre estaciones, cuya identificación óptica se respalda en microfotografías en nicols paralelos y cruzados (Figuras 8).

Figura 8. Imágenes petrográficas de las secciones delgadas.

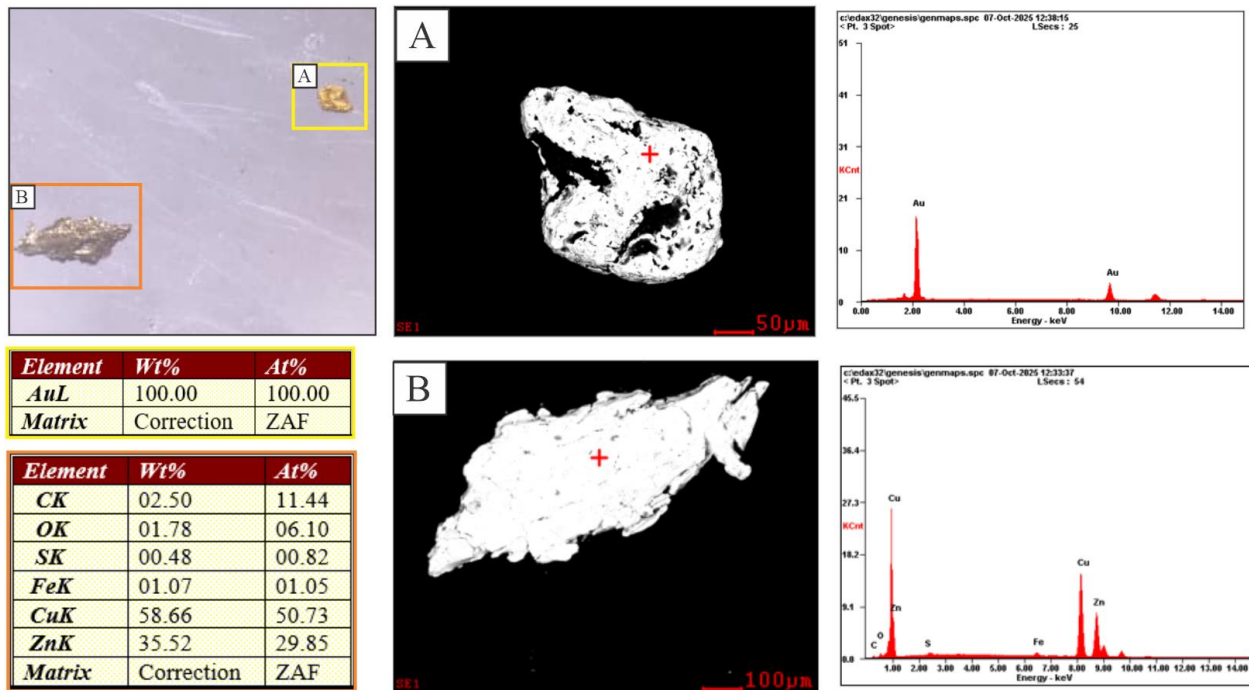


Nota. Las fotografías fueron tomadas bajo nicols paralelos (NP) y nicols cruzados (NX), las cuales ilustran la presencia de diversos minerales pesados reconocidos en el análisis petrográfico de las arenas. (A–B) sección delgada de la estación SC-1; (C–D) sección delgada de la estación SC-4; y (E–F) sección delgada de la estación SC-5. Abreviaciones: Zrn: zircón; Tur: turmalina; Opx: ortopiroxeno; Ep: epidota; Act: actinolita; Rt: rutilo; Grt: granate; Zo: zoisita; Sill:

sillimanita; Ttn: titanita; Hbl: hornblenda; Qtz: cuarzo; Qtzp: cuarzo policristalino; Op: mineral opaco; Glt: glauconita.

En la fracción pesada de la estación SC-5 se identificaron, mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), dos granos metálicos correspondientes a oro nativo y a una aleación Cu–Zn, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Imágenes obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).



Nota. Los granos metálicos fueron obtenidos del concentrado de minerales de la estación SC-5: (A) grano de oro; y (B) grano correspondiente a una aleación Cu–Zn.

5. Discusión de resultados

5.1. Ambiente de depósito

Las características texturales observadas en los afloramientos, incluyendo el predominio de clastos subredondeados y de baja esfericidad, la presencia de una matriz arenosa que soporta guijarros y cantos, y la pobre selección, indican una depositación asociada a flujos hiperconcentrados, correspondientes a un estado intermedio entre la dinámica fluvial y los flujos de detritos, bajo condiciones de alta energía. La presencia de imbricación indica un sentido general de transporte hacia el oeste, compatible no solo con sistemas estrictamente canalizados, sino también con corrientes densas asociadas a sistemas aluviales proximales. El ambiente es concordante con la propuesta de Garnica & Niño (2015), Lima & Medina (2015) y Gutiérrez & Pico (2020). Los resultados difieren de los reportados por Arévalo & Rincón (2016), en los que indican un ambiente fluvial playa y till. Asimismo, Solano (2016) y Franco & Ramírez (2018) interpretan un ambiente predominantemente fluvial. Estas diferencias podrían atribuirse a los diferentes niveles analizados y una posible discrepancia en la asignación de las áreas fuente.

5.2. Composición litológica de los clastos

El dominio composicional de los clastos sugiere una fuente principal sedimentaria, compatible con litologías Mesozoicas expuestas reportadas en el sector oriental de la zona de estudio. Este conjunto incluye unidades de origen continental, como las formaciones Jordán, Angostura del Río Lebrija y Los Santos (Garnica & Niño, 2015; Gutiérrez & Pico, 2020), representadas por areniscas cuarzosas, areniscas rojizas, conglomerados y lodolitas blancas. La elevada proporción de clastos de cuarcita reportada en Contreras & Osma (2018) podría

atribuirse a una confusión en la identificación litológica, correspondiendo a la arenisca cuarzosa. Asimismo, se identifican litologías sedimentarias marinas típicas del Cretácico, representadas por las formaciones Rosa Blanca, Paja, Tablazo, Simití, La Luna y Umir, caracterizadas por lodolitas silíceas, mudstones, areniscas fosilíferas y niveles de chert (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Etayo-Serna, 2019; Alarcón et al., 2020; Bayona et al., 2020). Solano (2016) y Franco & Ramírez atribuyen el chert a la Formación La Luna aflorante en el sector de San Andrés (Santander), no obstante, esta formación también aflora en la faja Matanza-Suratá, al este de la zona de estudio (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Etayo-Serna, 2019).

Las litologías metamórficas corresponden principalmente a las descritas en el Neis de Bucaramanga (Contreras & Osma, 2018), representado por esquistos máficos y neises cuarzo-feldespáticos, a los Esquistos del Silgará (Garnica & Niño, 2015), caracterizados por esquistos cuarzo-muscovíticos y muscovíticos, y al Ortoneis, que incluye esquistos máficos, neises cuarzo-feldespáticos y granito milonitizado (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001; Mantilla et al., 2016; García-Ramírez et al., 2017).

Los componentes ígneos se relacionan con intrusiones Triásico–Jurásicas del Grupo Plutónico de Santander, representadas por leucogranitos y granodioritas, concordantes con variaciones locales del Monzogranito de La Corcova (Rodríguez et al., 2020), así como con cuerpos descritos en el sector de Páramo Rico y en la zona central del Distrito Minero Vetas-California (Ward et al., 1973; Mantilla et al., 2013). Contreras y Osma (2018) sugieren como fuente al Batolito de Rionegro, lo cual podría atribuirse a la localización de sus afloramientos, al norte del presente estudio, sin embargo, el transporte desde esta fuente resulta limitado para la extensión hacia el sur del Abanico de Bucaramanga. De manera similar, Solano (2016) atribuye los clastos ígneos al Granito de Pescadero, por lo que se sugiere atribuir de manera general al

Grupo Plutónico de Santander, debido a las similitudes litológicas y falta de estudios detallados que discriminen entre estos cuerpos ígneos.

La presencia de clastos de pegmatita y de cuarzo con turmalina señala aportes desde fuentes ígneas del Grupo Plutónico de Santander y metamórficas del basamento del Macizo de Santander, incluyendo el Neis de Bucaramanga y el Ortoneis. Asimismo, los clastos de cuarzo monocristalino pueden derivar de estas mismas fuentes, con una posible contribución adicional asociada a eventos hidrotermales.

5.3. Fracción arena

La matriz arenosa que soporta los clastos está dominada por granos de cuarzo, lo que refleja una alta madurez mineralógica y sugiere un aporte mayoritario desde areniscas cuarzosas preexistentes, coherente con las unidades Mesozoicas inferidas a partir de los clastos. Este carácter respalda una interpretación de proveniencia desde el sector oriental, correspondiente al Macizo de Santander.

Las variaciones locales observadas en el Miembro Órganos (Figura 2), reflejadas en una matriz feldespato-lito-cuarzosa (fLQ) y pobremente seleccionada en SC-1 frente a una matriz más cuarzosa (Q) y mejor seleccionada en SC-4, pueden interpretarse como cambios en la dinámica de transporte. En este sentido, SC-1 representaría depósitos más proximales y de mayor energía, coherentes con su posición topográficamente más elevada y hacia el este, mientras que SC-4 registra condiciones más distales y de menor energía hacia el oeste, reflejando una pérdida progresiva de energía en ese sentido, así como la interpretación en Arévalo & Rincón (2016). Con respecto al Miembro Finos correspondiente a SC-2 (Figura 2), la composición feldespato-

cuarzosa (FQ) de la matriz sugiere un aporte relativamente más proximal, coherente con su posición estratigráfica superior dentro del Abanico de Bucaramanga.

La presencia de arenas cuarzosas limita la interpretación de la procedencia únicamente a partir de los componentes mayoritarios, lo que resalta la necesidad del análisis de minerales pesados para obtener información más detallada sobre las litologías fuente de los granos que conforman los depósitos.

5.4. Análisis de minerales pesados

Los pesos obtenidos para las fracciones pesada magnética y no magnética, discriminados por tamaño de grano y estación (Tabla 2), evidencian diferencias en la eficiencia de concentración y en la dinámica sedimentaria del sistema. La mayor acumulación de material pesado en el intervalo 0.25–0.104 mm es consistente con una selección hidráulica más eficiente en este rango, mientras que las variaciones entre estaciones reflejan cambios en el aporte detrítico y/o en la energía del transporte. Si bien los minerales accesorios suelen presentarse en proporciones inferiores al 1 % en sedimentos siliciclásticos, en varias estaciones los contenidos de minerales pesados superan este umbral, lo cual se explica en parte por la abundancia de la fracción magnética, probablemente dominada por magnetita, cuyo elevado peso específico ($>5,20 \text{ g/cm}^3$) favorece su concentración durante procesos de separación mecánica como el realizado mediante batea. Adicionalmente, debe considerarse que la fracción no magnética incluye minerales relativamente livianos, dado que el método de separación empleado no discrimina de manera absoluta entre minerales pesados y livianos (Tabla 3), lo que introduce un sesgo en la interpretación de los valores de peso obtenidos que debe tratarse cuidadosamente.

La fracción granulométrica utilizada para hacer el conteo de granos tiene respaldo por Morton (1985), el cual propone realizar el análisis de minerales pesados en una sola fracción de tamaño, con el objetivo de eliminar los efectos de la disponibilidad de tamaño de grano. Adicionalmente, Garzanti & Andò (2019) establecen que los sedimentos más finos que 0.125 mm son menos adecuados para el análisis petrográfico, y los más gruesos que 0.35 mm son menos confiables para el análisis de minerales pesados, por lo que el rango establecido es pertinente.

El conjunto de minerales pesados, con un marcado dominio del zircón en todas las estaciones, sugiere una elevada madurez mineralógica y un aporte dominante desde fuentes sedimentarias recicladas, en coherencia con la composición cuarzosa de la matriz y la predominancia de clastos sedimentarios en las diamictitas. La presencia subordinada de turmalina y rutilo, los cuales junto al zircón son reconocidos como minerales ultraestables (Pettijohn et al., 1973), refuerza esta interpretación. Asimismo, estos minerales se asocian comúnmente a litologías ígneas y metamórficas de medio a alto grado, como granitos, neises y esquistos (Mange & Maurer, 1992), lo que sugiere que dichas unidades pudieron constituir áreas fuentes primarias del sistema sedimentario.

Las variaciones en la abundancia de minerales entre estaciones reflejan una heterogeneidad en las áreas fuente. La presencia de minerales metamórficos es concordante con unidades del basamento del Macizo de Santander, que incluyen rocas de bajo a medio grado de metamorfismo, correspondientes a la zona del granate en facies de esquistos verdes, reportada en los Esquistos del Silgará (García et al., 2005; Castellanos et al., 2008; Mantilla et al., 2016), destacándose minerales como zoisita, clinozoisita, epidota y granate. La presencia de sillimanita indica un grado metamórfico mayor correspondiente a la zona de la sillimanita en facies

anfíbolita (Cordani et al., 2005), mientras que la hornblenda, junto con los minerales del grupo de la epidota se asocian a anfíbolitas. En conjunto, estas asociaciones son consistentes con litologías reportadas en el Neis de Bucaramanga y el Ortoneis (Ward et al., 1973; Cordani et al., 2005; García-Ramírez et al., 2017), que incluyen neises pelíticos y cuarcitas portadoras de granate y sillimanita, así como neises máficos y cuerpos lenticulares de anfíbolitas caracterizados por hornblenda con posible presencia de los minerales del grupo de la epidota y ortopiroxeno.

Los minerales de afinidad ígnea, representados por ortopiroxeno, hornblenda y titanita, junto con la alta abundancia relativa de magnetita, sugieren contribuciones de cuerpos ígneos Triásico–Jurásicos del Grupo Plutónico de Santander, entre los cuales el Monzogranito de La Corcova presenta la mayor distribución y cercanía al área de estudio. Este cuerpo ha sido descrito como portador de minerales accesorios opacos, zircón y titanita, y presenta localmente desarrollos de epidota y clinozoisita asociados a procesos de alteración (Rodríguez et al., 2020), lo cual concuerda con la asociación mineralógica reconocida en los depósitos analizados.

Es importante resaltar que varios de los minerales pesados identificados presentan un origen diverso, pudiendo derivarse de fuentes sedimentarias recicladas, rocas ígneas, metamórficas, así como de procesos hidrotermales y de alteración, por lo que su presencia individual no constituye un indicador inequívoco de procedencia. En este sentido, la interpretación se fundamenta en la asociación mineralógica y en la coherencia espacial con las unidades aflorantes cercanas, más que en la asignación directa de una única fuente para cada especie mineral.

El ensamblaje de minerales pesados está condicionado por sesgos inherentes a los estudios de procedencia, relacionados tanto con la fertilidad mineral de las litologías fuente como

con los procesos que modifican los sedimentos durante la erosión, el transporte y la depositación (Caracciolo, 2020).

La fertilidad de las litologías erosionadas es primordial, siendo las rocas metamórficas de grado medio a alto y las rocas ígneas máficas particularmente fértiles, mientras que las rocas sedimentarias y los granitos contienen cantidades relativamente bajas de minerales accesorios (Garzanti & Andò, 2019). En consecuencia, la presencia de minerales de afinidad ígnea y metamórfica en los depósitos analizados indica la participación efectiva de estas litologías como áreas fuentes.

Las rocas siliciclásticas y, en menor medida, los granitoides, presentan una alta eficiencia en la generación de arena, lo que puede evaluarse mediante el Índice de Generación de Arena (IGA) (Palomares & Arribas, 1993; Arribas & Tortosa, 2003). En el caso del área de estudio, las unidades siliciclásticas Mesozoicas del Macizo de Santander habrían contribuido de manera dominante al volumen de arenas cuarzosas y a la concentración de minerales ultraestables, mientras que las rocas ígneas y metamórficas aportaron una asociación mineralógica más diversa, aunque volumétricamente subordinada, coherente con sus valores de IGA bajos a moderados.

Durante el transporte y la depositación, los ensamblajes de minerales pesados son adicionalmente modificados por procesos de selección física, abrasión mecánica y disolución química (Morton, 1999). La concentración diferencial de minerales está controlada por la velocidad de sedimentación, en función del tamaño, densidad y forma de los granos, conforme al principio de equivalencia hidráulica (Rittenhouse, 1943; Malusà et al., 2013), mientras que el arrastre selectivo regula las variaciones composicionales entre estaciones (Komar & Li, 1988;

Garzanti & Andò, 2019). En sistemas de alta energía, inferidos para los depósitos de Bucaramanga, estos procesos favorecen la preservación selectiva de especies más resistentes.

La estabilidad mecánica y química de los minerales pesados constituye un control adicional sobre su representación en los depósitos. Minerales ultraestables, como zircón, turmalina y rutilo, presentan una alta resistencia tanto a la abrasión como a la alteración química, por su parte, la zoisita, titanita, sillimanita, granate y epidota son moderadamente estable, mientras que minerales ferromagnesianos, como piroxenos y anfíboles, son considerablemente más inestables (Freise, 1931; Thiel, 1945; Pettijohn et al., 1973; Morton, 1999). La presencia puntual de minerales inestables en los depósitos analizados sugiere un aporte relativamente proximal y una alteración post-depositacional limitada, coherente con un enterramiento relativamente rápido y condiciones de alta energía. Esto es favorecido a su vez por el alto relieve del Macizo de Santander, el cual constituye un factor clave para la preservación de la señal de procedencia, a pesar de condiciones climáticas potencialmente favorables a la meteorización química (Garzanti, 2016).

De manera integrada, el ensamblaje identificado responde a la interacción entre fertilidad litológica, relieve, reciclaje sedimentario, selección hidráulica y estabilidad mineral, más que a una reproducción directa de las litologías fuente.

5.5. Presencia de glauconita

En las siete secciones delgadas analizadas, con excepción de SC-5 y SC-7, se reconoció la presencia de glauconita (Figura 8C), la cual ha sido previamente interpretada como indicativa de aporte desde las cuencas de los ríos Chicamocha y Sogamoso, asociadas a las formaciones Aguardiente y Tibú-Mercedes (Solano, 2016; Franco & Ramírez, 2018). Sin embargo, en el

presente estudio, la integración de las evidencias sedimentológicas y de procedencia indica un aporte dominante desde el sector oriental del área de estudio. En este contexto, la glauconita se interpreta como derivada principalmente de unidades Cretácicas del sector oriental reportadas con presencia de este mineral, tales como las formaciones Rosa Blanca, Paja, Tablazo, La Luna o Umir (Etayo-Serna et al., 2019), las cuales son estratigráficamente correlacionables con las formaciones Aguardiente y Tibú-Mercedes (Royero & Clavijo, 2001). De esta manera, la presencia de glauconita refuerza un modelo de aporte este-oeste, sin descartar contribuciones secundarias desde otras áreas regionales.

5.6. Oro nativo y aleación Cu-Zn

La presencia puntual de oro nativo y una aleación Cu-Zn en la estación SC-5, resulta relevante desde el punto de vista de procedencia. En este contexto, se infiere un aporte desde el sector oriental, donde se localiza el Distrito Minero Vetas-California (Mantilla et al., 2009, 2012, 2013), reconocido por su mineralización aurífera y polimetálica. Esta interpretación es consistente con lo reportado por Schimalbach & Rincón (2018), quienes documentan niveles epiclásticos al norte de Bucaramanga y los atribuyen a la erosión de diques volcánicos asociados a dicho distrito. Así mismo, atribuyen que el transporte de estos materiales habría sido facilitado por las quebradas La Plata y Móngora, que drenan el distrito minero y confluyen en el Río Vetas, el cual desemboca en el Río Suratá, permitiendo su incorporación aguas abajo en los depósitos de Bucaramanga (Figura 1).

En conjunto, la integración de la dirección de paleocorrientes, las características texturales y composicionales de clastos y matriz, el ensamblaje de minerales pesados y la presencia puntual de fases metálicas apoyan un modelo de procedencia dominado por aportes

desde el sector oriental del área de estudio, asociado al Macizo de Santander, mostrando una mejor coherencia con el modelo propuesto por De Porta (1959), vinculado al paleo-Río Surata.

6. Conclusiones

Los depósitos aflorantes en el área de Bucaramanga, correspondientes principalmente al Miembro Órganos del Abanico de Bucaramanga, y de manera puntual a los miembros Finos y Gravoso, corresponden a depósitos aluviales proximales generados por flujos hiperconcentrados. Las mediciones de paleocorrientes indican un sentido general de transporte hacia el oeste y un aporte fluvial significativo del Río Suratá desde sectores altos de su cuenca.

El análisis de clastos y de la matriz arenosa evidencia un dominio de aportes sedimentarios reciclados, principalmente Mesozoicos, con contribuciones subordinadas del basamento metamórfico e ígneo, correspondiendo a unidades del Macizo de Santander. Las variaciones texturales y composicionales reflejan cambios en la energía del transporte y una disminución progresiva de energía hacia el oeste dentro del sistema aluvial.

El conjunto de minerales pesados, dominado por el zircón y acompañado por minerales de afinidad metamórfica e ígnea, respalda un modelo de procedencia regional compleja, controlado por el reciclaje sedimentario y la erosión diferencial de unidades del Macizo de Santander. La diversidad de afinidades genéticas de los minerales pesados identificados impide una asignación unívoca de fuente para cada especie, por lo que la interpretación se fundamenta en asociaciones mineralógicas integradas con el contexto geológico regional.

La identificación de oro nativo y una aleación Cu–Zn en la estación SC-5 constituye un indicador directo de procedencia desde el Distrito Minero Vetas-California, lo que refuerza de manera consistente la interpretación de una fuente dominante oriental.

7. Recomendaciones

Con el fin de profundizar en la comprensión de la procedencia y la evolución de los depósitos del Abanico de Bucaramanga, se recomienda complementar los análisis realizados con estudios geocronológicos, particularmente dataciones U–Pb en circones detríticos, que permitan discriminar con mayor precisión las contribuciones relativas de las distintas unidades fuente. Asimismo, la ampliación del muestreo hacia sectores al sur del abanico y los miembros superiores. Finalmente, se sugiere integrar análisis geoquímicos de minerales pesados y estudios detallados de isótopos, con el objetivo de refinar los modelos de procedencia.

De manera complementaria, se sugiere evaluar, mediante estudios especializados y bajo criterios técnicos, legales y ambientales estrictos, el potencial económico asociado a los minerales pesados identificados, particularmente la presencia puntual de oro detrítico, considerando los posibles riesgos geotécnicos y la estabilidad del terreno.

Referencias Bibliográficas

- Alaska Satellite Facility. (2015). *ALOS RTC product AP_26885_FBS_F0120_RT1: Terrain-corrected DEM (30 m)*. University of Alaska Fairbanks.
- Alarcón, C. M., & Rodríguez, J. G. (2019). *Estratigrafía, facies y paleoambiente de sedimentación de la Formación Jordán: Un registro fluvio-lacustre con incidencia de actividad volcánica* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/13047>
- Alarcón, C. M., Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. C., & Rodríguez, J. G. (2020). Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 1137–1151. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Arche, A. (2010). Análisis de la procedencia en depósitos arenosos. En A. Arche (Ed.), *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (pp. 397–434). Madrid, España. <https://www.academia.edu/44029010>
- Arribas, J., & Tortosa, A. (2003). Detrital modes in sedimenticlastic sands from low-order streams in the Iberian Range, Spain: The potential for sand generation by different sedimentary rocks. *Sedimentary Geology*, 159(3–4), 275–303. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(02\)00332-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00332-9)
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G., & Salazar-Franco, A. M. (2020). Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying

- Colombian Jurassic rocks. En J. Gómez & A. O. Pinilla-Pachon (Eds.), *The geology of Colombia* (Vol. 2, pp. 171–207). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Bustamante Gonzáles, F. Y. (2017). *Procedencia sedimentaria de depósitos cenozoicos en base a análisis de minerales pesados en Pachia (36v) y Tacna (37v), Tacna* [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1416>
- Caracciolo, L. (2020). Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development. *Earth-Science Reviews*, 209, 103226. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103226>
- Castellanos, O. M., Ríos, C. A., & Takasu, A. (2008). A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with P–T paths of the Barrovian-type Silgará Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Earth Sciences Research Journal*, 12(2), 125–155. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/21185>
- Clavijo, J., & Royero, J. M. (2001). *Mapa geológico generalizado del departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria explicativa*. INGEOMINAS.
- Contreras Moreno, J. C., & Osma Duarte, A. S. (2018). *Caracterización del segmento Órganos inferior en el miembro Órganos (Formación Bucaramanga) en el norte de Bucaramanga* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39255>
- Cordani, U., Cardona, A., Jiménez, D., Liu, D., & Nutman, A. (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: Tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. En A. P. M. Vaughan, P. T. Leat, & R. J. Pankhurst (Eds.),

- Terrane processes at margins of Gondwana* (pp. 329–346). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.246.01.13>
- De Porta, J. (1959). La terraza de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, (3), 5–13. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4000>
- Diederix, H., Torres, E., Hernández, C., & Botero, P. (2008). *Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga*. INGEOMINAS.
- Diederix, H., Hernández, C., Torres, E., Osorio, J. A., & Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 9(2), 18–23. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/903
- Etayo-Serna, F. (1989). *Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander*. Guía de excursión técnica, V Congreso Colombiano de Geología.
- Etayo-Serna, F. (2019). *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585231788>
- Franco Corredor, M. A., & Ramírez Arévalo, A. M. (2018). *Reconstrucción Paleoambiental de los Miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga en el Área Metropolitana de Bucaramanga* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39200>

- Freise, F. W. (1931). Untersuchung von Mineralen auf Abnutzbarkeit bei Verfrachtung im Wasser. *Zeitschrift für Kristallographie, Mineralogie und Petrographie*, 41, 1–7. <https://doi.org/10.1007/BF02949762>
- García González, Y. C., & Añez Medina, M. (2017). *Evolución reciente de los drenajes de los ríos Chicamocha y Suárez* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/36025>
- García-Ramírez, C. A., Rey-León, V., & Valencia, V. (2017). Ortoneises en la Franja Silos–Babega, Macizo de Santander, Colombia: Evidencias de la orogenia famatiniana en los Andes del norte. *Andean Geology*, 44(3), 307–327. <https://doi.org/10.5027/andgeov44n3-a04>
- García, C., Ríos, C., & Castellanos, O. (2010). Medium-pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 27(2). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/873>
- Garnica Suárez, A. F., & Niño Pinto, L. G. (2015). *Caracterización sedimentológica del segmento Órganos de la Formación Bucaramanga en el sector del anillo vial del municipio de Girón, Santander* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/32420>
- Garzanti, E. (2016). From static to dynamic provenance analysis—Sedimentary petrology upgraded. *Sedimentary Geology*, 336, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.010>
- Garzanti, E., & Andò, S. (2019). Heavy minerals for junior woodchucks. *Minerals*, 9(3), 148. <https://doi.org/10.3390/min9030148>
- Gómez, J., Núñez-Tello, A., Mateus-Zabala, D., Alcárcel-Gutiérrez, F. A., Lasso-Muñoz, R. M., Marín-Rincón, E. & Marroquín-Gómez, M. P. (2020). Physiographic and geological

- setting of the Colombian territory. En J. Gómez & D. Mateus-Zabala (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic–Paleozoic* (pp. 1–16). Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35.
- Gutiérrez Barrera, J. C., & Pico Barrajas, D. (2020). *Caracterización sedimentológica de la formación Bucaramanga en el relleno sanitario El carrasco* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39744>
- Howard, J. L. (1993). The statistics of counting clasts in rudites: A review, with examples from the Upper Palaeogene of southern California, USA. *Sedimentology*, 40, 157–174.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01759.x>
- Hubach, E. (1952). *Interpretación geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa*. Servicio Geológico Colombiano.
- Ingram, R. L. (1954). Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 65(9), 937–938.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65\[937:TFTOTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[937:TFTOTS]2.0.CO;2)
- Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS). (2001). *Zonificación sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga*. Bogotá, Colombia.
- Irving, E. M. (1971). La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia. *Boletín Geológico*, 19(2), 1–90. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol19.2.1971.395>
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccenna, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a ≤ 3 mm/yr slip rate for the Bucaramanga–

- Santa Marta Fault, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 57, 12–22.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.11.001>
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de Las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia). *Boletín de Geología*, (1), 7–43.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3994>
- Komar, P. D., & Li, Z. (1988). Applications of grain-pivoting and sliding analyses to selective entrapment of gravel and to flow-competence evaluations. *Sedimentology*, 35, 681–695.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1988.tb01244.x>
- López Isaza, J. A., Cuéllar Cárdenas, M. A., Osorio Naranjo, J. A., Bernal Vargas, L. E., & Cortés Castillo, E. (2008). Pseudotaquilitas y el carácter paleosísmico de un segmento del sistema de fallas de Bucaramanga (SFB), noreste del municipio de Pailitas, departamento del Cesar, Colombia. *Boletín de Geología*, 30(2).
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/42>
- Malusà, M. G., Carter, A., Limoncelli, M., Villa, I. M., & Garzanti, E. (2013). Bias in detrital zircon geochronology and thermochronometry. *Chemical Geology*, 359, 90–107.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.09.016>
- Mantilla-Figueroa, L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiríticos del distrito aurífero de Vetás-California (departamento de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 31(1).
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/164>
- Mantilla-Figueroa, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, H. (2012). Nuevas evidencias sobre el magmatismo miocénico en el distrito minero de Vetás-California (Macizo de

- Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33(1).
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/2471>
- Mantilla-Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. J. (2013). The magmatic history of the Vetás-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235–249.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.006>
- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., & Valencia, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada Formación Silgará (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33–50.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Mange, M. A., & Maurer, H. F. W. (1992). Heavy minerals in the study of sediments: Their application and limitations. En *Heavy minerals in colour* (pp. 4–10). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-2308-2_2
- Martini, M., & Ortega-Gutiérrez, F. (2018). Tectono-stratigraphic evolution of eastern Mexico during the break-up of Pangea: A review. *Earth-Science Reviews*, 183, 38–55.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.013>
- Montes, N., & Sandoval, A. (2001). *Base de datos de fallas activas de Colombia. Recopilación bibliográfica*. Servicio Geológico Colombiano.
- Mora, A., & García, A. (2006). *Cenozoic tectono-stratigraphic relationships between the Cesar sub-basin and the southeastern Lower Magdalena Valley basin of northern Colombia*. AAPG Annual Convention.
- Morton, A. C. (1985). Heavy minerals in provenance studies. En G. G. Zuffa (Ed.), *Provenance of arenites* (pp. 249–277). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_12

- Morton, A. C., & Hallsworth, C. R. (1999). Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124(1–4), 3–29. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3)
- Nichols, G. (2009). Field sedimentology, facies and environments. En *Sedimentology and stratigraphy* (pp. 75–77). John Wiley & Sons.
- Palomares, M., & Arribas, J. (1993). Modern stream sands from compound crystalline sources: Composition and sand generation index. En M. J. Johnsson & A. Basu (Eds.), *Processes controlling the composition of clastic sediments* (pp. 313–322). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p313>
- París, G., & Romero, J. A. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico*, 34(2–3), 4–25. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol34.2-3.1994.347>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1973). *Sand and sandstone* (pp. 53–91). Springer Verlag. Berlin Heidelberg, New York.
- Rittenhouse, G. (1943). Transportation and deposition of heavy minerals. *Bulletin of the Geological Society of America*, 54(12), 1725–1780. <https://doi.org/10.1130/GSAB-54-1725>
- Rodríguez, G., Correa-Martínez, A. M., Arango, M. I., Zapata, G., & Bermúdez, J. G. (2020). *Catálogos de las unidades litoestratigráficas de Colombia: Macizo de Santander* (Vol. 1). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279445>
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>

- Solano, L. (2016). *Estudio de proveniencia de los sedimentos de la Formación Bucaramanga al sur del río Frío, en los municipios de Floridablanca y Girón, Santander* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/34996>
- Thiel, G. A. (1945). Mechanical effects of stream transportation of mineral grains of sand size. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 1207.
- Toro, J. (1990). *The termination of the Bucaramanga fault in the Cordillera Oriental, Colombia* [Master's thesis, University of Arizona]. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/558140>
- Trinidad, I., Alván, A., Sánchez, E., & Benites, A. (2016). Proveniencia sedimentaria de las rocas detríticas del Grupo Yura (Jurásico–Cretáceo) en Tacna, basado en análisis de minerales pesados. En *XVIII Congreso Peruano de Geología* (pp. 435–438). <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1626>
- Ujueta, G. (2003). La falla de Santa Marta-Bucaramanga no es una sola falla; son dos fallas diferentes: La falla de Santa Marta y la falla de Bucaramanga. *Geología Colombiana*, 28, 133–153. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/101647>
- Velandia, F. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander: Énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la falla de Bucaramanga* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63257>
- Veloza, G., Styron, R., Taylor, M., & Mora, A. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. *GSA Today*, 22(10), 4–10. <https://doi.org/10.1130/GSAT-G156A.1>

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>