

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

Estudio petrográfico de la ocurrencia de minerales de uranio en el sistema de alta sulfuración en  
la zona de la Baja, California (Santander)

David Alejandro Gil Echeverry y Camila Alejandra Pacheco Manzano

Trabajo de Grado para optar por el título de geólogo

Director:

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2022

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Dedicatoria**

A mis papás que, con su apoyo incondicional, esfuerzo y mucho amor me impulsaron siempre a alcanzar todas mis metas, trabajar por mis sueños y cumplir mis metas. Gracias todo el esfuerzo  
y los buenos consejos.

A mi papá por siempre darme los mejores consejos y enseñanzas para motivarme siempre a ser  
un excelente hombre.

A mi mamá por su infinito amor, apoyo, incondicionalidad, comprensión y por siempre querer  
darme lo mejor.

A mis abuelos, quienes me enseñaron a siempre dar lo mejor de mí.

A mis tíos, primos y amigos de Palmira, quienes siempre están para mí, sin importar lo que  
suceda.

A Alejandro, Felipe, Luisa, Valeria, por acompañarme durante toda la carrera.

A mi compañera, Camila Alejandra, por su excelente trabajo y dedicación.

**David Alejandro Gil Echeverry**

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Dedicatoria**

A Dios.

A mi abuela Luz Elena por enseñarme a creer en mí misma y a luchar por mis sueños, mi tutty  
esto es tan tuyo como mío.

A Liliana Manzano, por su amor y comprensión incondicional, por enseñarme a ser fuerte y  
perseverante, eres la mejor má.

A Diego Felipe, por ser la alegría e inocencia de la familia, eres el mejor regalo que me ha dado  
la vida.

A mi tío Eduar, por ser mi figura paterna y brindarme apoyo siempre, eres mi modelo a seguir.

A mi familia, por ser mi motor de vida.

A Leidy Muñoz y Silvio Pacheco, por brindarme su amistad incondicional, hicieron mi pregrado  
inolvidable.

A mis amigos de GCG, Johnatan, José Javier y Eliana por permitirme disfrutar mi profesión y a  
crecer en esta.

A mi compañero de tesis David Alejandro, por compartir esta experiencia conmigo.

**Camila Alejandra Pacheco Manzano**

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **Agradecimientos**

Ofrecemos un especial agradecimiento a la Escuela de Geología y a los funcionarios Luis Eduardo Garrido Palencia, Cesar Enrique Llenera Betancour y Carlos Villareal quienes brindaron su apoyo en el desarrollo de este proyecto. Agradecemos a el director de escuela Carlos Alberto Ríos por el prestamos de equipos y laboratorios para el desarrollo de esta tesis.

Agradecemos a el director de este proyecto Andrés Mauricio Cáceres Bottia por su guía en el desarrollo de esta tesis.

A los docentes que a lo largo del pregrado nos ayudaron a crecer personal y profesionalmente. A nuestros colegas y compañeros de la universidad por brindarnos apoyo durante nuestro pregrado, entre esos: Leidy, Lexlys, Juanita, Silvio, Angela, Ronald, Juliana, Sol, Jaime, Alejandro, Felipe, Luisa, Valeria, Víctor, José y Fabián.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
Localización del área de estudio .....	18
1. Objetivos .....	20
1.1 Objetivo general .....	20
1.2 Objetivos específicos .....	20
2. Metodología .....	21
2.1 Fase de Pre-Campo .....	21
2.2 Fase de Campo .....	21
2.3 Fase de Laboratorio .....	22
2.4 Análisis e interpretación de datos .....	22
2.5 Elaboración del informe final .....	23
3. Antecedentes .....	24
4. Marco geológico .....	29
4.1 Estratigrafía .....	29
4.1.1 Rocas del Pre-Mesozoicas .....	29
4.1.2 Rocas del Triásico Tardío - Jurásico Temprano .....	30
4.1.3 Rocas del Mioceno Tardío – Plio-Pleistoceno .....	30
4.2 Geología Estructural .....	31

# ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

5.	RESULTADOS.....	33
5.1	Localización de las muestras .....	33
5.2	Descripción macroscópica y microscópica.....	34
5.2.1	Granitos .....	34
5.2.1.1	Muestra DC-001 .....	34
5.2.1.2	Muestra DC-002 .....	36
5.2.1.3	Muestra DC-005 .....	38
5.2.1.4	Muestra DC-006 .....	40
5.2.2	Brechas Hidrotermales .....	42
5.2.2.1	Muestra DC-003 .....	42
5.2.2.2	Muestra DC-004 .....	44
5.3	Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	49
5.3.1	Muestra DC-002 (Leucogranito).....	49
5.3.2	Muestra DC-003 (Leucogranito).....	53
5.3.3	Muestra DC-004 (Brecha Hidrotermal) .....	56
5.3.4	Muestra DC-006 (Leucogranito).....	58
5.3.5	Muestra DC-007 (Leucogranito).....	60
6.	Discusión.....	63
7.	Conclusiones .....	77

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

8. Recomendaciones .....	78
Referencias Bibliográficas .....	79

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Mediciones radiométricas tomadas con SPP2, en el área de La Baja, California (Santander).....	33
<b>Tabla 2.</b> Tabla del diagrama elemental de pirita para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	50
<b>Tabla 3.</b> Tabla del diagrama elemental de galena para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	51
<b>Tabla 4.</b> Tabla del diagrama elemental de esfalerita para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	52
<b>Tabla 5.</b> Tabla del diagrama elemental de cofinita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	53
<b>Tabla 6.</b> Tabla del diagrama elemental de cofinita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	54
<b>Tabla 7.</b> Tabla del diagrama elemental de pirita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	55
<b>Tabla 8.</b> Tabla del diagrama elemental de cuarzo para la sección DC-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	56
<b>Tabla 9.</b> Tabla del diagrama elemental de circón para la sección DC-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	57
<b>Tabla 10.</b> Tabla del diagrama elemental de barita para la sección DC-006. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	58

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

<b>Tabla 11.</b> Tabla del diagrama elemental de circón para la sección DC-006. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	59
<b>Tabla 12.</b> Tabla del diagrama elemental de monacita para la sección DC-007. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.....	61
<b>Tabla 13.</b> Secuencia paragenética del área de estudio, fuente de los Autores. ....	76

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Localización del Complejo Minero de Vetas y California y el área de estudio en base a la plancha 110 del IGAC.....	18
<b>Figura 2.</b> Localización del área de estudio en base a la plancha 110 del IGAC.....	19
<b>Figura 3.</b> Localización de las muestras tomadas en área de estudio y su radiación en CPS, mapa en base a la plancha 110 del IGAC.....	34
<b>Figura 4.</b> Granito con alteración sericítica, venilleo de cuarzo y sulfuros, radiación de 2.500 CPS. (Muestra DC-001).....	35
<b>Figura 5.</b> Granito con cristales de sericita (Ser) en una matriz de cuarzo (Qz), se observan cristales euhderales de pirita (Py) en la matriz. ....	36
<b>Figura 6.</b> Granito con alteración argílica avanzada, con presencia de pirita en bandas, radiación de 7.500 CPS. (Muestra DC-002).....	37
<b>Figura 7.</b> Granito con alunita (Al) y cuarzo (Qz), producto de la alteración argílica avanzada, hacia la izquierda se observa un cristal de moscovita (Ms) que ha sido reemplazado parcialmente por la matriz de cuarzo-alunita. En nicoles paralelos (NP), se observan cristales de pirita (Py), Muestra DC-002.....	38
<b>Figura 8.</b> Granito con alteración argílica avanzada, se observa cuarzo oqueroso y formación de cuarzo-alunita, radiación de 10.000 CPS. (Muestra DC-005). ....	39
<b>Figura 9.</b> Granito con cristales de circón (Zr) de tamaño de grano muy fino, dentro de una matriz de cuarzo masivo (Qz masivo), Muestra DC-005.....	40
<b>Figura 10.</b> Granito con alteración argílica avanzada, con destrucción total de los feldespatos, radiación de 2.000 CPS. (Muestra DC-005). ....	41

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

<b>Figura 11.</b> Granito con cuarzo (Qz), gran presencia de minerales opacos (Op) como pirita y galena, Muestra DC-006.....	42
<b>Figura 12.</b> Brecha hidrotermal compuesta principalmente por cuarzo-alunita, se observa cuarzo oqueroso, con presencia de brochantita y calcantita, radicación de 15.000 CPS, Muestra DC-003. ....	43
<b>Figura 13.</b> Brecha Hidrotermal con cuarzo residual (Qz residual), presencia de circones (Zr), en nicoles paralelos (NP) se aprecian las oquedades del cuarzo, Muestra DC-003. ....	44
Figura 14. Brecha hidrotermal compuesta principalmente por cuarzo-alunita, se observa cuarzo oqueroso, con presencia de brochantita y calcantita, pirita fina diseminada, radicación de 15.000 CPS, Muestra DC-004. ....	45
<b>Figura 15.</b> Brecha Hidrotermal con oquedades del cuarzo (Oq) y cristales de pirita (Py), Muestra DC-004.....	46
<b>Figura 16.</b> Granito, en nicoles cruzados (NC), se observa una vena de cuarzo (Qz) con una textura tipo rompecabeza que rellenó una cavidad dentro de sericita (Ser), producto de la alteración de la plagioclasa, en nicoles paralelos (NP) se observan algunos cristales de circón (Zr), Muestra DC-001.....	47
<b>Figura 17.</b> Granito, en nicoles cruzados (NC), se observan las relaciones de los tamaños de grano entre el cuarzo masivo microcristalino (Qz masivo) y el cuarzo en cresta (Qz en cresta). El cuarzo en cresta se caracteriza por formas prismáticas, Muestra DC-002. ....	48
<b>Figura 18.</b> Brecha hidrotermal con cuarzo tipo rompecabeza (Qz tipo rompecabeza) de tamaño medio, en nicoles paralelos (NP) se observan cristales de pirita (Py), Muestra DC-003. ....	48
<b>Figura 19.</b> Cristal de Pirita y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	50

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

<b>Figura 20.</b> Cristal de Galena y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	51
<b>Figura 21.</b> Cristal de Esfalerita y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	53
<b>Figura 22.</b> Cristal de Cofinita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	54
<b>Figura 23.</b> Cristal de Cofinita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	55
<b>Figura 24.</b> Cristal de Piritita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	56
<b>Figura 25.</b> Cristal de Cuarzo y diagrama de elementos (DC-004). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	57
<b>Figura 26.</b> Cristal de Circón y diagrama de elementos (DC-004). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	58
<b>Figura 27.</b> Cristal de Barita y diagrama de elementos (DC-006). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	59
<b>Figura 28.</b> Cristal de Circón y diagrama de elementos (DC-006). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	60
<b>Figura 29.</b> Cristal de Monacita y diagrama de elementos (DC-007). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.....	62
<b>Figura 30.</b> Circón con contenido de uranio 00.46 Wt% (Sección DC-006).....	64
<b>Figura 31.</b> Circón con uranio 01.09 Wt% (Sección DC-006).....	64
<b>Figura 32.</b> Circón con uranio 01.70 Wt% (Sección DC-006).....	65

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

<b>Figura 33.</b> Xenotima con contenido de uranio 01.21 Wt%. (Sección DC-002). .....	66
<b>Figura 34.</b> Pirita con contenido de uranio 01.22 Wt% comportándose como agente reductor en el sistema (Sección DC-002). .....	67
<b>Figura 35.</b> Esfalerita con contenido de uranio 01.46 Wt% comportándose como reductor en el sistema. Sección (DC-002). .....	68
<b>Figura 36.</b> Circón lixiviado producto de la alteración hidrotermal presente en la zona. (Sección DC-007). .....	71
<b>Figura 37.</b> Cristal de cofinita asociada a la lixiviación del circón (Sección DC-007).....	71
<b>Figura 38.</b> Cristal de Cofinita identificado mediante SEM, embebido en cuarzo residual. (Sección DC-006). .....	73
<b>Figura 39.</b> Cristal de Cofinita con UL 67.45%, embebido en masa residual de cuarzo (Sección DC-006). .....	74
<b>Figura 40.</b> Masa silíceo de cuarzo residual con cofinita (Sección DC-006).....	75

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### Resumen

**Título:** Estudio petrográfico de la ocurrencia de minerales de uranio en el sistema de alta sulfuración en la zona de la baja, california (Santander)\*

**Autores:** David Alejandro Gil Echeverry, Camila Alejandra Pacheco Manzano\*\*

**Palabras Clave:** Uranio, Protección radiológica, Epitermal, Cofinita, Xenotimo.

### Descripción:

El Distrito Minero de Vetas y California (DMVC), se ubica en las estribaciones de la Cordillera Oriental, específicamente en el Macizo de Santander (MS). EL DMVC es reconocido principalmente por la presencia de mineralizaciones auríferas. Los yacimientos de esta zona han sido caracterizados como de Alta e Intermedia sulfuración. Sin embargo, en la zona de la Baja, en el municipio de California (Santander) se ha reconocido la presencia de alta radiación desde los años 50's. El presente trabajo pretende asociar dicha radiación correspondiente a un enriquecimiento en uranio producto del evento magmático hidrotermal relacionado con los epitermales de alta sulfuración.

El enriquecimiento de uranio ocurre por una alta diferenciación magmática, la cual permitió el enriquecimiento en elementos incompatibles en minerales accesorios como circones y xenotimos, posteriormente un evento hidrotermal de alta sulfuración generó fluidos ácidos y oxidados los cuales ascendieron por las fracturas presentes en el área, generando la removilización, transporte y precipitación de uranio. La fase de mineralización de uranio ocurre durante la etapa temprana de formación del litocap.

La concentración de estos minerales de uranio se da principalmente en cercanías del casco urbano de La Baja, en donde los habitantes de la zonas y visitantes de la capilla de San Antonio usan el agua que percola las rocas mineralizadas para cocinar, bañarse y demás actividades, lo cual los expone a constante radiación.

---

\*Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de geología. Director: M. Sc. Andrés Cáceres Bottia.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Abstract**

**TITLE:** Petrographic study of the occurrence of uranium minerals in the high Sulphidation system in Baja, California (Santander)\*

**AUTHORS:** David Alejandro Gil Echeverry, Camila Alejandra Pacheco Manzano\*\*

**KEYWORDS:** Uranium, Radiation Protection, Epithermal, Cofinite, Xenotime.

**DESCRIPTION:** The Vetas y California Mining District (DMVC) is located in the foothills of the Cordillera Oriental, specifically in the Santander Massif (MS). The DMVC is recognized mainly by the presence of gold mineralization. The deposits in this area have been characterized as High and Intermediate sulphidation. However, in the Baja area, in the municipality of California (Santander), the presence of high radiation has been recognized since the 1950s. The present work intends to associate this radiation corresponding to a uranium enrichment product of the hydrothermal magmatic event related to the high sulfidation epithermals.

Uranium enrichment occurs due to a high magmatic differentiation, which allowed the enrichment of incompatible elements in accessory minerals such as zircons and xenotimes, later a high sulfidation hydrothermal event generated acidic and oxidized fluids which rose through the fractures present in the area, generating the remobilization, transport and precipitation of uranium. The uranium mineralization phase occurs during the early stage of lithocap formation.

The concentration of these uranium minerals occurs mainly in the vicinity of the urban area of La Baja, where the inhabitants of the areas and visitors to the chapel of San Antonio use the water that percolates the mineralized rocks for cooking, bathing and other activities. which exposes them to constant radiation.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Physicochemical Engineering College. Geology Department. Director: M. Sc Andres Cáceres Bottia.

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### Introducción

Existen cerca de 200 minerales en el mundo que presentan Uranio en su composición química como un constituyente estructural importante Fleischer y Mandarino, 1995 en Burns y Finch, 1999). Este elemento, a su vez, es parte fundamental para la generación de energía con cero emisiones de CO<sub>2</sub>. El Uranio produce alrededor del 11% de la energía mundial en las centrales nucleares (WorldNuclear, 2017 en Porras y Díaz, 2019). Según Grancea *et al.*, 2020, los principales países que explotan este metal son: Canadá, China, Kazajistán representando el 93% de la explotación mundial y para el primero de enero del 2019 la producción mundial de Uranio era de 53.516 toneladas. En Colombia, 15 departamentos presentan manifestaciones de uranio y para el 2019 según información de Catastro Minero, existían tres títulos vigentes para la exploración de uranio en Colombia. (Prieto , Guatame, & Cardenas, 2019).

La explotación de oro y plata en la región de La Baja, en el municipio de California, Santander, data de la época colonial. La zona de estudio ha sido objeto de exploración de diferentes empresas mineras como Eco Oro y Grey Star, debido al gran potencial minero que representa el área del Distrito Minero de Vetas y California (Guerrero, 2017)

En la zona de estudio se ha evidenciado la presencia de minerales radiactivos como el Uranio, la Tobernita, Pechblenda y Autunita. (Lleras Codazzi, 1927 en Bueno,1955). Una de las primeras fuentes que mencionan la presencia de este elemento es Ricardo Lleras Codazzi en su libro *Minerales de Colombia* de 1927. A partir del año de publicación, se realizaron investigaciones gracias al apoyo de empresas extranjeras como Anaconda Copper, la cual en 1945 realizó proyectos exploratorios de uranio en el municipio de California, Santander (Porras & Díaz , 2019).

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

Bueno, (1955) propone que los yacimientos de Uranio se encuentran distribuidos en depósitos hipógenos, donde las soluciones enriquecidas por sustancias minerales rellenaron las fracturas de las rocas adyacentes. La mineralización ocurrió en condiciones de temperatura y presión moderadas a bajas, mediante procesos mesotermales e incluso, epitermales.

En el año 1953, el Instituto Geológico Nacional y la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos de América, realizaron estudios radiométricos con el fin de obtener información detallada acerca de las zonas cuya concentración de Uranio es mayor (López & Bueno). Estudios recientes indican que las zonas de alta radiación se encuentran ligadas a zonas de alteración hidrotermal, cuyos fluidos son de alta sulfuración, así mismo, determinaron que las concentraciones importantes de radiación están delimitadas estructuralmente y posiblemente ligadas por la Falla de La Baja (Bautista *et al.*, 2016).

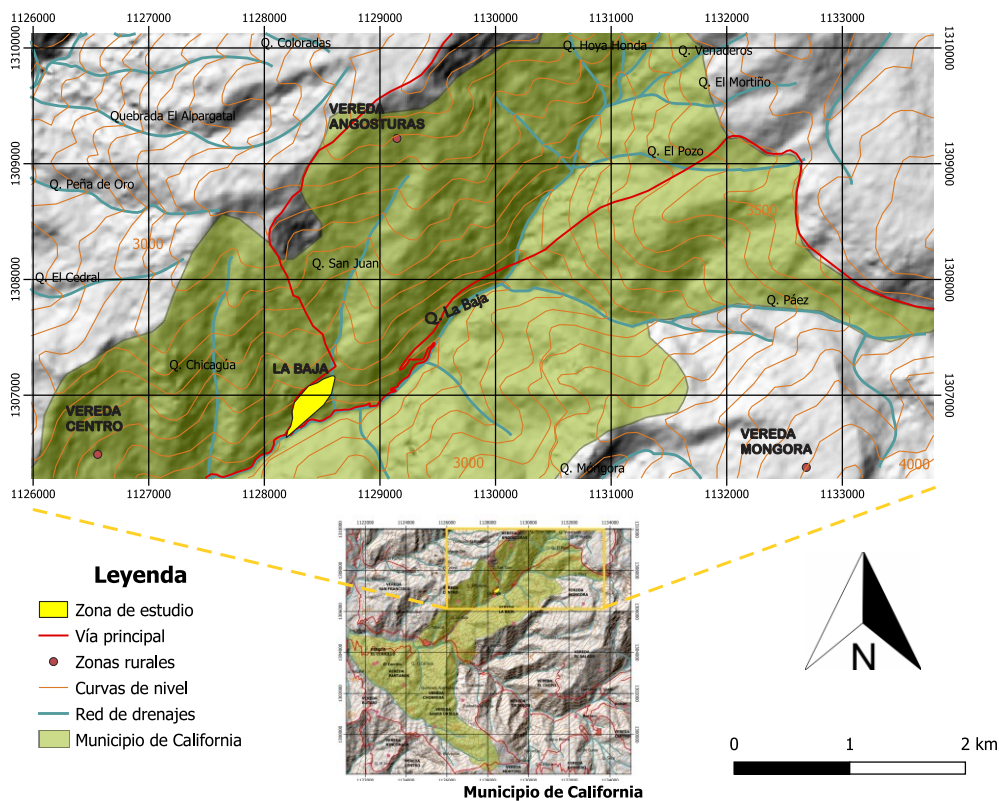
Según Prieto *et al.*, 2019, desde el punto de vista radiológico y químico, el uranio es un elemento altamente tóxico. En el aire, la concentración máxima permisible de compuestos solubles de uranio es 0.2 mg/m<sup>3</sup> desde el punto de vista químico, respecto a la radiactividad, la radiación total máxima de uranio permisible para el organismo es 0.2 microcuries. (Alemán & Ramos, 2000).



ESTUDIO DE LA OCURENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 2.**

*Localización del área de estudio en base a la plancha 110 del IGAC.*



## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **1. Objetivos**

#### **1.1 Objetivo general**

Determinar las características y propiedades de la mineralización de uranio en la zona de La Baja, California (Santander), mediante la medición de datos radiométricos y toma de muestras en campo, las cuales serán analizadas mediante estudios petrográficos con el fin de determinar su relación con el sistema epitermal de alta sulfuración y su posible afectación radiológica en el área.

#### **1.2 Objetivos específicos**

Desarrollar la fase de campo con el fin de recolectar datos y realizar muestreos de las zonas que reportan mayor radiación.

Describir textural y composicionalmente las rocas asociadas a la mineralización de uranio mediante técnicas macroscópicas y microscópicas, con el fin de realizar una caracterización de las litologías de interés.

Realizar estudio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a las rocas con mayor concentración de uranio, con el fin de determinar relaciones texturales y valores cualitativos elementales.

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **2. Metodología**

Para la elaboración de este trabajo de grado se llevará a cabo cinco fases de carácter secuencial, estas empiezan con la fase pre-campo, continuando con la fase de campo, laboratorio, análisis e interpretación de datos y finalmente la elaboración del informe final.

#### **2.1 Fase de Pre-Campo**

En esta fase se recopiló la información bibliográfica de la zona de estudio por medio de artículos científicos, trabajos de grados, libros e información existente sobre el área y tema de interés. Esto para realizar una contextualización geológica de la zona de La Baja, California (Santander).

#### **2.2 Fase de Campo**

En esta fase se realizó el reconocimiento de las zonas con mayores valores radiométricos y se describieron las litologías que albergan dichas anomalías radiométricas que se encuentran en el sector La Baja, California (Santander); para esto se realizó la toma de datos radiométricos con la ayuda de un Centillometro SPP2 (unidad en Cuentas por Segundo, CPS), el instrumento de medición se mantuvo encendido durante todo el recorrido en campo para identificar las zonas con mayor concentración de elementos radioactivos y realizar el respectivo muestreo de rocas en las zonas con anomalías de uranio.

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **2.3 Fase de Laboratorio**

Durante esta fase se realizó el análisis macro y microscópico de las muestras recolectadas durante la fase 2.2. Se realizaron estudios mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para determinar relaciones texturales y establecer de manera cualitativa los elementos relacionados en las muestras de mayores enriquecimientos. El análisis microscópico se llevó a cabo en el laboratorio de petrología de la escuela de geología de las Universidad Industrial de Santander; Se realizaron secciones delgadas pulidas expuestas en una cara con el fin de caracterizar petrográficamente las rocas encontradas en el área de interés, para esto se hizo uso del microscopio de luz transmitida Nikon Eclipse E200 50/POL y el microscopio de luz reflejada junto con la pantalla y cámara integradas. Los estudios de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se realizaron en la sede Parque Tecnológico de Guatigará de la Universidad Industrial de Santander, haciendo uso del microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun) Quanta FEG 650, las imágenes se tomaron con alto vacío, voltaje de aceleración 15kV, electrones secundarios (SE): Everhart Thornely detector ETD, Electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electron detector (BSED), para el análisis químico se utilizó un volteje de aceleración Kv, Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn  $k\alpha$ ) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy). Software EDX Genesis, información semicuantitativa de los elementos químicos.

### **2.4 Análisis e interpretación de datos**

Se determinó la secuencia paragenética a partir de los análisis petrográficos y de estudios de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Posteriormente, se relacionó el

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) como el detonante del enriquecimiento de Uranio en el sistema epitermal. A partir del levantamiento radiométrico se establecieron los lugares con valores de radiación.

### **2.5 Elaboración del informe final**

Finalmente, se recopilieron los datos adquiridos durante las fases previas en el trabajo de investigación con el fin de dar respuesta a los objetivos planteados. Los resultados obtenidos aportarán al conocimiento geológico de elementos radiactivos en Colombia y cómo estos elementos afectan a las comunidades.

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### 3. Antecedentes

El área de estudio hace parte del Sistema Orogénico Andino, más concretamente de los Andes del Norte (Gansser *et al.*, 1997, Alemán y Ramos, 2000) y se localiza sobre el Terreno Chibcha (Restrepo *et al.*, 2011). La Cordillera de los Andes exhibe variaciones a nivel tectónico, además de las fallas de rumbo. Los orógenos y acreciones desarrolladas en la cordillera generan que el margen noroccidental del continente Sudamericano sea complejo (Cediel *et al.*, 2003). La complejidad entre las relaciones de La Placa Suramericana, La Placa Caribe con movimiento hacia el Este, La Placa Nazca con movimiento E-SE y La Placa Cocos con movimiento E-NE generan la deformación de los Andes del Norte (Toboada *et al.*, 2000). De acuerdo con Restrepo *et al.*, (2011) y Mantilla *et al.*, (2012) el sistema Orogénico Andino Colombiano es el resultado de varios eventos de acreción de terrenos.

Según Osorio *et al.*, (2008), durante el Plio-Cuaternario se generó el mayor pulso de levantamiento de la Cordillera Oriental y por ende del Macizo de Santander (MS). El emplazamiento del MS ocurrió por el levantamiento vertical a partir de la inversión de fallas normales de alto ángulo durante el Jurásico (Kammer, 1993). El MS se encuentra en el terreno Chibcha, según Tussaint (1993) presenta un basamento continental del Precámbrico. El MS está ubicado dentro del dominio de la Sub-placa de Maracaibo, la cual a finales del Cretácico comenzó a migrar hacia el NE a lo largo del sistema de Fallas de Bucaramanga-Santa Marta y Oca-El pilar formando en cinturón de Santander-Perijá (Cediel *et al.*, 2003). La Falla Bucaramanga-Santa Marta es el límite occidental de la subplaca Maracaibo, la cual ha tenido un desplazamiento total de 100 km (Campbell, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985 en Cediel *et al.*, 2003). Para Tussaint (1993),

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

el MS se divide en dos bloques uno que gira en dirección NE generando los Andes de Mérida en Venezuela, el otro bloque con dirección NNW y dirección NE en la serranía de Perijá.

El MS está conformado por rocas metamórficas, las cuales se dividen en dos unidades litodémicas, la primera el Gneis de Bucaramanga, corresponde a una serie de grauvacas, lutitas y rocas volcánicas metamorfoseadas de alto grado y migmatitas, la segunda la Formación Silgará, esta suprayace el Gneis de Bucaramanga, se compone de una serie de Turbiditas y depósitos cíclicos de limolitas, lutitas, areniscas y calizas con metamorfismo de bajo a mediano grado (Goldsmith *et al.*, 1971 en Barbosa, 2016). Según Bissig *et al.*, (2012), se han evidenciado dos episodios metamórficos en el MS. El primero es relacionado con la Orogenia Grenvilliana y el segundo con la Orogenia Caledoniana, estos eventos afectaron rocas con metamorfismo de facies anfibolitas.

Estudios previos en el MS reconocieron cinco eventos magmáticos (Mantilla *et al.*, 2009), en el primer evento ocurre inyección de fluidos graníticos de edad  $461 \pm 10$  (Ward *et al.*, 1973 en Mantilla *et al.*, 2009), el segundo evento se relaciona con la formación de la Monzonita de Onzaga, este evento es de carácter granítico (Boinet *et al.*, 1985 en Mantilla *et al.*, 2009), el tercer evento tiene un carácter diorítico a granítico y se relaciona con la formación del Grupo Plutónico de Santander con edades de 210 Ma según el método de Re-Os y U-Pb (Goldsmith *et al.*, 1971, Polania, 1980, Dorr *et al.*, 1995 en Mantilla *et al.*, 2009), el cuarto evento ocurre durante el cretácico inferior, en este se formaron diques riolíticos y diabásicos (Ward *et al.*, 1973 en Mantilla *et al.*, 2009), el quinto evento data de  $57 \pm 10$  Ma, estas edades fueron obtenidas a partir de concentrados de pirita presentes en filones auríferos del área de California (Mathur *et al.*, 2003 en Mantilla *et al.*, 2009).

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

El Distrito Minero de Vetas y California (DMVC), ha sido estudiado y analizado geológicamente desde hace varias décadas, Wokittel (1954) caracterizó los minerales presentes en los sectores de La Alta, La Baja y Vetas. Bueno (1955) describió los yacimientos auríferos de La Baja y reconoció que los metales preciosos se presentan en zonas de alta concentración separados por zonas estériles. Mendoza y Jaramillo (1979) determinaron que el oro presente en el sector es de tamaño submicroscópico. Pinto (1991) sugiere que ubicación de los pulsos mineralizados está controlado por el tectonismo regional y local. Felder *et al.*, (2000) describen la geología regional y local, además caracterizan los yacimientos presentes en la zona como depósitos de alta sulfidización.

Las unidades litológicas más antiguas presentes en el DMVC corresponden a rocas metamórficas migmatizadas y granitoides, las rocas metamórficas corresponden a gneises feldespáticos, gneises cuarzofeldespáticos gneises biotíticos, anfibolitas y gneises anfibólitos (Galvis , 1998). Mantilla *et al.*, (2011) subdivide las rocas ígneas en tres grupos, el primer grupo corresponde a Alaskitas I compuesto por tonalitas a granodioritas del Triásico-Jurásico, el segundo grupo Alaskitas II del postlímite del Triásico-Jurásico y el tercer grupo corresponde a las rocas ígneas del Mioceno, el magmatismo del Mioceno coincide con la mayor actividad de la Falla Bucaramanga-Santa Marta. Las rocas ígneas y metamórficas presentes en el área de estudio muestran alteración hidrotermal como argílica, propilitica, sericita y silificación (Mendoza y Jaramillo, 1975 en Royero y Clavijo, 2001).

Según Royero y Clavijo (2001), las mineralizaciones presentes en la zona corresponden a oro, pirita, plata, cuarzo y en menos proporción calcopirita, arsenopirita, esfalerita, galena y tetraedrita. La mineralización del DMVC se generó por la actividad magmática del Cenozoico, en la cual se formaron pórfidos dacíticos y andesíticos que produjeron los fluidos mineralizantes

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

(Shaw, 2000). Las estructuras mineralizadas se encuentran en zonas donde la roca encajante ha sido sometida a esfuerzos diferenciales con intenso diaclasamiento y cizallamiento (Royero & Clavijo, 2001). Según Polania (1982), los depósitos de Vetas y California corresponde a depósitos filonianos epitermales de oro y plata, y esta mineralización ocurrió gracias a fracturas sigmoidales y diagonales a la quebrada La Baja. Según Mantilla *et al.*, (2009) un evento durante el Mioceno relacionado con la Orogenia Andina pudo favorecer la formación del sistema magmático-hidrotermal en el área. Las mineralizaciones epitermales de oro se produjeron a finales del Plioceno-Pleistoceno y se sugiere una mineralización temprana tipo pórfido posterior a 7-9 Ma (Bissig *et al.*, 2012).

Según Bissig *et al.*, (2014), las rocas ígneas del MS pertenecen a las series calco-alcálicas con alto contenido de potasio. Siendo las rocas intermedias (composición diorítica) las más antiguas del distrito, con edades que van desde el Triásico Tardío al Jurásico Temprano, con porcentaje en peso de SiO<sub>2</sub> de 54,9% a 60,4%. Los leucogranitos presentes tienen mayor contenido de SiO<sub>2</sub> con 72,7% a 75,8% de porcentaje en peso. Las rocas del Mioceno se clasifican como granodioritas y tonalitas, con un contenido de 63,1 a 66,1 porcentaje en peso. Las dioritas son metaluminosas, mientras que los leucogranitos son peraluminosos y los pórfidos del mioceno se encuentran en el límite entre las composiciones metaluminosas y débilmente peraluminosas.

Los leucogranitos tienen los valores más altos de U, Th y Pb, pero los más bajos de Ba, Sr y Ti. Los pórfidos del Mioceno, por el contrario, están más enriquecidos en Ba y Sr pero empobrecidos en Cs en comparación con las otras rocas ígneas (Bissig *et al.*, 2014).

Para Putnis (2002), la etapa de mineralización se divide en dos fases, la primera de lixiviación-catalización-recristalización, en esta ocurre la primera aparición de minerales de uranio

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

por procesos de lixiviación de los minerales accesorios presentes en el leucogranito, la segunda fase se origina por el frente redox por la precipitación de uraninita en los bordes de minerales de sulfuros como la pirita, la esfarelita, monacita y xenotimos seguido a esto se da el proceso de silicificación el cual permite la captación de los minerales primarios de uranio formados en la primera fase.

Para Rodríguez (2014), la mineralización de uranio en el área de estudio comenzó hace 10-8 Ma y presenta el mayor pico de mineralización hace 4-3.25 Ma.

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### 4. Marco geológico

Los trabajos geológicos y cartográficos realizados en el Municipio de California, Santander y más específicamente en La Baja han sido realizados principalmente por Servicio Geológico Colombiano, INGEOMINAS y entidades privadas, este último con el objetivo de caracterizar las mineralizaciones presentes en el área. Los estudios realizados en la zona han permitido la caracterización de las litologías aflorantes, la geología estructural y el desarrollo minero del DMVC.

#### 4.1 Estratigrafía

La zona de estudio presenta gran variedad litológica, se evidencian desde rocas metamórficas del Precámbrico las cuales se conocen como el Gneis de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973). Rocas metamórficas pre-Devónicas (Ward *et al.*, 1973). Rocas graníticas del Triásico-Jurásico, rocas intrusivas del Terciario (Mantilla *et al.*, 2012), rocas sedimentarias del cretácico y depósitos Cuaternarios.

##### 4.1.1 Rocas del Pre-Mesozoicas

###### 4.1.1.1 Gneis de Bucaramanga

Unidad definida por Ward *et al.*, (1973), posteriormente Royero *et al.*, (2001), define esta unidad como el Complejo de Bucaramanga. El Gneis de Bucaramanga se compone de paraneises cuarzofeldespáticos, horblendíticos, micáceos y granatíferos, en menor proporción se observan anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, mármoles y granulitas (Mantilla *et al.*, 2012). Según Royero y Clavijo (2001) estas rocas son del Precámbrico. El pico de metamorfismo para esta

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

formación data en  $1057\pm 28$  Ma y es asociado con la Orogenia Grenvilliana (Cordani *et al.*, 2005 en Mantilla *et al.*, 2013).

### 4.1.1.2 Formación Silgará

Unidad definida por Ward *et al.*, (1973), es una secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas compuesta por pizarras, filitas, meta-limolitas, metaareniscas y en menor proporción por pizarras y filitas calcáreas. Según el mismo autor esta unidad tiene una edad del Paleozoico y edad equivalente al Ordoviciano o al Cámbrico.

## 4.1.2 Rocas del Triásico Tardío - Jurásico Temprano

### 4.1.2.1 Grupo plutónico de Santander

Unidad definida por Ward *et al.*, (1973), esta unidad está constituida por plutonitas y sedimentitas datadas del Jurásico Inferior y medio, según Goldsmith *et al.*, (1971) los cuerpos intrusivos de esta unidad corresponden a Tonalitas y Granodioritas, las cuales también se conocen como Alaskitas I y II (Mantilla *et al.*, 2011). Las rocas de esta unidad datan del Triásico-Jurásico (Goldsmith *et al.*, 1971 en Bautista *et al.*, 2016).

## 4.1.3 Rocas del Mioceno Tardío – Plio-Pleistoceno

### 4.1.3.1 Cuerpos porfiríticos

Stocks pequeños que hacen parte del cuerpo porfirítico, estos contienen fenocristales de cuarzo y feldespato potásico, se encuentran localizados desde el

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

sector la gran curva del Rio surata hasta el municipio de Vetas (Bautista *et al.*, 2016). Galvis (1998) reporta la presencia de una estructura anular la cual se extiende en un área circular entre 9-10km<sup>2</sup>. Estos cuerpos porfiríticos cortan al grupo plutónico de Santander y al Complejo Bucaramanga (Gneis de Bucaramanga), se evidencian en diques, sills y cuerpos irregulares pequeños (Mantilla *et al.*, 2009, 2012, 2013).

### 4.1.3.2 Brechas Hidrotermales

Según Sillitoe (1985) las brechas presentes en el área de estudio exhiben deformaciones asociadas a una brecha de origen tectónico, según Bautista *et al.*, (2016) estas brechas presentan una cementación compuesta de cuarzo, relacionada con Alunita y alteración argílica avanzada. La edad determinada por método Ar/Ar corresponde a  $2.63 \pm 0.09$  Ma en la Alunita y  $3.343 \pm 0.072$  Ma para la Moscovita (Bissig *et al.*, 2012 en Bautista *et al.*, 2016).

## 4.2 Geología Estructural

El DMVT se define principalmente por fallas con una tendencia N a NE. La Falla Bucaramanga – Santa Marta es uno de los rasgos estructurales más importantes de la zona. Según Clavijo (1994) corresponde a un sistema de fallas de rumbo sinestral con una dirección N20°W. El sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta presenta un componente vertical que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como una falla inversa (Julivert, 1959, Ward *et al.*, 1973).

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

Otra estructura importante presente en el área de estudio es La Falla Cucutilla-Romeral, corresponde a un sistema de fallas de rumbo sinestral con una tendencia NE-SW (Royero y Clavijo, 2001). La falla se desplaza a lo largo de la quebrada Romeral con una dirección hacia el N y se dirige al SW para cruzar el río Vetas y el páramo Rico (Ward *et al.*, 1973). De acuerdo con Horner (2005), este sistema de fallas hace parte del sistema regional de Fallas de Boconó. La estructura principal del área de estudio corresponde a la Falla La Baja que lleva el nombre del río que atraviesa de manera subparalela y es considerada una extensión de la Falla Cucutilla (Bueno *et al.*, 2016). Esta falla corresponde a una falla de rumbo dextral con una dirección NE-SW (Mendoza y Jaramillo, 1979). De acuerdo con Ward *et al.*, (1971), esta falla puede ser interpretada como una falla producida por esfuerzos tensionales en sistema de cizallamiento. Según Mendoza *et al.*, (1973) en Bautista *et al.*, (2016), la importancia de esta estructura radica en el control de la mineralización del segmento NW del DMVT.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Localización de las muestras

A partir de los datos radiológicos tomados durante la fase de campo con el equipo SPP2 (Tabla 1), los datos fueron tomados con el instrumento SPP2, se encuentran en la unidad cuentas por segundo (CPS), cada cuenta que mide el dispositivo corresponde a una desintegración radiactiva, es importante resaltar que el centillómetro no detecta el 100% de las desintegraciones por lo cual el valor de cuentas por segundo será menor que el de desintegración por segundo real.

Teniendo en cuenta los valores de radiación, se realizó un muestreo a las rocas que presentaban mayores anomalías de uranio, identificando los puntos donde la radiación es mayor, en la figura 3 se observa el mapa de la distribución de las muestras.

**Tabla 1.**

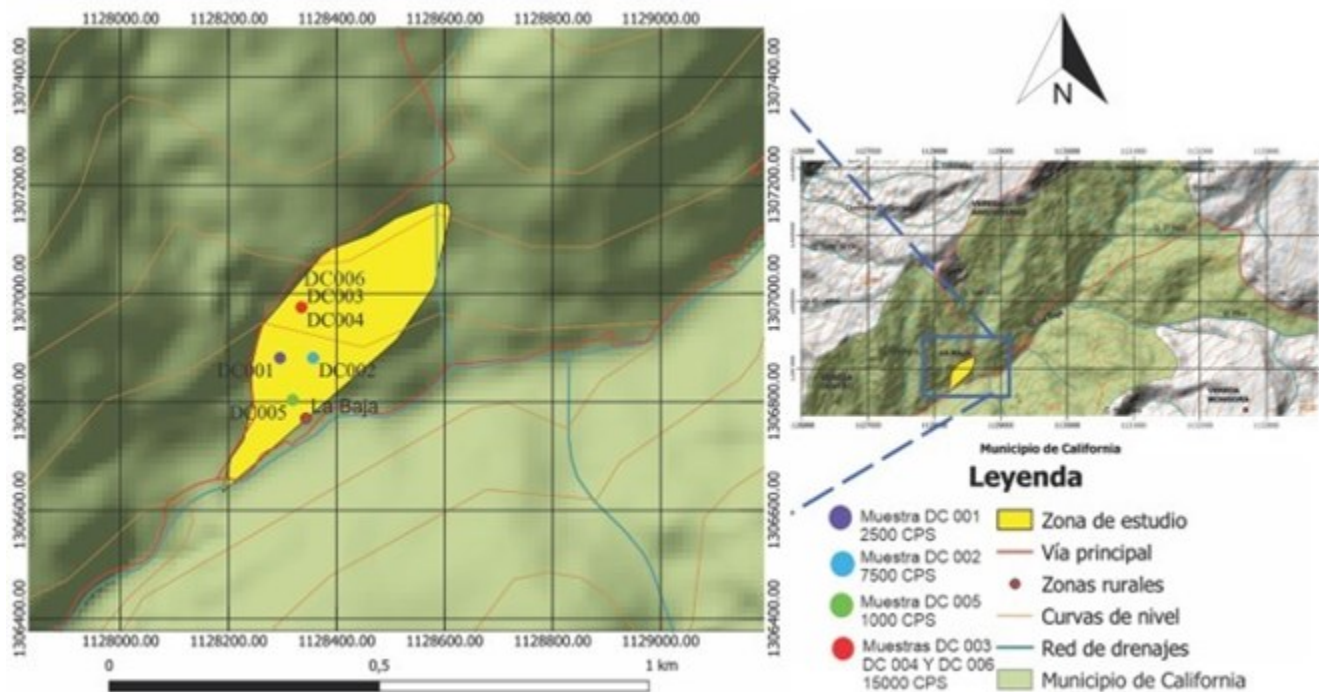
*Mediciones radiométricas tomadas con SPP2, en el área de La Baja, California (Santander)*

Estación	Coordenadas		Radiación (CPS)	Toma de muestra	Código de muestra
	Latitud	Longitud			
1.	7.37222	-72.9125	2.000	No	
2.	7.37111	-72.9117	250	No	
3.	7.37111	-72.9114	150	No	
4.	7.37194	-72.9128	1.200	No	
5.	7.37056	-72.9156	15.000	Si	DC-003 DC-006 DC-007
6.	7.36972	-72.9158	500	No	
7.	7.36972	-72.9161	10.000	No	
8.	7.36972	-72.915	7.500	Si	DC-002
9.	7.369722	-72.9156	2.500	Si	DC-001
10.	7.369022	-72.9153	10.000	Si	DC-005

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

**Figura 3.**

*Localización de las muestras tomadas en área de estudio y su radiación en CPS, mapa en base a la plancha 110 del IGAC.*



## 5.2 Descripción macroscópica y microscópica

### 5.2.1 Granitos

#### 5.2.1.1 Muestra DC-001

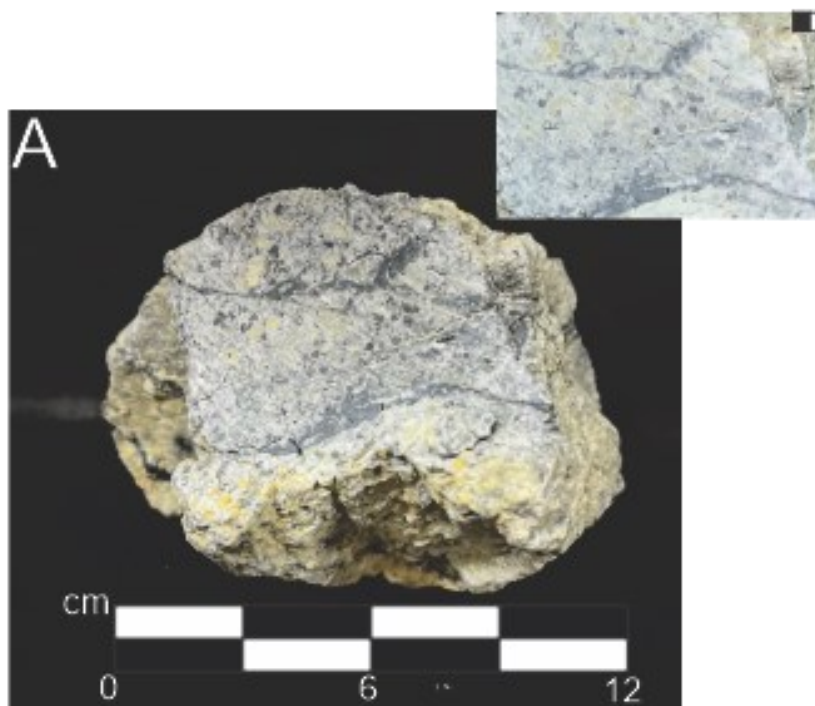
Roca ígnea de color blanco – gris claro, inequigranular con tamaño de cristales (grano) fino a muy grueso, subhedrales a anhedrales entre 3-5mm, con presencia de cuarzo, plagioclasa, pirita diseminada, sericita, alunita, muscovita. Presenta venas de cuarzo (Qz) y pirita (Py). La muestra DC-001, corresponde a un granito, con alteración sericítica y reemplazamiento de plagioclasa por caolinita y sericita. La matriz es de sílice (cuarzo microcristalino), los espacios intergranulares son rellenados en su

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

mayoría por cuarzo y pirita. El dato de radiación para esta muestra fue de 2.500 CPS  
(Figura 4).

### **Figura 4.**

*Granito con alteración sericítica, venilleo de cuarzo y sulfuros, radiación de 2.500 CPS. (Muestra DC-001).*

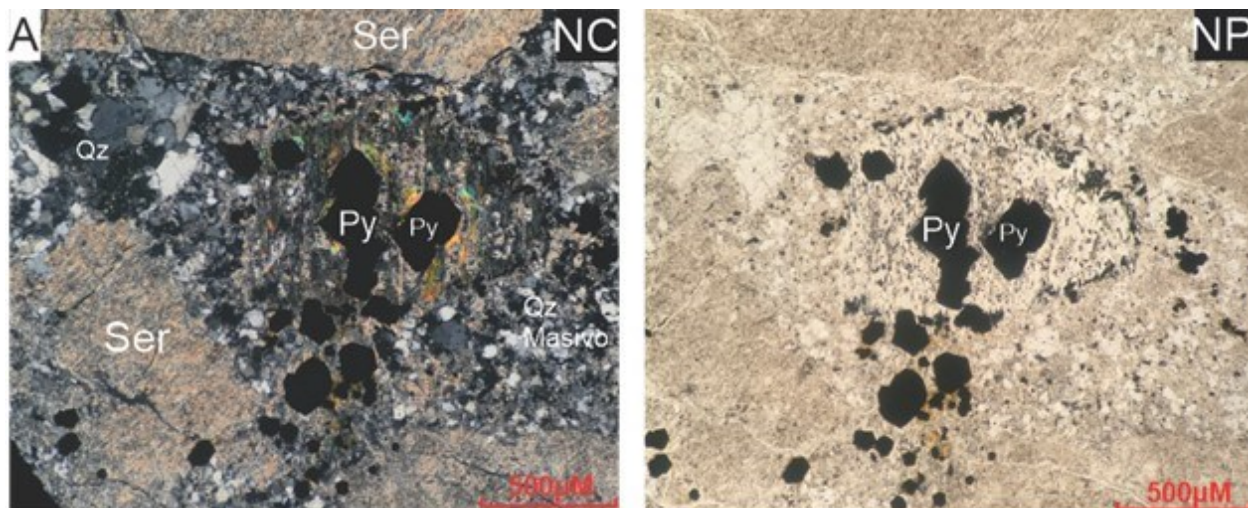


Según el análisis a la sección delgada, la muestra DC-001 se compone de sericita producto de la alteración de la plagioclasa en un porcentaje de 47.3%, cuarzo en venas y como matriz de la roca con 43%, pirita con 4%, muscovita con 3,5% y minerales opacos con 1,5% y circón con 0,7%. La característica más distintiva observada es su alteración sericítica, dado a la evidencia de la alteración de la plagioclasa a minerales arcillosos como sericita e ilmenita. (Figura 5).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 5.**

*Granito con cristales de sericita (Ser) en una matriz de cuarzo (Qz), se observan cristales euhedrales de pirita (Py) en la matriz.*



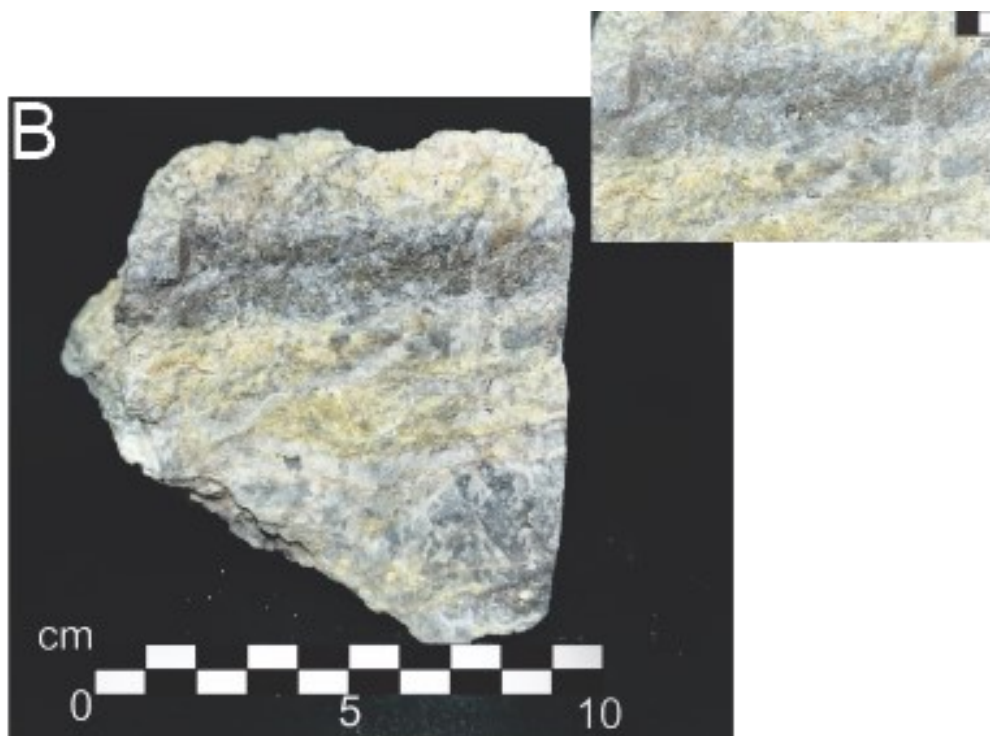
5.2.1.2 Muestra DC-002

Roca ígnea de color gris claro, inequigranular con tamaño de cristales (grano) medio a muy grueso, subhedrales a anhedrales, con presencia de cuarzo, feldespato plagioclasa, illita, alunita, sericita, pirita, feldespato potásico. Un proceso de alteración tipo argílica avanzada se evidencia en la muestra, donde el cuarzo y la alunita rellenan espacios intergranulares y cavidades. La muestra se clasificó como un granito que presenta alteración argílica avanzada, que se caracteriza por la destrucción total de feldespatos, dando lugar a la formación de alunita, caolinita e illita. La matriz es de sílice (cuarzo microcristalino), los espacios intergranulares son rellenos en su mayoría por cuarzo, alunita y sulfuros. El dato de radiación de esta muestra fue de 7.500 CPS (Figura 6).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 6.**

*Granito con alteración argílica avanzada, con presencia de pirita en bandas, radiación de 7.500 CPS. (Muestra DC-002).*

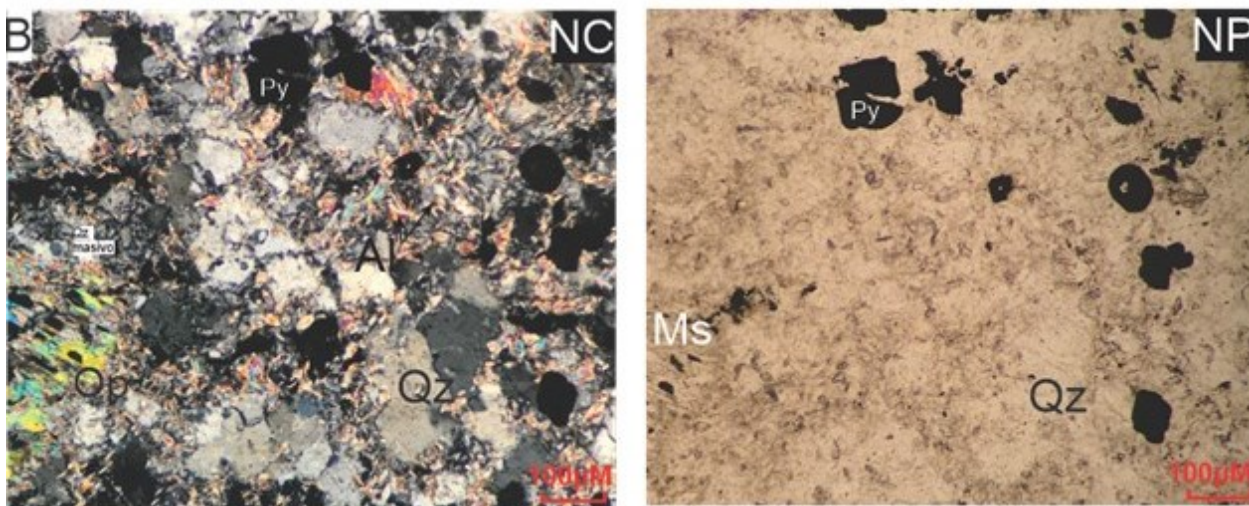


Según el análisis de la sección delgada (Figura 7)., la muestra se caracteriza por su alto contenido de cuarzo con 78%, el cuarzo presenta distintas composiciones texturales, desde cuarzo de grano medio(1-2mm) que predominan en la muestra con 39%, cuarzo de grano fino, (0.1-1 mm) que se encuentra en venas con un porcentaje de 30%, y un cuarzo masivo que corresponde a la matriz con 9%. Se observó la alteración argílica avanzada en la sección donde la alunita y el cuarzo componen la matriz de la roca. Con lo que respecta los minerales accesorios identificados en la muestra, moscovita con 10%, pirita con 3%, y otros minerales opacos como la pirita, galena y esfalerita.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 7.**

*Granito con alunita (Al) y cuarzo (Qz), producto de la alteración argílica avanzada, hacia la izquierda se observa un cristal de moscovita (Ms) que ha sido reemplazado parcialmente por la matriz de cuarzo-alunita. En nicoles paralelos (NP), se observan cristales de pirita (Py), Muestra DC-002.*



5.2.1.3 Muestra DC-005

Roca ígnea de color gris claro, inequigranular con tamaño de cristales (grano) medio a muy grueso, subhedrales a anhedrales, con presencia de cuarzo, feldespato plagioclasa, illita, alunita, sericita, pirita, feldespato potásico. La alteración tipo argílica avanzada se evidencia en la muestra, donde el cuarzo y la alunita rellenan espacios intergranulares y cavidades. En algunas zonas se observa un desarrollo de sílice oqueroso (vuggy silica) que corrobora un fuerte proceso de alteración, dando lugar a cuarzo residual y sulfuros como la pirita. La muestra se clasificó como un granito, presenta alteración argílica avanzada, que se caracteriza por la destrucción total de feldespatos, permitiendo la formación de alunita, caolinita e illita. La matriz es de sílice (cuarzo microcristalino), los espacios intergranulares son rellenados en su mayoría por

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

cuarzo, alunita y sulfuros. El dato de radiación de esta muestra fue de 10.000 CPS  
(Figura 8).

### **Figura 8.**

*Granito con alteración argílica avanzada, se observa cuarzo oqueroso y formación de cuarzo-alunita, radiación de 10.000 CPS. (Muestra DC-005).*

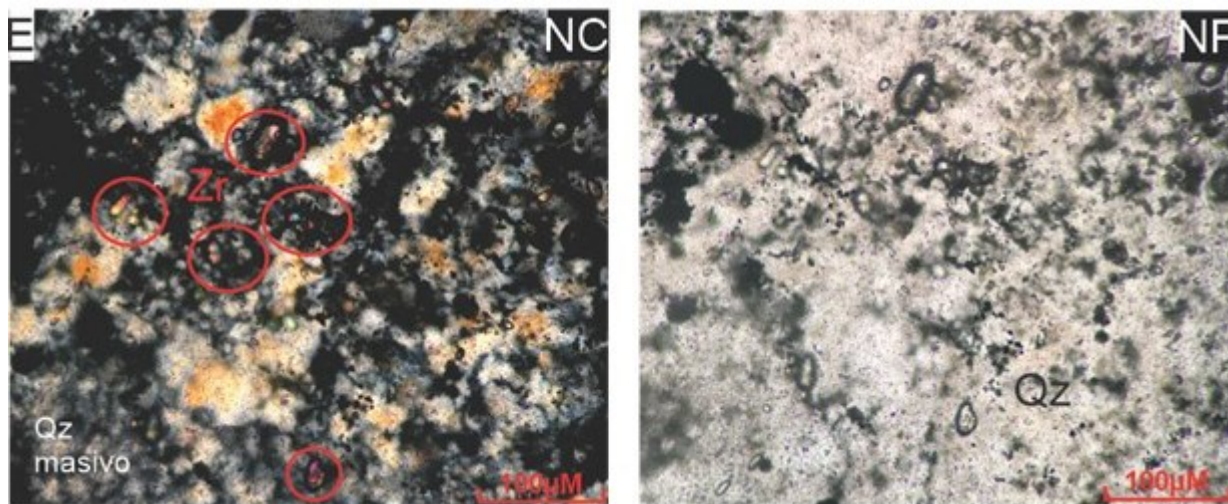


Según el análisis de la sección delgada, la muestra contiene cuarzo 75%, el cual presenta composiciones texturales variadas, la textura más predominante es la del cuarzo masivo microcristalino con 45%, seguido de cuarzo de tamaño de grano fino, (0.1-1 mm), el cual se encuentra en venas con 20%, 1 cuarzo de tamaño de grano medio (1-2mm), en menor proporción con 10%, el cemento de cuarzo está relacionado con alunita con 20%, y finalmente, los minerales opacos, en este caso identificados como pirita se presentan en un 5%. (Figura 9).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 9.**

*Granito con cristales de circón (Zr) de tamaño de grano muy fino, dentro de una matriz de cuarzo masivo (Qz masivo), Muestra DC-005.*



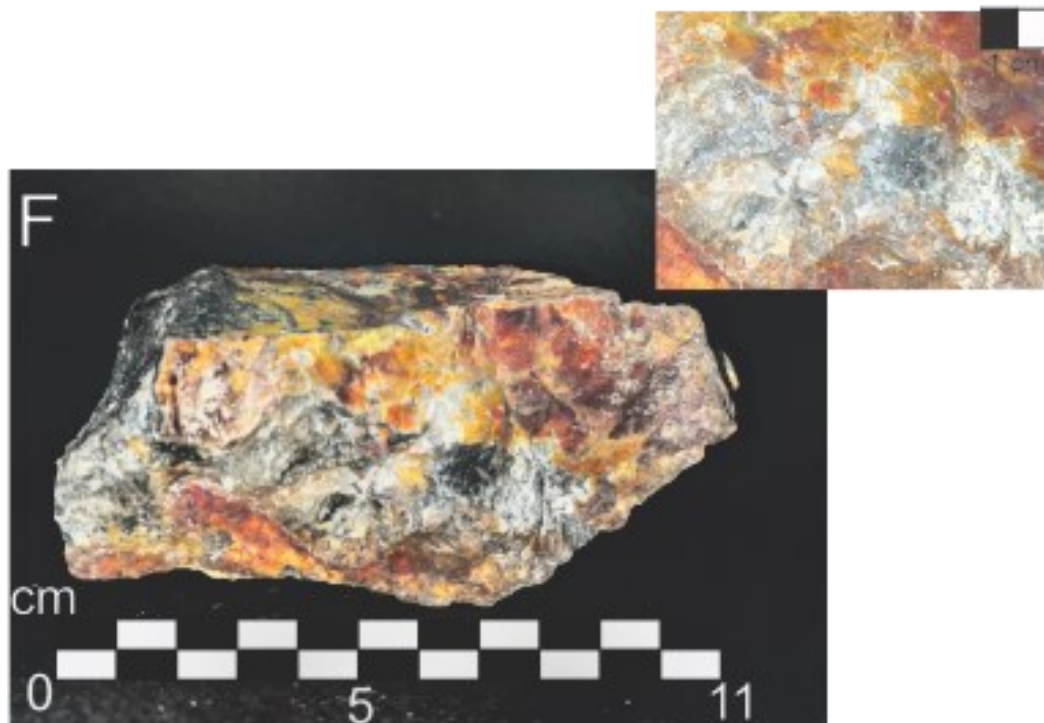
5.2.1.4 Muestra DC-006

Roca ígnea de color gris oscuro, inequigranular con tamaño de cristales (grano) muy fino, subhedrales a anhedrales, con presencia de cuarzo, minerales opacos, biotita, feldespato plagioclasa, alunita. Presenta un recubrimiento de óxido que le da una tonalidad rojiza. La alteración tipo argílica avanzada se evidencia en la muestra, donde el cuarzo y la alunita rellenan espacios intergranulares y cavidades. La muestra es un granito que presenta alteración argílica avanzada, que se caracteriza por la destrucción total de feldespatos, permitiendo la formación de alunita, caolinita e illita. La matriz sílicea microcristalina compone en su mayoría a la muestra. Los espacios intergranulares son rellenos en su mayoría por cuarzo, alunita y sulfuros. El dato de radiación de esta muestra fue de 2.000 CPS (Figura 10).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 10.**

*Granito con alteración argílica avanzada, con destrucción total de los feldespatos, radiación de 2.000 CPS. (Muestra DC-005).*

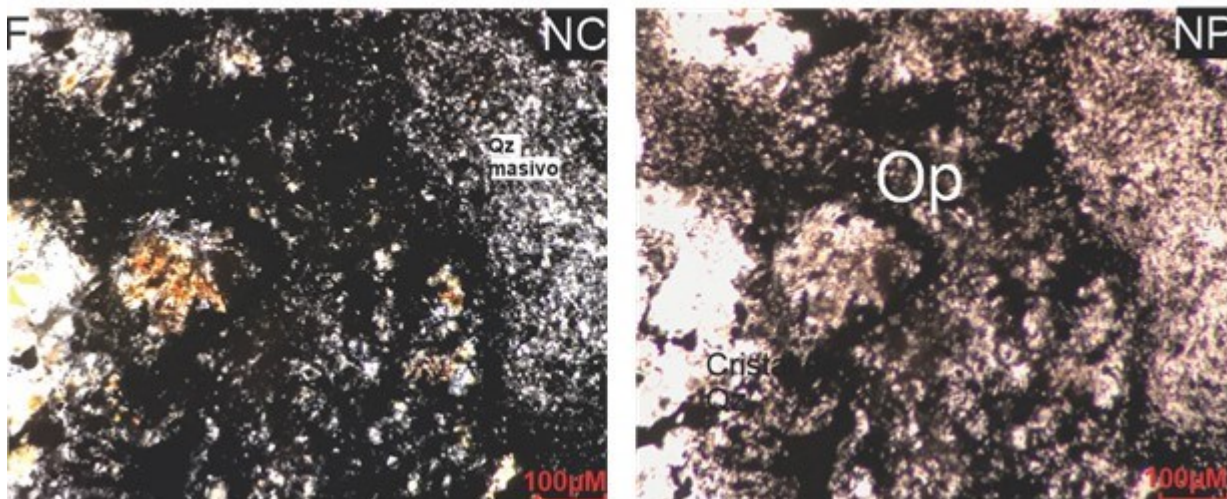


Los análisis obtenidos en petrografía muestran alto contenido de matriz silicea. El cuarzo masivo microcristalino es el tipo de cuarzo más abundante con 34%, seguido de cuarzo de tamaño de grano medio (1-2mm) con 17%, el cuarzo de tamaño de grano fino (0.1-1mm) con 11%, el cemento de cuarzo, el cual está relacionado con alunita con 11,3%. La muestra contiene una significativa abundancia de minerales opacos como pirita y galena con 25,7% y de minerales accesorios como circón con 1.3%. (Figura 11).

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **Figura 11.**

*Granito con cuarzo (Qz), gran presencia de minerales opacos (Op) como pirita y galena, Muestra DC-006.*



### **5.2.2 Brechas Hidrotermales**

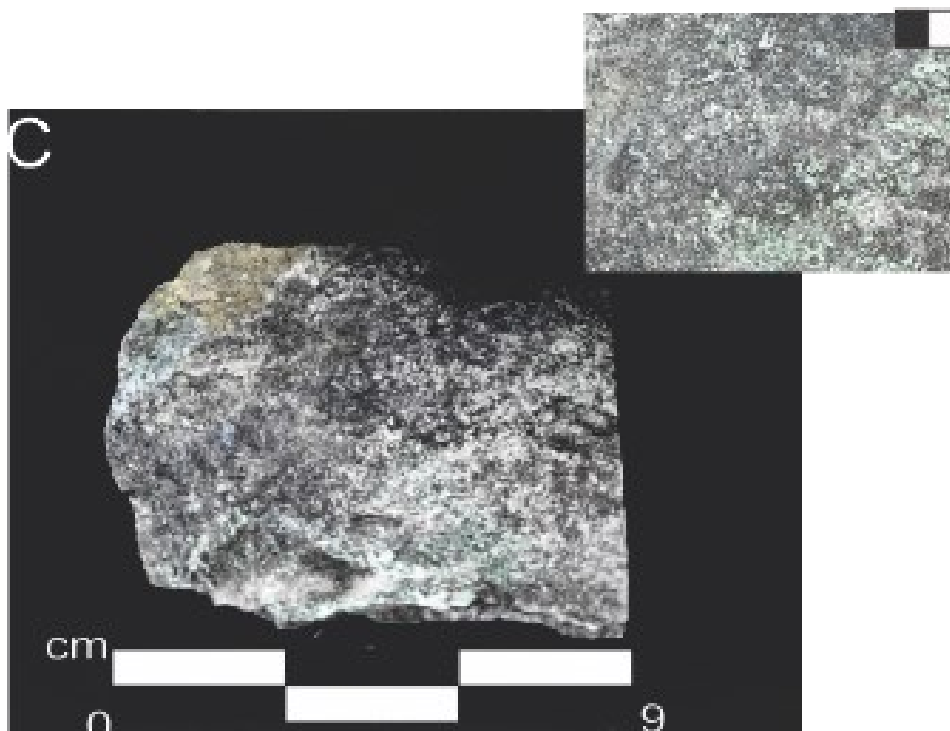
#### 5.2.2.1 Muestra DC-003

Brecha hidrotermal de color gris oscuro, inequigranular con tamaños de cristales (grano) muy finos compuestos en su mayoría de cuarzo y alunita. Se observan oquedades conocidas como cuarzo oqueroso (vuggy silica) debido a la extrema hidrólisis, producto de la alteración argílica avanzada. Se observan minerales verdes y azules clasificados como brochantita y calcantita respectivamente. El dato de radiación de esta muestra fue de 15.000 CPS (Figura 12).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 12.**

*Brecha hidrotermal compuesta principalmente por cuarzo-alunita, se observa cuarzo oqueroso, con presencia de brochantita y calcantita, radicación de 15.000 CPS, Muestra DC-003.*

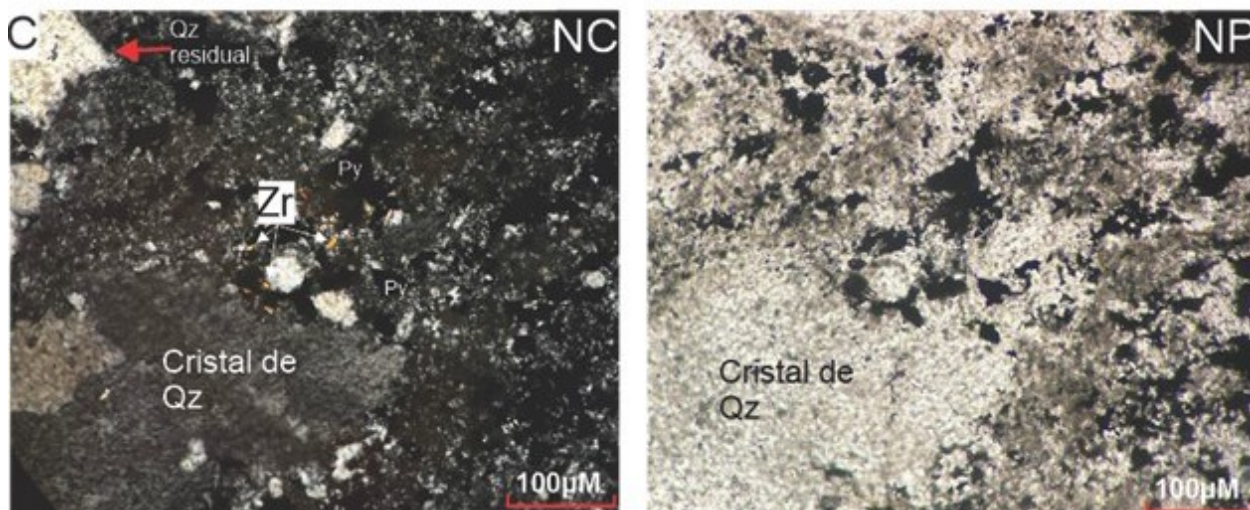


Los análisis obtenidos en sección delgada corroboran la presencia del cuarzo tipo *vuggy* que fue descrito en muestra de mano, que en el microscopio se observan como cristales de cuarzo separados unos de los otros por oquedades en la sección. La sección se caracteriza por cuarzo microcristalino (matriz y cemento) con 60% y cuarzo de tamaño medio (clastos) con 22%, oquedades con 10%, opacos con 7% y circones 1%. La alteración hidrotermal se evidencia por los bordes de algunos cristales de cuarzo que están corroídos por la fuerte hidrólisis dando como resultado cuarzo residual. (Figura 13).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 13.**

*Brecha Hidrotermal con cuarzo residual (Qz residual), presencia de circones (Zr), en nicoles paralelos (NP) se aprecian las oquedades del cuarzo, Muestra DC-003.*



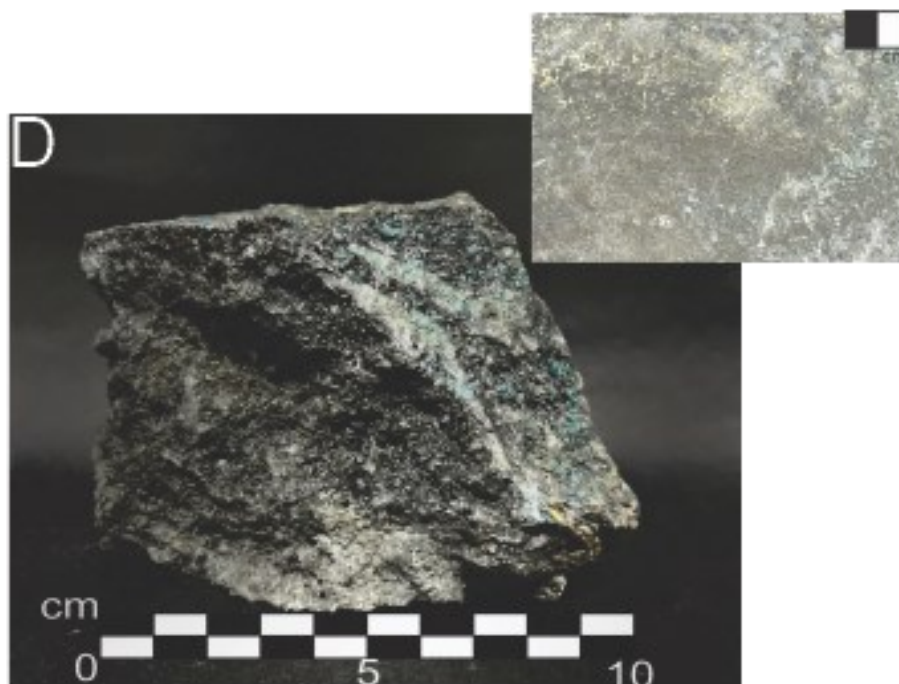
5.2.2.2 Muestra DC-004

Brecha hidrotermal de color gris oscuro, inequigranular con tamaños de cristales (grano) muy finos, compuesta en su mayoría de cuarzo y alunita. Se observan oquedades (vuggy silica) debido a la extrema hidrólisis, producto de la alteración argílica avanzada. Se observan minerales verdes y azules clasificados como brochantita y calcantita respectivamente, se observa pirita diseminada de tamaño fino. El dato de radiación de esta muestra fue de 15.000 CPS (Figura 14).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 14.**

*Brecha hidrotermal compuesta principalmente por cuarzo-alunita, se observa cuarzo oqueroso, con presencia de brochantita y calcantita, pirita fina diseminada, radicación de 15.000 CPS, Muestra DC-004.*

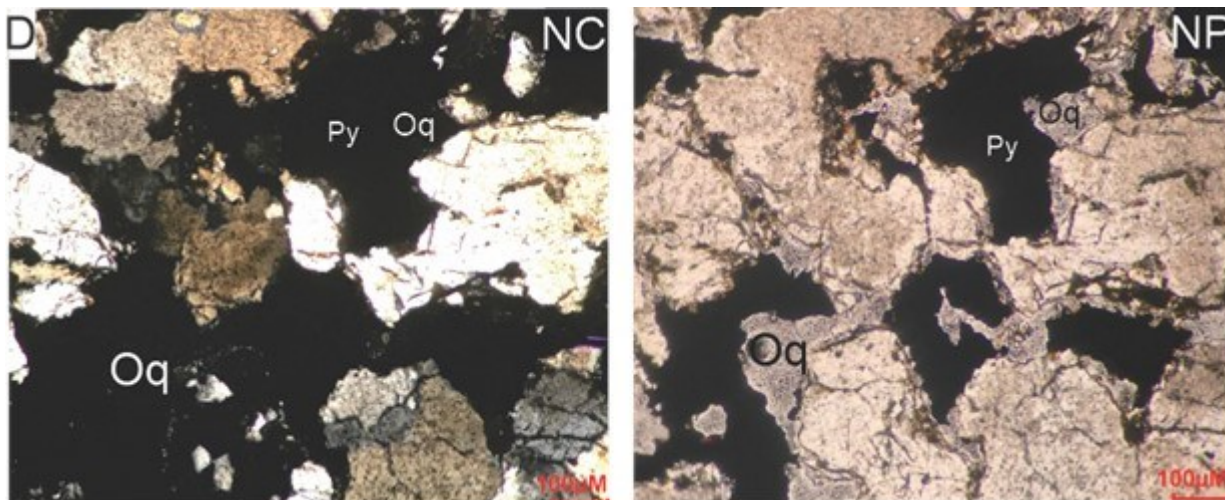


En la sección delgada se evidencia cuarzo tipo *vuggy* que fue descrito en muestra de mano, que en el microscopio se observan como cristales de cuarzo separados unos de los otros por oquedades o huecos en la sección. La sección se caracteriza por una abundante cantidad de cuarzo microcristalino (matriz y cemento) con 50% y cuarzo de tamaño medio (clastos) con 20%, oquedades con 15%, opacos con 10%, apatitos con 2%, esfaleritas 1% y circones 2%. (Figura 15).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 15.**

*Brecha Hidrotermal con oquedades del cuarzo (Oq) y cristales de pirita (Py), Muestra DC-004.*



**Análisis Petrográfico**

Las muestras DC-001, DC-002, DC-005 y DC-006 corresponden a muestras del Leucogranito. En términos generales, el leucogranito presenta una textura hipidiomórfica, holocristalina e inequigranular con un tamaño de grano fino a medio. Las muestras DC-003 y DC-004 corresponden a brechas hidrotermales caracterizadas por una matriz de cuarzo masivo (granos muy finos) y cemento de cuarzo-alunita.

La mineralogía de las secciones analizadas corresponde principalmente a cuarzo, pirita, plagioclasa, moscovita, biotita, minerales secundarios opacos como la pirita, esfalerita y galena, y minerales accesorios tales como circón, apatito y xenotima.

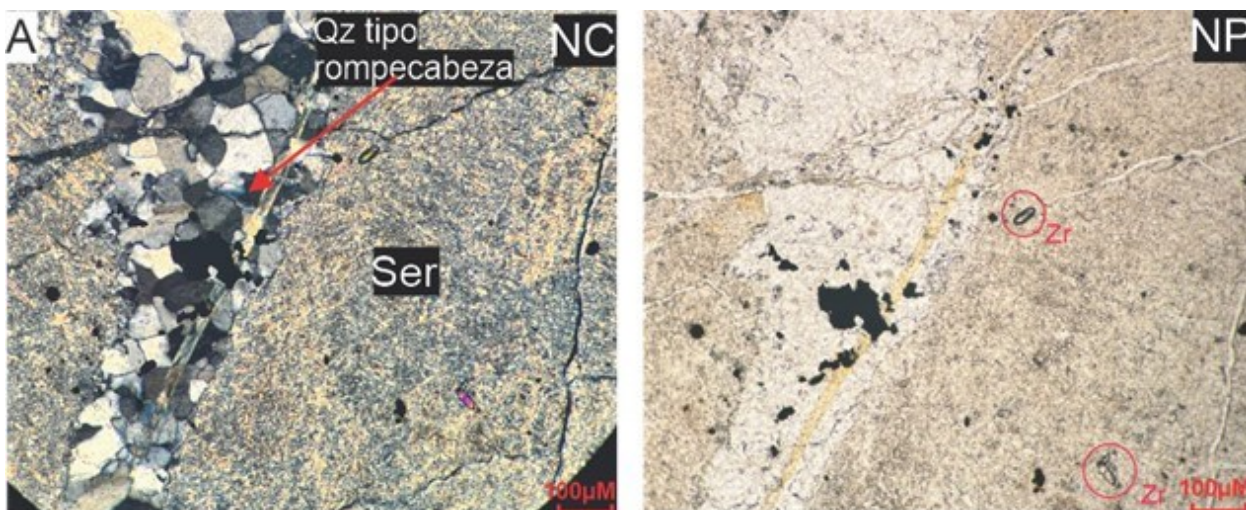
El mineral más abundante es el cuarzo, el cual presenta distintas texturas, la primera está caracterizada por un tamaño de grano medio a grueso con texturas tipo *en cresta* y *rompecabeza* (figuras 16 y 17), en algunos cristales se puede observar cómo los bordes han sido corroídos que indica que el cuarzo es residual, producto de la alteración argílica

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

avanzada. Esta textura se observó tanto en las muestras del leucogranito como en las brechas hidrotermales (Figuras 16, 17 y 18). La segunda textura está caracterizada por un tamaño de grano muy fino a fino, microscritalino y textura tipo *masiva* (figura 18) que corresponde a la matriz de las rocas y en las brechas, y junto con alunita, corresponde al cemento de las brechas hidrotermales.

### **Figura 16.**

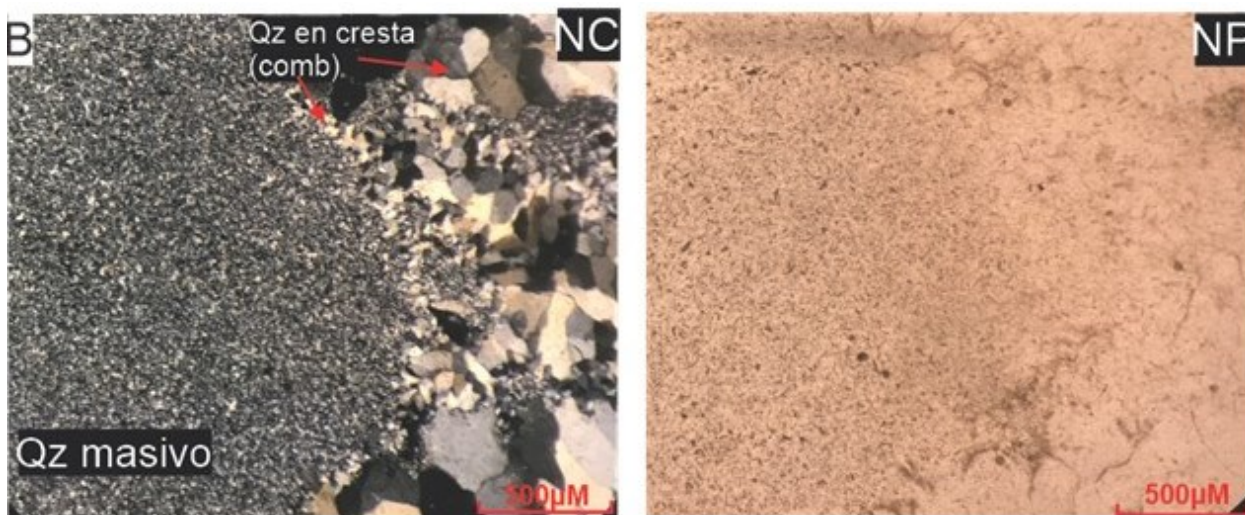
*Granito, en nicoles cruzados (NC), se observa una vena de cuarzo (Qz) con una textura tipo rompecabeza que rellenó una cavidad dentro de sericita (Ser), producto de la alteración de la plagioclasa, en nicoles paralelos (NP) se observan algunos cristales de circón (Zr), Muestra DC-001.*



ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

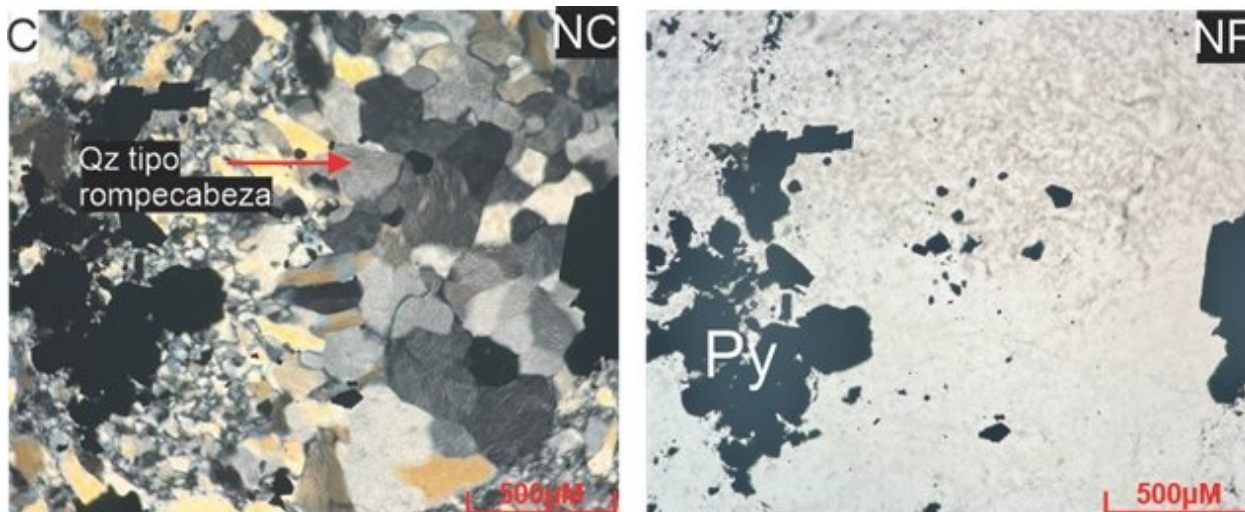
**Figura 17.**

*Granito, en nicoles cruzados (NC), se observan las relaciones de los tamaños de grano entre el cuarzo masivo microcristalino (Qz masivo) y el cuarzo en cresta (Qz en cresta). El cuarzo en cresta se caracteriza por formas prismáticas, Muestra DC-002.*



**Figura 18.**

*Brecha hidrotermal con cuarzo tipo rompecabeza (Qz tipo rompecabeza) de tamaño medio, en nicoles paralelos (NP) se observan cristales de pirita (Py), Muestra DC-003.*



De acuerdo con Dong *et al.*, (1995) existen 3 tipos de clases texturales, consideradas desde un punto de vista genético. Las texturas primarias, que representan las morfologías

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

formadas durante el crecimiento de los cristales o la depositación de la sílica amorfa. Las texturas de recristalización, que resultan de la cristalización y subsecuente recristalización de sílica amorfa a cuarzo. Y, por último, las texturas de reemplazamiento de otros minerales por minerales de sílica dentro de venas.

Teniendo en cuenta la clasificación de Dong *et al.*, (1995) mencionada arriba, las texturas presentes en las secciones observadas corresponden a texturas primarias de tipo cresta y masiva, y texturas de recristalización de tipo rompecabeza.

El cuarzo tanto masivo como vuggy y la alunita son los principales minerales de ganga con minerales de arcillosos, en este caso identificados como caolinita. El cuarzo vuggy es un producto residual de una intensa alteración ácida, y es una característica distintiva que refleja la textura original de la roca y la lixiviación diferencial de fenocristales y/o fragmentos líticos (Simmons, White, & John, 2005).

### **5.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

Se realizó análisis de Microscopía Electrónica de Barrido a cuatro secciones delgadas, granitos: Sección DC-002, DC-006 y DC-007 y brecha hidrotermal: DC-004, con el fin de reconocer los minerales que contienen uranio en su estructura.

#### **5.3.1 Muestra DC-002 (Leucogranito)**

##### **5.3.1.1 PIRITA**

Teniendo en cuenta la asociación de S y Fe como los elementos de mayor proporción y los estudios previos realizados en los análisis petrográficos indican que la composición química de este mineral corresponde a pirita (Tabla 2 y Figura 19).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

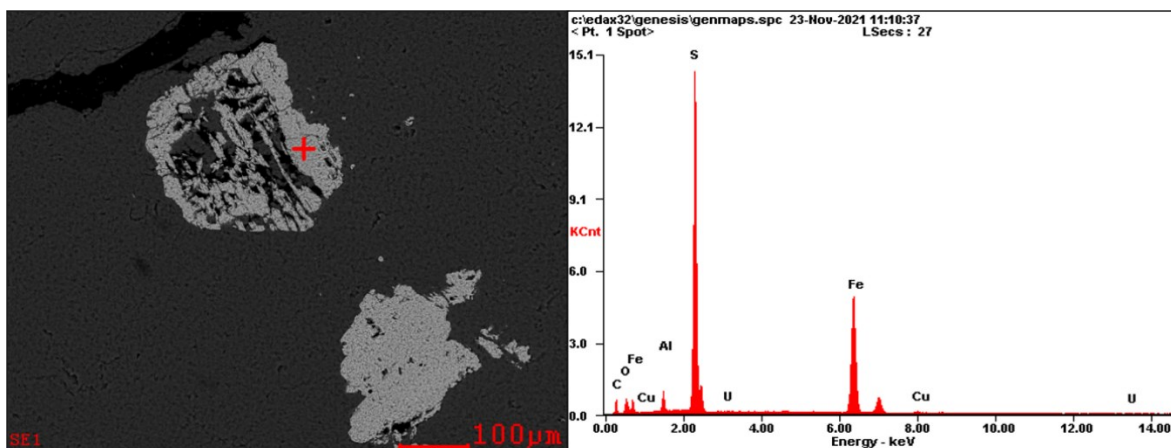
**Tabla 2.**

Tabla del diagrama elemental de pirita para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	21.94	45.17
<i>OK</i>	07.07	10.93
<i>AlK</i>	03.12	02.86
<i>SK</i>	34.57	26.66
<i>FeK</i>	31.66	14.02
<i>CuK</i>	00.66	00.26
<i>UL</i>	00.97	00.10
<i>Matriz</i>	Corrección ZAF	

**Figura 19.**

Cristal de Pirita y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.



## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### 5.3.1.2 GALENA

En esta zona de la muestra DC-002 Teniendo en cuenta que se encuentran valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para el plomo y azufre, estos elementos en asociación conforman la galena (Tabla 3 y Figura 20).

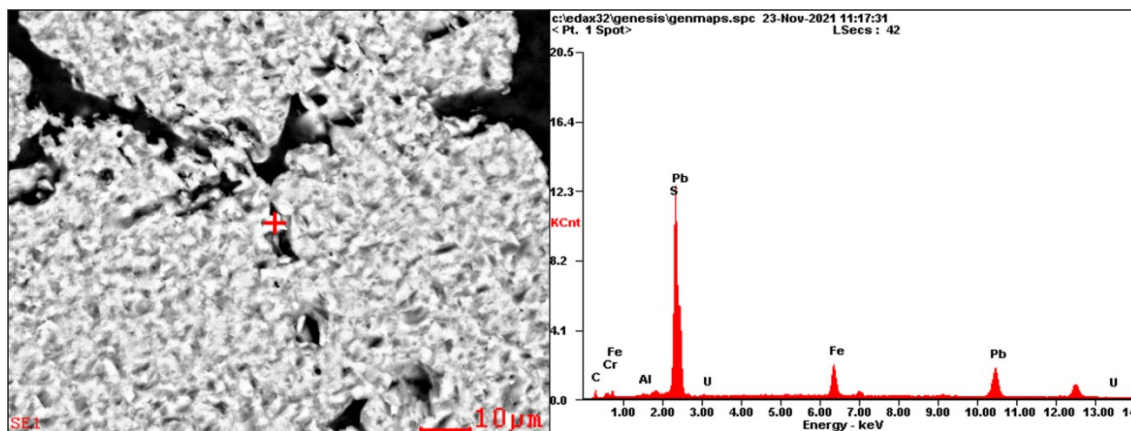
**Tabla 3.**

*Tabla del diagrama elemental de galena para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	06.17	30.66
<i>CrL</i>	19.32	22.19
<i>AlK</i>	00.32	00.72
<i>SK</i>	11.66	21.71
<i>FeK</i>	08.57	09.16
<i>PbL</i>	53.97	15.56
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

**Figura 20.**

*Cristal de Galena y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

5.3.1.3 ESFALERITA

Como se puede observar en la tabla, los valores más altos en porcentaje peso (Wt%) corresponden al zinc y azufre. Teniendo en cuenta estos porcentajes, esta asociación de elementos corresponde al mineral esfalerita. Así mismo, esta zona contiene un pequeño porcentaje de uranio libre en su composición química (Tabla 4 y Figura 21).

**Tabla 4.**

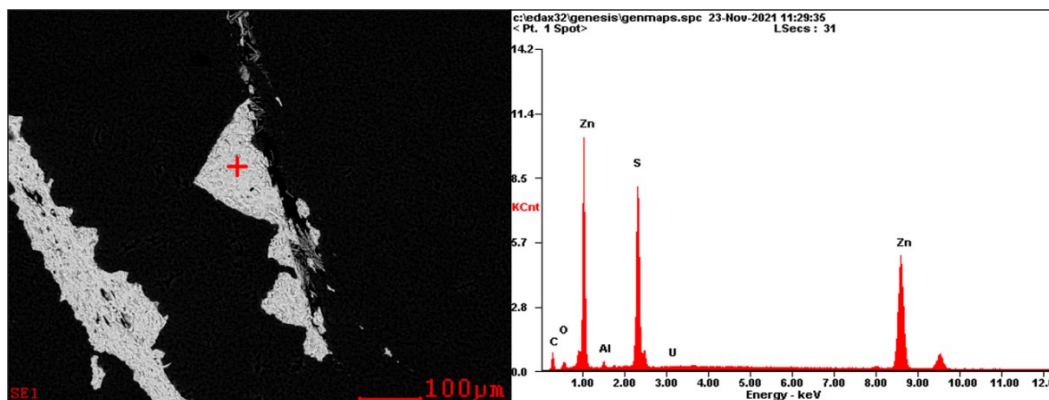
*Tabla del diagrama elemental de esfalerita para la sección DC-002. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<b><i>CK</i></b>	21.12	50.68
<b><i>OK</i></b>	02.67	04.81
<b><i>AlK</i></b>	01.27	01.36
<b><i>SK</i></b>	23.07	20.74
<b><i>ZnK</i></b>	50.41	22.23
<b><i>UL</i></b>	01.46	00.18
<b><i>Matriz</i></b>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 21.**

*Cristal de Esfalerita y diagrama de elementos (DC-002). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



**5.3.2 Muestra DC-003 (Leucogranito)**

**5.3.2.1 COFINITA**

En los análisis del SEM, se encontró un alto porcentaje en peso (Wt%) de uranio libre en la muestra. Los porcentajes en peso de cada elemento mencionados anteriormente se relacionan al mineral cofinita, el cual tiene como formula química  $USiO_4 \cdot (OH)_4$ . (Tabla 5 y Figura 22).

**Tabla 5.**

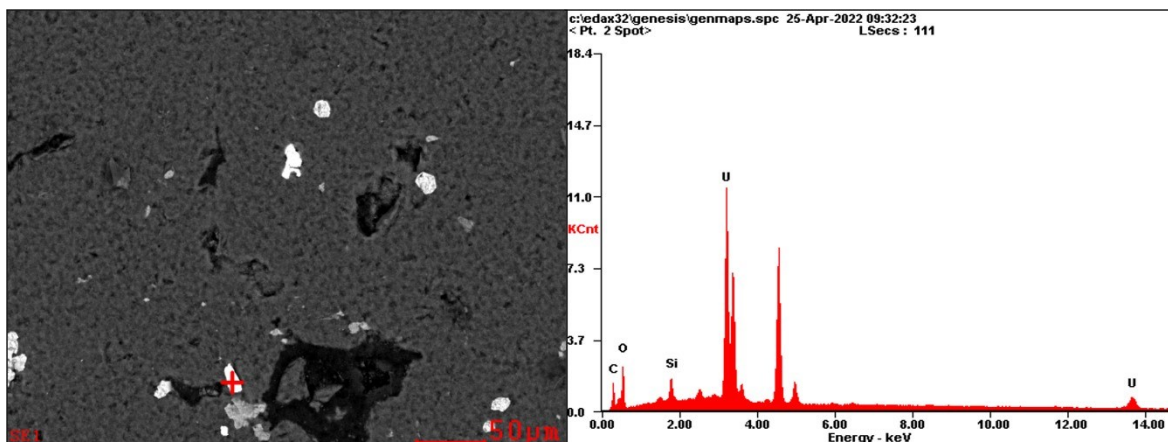
*Tabla del diagrama elemental de cofinita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.48	12.68
<i>OK</i>	25.26	69.01
<i>SiK</i>	03.81	05.92
<i>UL</i>	67.45	12.39
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 22.**

*Cristal de Cofinita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



En otro punto de la misma zona, se encontraron nuevamente valores altos de uranio Wt% 49.89 (Tabla 6 y Figura 23).

**Tabla 6.**

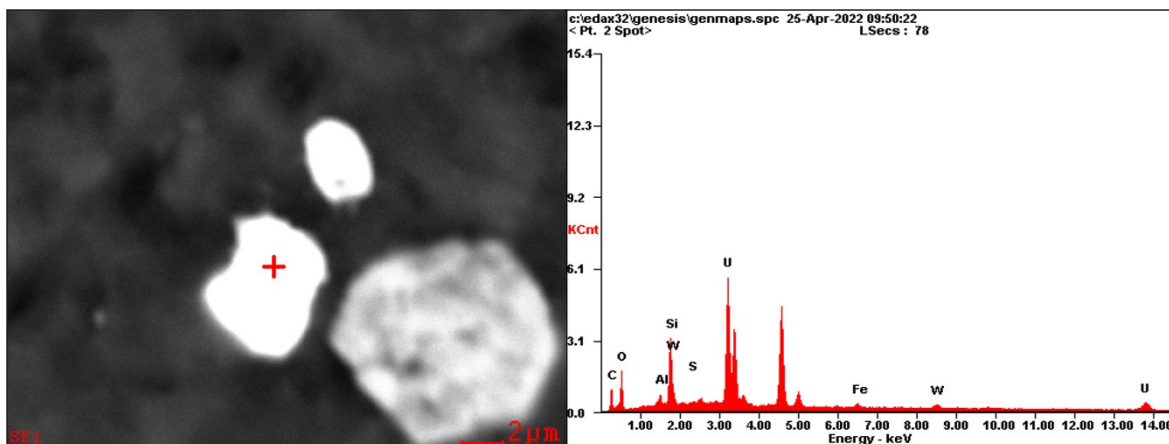
*Tabla del diagrama elemental de cofinita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	08.41	24.59
<i>OK</i>	22.89	50.28
<i>AlK</i>	02.32	03.03
<i>SiK</i>	09.85	12.32
<i>SK</i>	00.72	00.79
<i>FeK</i>	01.12	00.71
<i>WL</i>	04.80	00.92
<i>UL</i>	49.89	07.37
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 23.**

*Cristal de Cofinita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



### 5.3.2.2 PIRITA

Este mineral tiene como fórmula química  $\text{Fe}_2\text{S}_3$ , En la tabla 7, se observa el hierro y azufre, como los elementos de mayor porcentaje en peso (Wt%), este cristal se relaciona con pirita (Tabla 7 y Figura 24).

**Tabla 7.**

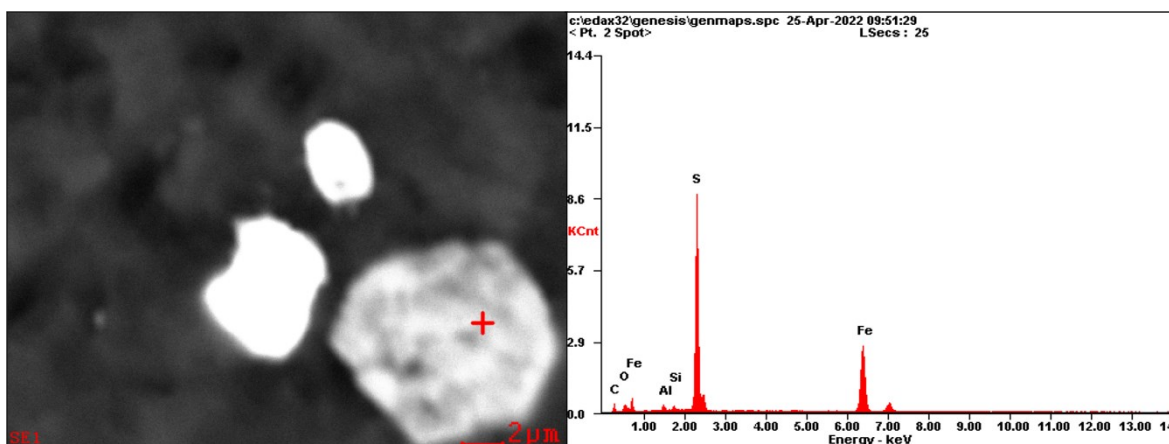
*Tabla del diagrama elemental de pirita para la sección DC-003. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	22.50	46.18
<i>OK</i>	05.87	09.04
<i>AlK</i>	01.40	01.28
<i>SiK</i>	00.85	00.75
<i>SK</i>	37.08	28.50
<i>FeK</i>	32.30	14.25
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 24.**

*Cristal de Pirita y diagrama de elementos (DC-003). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



### 5.3.3 Muestra DC-004 (Brecha Hidrotermal)

#### 5.3.3.1 CUARZO RESIDUAL

El alto contenido de sílice en la geoquímica se correlaciona con la presencia de cuarzo en la muestra, el cual, en este caso, hace parte de la matriz de la roca (Tabla 8 y Figura 25).

**Tabla 8.**

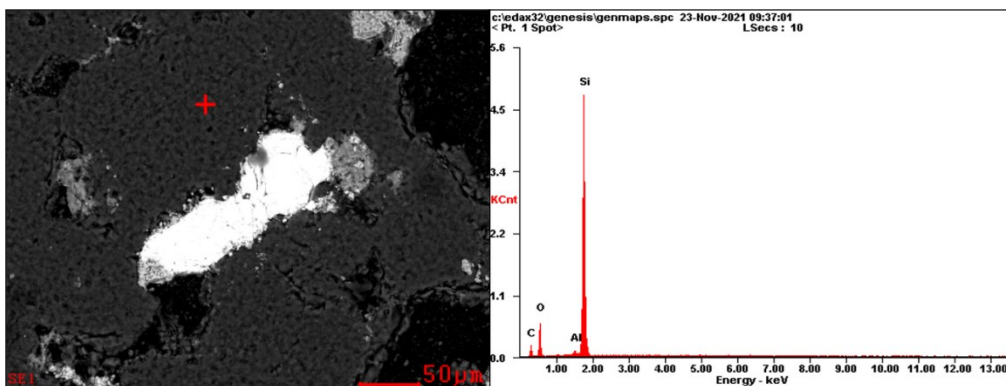
*Tabla del diagrama elemental de cuarzo para la sección DC-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	25.35	37.69
<i>OK</i>	30.86	34.44
<i>AlK</i>	00.89	00.59
<i>SiK</i>	42.89	27.27
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 25.**

*Cristal de Cuarzo y diagrama de elementos (DC-004). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



### 5.3.3.2 CIRCÓN

Según el alto contenido de zirconio y sílice, siendo los elementos de mayor proporción, y los análisis petrográficos previamente realizados en la muestra, se relaciona la composición elemental con el mineral zircón (Tabla 9 y Figura 26).

**Tabla 9.**

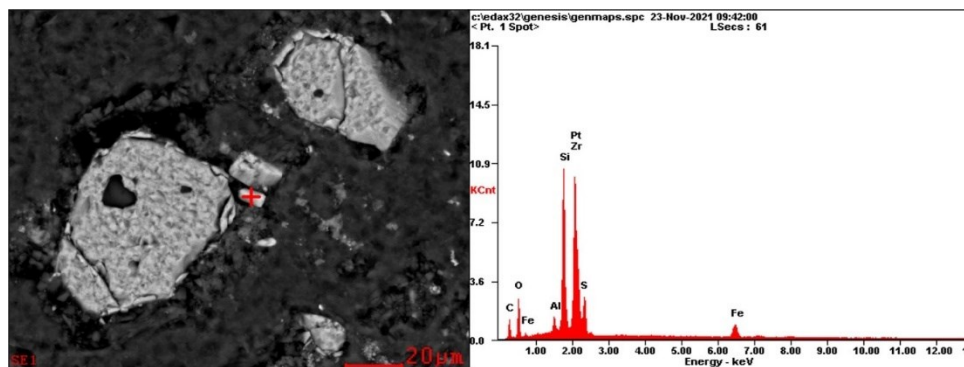
*Tabla del diagrama elemental de circón para la sección DC-004. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<b><i>CK</i></b>	14.58	37.84
<b><i>OK</i></b>	14.99	29.21
<b><i>AlK</i></b>	01.08	01.25
<b><i>SiK</i></b>	11.92	13.23
<b><i>PtM</i></b>	27.25	04.35
<b><i>SK</i></b>	05.20	05.06
<b><i>FeK</i></b>	02.42	01.35
<b><i>ZrK</i></b>	22.55	07.71
<b><i>Matriz</i></b>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 26.**

*Cristal de Circón y diagrama de elementos (DC-004). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



**5.3.4 Muestra DC-006 (Leucogranito)**

**5.3.4.1 BARITA**

Teniendo en cuenta los análisis del SEM, se encontraron valores altos en porcentaje peso (Wt%) para bario, azufre y oxígeno, donde esta composición elemental se correlaciona al mineral barita (Tabla 10 y Figura 27).

**Tabla 10.**

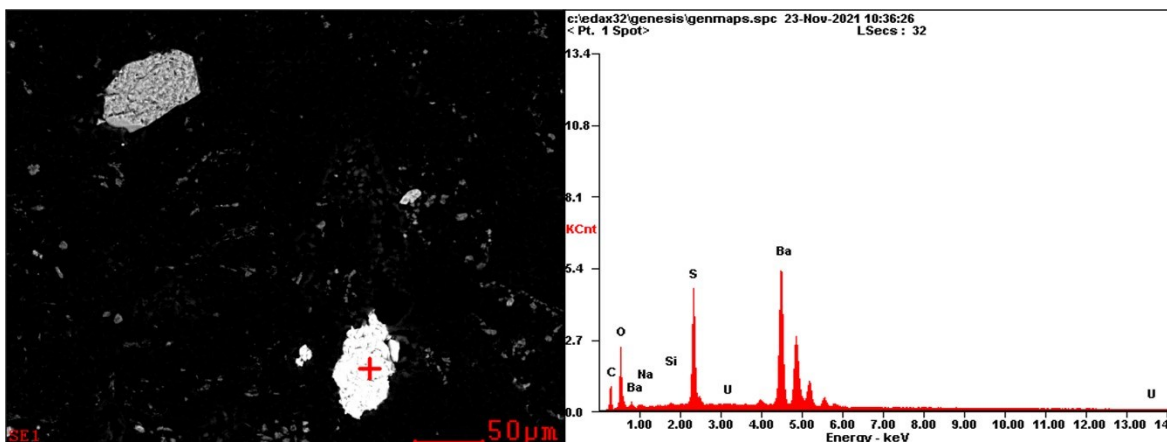
*Tabla del diagrama elemental de barita para la sección DC-006. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido.*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<b><i>CK</i></b>	15.70	41.63
<b><i>OK</i></b>	16.31	32.46
<b><i>NaK</i></b>	00.60	00.83
<b><i>SiK</i></b>	00.42	00.48
<b><i>SK</i></b>	12.13	12.04
<b><i>BaL</i></b>	53.26	12.35
<b><i>UL</i></b>	01.57	00.21
<b><i>Matrix</i></b>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 27.**

*Cristal de Barita y diagrama de elementos (DC-006). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



#### 5.3.4.2 CIRCÓN

Dado el alto contenido de zirconio y sílice, siendo los elementos de mayor proporción, y los análisis petrográficos previamente realizados en la muestra, se relaciona la composición elemental con el mineral circón (Tabla 11 y Figura 28).

**Tabla 11.**

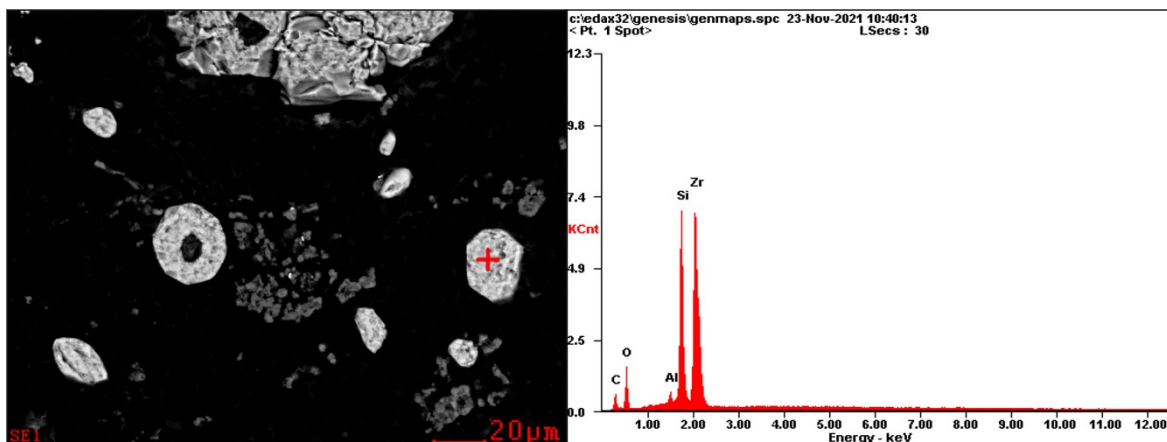
*Tabla del diagrama elemental de circón para la sección DC-006. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	18.46	38.07
<i>OK</i>	22.99	35.59
<i>AlK</i>	00.82	00.76
<i>SiK</i>	16.23	14.31
<i>ZrK</i>	41.49	11.27
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **Figura 28.**

*Cristal de Circón y diagrama de elementos (DC-006). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



### 5.3.5 Muestra DC-007 (Leucogranito)

#### 5.3.5.1 MONACITA

Dada la presencia de cerio y lantano, siendo los elementos de mayor porcentaje en peso (Wt%) dentro del análisis, esta composición elemental se correlaciona con monacita (Ver Tabla 12 y Figura 29).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Tabla 12.**

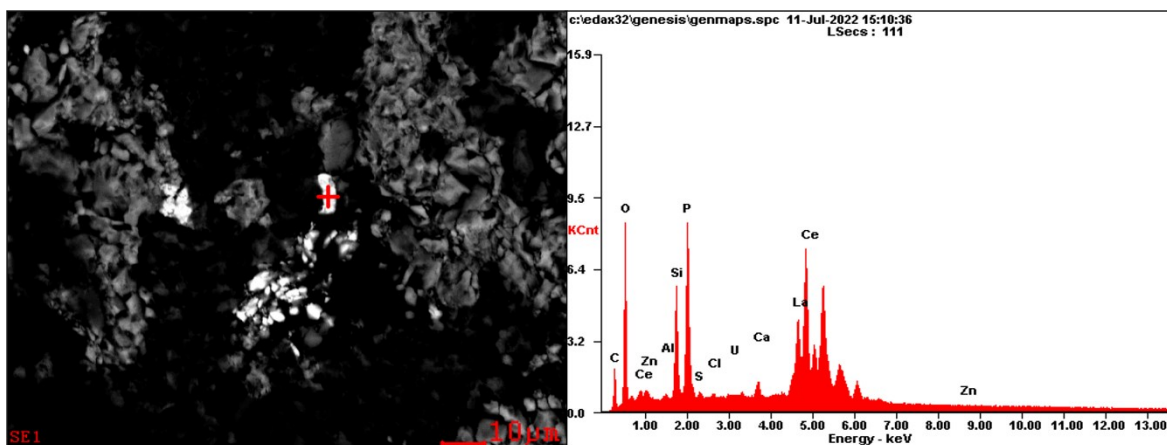
*Tabla del diagrama elemental de monacita para la sección DC-007. Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido*

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	13.50	31.12
<i>OK</i>	23.91	41.37
<i>AlK</i>	00.47	00.49
<i>SiK</i>	07.31	07.21
<i>PK</i>	11.78	10.53
<i>SK</i>	00.35	00.30
<i>ClK</i>	00.26	00.20
<i>UM</i>	00.76	00.09
<i>CaK</i>	00.87	00.60
<i>LaL</i>	14.41	02.87
<i>CeL</i>	26.30	05.20
<i>ZnK</i>	00.08	00.03
<i>Matriz</i>	Corrección	ZAF

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 29.**

*Cristal de Monacita y diagrama de elementos (DC-007). Electrones retrodispersados, Tomada en el laboratorio de Microscopía electrónica de barrido-UIS.*



## 6. Discusión

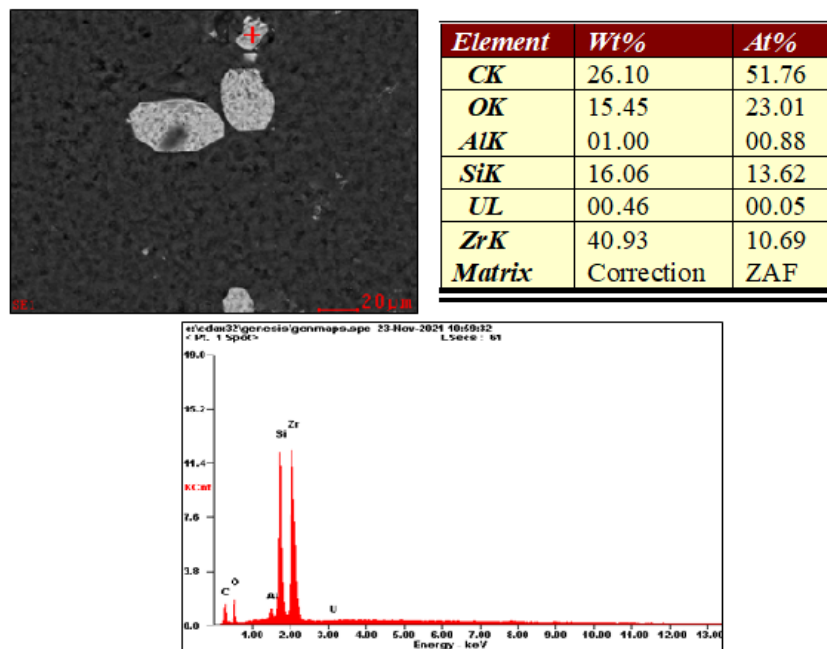
Según Förster (2005), la mayoría de los granitos las concentraciones de los elementos como Y, Th, U, Zr, Hf, Nb, Ta y otros elementos de tierras raras (REE), están incorporados en los minerales accesorios. En el caso de las xenotimas se concentran elementos de REE pesadas y en el circón se acumula el 30% de estos elementos en magmas diferenciados.

Para Geisler *et al.*, (2007), se ha demostrado las características químicas de la reacción de reequilibrio en los circones formando soluciones isoestructurales con minerales como cofinita ( $\text{USiO}_4$ ), torita ( $\text{ThSiO}_4$ ) y xenotima ( $\text{YSiO}_4$ ). Geisler (2001). Putnis (2002), indica que durante los procesos hidrotermales, los elementos compatibles con la estructura del circón ( $\text{ZrSiO}_4$ ) pueden ser incorporados en una nueva zona de sobrecrecimiento de la superficie del mineral y otros elementos contenidos en el circón pueden ser expulsados en un proceso descrito en términos de lixiviación-catalización-re cristalización. Los circones encontrados en la sección delgada DC-006 presentan dentro de su estructura contenido de uranio, sin embargo estos valores son muy bajos para ser considerados como la fuente de uranio (Figura 30, 31 y 32).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

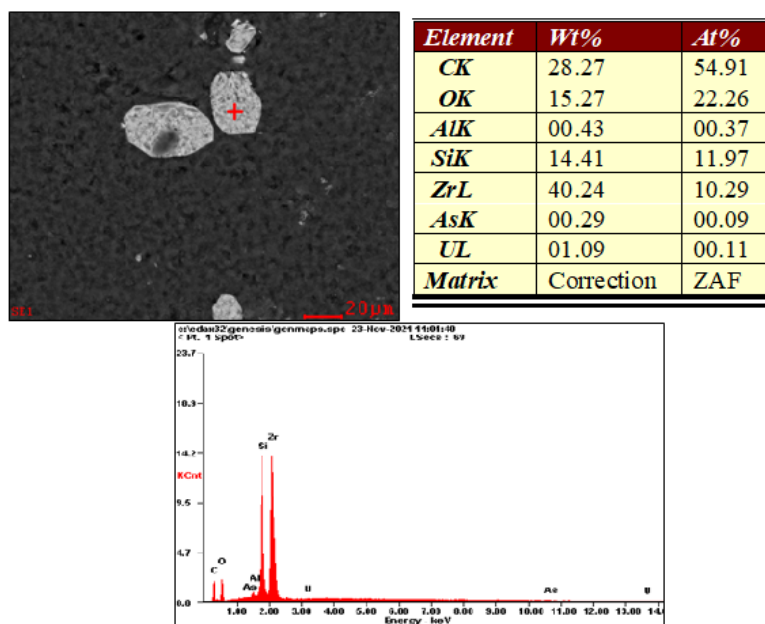
**Figura 30.**

*Circón con contenido de uranio 00.46 Wt% (Sección DC-006).*



**Figura 31.**

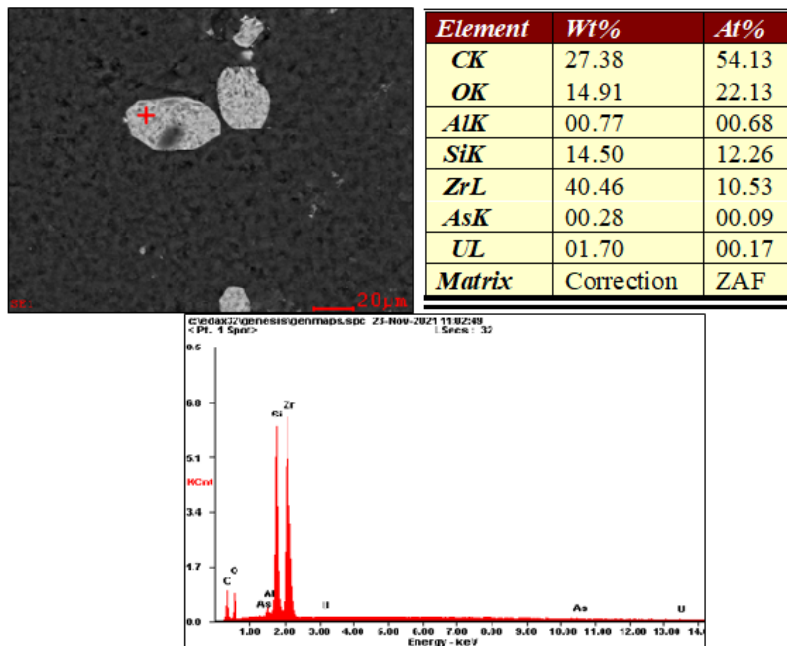
*Circón con uranio 01.09 Wt% (Sección DC-006).*



ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 32.**

*Circón con uranio 01.70 Wt% (Sección DC-006).*

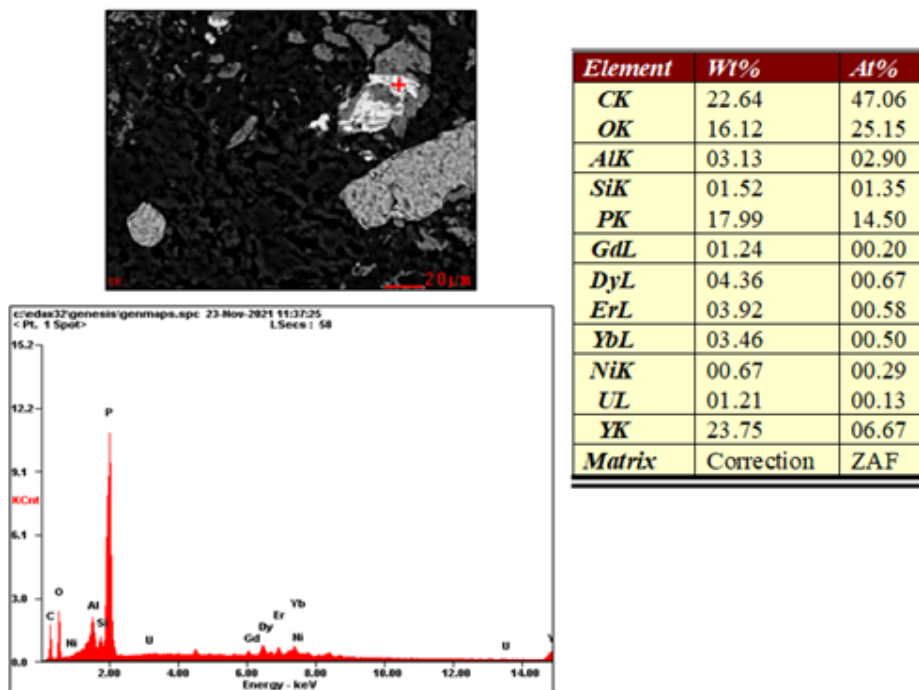


Según Hetherington (2008), En el caso de la xenotima (Figura 33), la asociación del mineral post-alteración consistirá en uraninita si la relación dentro del mineral inalterado es  $\text{ThO}_2:\text{UO}_2$  es  $<1$ , si esta relación es  $>1$ , la asociación mineral será cofinita.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 33.**

*Xenotima con contenido de uranio 01.21 Wt%. (Sección DC-002).*



Según Rodríguez (2014), fluidos ácidos y oxidados se generaron durante el evento de formación de litocap en el área de estudio, los procesos hidrotermales generaron la lixiviación y el transporte de los minerales accesorios como circones y xenotimos que fueron removilizados desde el leucogranito, siendo este la roca fuente. Los fluidos de alta acidez y oxidación produjeron la liberación de elementos como Uranio, Torio, Itrio y REE (Rodríguez, 2014), Estos elementos posteriormente fueron reducidos y concentrados en el cuarzo residual por interacción con el Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

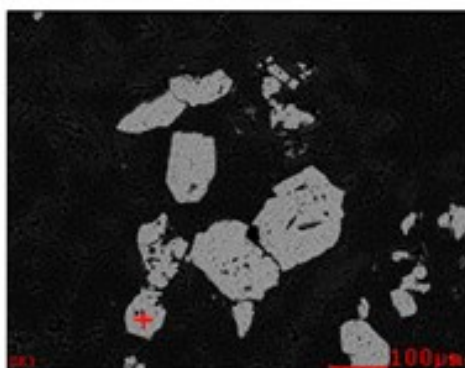
Para Bautista *et al.*, (2016), Los minerales de sulfuros actúan como trampa en la reducción del ion uranil lixiviado de los minerales del leucogranito. Durante la primera etapa del hidrotermalismo el uranio disuelto encontró un frente de reducción en minerales como la pirita y esfalerita, minerales que se observan en las figuras 34 y 35, sin embargo,

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

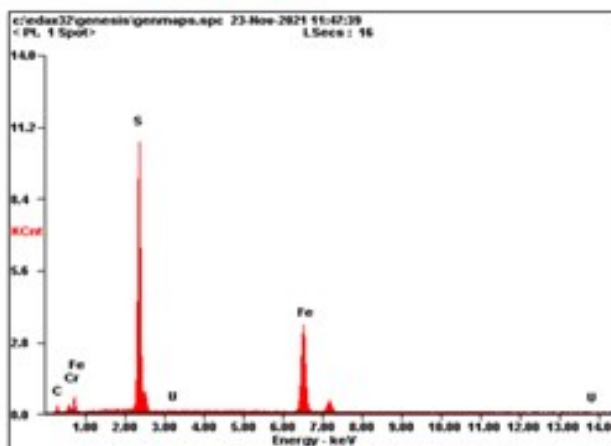
dicha relación no se logró determinar en este estudio, se considera que la mineralización de sulfuros ocurrió en una etapa posterior a el enriquecimiento de uranio en la zona.

**Figura 34.**

*Pirita con contenido de uranio 01.22 Wt% comportándose como agente reductor en el sistema (Sección DC-002).*



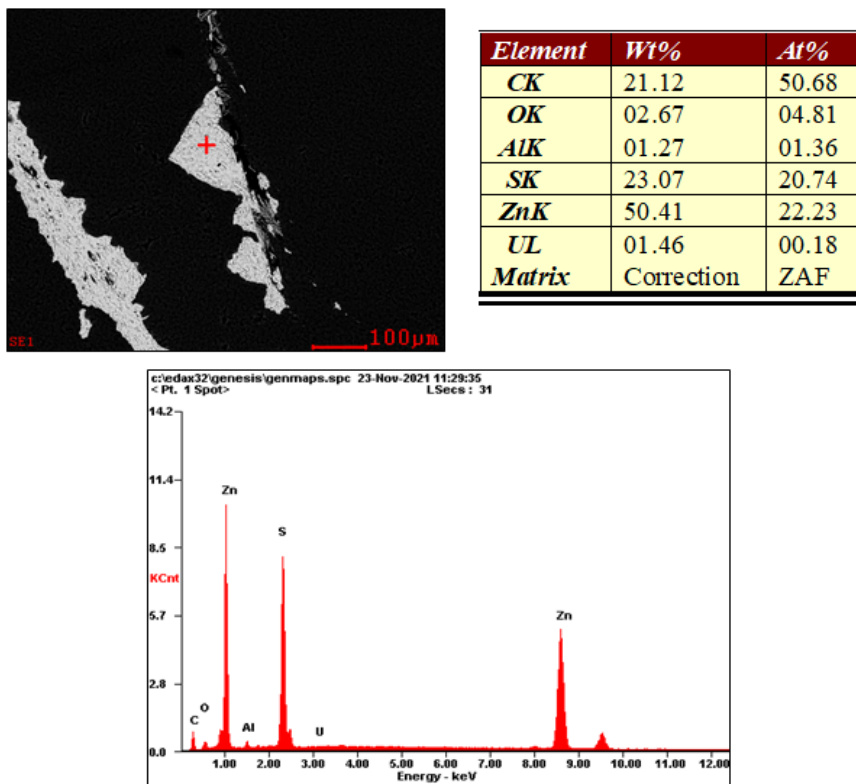
Element	Wt%	At%
CK	11.67	32.45
CrL	26.85	17.24
SK	31.80	33.12
FeK	28.46	17.02
UL	01.22	00.17
Matrix	Correction	ZAF



ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 35.**

*Esfalerita con contenido de uranio 01.46 Wt% comportándose como reductor en el sistema. Sección (DC-002).*



Según Szenknect *et al.*, (2020), la Cofinita es un ortosilicato con  $U^{4+}$  y un porcentaje de  $U^{6+}$ , asociada con ambientes reductores, con sulfuros y materia orgánica. La cofinita formula química es  $USiO_4 \cdot NH_2O$ , es un mineral primario común en los depósitos de uranio. En condiciones reductoras la cofinita reemplaza a la uraninita (Evins & Jensen). Se determinó la presencia de Cofinita en la muestra DC-003, con porcentaje de Uranio Libre (UL) de 49,89%. (Figura 23).

Para Bautista *et al.*, (2016), la mineralización en el área de estudio se condiciona en tres factores: El primero de estos es un leucogranito como roca fuente el cual contiene minerales con concentraciones no despreciables de Uranio en su estructura cristalina. El

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

segundo factor es un evento de alteración de alta sulfuración con fluidos ácidos y oxidados que liberó el uranio de los minerales accesorios y lo transportó hasta encontrar una fuente de reducción, durante este estudio se determinó el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) como agente reductor. Finalmente, un lineamiento como la Falla La Baja, funcionó como canal para transporte de los fluidos hidrotermales, permitiendo una interacción entre la roca caja y el evento hidrotermal.

### **Fuente del uranio**

Según Cuney (2009), los granitoides evolucionados derivados de fraccionamiento intenso de magmas calcoalcalinos y ricos en potasio se caracterizan por enriquecimiento moderado de elementos incompatibles como Torio (Th), U, Cesio (Ce), Oxido de plomo (Pb<sup>4+</sup>), Circonio (Zr), Hafnio (Hf), Titanio (Ti), Niobio (Nb) y Talio (Ta). Cuando el leucogranito se enriquece en U, ocurre un mayor enriquecimiento de U en la masa fundida de silicato resultante.

En el área de estudio se han cartografiado cuerpos leucograníticos ricos en sílice, que han reportado un contenido de uranio 100.42 ppm en promedio (Bautista *et al.*, 2016). Para Bautista *et al.*, (2016), el filón de San Celestino se formó por soluciones hidrotermales que llenaron espacios abiertos en la roca y produjeron las alteraciones por sustitución metasomática. Los espacios abiertos sirvieron para la circulación y la depositación de la mineralización, el canal fue la Falla La Baja, una falla de rumbo general N75°W y 45° de buzamiento al N (Mendoza y Jaramillo, 1979), Según Bueno (1995), estas condiciones explican la zona de brecha altamente sulfurada. Así mismo Bueno (1955) y Bautista *et al.*,

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

(2016), afirman que el uranio fue desplazado en solución quedado como fuente principal de la radiactividad registrada en la zona.

Según Friedrich *et al.*, (1987) en Cuney (2009), esta condición genera que el U se aloje predominantemente en la red de minerales accesorios como circón y apatito y no entrará en la masa fundida de silicato porque estos minerales accesorios son poco solubles, esta hipótesis fue descartada, ya que en la secciones delgadas se evidencio minerales de uranio primarios embebidos en la masa de cuarzo residual (Figura 22).

### **Lixiviación y transporte**

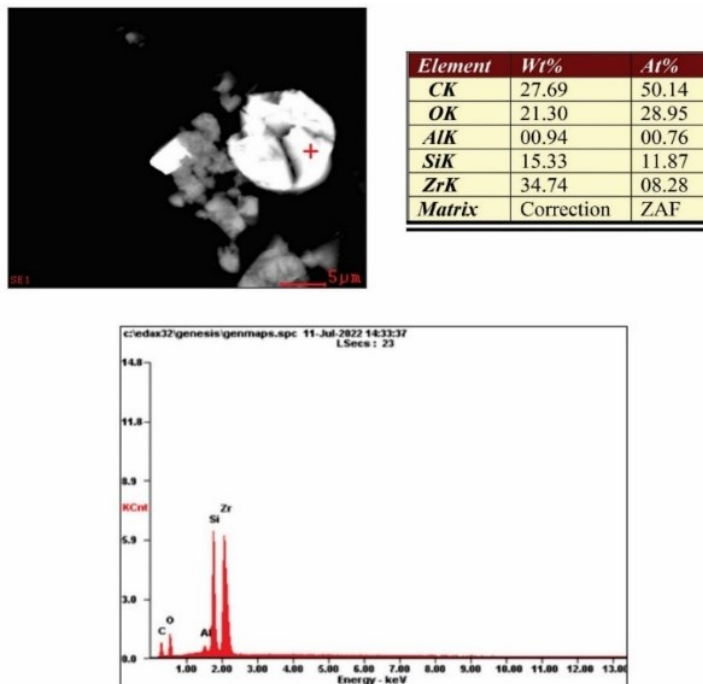
Los procesos de mineralización en el área de estudio han sido el producto de la alta actividad hidrotermal, la cual generó grandes zonas de alteración en las rocas encajantes, hasta el punto de hacer desaparecer sus características texturales (Felder. F., 2000) y (López. J., 2013). La lixiviación requiere un fluido con  $\text{pH} < 2$  para movilizar la alúmina (Stoffregen, 1987 en Sillitoe y Hedenquist, 2003), Según Rodríguez (2014), la alunita se forma a un pH entre 2 y 3.

Según Rojas (2013), la zona se reconoce un sistema epitermal de alta e intermedia sulfuración el cual tiene condiciones de pH extremo y se asocia a eventos porfiríticos. Este evento fue el detonante de la lixiviación y transporte del uranio desmovilizado de minerales refractarios como circones y monacitas, comunes en las alaskitas, utilizando como canal de movilización la Falla La Baja. En la figura 36, se observa un circón lixiviado producto de los procesos hidrotermales presentes en la zona. En la figura 37, se observa como debido a la lixiviación se evidencia minerales con uranio.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

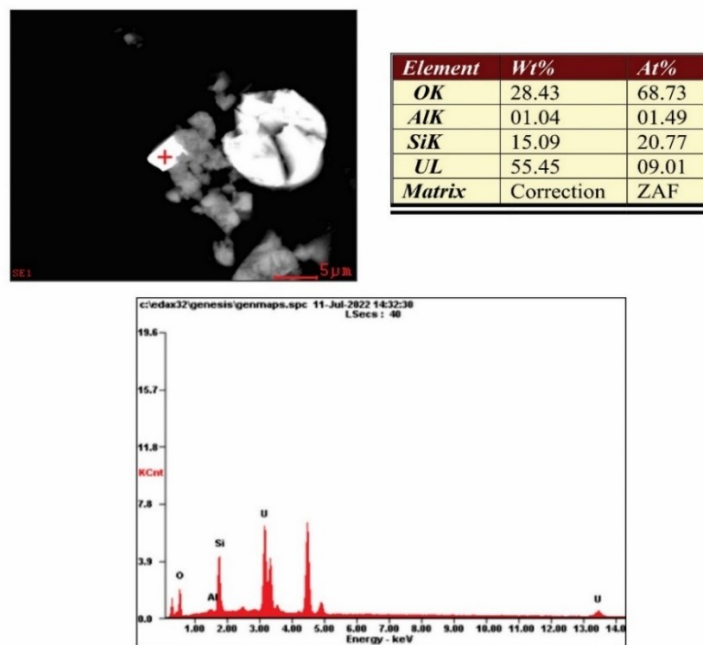
**Figura 36.**

*Circón lixiviado producto de la alteración hidrotermal presente en la zona. (Sección DC-007).*



**Figura 37.**

*Cristal de coffinita asociada a la lixiviación del circón (Sección DC-007).*



## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### **Trampa**

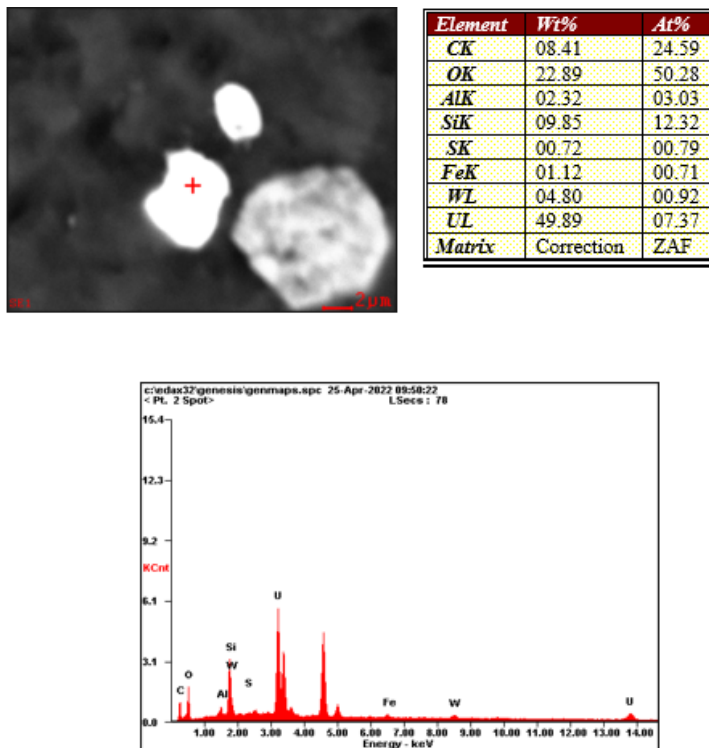
Según Sillitoe *et al.*, (2003), en la etapa inicial del evento epitermal la temperatura y presión son altas, en el sistema más profundo un fluido supercrítico se separa debido a la pérdida de presión en una fase vapor y una fase fluida hiper caliente. La fase de vapor se compone principalmente por SO<sub>2</sub> y al llegar a la zona epitermal a profundidades no mayores a 2km, encuentra oxígeno (O<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), comenzado un proceso de disociación (Sillitoe *et al.*, 2003). Este evento es muy ácido y con temperaturas muy elevadas, lo cual no permite la removilización de metales, esta removilización de sulfuros ocurre en la etapa única tardía donde la temperatura y salinidad han disminuido.

La Cofinita evidencia un estado de interacción con H<sub>2</sub>S, el cual es abundante en la primera etapa de formación del litocap, que, este caso, actuó como agente reductor que ‘atrapó’ y precipitó el Uranio libre en el sistema y posteriormente formó Cofinita. El uranio disuelto en los fluidos durante la primera etapa de hidrotermalismo encontró un frente de reducción en los fluidos compuestos por H<sub>2</sub>S, lo cual encaja con el evento epitermal, específicamente con la alteración de cuarzo residual donde se encuentra alojada la mineralización de uranio (Figura 38).

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Figura 38.**

*Cristal de Cofinita identificado mediante SEM, embebido en cuarzo residual. (Sección DC-006).*



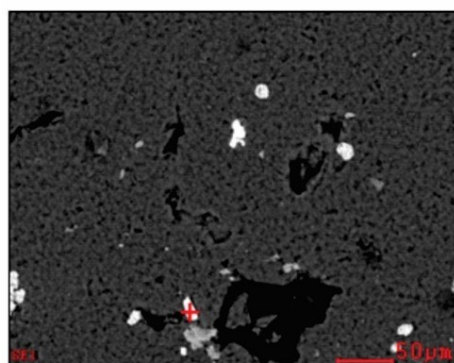
En la figura 39, se observa una microfotografía obtenida a partir del SEM, se determinó que el mineral de uranio presente en las muestras tomadas en el área de estudio corresponde a cofinita, con un porcentaje de uranio (UL) de 67.45%, se encuentra embebido dentro de una masa de cuarzo residual, corroborando la relación textural entre dichos minerales. Los cristales de cofinita encontrados las secciones delgadas tienen tamaños no mayores a 5 micras. La relación textural entre el cuarzo residual y la cofinita ocurre gracias a el H<sub>2</sub>S que actuó como agente reductor permitiendo que el uranio libre se transportara por los fluidos hidrotermales y posteriormente precipitara. Según estudios previos realizador por Bueno (1955) y Bautista (2016), se reportan minerales de uranio como cofinita sobre circón y uraninita sobre xenotima, evidencian de que el evento

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

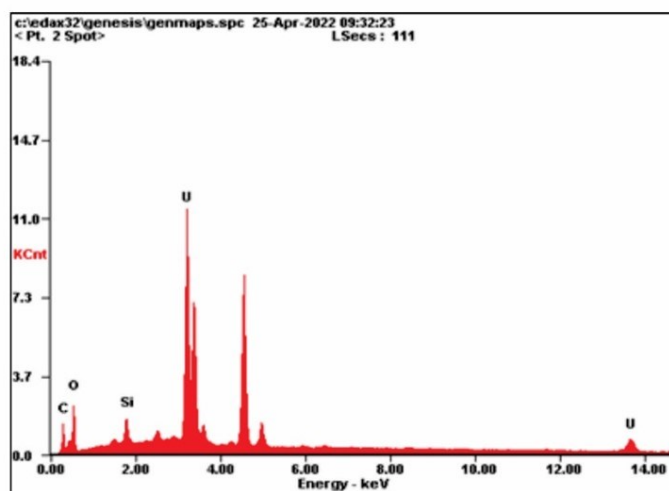
hidrotermal en el área de estudio detonaron la lixiviación del leucogranito y se produjo liberación del uranio, el cual se reconcentró y fue atrapado en el mismo sistema epitermal de alta sulfuración, Dicha hipótesis fue corroborada, en las figuras 39 y 40, se observa cofinita relacionada texturalmente con cuarzo residual producto de la silificación característica de estos yacimientos. Así mismo, Rodríguez (2014), estima que este proceso ocurrió entre la etapa media y tardía de la mineralización del Distrito Minero de Vetas y California.

### **Figura 39.**

*Cristal de Cofinita con UL 67.45%, embebido en masa residual de cuarzo (Sección DC-006).*



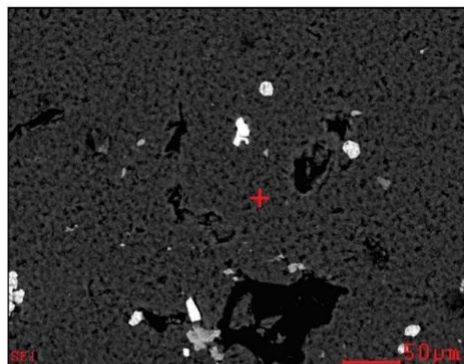
Element	Wt%	At%
CK	03.48	12.68
OK	25.26	69.01
SiK	03.81	05.92
UL	67.45	12.39
Matrix	Correction	ZAF



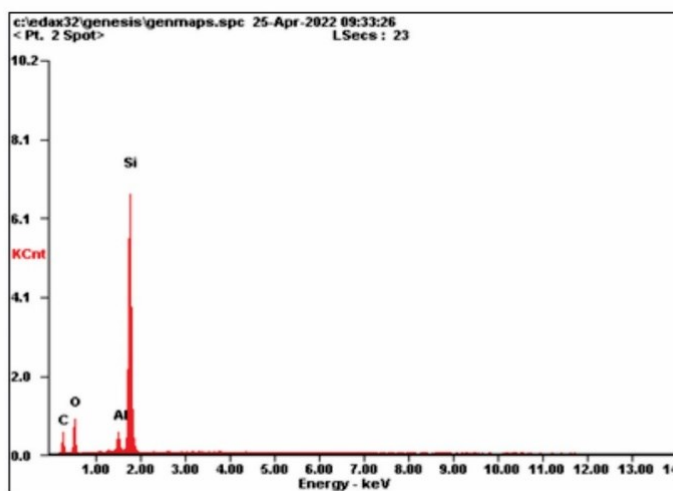
## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

**Figura 40.**

*Masa silícea de cuarzo residual con cofinita (Sección DC-006).*



Element	Wt%	At%
CK	32.70	46.73
OK	26.14	28.05
AlK	02.87	01.83
SiK	38.29	23.40
Matrix	Correction	ZAF



### Secuencia paragenética

Teniendo en cuenta la petrografía y SEM realizados, la secuencia paragenética corresponde a la observada en la Tabla 13. Los minerales accesorios que proviene del leucogranito y este aportan uranio al sistema son los circones y xenotimas. El mineral primario de uranio (cofinita) precipita en la etapa temprana de la alteración epitermal en simultaneidad con el cuarzo residual y la alunita. Durante la etapa tardía de la alteración epitermal precipitan los sulfuros: pirita, esfalerita y galena.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Tabla 13.**

*Secuencia paragenética del área de estudio, fuente de los Autores.*

	ROCA CAJA		ALTERACIÓN EPITERMAL	
	MINERALES ACCESORIOS		ETAPA TEMPRANA	ETAPA TARDÍA
CIRCÓN	-----			
XENOTIMA	-----			
CUARZO RESIDUAL			-----	
ALUNITA			-----	
COFINITA			-----	
PIRITA				-----
ESFALERITA				-----
GALENA				-----

## ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA, (SANTANDER)

### 7. Conclusiones

- La mineralización de uranio en la zona de La Baja, California (Santander) está asociada al leucogranito que actúa como roca fuente.
- El leucogranito de edad jurásica de características calcoalcalinas y peraluminosas es la fuente de los minerales accesorios los cuales por procesos de alta diferenciación lograron concentrar cantidades importante de uranio en su estructura cristalina.
- Mediante el análisis de SEM, se evidenció presencia de uranio en la estructura cristalina de minerales accesorios como los circones, xenotimos y apatitos.
- La falla La Baja, la cual está en contacto con el leucogranito, actuó como canal permitió la lixiviación, circulación y precipitación de los minerales de uranio, la zona de brecha presenta alta mineralización en sulfuros. Los fluidos relacionados con la lixiviación, removilización y transporte del uranio corresponde a la fase inicial de la etapa del evento epitermal de formación del litocap.
- El evento que genera la lixiviación de los minerales que contienen uranio como los xenotimos, apatitos, circones corresponde a los fluidos relacionados con el evento temprano de la formación del litocap y del evento epitermal de alta sulfuración, que corresponde a fluidos extremadamente ácidos y oxidados.
- Los fluidos ácidos y oxidados son capaces de lixiviar los minerales que contiene uranio, permitiendo cambiar el estado de oxidación de +4 a un estado de oxidación +6, el pH de estos fluidos es extremadamente ácido con pH por debajo de 1.
- El H<sub>2</sub>S actuó en el sistema como agente reductor, permitiendo la precipitación de uranio libre en el sistema, posteriormente formando cofinita.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**8. Recomendaciones**

- Se recomienda realizar datación de los circones para tener certeza de la edad de la mineralización y su relación parental con el leucogranito.
- Se recomienda tomar las medidas de radiación con un centillómetro de mayor sensibilidad.
- Se recomienda realizar estudios geoquímicos a el agua que percola por el área mineralizada con uranio teniendo en cuenta que estas aguas corresponden a aguas ácidas de mina y tienen la capacidad de removilizar el uranio.
- Se recomienda hacer una campaña de socialización para los habitantes de La Baja sobre los efectos en la salud a causa de la exposición de Uranio.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

**Referencias Bibliográficas**

- Alemán , A., & Ramos, V. A. (2000). *The Northern Andes. In Tectonic Evolution of South America, Cordani UG, Milani EJ, Thomaz Filho A, Campos DA (eds)*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress.
- Álvarez, M. C. (1955). *Yacimientos y obtención del uranio*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
- Barbosa, S. (2016). *Evolución del sistema hidrotermal del prospecto La Plata, Distrito Minero Vetas-California (DMVC)*. Santander, Colombia: Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.
- Bautista, S., Cáceres, A., Romero, F., Zamora, A., & Zappa, A. (2016). *Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectométricas para Potasio, Uranio y Torio en el área de Simacota-Lebrija y área de California, Departamento de Santander. Versión 2016*. Servicio Geológico Colombiano.
- Bissig , T., Rodríguez, A., & Mantilla, L. (2012). *New age data from California-Vetas District, Santander, Colombia. MDRU Colombia Gold and Porphyry Project*.
- Bissig, T., Mantilla, L., & Hart, C. (2014). *Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (-Mo, Au) metallogeny*. ELSEVIER.
- Bueno, J. A. (1955). Yacimientos de Uranio y otros metales en la región de La Baja, Municipio de California, Departamento de Santander. *Publicación del Ministerio de Minas y Petróleos*, 22-40.
- Burns, P., Fayek, M., Finch, R., & Kyser, T. (1999). *Stable isotope geochemistry of uranium deposits. Uranium: Mineralogy*. *Geochemistry and the Environment*, 38, 181-220.
- Cediel, F., Shaw, R., & Cáceres, C. (2003). *Tectonic Assembly of the Northern Andean Block in: Bartolini, C., Buffler, R. and Blickwede, J., eds., The Circum-Gulf of México and Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 79, Digital Edition, 815-848.
- Clavijo, J. (1994). *Mapa geológico generalizado de Norte de Santander. Escala 1: 250.000. Mapa interno. Bucaramanga*. INGEOMINAS.
- Cuney, M., & Kyser, K. (2009). *Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, vol. 39.
- Demoustier, A., Castroviejo, R., & Charlet, J. M. (1998). Calsificación Textural del cuarzo epitermal (Au-Ag) de rreino filoniano del área volcanica de Cabo de Gata, Almeria. *Boletín Geológico y Minero Vol. 109-5 y 6*, 449-468.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

- Dong, G., Morrison, G., & Jaireth, S. (1995). Quartz textures in Epithermal veins, Queensland. Classification, Origin and Implication. *Economic Geology Vol. 90*, 1841-1856.
- Dygert, H. (1949). *Concepts in inhalation toxicology of uranium*. compounds McGraw-Hill New York. pp. 603-700.
- Etayo, F. (1965). *Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leiva y zonas próximas*. Boletín de Geología, (21), 19-32.
- Evins, Z., & Jensen, K. A. (n.d.). *Review of spatial relations between uraninite and coffinite - implications for alteration mechanisms*. Estocolmo .
- Felder, F., S. A. (2000). Angustura Project, A High Sulphidation Gold Silver Deposit located in the Santander Complex of North East Colombia. *Paper presented t Simposio de Oro, Lima, Perú*.
- Fisenne, I. (1994). *Uranium*. En: Seiler HG, Siegel A, y Siegel H Handbook on Metals in Clinica and Analytical Chemistry Marcel Dekker, Inc New York.
- Forero, A. R. (2010). *Paragenesis Mineral de las brechas mineralizadas del sector La Mascota (California, Santander)*. Bucaramanga: Tesis Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Galvis, J. (1998). *Una caldera volcánica en el Macizo de Santander, Colombia*. *Ciencias de la Tierra*. Revista Académica Colombiana de ciencias, 22.
- Gansser, A. (1973). *Facts and theories on the Andes: twenty-sixth William Smith Lecture*. Journal of the Geological Society, 129(2), 93-131.
- Geisler, T., Schaltegger, U., & Tomaschek, F. (2007). Re-equilibration of Zircon in Aqueous Fluids and Melts. *Elements*, 44-55.
- Geisler, T., Ulonska, M., Schleicher, H., Pidgeon, R. T., & van Bronswijk, W. (2001). Leaching and differential recrystallization of metamict zircon under experimental hydrothermal conditions. *Contrib Mineral Petrol*, 53-65.
- Gilman, A., Villeuve, D., Secours, V., Yagminas, A., Tracy, B., Quinn, J., & Moss, M. (1998). *Uranyl nitrate: 28-day and 91-day toxicity studies in the Sprague-Dawley rat*. Toxicological Sciences, Vol. 41(1).
- Goldsmith, R., Marvin, R., & Mehnert, H. (1971). *Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes*. U.S. Geological Survey Professional Paper, Vol. 750-D, D41-D49.
- Grancea, L., & Hanly, A. (2020). *Uranium 2020: Resources, production and demand, (NEA No. 7551) (No. NEA - 7413)*. Organization for economic cooperation and development.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

- Guerrero, A. (2017). *Memoria de las prácticas mineras en el municipio de California para fortalecer la educación ambiental*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.
- Hetherington, C., & Harlov, D. (2008). *Metasomatic thorite and uraninite inclusions in xenotime and monazite from granitic pegmatites, Hydra anorthosite massif, southwestern Norway: Mechanics and fluid chemistry*. *American Mineralogist*, Vol. 93(5-6), 806-820.
- Horner, J. (2005). *Final report "Structural geology and tectonics of the Angostura Project area"*. Ic consulentes. pp 32.
- Julivert, M. (1959). *Geología de la Vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga*. *Boletín de Geología. UIS. No. 3: 15-34*.
- Kammer, A. (1993). *Steeply dipping basement fault and associated structures of the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes*. *Geología Colombiana*, 18.
- Leach, L. J., Maynard, E. A., Hodge, H. C., Scott, J. K., Yuile, C. L., Sylvester, G. E., & Wilson, H. B. (1970). A five-year inhalation study with natural uranium dioxide (UO<sub>2</sub>) dust. I. Retention and biologic effect in. *Health Phys* 18, 599-612.
- López, & Bueno. (n.d.). *Informe No-932*. Colombia: Instituto Geológico Nacional.
- López, J., V. F. (2013). Geología y estructuras del Proyecto Angostura. Algunas consideraciones genéticas. *XIV Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.
- Lu Sy Zhao, F. Y. (1990). Nephrotoxic limit and annual limit on intake for natural U. *Health Phys* 58, 619-623.
- Mantilla, L., Valencia, V., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. (2009). *Geocronología U-Pb de los cuerpos porfíricos del Distrito aurífero de Vetas-California (Departamento de Santander, Colombia)*. *Boletín Geología*, Vol. 31.
- Mantilla, L., Bissig, T., Cottle, J., & Hart, C. (2011). *Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera)*. *Journal of South American Earth Sciences* 38.
- Mantilla, L., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. (2013). *The magmatic history of the vetas-california mining district, santander massif, eastern cordillera, colombia*. *Journal of south american earth sciences*, 45.
- Mantilla, L., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, T. (2011). *Nuevas evidencias sobre el magmatismo Mioceno en el Distrito Minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia)*. *Boletín Geología*, Vol. 31.
- Mendoza, H., & Jaramillo, L. (1979). *Geología y geoquímica del área de California, Santander*. *Boletín Geológico Ingeominas*, 22.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

- Osorio, J., Hernández, C., Torres, E., & Botero, P. (2008). *Modelo geodinámico del Macizo de Santander*. Instituto Colombiano de geología y minería. Bogotá: INGEOMINAS.
- Pavlakakis, N., Pollock, C. A., McLean, G., & Bartrop, R. (1996). Deliberate overdose of uranium: toxicity and treatment. *Nephron* 72, 313-317.
- Pinto, E. (1991). *Geología y evolución de la Mina la Bodega, California (Santander)*. Bucaramanga: Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.
- Polania, J. (1982). *Mineralizaciones de uranio y otros metales en California, (Santander del Sur)*. Geología Norandina, Vol. 6.
- Porras, A., & Díaz, J. (2019). *The uranium as an energetic resource and its currently mining in Colombia*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, DYNA.
- Prieto, R., Guatame, C., & Cardenas, S. (2019). *Recursos minerales de Colombia, vol. 1. Bogota*. Servicio Geologico Colombiano.
- Putnis, A. (2002). *Mineral replacement reactions: from macroscopic observations to microscopic mechanisms*. Mineralogical Magazine, Vol. 66.
- Restrepo, J., Ordóñez-Carmona, O., Armstrong, R., & Pimentel, M. (2011). *Metamorfismo triásico en la parte norte del Tahamí Terrane de la cordillera central de Colombia*. Revista Ciencias de la Tierra de América del Sur.
- Rodríguez, A. (2014). *Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes*. Vancouver: The University of British Columbia.
- Rojas, S. (2013). *Metalogenia de las mineralizaciones auríferas en la zona de Vetas, Santander*. Bucaramanga: Tesis Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología.
- Royero, M., & Clavijo, J. (2001). *Memoria explicativa del departamento de Santander, Mapa geológico generalizado, Departamento de Santander. Escala 1:400.000*. INGEOMINAS.
- Sanders, C. L. (1986). Radiological health. Toxicological aspects of energy production. *Columbus Ohio: Battelle Press*, 253-284.
- Shaw, R. (2000). *Gold mineralization in the Northern Andes: Magmatic Vs Metallogeny*. Bogotá, Colombia: XI International Mining Congress.
- Sillitoe, R. H. (1985). *Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs*. Economic geology, 80(6), 1467-1514.
- Sillitoe, R., & Hedenquist, J. (2003). *Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious-metal deposits*. In Simmons SF, Graham I (eds). Soc Econ Geol Spec Pub 10:315-343.

ESTUDIO DE LA OCURRENCIA DE MINERALES DE URANIO EN LA BAJA,  
(SANTANDER)

- Simmons, S. F., White, N. C., & John, D. A. (2005). Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Society of Economic Geologist* , 485-522.
- Stokinger, H. E., Baxter, R. C., & Dygent, H. (1953). *Toxicity following inhalation for 1 and 2 years*. New York: McGraw-Hill.
- Szenknect, S., Alby, D., López, M., Wang, C., Podor, R., Miserque, F., . . . Ewing, C. (2020). Coffinite formation from  $UO_2+x$ . *Scientific Reports*.
- Tobada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., . . . Rivera, C. (2000). *Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia)*. Tectonics.
- Tussaint, J. (1993). *Evolución geológica de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR. (1988). *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes*. Nueva York.
- Vicente, L., Quiros, Y., Pérez, F., López-Novoa, J., López-Hernández, F., & Morales, A. (2011). *La exposición crónica al uranio, un riesgo potencial de nefrotoxicidad*. Rev. toxicol, Vol. 28, 99-108.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo. (1973). *Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander y Norte de Santander*. Boletín Geológico.
- Wheeler, O. (1929). *Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama y La Paz Formations near the eastern part of De Mares Concession*. Informe Geológico, 37.
- Wokittle, R. (1954). *Recursos de Alta, Baja y Vetas. Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Nacional, Informe 1030.
- Wrenn, M. E., Durbin, P. W., Howard, B., Lipsztein, J., Rundo, J., Still, E. T., & Willis, D. L. (1985). Metabolism of ingested U and Ra. *Health Phys* 48, 601-633.
- Yuan, F., Jiang, S. Y., Liu, J., Zhang, S., Xiao, Z., Liu, G., & Hu, X. (2019). Geochronology and Geochemistry of Uraninite and Coffinite: Insights into Ore-Forming Process in the Pegmatite-Hosted Uraniferous Province, North Qinling, Central China. *Minerals*, 2-15.