

**MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA DE LA MINERALIZACIÓN DE URANIO EN
FOSFORITAS DEL CRETÁCICO INFERIOR, SINCLINAL DE BERLÍN,
CORDILLERA CENTRAL
(DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA)**

ROBINSON PIMIENTO RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

**MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA DE LA MINERALIZACIÓN DE URANIO EN
FOSFORITAS DEL CRETÁCICO INFERIOR, SINCLINAL DE BERLÍN,
CORDILLERA CENTRAL
(DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA)**

ROBINSON PIMIENTO RUEDA

**Proyecto de grado para optar al título de
GEÓLOGO**

Director:

**GEÓLOGO PH.D. CARLOS ALBERTO RIOS REYES
Profesor Escuela Geología UIS**

Codirectores:

**GEÓLOGO PH.D. LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA
Profesor Escuela Geología UIS**

**GEÓLOGO ANDRES MAURICIO CACERES BOTTIA
Geólogo U308 Corp.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

A mis padres, hermanos y a Sandra por su respaldo incondicional. A los docentes de la Escuela de Geología UIS por su invaluable formación.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Luis Carlos Mantilla Figueroa y Carlos Alberto Ríos Reyes por su dedicación y aportes en el desarrollo del presente trabajo.

Al Geólogo Andrés Mauricio Cáceres Bottia y el equipo de Geólogos de la compañía U3O8 Corp., por fomentar y patrocinar trabajos de investigación entre la industria y la academia.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. METODOLOGÍA	20
2.1 FASE DE PRECAMPO	21
2.2 FASE DE CAMPO	21
2.3 FASE DE LABORATORIO	22
2.4 FASE DE OFICINA	25
3. GENERALIDADES	27
3.1 LOCALIZACIÓN	27
3.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA	27
4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	30
4.1 CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL FÓSFORO	30
4.2 CICLO GEOQUÍMICO DEL URANIO	33
4.3 DEPÓSITOS DE FOSFORO Y URANIO EN COLOMBIA DE EDAD CRETÁCICO	37
4.4 DEFINICIÓN: DEPÓSITOS DE URANIO HOSPEDADO EN ARENISCAS (IAEA, 2009)	42
4.5 ANTECEDENTES DEPÓSITO DE BERLÍN	43
5. GEOLOGÍA REGIONAL	47
6. GEOLOGÍA LOCAL	51
6.1 ESTRATIGRAFÍA	51

6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	61
7. RESULTADOS	63
7.1 OCURRENCIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CON FÓSFORO Y URANIO	63
8. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA Y PETROGRÁFICA CON MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA Y REFLEJADA, (SEM) Y (EPMA) DE LA MINERALIZACIÓN DE URANIO Y FOSFORO EN FOSFORITAS DE BERLÍN	68
8.1 MUESTRA No. 12 (MUESTRA S4M5B: BASE COLUMNA ESTRATIGRÁFICA EL VOLCÁN)	68
8.2 MUESTRA No. 11 (MUESTRA S4M7: TECHO COLUMNA ESTRATIGRÁFICA EL VOLCÁN)	73
8.3 MUESTRA No. 1 (MUESTRA BE1001005FCM: TRINCHERA TB2)	76
8.4 MUESTRA No. 3 (MUESTRA BE1001005ECM: TRINCHERA TB2)	81
8.5 MUESTRA No. 10 (BE1005007ACM: CAMINO QUIEBRA DEL GUAYABO AL POZO P1)	88
8.6 MUESTRA No. 9 (BE1005TB26OS: TRINCHERA TB26, FLANCO ORIENTAL DEL SINCLINAL)	91
8.7 MUESTRA No. 2 (BE1003TB9COS: TRINCHERA TB9, VEREDA LA TULIA)	94
8.8 MUESTRA No. 5 (BE1004006JS: TRINCHERA TB14 VEREDA ALTO SAN JUAN CERCA DE UN AFLUENTE DE LA QUEBRADA EL PERRO)	98
8.9 MUESTRA No. 4 (BE1004006CM: TRINCHERA TB17 QUEBRADA LA CALERA)	101
8.10 MUESTRA No. 6 (BE1004003BCM: TRINCHERA TB17 AFLUENTE QUEBRADA LA CALERA)	104
8.11 MUESTRA No. 7 (BE1004003ACM: TRINCHERA TB17 AFLUENTE QUEBRADA LA CALERA) VER FIGURAS. 50 – 51 – 52	107

8.12 MUESTRA No. 8 (BE1004013CMVEREDA LA RESACA. QUEBRADA LA CALERA)	111
9. HIPÓTESIS DE TRABAJO PRELIMINAR SOBRE LA GÉNESIS DE LA MINERALIZACIÓN DE FÓSFORO Y URANIOEN EL SINCLINAL DE BERLIN	114
CONCLUSIONES	118
RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	127

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especies minerales de fosfatos en meteoritos.	31
Tabla 2. Correspondencias entre dominios y terrenos para la prospección de Uranio. El depósito de Berlín, Caldas, se describe en la primera fila de la tabla.	44

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la metodología empleada en el desarrollo de este trabajo.	20
Figura 2. Microscopio (SEM) (Fig. 2a) y detalle del montaje de las muestras (Fig. 2b) para el análisis	24
Figura 3. Interfaz de usuario del programa (EPMA v.8.47) indicando los parámetros para la adquisición de datos y los estándares para el análisis químico cuantitativo tabulados en el (Anexo C)	25
Figura 4. Localización del depósito de Berlín.4a. Localización departamento de Caldas	28
Figura 5. Fisiografía del área del depósito de Berlín.	29
Figura 6. Esquema del ciclo biogeoquímico del fósforo pre humano. T	30
Figura 7. Disponibilidad de las formas de fosfatos a través del tiempo y su ocurrencia según el (pH) del ambiente	33
Figura 8. Esquema del ciclo geoquímico del uranio. Obsérvese la recurrente asociación del uranio con material carbonaceo	34
Figura 9. Distribución de uranio en el planeta Tierra indicando el porcentaje en volumen y masa equivalente del núcleo, manto y corteza con su respectivo índice de "Clarke" de uranio	36
Figura 10. Ciclo de interconversión del U^{+4} y el U^{+6} en la naturaleza	37
Figura 11. Mapas de secuencias sedimentarias Cretácicas y de áreas para prospección de Uranio	39
Figura 12. Esquemas de tipos de depósitos de U en areniscas de edad Fanerozoico asociado con materia orgánica vegetal y Proterozoico con materia orgánica algal	43

Figura 13. Esquema y mapa geológico regional ESC 1:100000 del área de estudio. 13.	49
Figura 14. Esquemas de evolución geológica durante el Cretácico en el Noroeste de Suramérica	50
Figura 15. Mapa geológico del área de Berlín	52
Figura 16. Roca metamórfica	53
Figura 17. Afloramiento de alaskita vía Berlín – Florencia	54
Figura 18. Columna estratigráfica radiométrica de la secuencia sedimentaria del depósito de Berlín	56
Figura 19. Metaconglomerados a la base de la secuencia sedimentaria	57
Figura 20. Cuarzo arenitas	58
Figura 21. Nivel mineralizado en fosforitas	61
Figura 22. Apique y detalles de estructuras sedimentarias en fosforitas	64
Figura 23. Columna estratigráfica El Volcán, Escala 1:300 del nivel mineralizado	66
Figura 24. Trinchera Tb2, detalles metodología de muestreo	67
Figura 25. Trinchera Tb9 indicando rejilla (cuerda color verde) para detallar el micropliegue y medidas de radiometría	67
Figura 26. Microscopía de luz transmitida muestra No.12	70
Figura 27. Microscopía de luz reflejada, muestra No.12	71
Figura 28. Imágenes (SEM) y espectrogramas muestra No.12	72
Figura 29. Microscopía de luz transmitida (29.a-b-c-d) y reflejada (29.e-f-g-h), muestra No. 11	75
Figura 30. Microscopía de luz transmitida muestra No. 1	78
Figura 31. Microscopía con luz reflejada muestra No.1	79
Figura 32. Imágenes y química mineral (EPMA) muestra No.1	80
Figura 33. Cacoxenita en individuos con zonación que varía según la composición de Fe (EPMA)	83

Figura 34. Microscopía de luz transmitida muestra No.3	84
Figura 35. Microscopía con luz reflejada muestra No.3	85
Figura 36. Imágenes y espectrogramas (SEM) muestra No.3	86
Figura 37. Imágenes (EPMA) muestra No.3	87
Figura 38. Microscopía de luz transmitida (38 a-b-c-d) y reflejada (38 e-f-g-h), muestra No. 10	90
Figura 39. Microscopía de luz transmitida y reflejada (39 c-d), muestra No. 9	92
Figura 40. Microscopía con luz reflejada muestra No. 9	93
Figura 41. Microscopía con luz transmitida y (EPMA 40-h) muestra No. 2	96
Figura 42. Microscopía con luz reflejada muestra No. 2	97
Figura 43. Imagen (EPMA) muestra No.2	97
Figura 44. Microscopía con luz transmitida, muestra No. 5	99
Figura 45. Microscopía con luz reflejada muestra No. 5	100
Figura 46. Microscopía con luz transmitida muestra No. 4	102
Figura 47. Microscopía con luz reflejada muestra No. 4	103
Figura 48. Microscopía con luz transmitida muestra No. 6	105
Figura 49. Microscopía con luz reflejada muestra No. 6	106
Figura 50. Microscopía con luz transmitida muestra No. 7	108
Figura 51. Microscopía con luz reflejada muestra No. 7	109
Figura 52. EPMA muestra No. 7	110
Figura 53. Microscopía con luz transmitida muestra No. 8	112
Figura 54. Microscopía con luz reflejada muestra No. 8	113

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Programa de Exploración Berlín	128
Anexo B. Descripción Macroscópica de Las Rocas Sedimentarias Mineralizadas con Fósforo y Uranio	145

RESUMEN

TITULO: MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA DE LA MINERALIZACIÓN DE URANIO EN FOSFORITAS DEL CRETÁCICO INFERIOR, SINCLINAL DE BERLÍN, CORDILLERA CENTRAL (DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA)*

AUTOR: ROBINSON PIMIENTO RUEDA**

PALABRAS CLAVES: URANIO, ARENISCAS, FOSFORITAS, PETROGRAFÍA, EPIGENÉTICO, GÉNESIS, BERLÍN, CALDAS.

DESCRIPCIÓN

La mineralización de U, P, V y REE en el área de estudio del depósito de Berlín, se hospeda principalmente en fosforitas del Cretácico inferior, las cuales fueron muestreadas y estudiadas con luz transmitida y reflejada, SEM y EPMA para conocer los minerales mena y ganga, las asociaciones minerales y sus relaciones texturales que permitieron plantear una hipótesis sobre la génesis de la mineralización. La mena hacen parte de la matriz, de cementos y rellenando fracturas y microfracturas en los granos detríticos de cuarzo y consiste de fosfatos, vanadatos y complejos uranilos fosfatados neoformados que según su abundancia sonapatito, roscoelita, autunita, metaautunita, cacoxenita, churchita, monazita (REE) e incluidos de REE en los cuarzos. La ganga consta de cuarzo detrítico, materia orgánica grafito, pirita, goethita, hematita, bornita, zircón, calcita, muscovita, clorita, rutilo y cromita. El proceso mineralizante es epigenético, generado por la remobilización de P, U remobilizado del basamento ígneo metamórfico o extraído de material detrítico con U y V con relación lineal de abundancia química P/U en fases minerales ricas en Fe que son transportados por fluidos hidrotermales oxidados de baja temperatura que percolan la porosidad secundaria precipitando minerales con morfologías radiales y amorfas que indican un sub enfriamiento muy rápido. Se plantea un criterio de exploración basado en análisis estratigráfico que identifique las Facies arenosas más permeables con alta cantidad de materia orgánica y sus variaciones laterales y continuidad por donde los fluidos transportaron y precipitaron con mayor eficacia los minerales mena presentados.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Geólogo PH.D. Carlos Alberto Ríos Reyes. Codirectores: Geólogo PH.D. Luís Carlos Mantilla Figueroa; Geólogo Andrés Mauricio Cáceres Bottia

ABSTRACT

TITLE: MINERALOGY AND PETROGRAPHY OF URANIUM ORE IN PHOSPHORITES OF LOW CRETACEOUS, SYNCLINAL OF BERLÍN, CORDILLERA CENTRAL (CALDAS STATE, COLOMBIA)*

AUTHOR: ROBINSON PIMIENTO RUEDA**

KEY WORDS: URANIUM, SANDSTONES, PHOSPHORITES, PETROGRAPHY, EPIGENETIC, GENESIS, BERLÍN, CALDAS.

DESCRIPTION

The U, P, V and REE ore in study area of Berlín ore deposit, is mainly hosts in phosphorites of low Cretaceous, were sampled and studied in transmitted and reflected light, SEM and EPMA to find ore and gangue minerals, the mineral assemblages and its textural relations which allowed to raise a hypothesis about the genesis of the mineralization. The ore are part of the matrix, cement and filling fractures and microfractures in detrital quartz grains and consists of phosphates, vanadates and complex uranyl phosphate neofomed that according to its abundance are apatite, roscoelite, autunite, meta autunite, cacoxenite, churchite, monazite (REE) and REE included in the quartz. The gangue consists of detrital quartz, organic material graphite, pyrite, goethite, hematite, bornite, zircon, calcite, muscovite, chlorite, rutile and chromite. Epigenetic mineralizing process is generated by the remobilization of P, U remobilization of igneous metamorphic basement and/or extracted of detritus with U and V with linear relation of chemical abundances P/U in Fe-rich mineral phases that are transported by low temperature oxidised hydrothermal fluids that percolate secondary porosity precipitating minerals with amorphous and radial morphologies that indicate a undercooling. We propose a exploration target based on stratigraphic analysis to identify the more permeable sand facies with high amounts of organic matter and its lateral variations and continuity through which the fluids transported and precipitated more effectively ore minerals.

* Project of Grade.

** Ability of Physical-chemical Engineerings. School of Geology. Director: Geology PH.D. Carlos Alberto Ríos Reyes. Co-Directors: Geólogo PH.D. Luís Carlos Mantilla Figueroa; Geology Andrés Mauricio Cáceres Bottia

INTRODUCCIÓN

El depósito de U, P, V y REE del sinclinal de Berlín se ubica en el flanco este de la Cordillera Central, hospedado en una secuencia sedimentaria que de base a techo son metaconglomerados, areniscas siliciclásticas, fosforitas, arcillolitas (*shale*) de edad Valanginiano-Albiano (Naranjo, 1983) y limolitas. En el área de estudio la secuencia es normal e intruida al oeste por el Complejo Ígneo de Samaná (119 ± 10 m.a. K/Ar en hornblenda de Facies gabroide) en Barrero y Vesga, (1976) y al este en inconformidad con el Complejo Cajamarca de edad Paleozoico. Los principales rasgos estructurales son la Falla de Palestina y el sinclinal de Berlín de edad Cretácico tardío. Las rocas presentan un bajo grado de deformación en el área de estudio ubicada al Sur del depósito evidente en la elongación de los cuarzos detríticos, poligonización del cuarzo, lamelas de deformación, disolución por presión y fracturamiento que en la parte Norte es reportado como metamorfismo de bajo grado con temperaturas de hasta 200 °C (Gómez y Lizcano, 1990). La mineralización se hospeda principalmente en el nivel de fosforitas variando entre los niveles de lodolitas, areniscas y limolitas calcáreas en asociaciones minerales de apatito, roscoelita, cacoxenita, autunita, metautunita y materia orgánica como reemplazamiento en la matriz y como cementos rellenando fracturas y microfracturas que actuaron como canales para la percolación de los fluidos mineralizantes y que ocurren en dos generaciones, la primera a través de la porosidad primaria donde fluidos ácidos incursionaron disolviendo el material primario calcáreo en la matriz y la segunda a través de la porosidad secundaria por fracturas y microfracturas por deformación así como a través de los canales de la paleoporosidad primaria por fluidos ácidos que a su vez rellenan las microfracturas aumentando el volumen por el paso de fluidos ¿clorurados?, separando los fragmentos de los granos detríticos y generando un embahamiento o reemplazamiento incipiente del cuarzo y feldespatos por fosfatos evidente en coronas de reacción en los bordes de los granos. La mineralización se genera

como producto de la remobilización del P, U y V, por fluidos oxidados de baja temperatura ($< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) en un ambiente ácido con un pH 4 – 5 que cuando alcanzan las condiciones reductoras producto de la interacción con la materia orgánica aumenta el pH y precipita granoseuhedrales de apatito de sección cuadrada, radiales de cacoxenita y fosfatos de hábito tabular y agregados aciculares de minerales de uranio sin ninguna evidencia de transporte así como fosfatos amorfos de roscoelita y autunita de aspecto coloidal y en agregados escamosos o laminares. En los datos de EPMA se evidencia una relación lineal directamente proporcional de P/U que ocurre en fases ricas en Fe. El P en su mayoría es un componente remobilizado por los fluidos hidrotermales y el U podría ser la remobilización del basamento ígneo metamórfico o haber sido extraído de minerales detríticos de U. A partir de los resultados obtenidos se considera que las Facies arenosas con mayor permeabilidad y alto contenido en materia orgánica son las más favorables para hospedar la mineralización presentada y su estudio estratigráfico permitirá hacer seguimiento a la continuidad y variaciones laterales de la mineralización. Las Facies calcáreas pueden ser en parte, producto de la carbonatación generada por el transporte del material primario disuelto en la matriz y cemento lo que implicaría un proceso epigenético primario que evidencia la disolución inicial y generación de porosidad secundaria requiriéndose comprobar si el material calcáreo es singenético o epigenético. Teniendo en cuenta los dos canales para que se dé la mineralización se propone un nuevo criterio de exploración basado en la continuidad y correlación de las Facies arenosas con alta permeabilidad y ricas en materia orgánica en la secuencia sedimentaria del depósito de Berlín.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

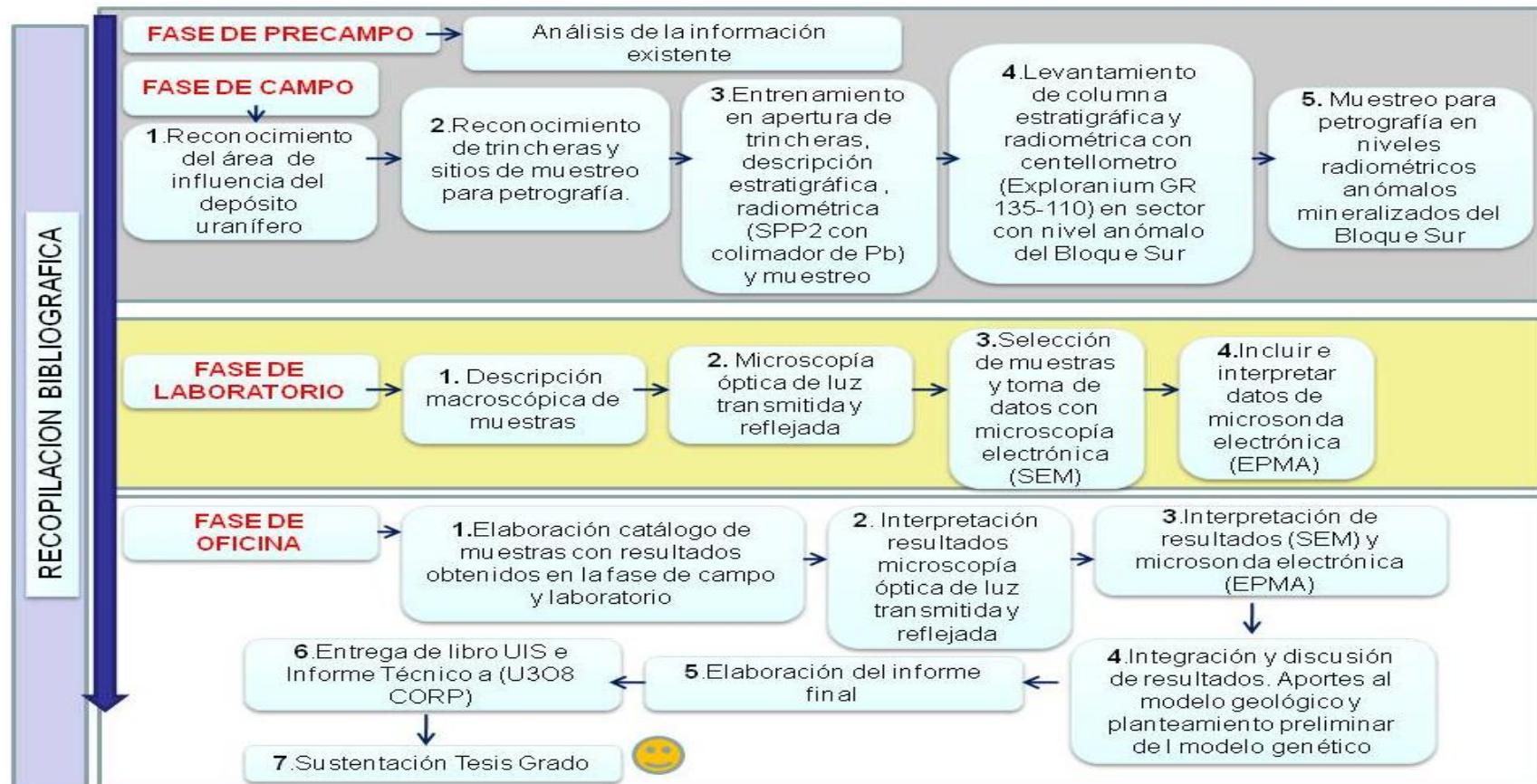
Caracterizar y determinar la mineralogía y petrografía de la mineralización de uranio en las fosforitas del Cretácico inferior del sinclinal de Berlín.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y caracterizar mediante microscopía óptica de luz transmitida y reflejada la mineralogía de la mena y la ganga asociada a la mineralización de uranio y fósforo presente en las fosforitas del sinclinal de Berlín.
- Identificar las asociaciones minerales presentes en los materiales sedimentarios con mineralización de uranio y fósforo.
- Caracterizar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microsonda electrónica (EPMA), las fases minerales y los rasgos texturales relacionados con las rocas mineralizadas con uranio y fósforo.
- Proponer a la luz de los nuevos datos una hipótesis de trabajo preliminar sobre la génesis de la mineralización uranio y fósforo.

2. METODOLOGÍA

Figura 1. Esquema de la metodología empleada en el desarrollo de este trabajo.



2.1 FASE DE PRECAMPO

La fase de pre campo comprende el estudio del estado del arte en geología de depósitos de uranio en rocas sedimentarias, la naturaleza de la ocurrencia de mineralización de uranio en roca fosfórica y del estudio de antecedentes e información existente obtenida por la empresa (U3O8 Corp.), en su concesión en el depósito de Berlín.

2.2 FASE DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó en el Bloque Sur del depósito ya que cuenta con la mayor cantidad de información, afloramientos con buena exposición de los estratos mineralizados, vías de acceso en buen estado y caminos abiertos para facilitar la toma de datos, muestreos y tener un área piloto del proyecto.

El trabajo de campo se desarrolló en cinco etapas que consisten en **(1)** reconocimiento geológico del depósito y afloramientos para muestreo, **(2-3)** ubicación, descripción estratigráfica con radiometría de trincheras, **(4)** levantamiento de columna estratigráfica con radiometría y **(5)** muestreo para petrografía en el nivel mineralizado.

La primera etapa consistió en un recorrido en compañía del personal de la empresa por los principales afloramientos y trincheras ubicados en cercanías a la vía secundaria que recorre de norte a sur el bloque sur del depósito. Como inducción se identificaron las principales unidades litoestratigráficas, la polaridad de la secuencia, la zona mineralizada y los principales rasgos estructurales. La zona mineralizada se identifica principalmente por anomalías radiométricas empleando un centellometro (Exploranium GR 135) y/o (Exploranium GR 110) así como por los niveles de fosforitas y shale negro.

La instrucción en la técnica de radiometría se realizó durante la inducción en campo (**Ver Anexo A**).

La segunda y tercera etapa se desarrolla según el programa de exploración de la empresa que cuenta con un manual de campo (**Ver Anexo A**) donde se describe la metodología para ubicar, excavar, medir la radiometría, muestrear y describir trincheras.

La cuarta etapa consistió en el levantamiento de la columna estratigráfica para lo cual se eligió un sector del bloque sur del depósito que cuenta con información de trincheras y pozo para en posteriores trabajos correlacionar la información tanto en superficie como en profundidad. Para el levantamiento de la columna estratigráfica se modificó el formato de Ingeominas para incluir la radiometría medida con centellometro (Exploranium GR 135). La escala de la columna fue de 1:300 dada la monotonía de la secuencia y teniendo en cuenta el máximo espesor promedio de la mineralización en fosforitas de 3.0 metros que es el objetivo principal del presente trabajo.

En la quinta etapa se realizó un muestreo de la zona mineralizada para petrografía. Se realizó reconocimiento en bodega (Bogotá) de los núcleos del pozo No.1 para reconocimiento preliminar de cambios mineralógicos en profundidad.

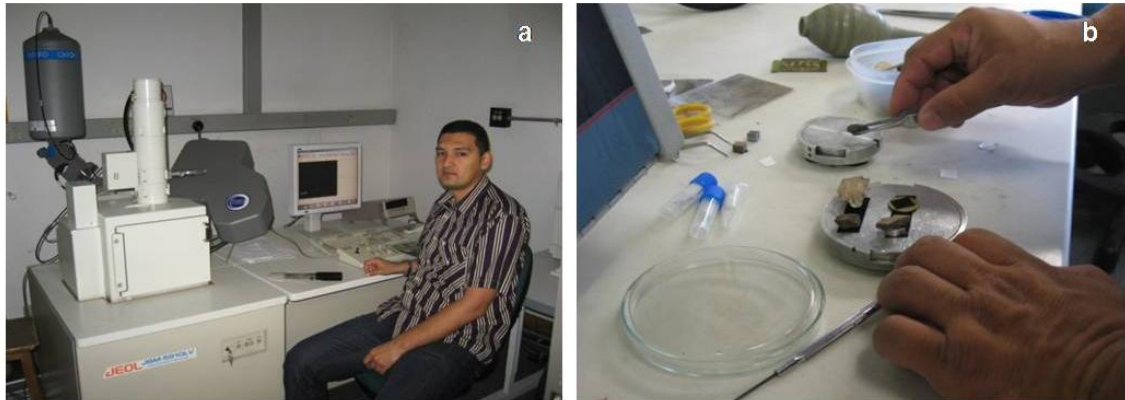
2.3 FASE DE LABORATORIO

La fase de laboratorio se desarrolló en cuatro etapas en torno a 12 muestras representativas del área de estudio en el bloque sur procedentes de muestreo en trincheras, afloramientos y en la columna estratigráfica descrita en este trabajo. Las etapas de la fase de laboratorio consistieron en **(1)** descripción macroscópica de muestras de mano, **(2)** descripción petrográfica (microscopía óptica de luz

transmitida y reflejada) de secciones delgadas pulidas, **(3)** descripción de la fracción arcilla mediante (SEM) y **(4)** análisis de química mineral mediante (EPMA). La etapa de descripción macroscópica y de petrografía se realizó en los laboratorios de la Escuela de Geología en la sede principal y en los laboratorios de la sede Guatiguará (GOTS) respectivamente. Para la descripción macroscópica se empleó un estereomicroscopio (Nikon SMZ 800), donde se determinaron los componentes texturales y estructurales aplicando figuras guías y metodologías para descripción de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas según (Folk 1974, Trappe 2001, Mantilla 2003 y García, 2007) respectivamente. Para la descripción petrográfica se empleó un microscopio de luz transmitida (Nikon Eclipse 50i POL) y un microscopio de luz reflejada (Nikon Optiphot – 100) empleando atlas, guías y metodologías según (Folk 1974, García 2007, Mackenzie 1997, Mantilla 2003, Melgarejo 2003, Ríos y Castellanos 2005, Scholle, 2003, Trappe 2001, Pracejus 2008 y Marshall et.al. 2004) así como los informes internos en petrografía y (EPMA) para (U3O8 Corp.) según (Renaud, 2010).

Se aplicó la metodología de descripción y clasificación de fosforitas según la nomenclatura propuesta por (Trappe, 2001). El (SEM) se realizó en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNALMED) en el laboratorio de Microscopía Avanzada empleando un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 5910 LV) con detector (EDS) para análisis químico cualitativo (**Ver Figura No. 2**).

Figura 2. Microscopio (SEM) (Fig. 2a) y detalle del montaje de las muestras (Fig. 2b) para el análisis.

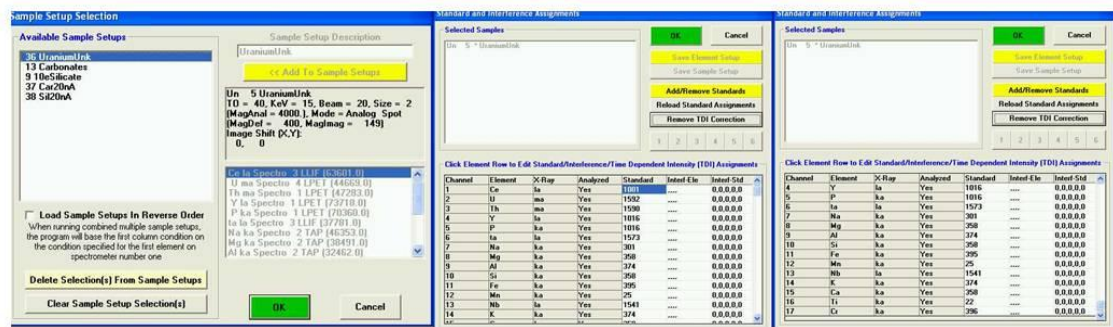


Para la toma de datos en (SEM) las muestras se eligieron una vez realizado el análisis petrográfico para reconocer y ubicar los minerales con tamaños menores a $50\ \mu\text{m}$ y fueron recubiertas con oro teniendo en cuenta el gran contenido en materia orgánica. Primero se tomaron las imágenes para ubicar en estas los puntos donde realizar análisis químico cualitativo.

Los datos obtenidos con análisis(EMPA) determino la composición química de carbonatos, silicatos (particularmente plagioclasas, feldespato potásico, biotitas, cloritas, anfíboles) sulfuros y otras fases minerales con contenido de uranio (U) y fosforo (P) empleando una microsonda electrónica (CAMECA SX100) con cinco espectrómetros con longitud de onda dispersa del Departamento de Geología en la Universidad de Santa Bárbara, (California, Estados Unidos). La EPMA es automatizada completamente mediante el programa (EPMA v.8.47) (*Probe software, Inc.*). En términos generales, la resolución espacial para el análisis cuantitativo fue del orden de 1 a 3 micrones y la resolución espacial para adquirir las imágenes electrónicas retro dispersadas fue de aproximadamente 100 a 200 (nm) (dependiendo de la aceleración por voltaje, corriente eléctrica y composición de la muestra). Primero se tomaron las imágenes para ubicar en estas los puntos

donde realizar análisis químico cuantitativo. El análisis de las fases de (U) y (P) fueron realizados primero con 15 (kV) de aceleración por voltaje, 20 (nÅ) de corriente del haz y 2 (µm) de diámetro del haz. (Ver Figura No.3). En el análisis químico cuantitativo por (EPMA) se obtuvo composición elemental y de compuestos en porcentaje atómico y en porcentaje en peso tabulados junto a los estándares (Ver Anexo C).

Figura 3. Interfaz de usuario del programa (EPMA v.8.47) indicando los parámetros para la adquisición de datos y los estándares para el análisis químico cuantitativo tabulados en el (Anexo C).



2.4 FASE DE OFICINA

En la fase de oficina se procesó toda la información recopilada en las fases anteriores realizando el catálogo de muestras, digitalizando la columna estratigráfica e integrando la información mineralógica y petrográfica de las muestras de la zona mineralizada. Durante esta fase se interpretaron los resultados obtenidos de la petrografía, el (SEM) y el (EPMA) determinando los minerales mena y ganga así como la relación de las asociaciones minerales y química mineral para plantear la hipótesis sobre la génesis de la mineralización.

Se realizó el informe final para la empresa (U3O8 CORP.), la presente monografía y la respectiva presentación para la sustentación pública.

En esta fase se integraron y discutieron los resultados y alcances del proyecto teniendo en cuenta el estado del arte y las técnicas empleadas así como el grado de aporte para formular la hipótesis de trabajo preliminar sobre la génesis de la mineralización en el depósito de Berlín.

3. GENERALIDADES

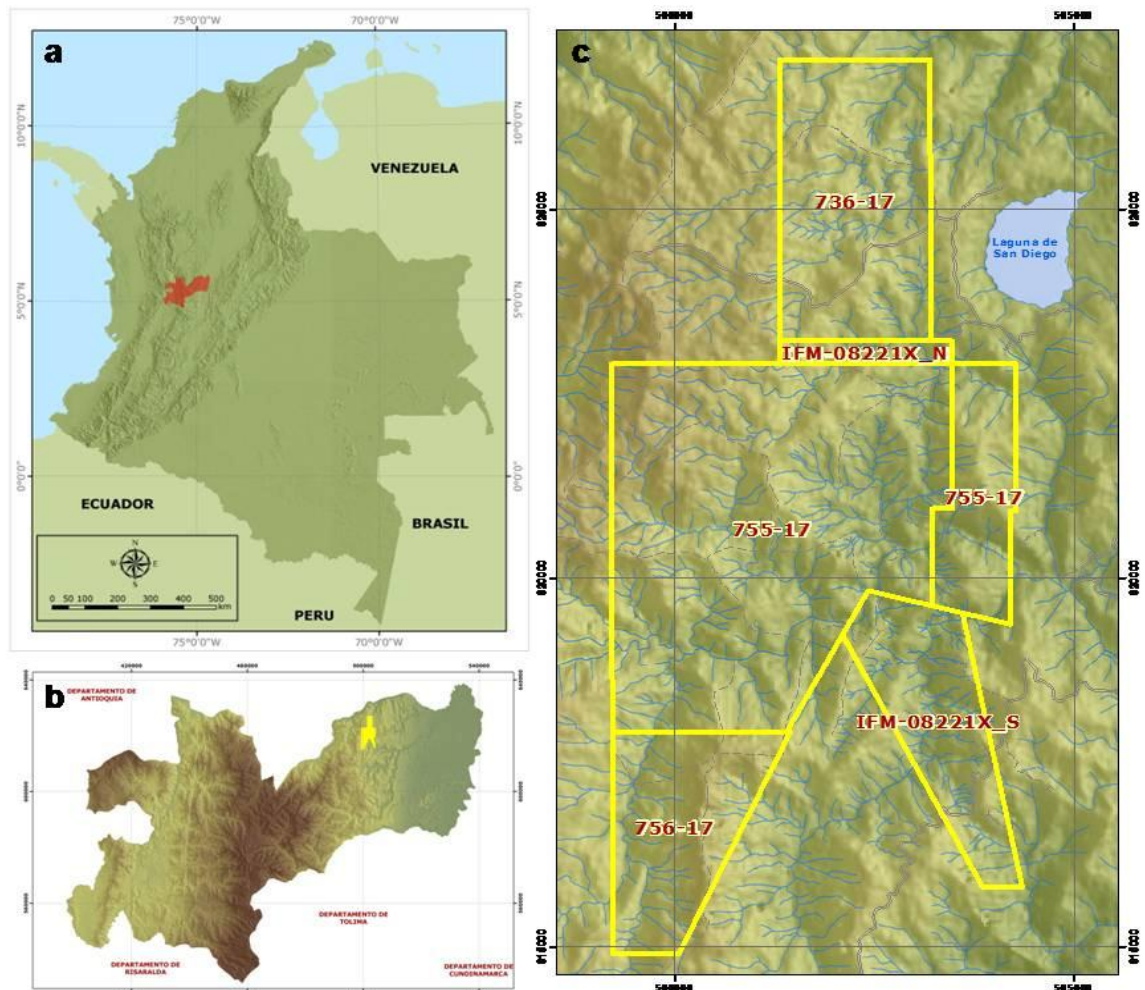
3.1 LOCALIZACIÓN

El área de Berlín está localizada en el centro de Colombia en el departamento de Caldas municipio de Samaná, aproximadamente a 80 (Km) al Noreste de Manizales la capital del departamento y su distancia vial desde el puerto fluvial de La Dorada es de 58 (Km) por la carretera que de esta ciudad conduce a Sonsón y a Medellín. El área de Berlín está en el flanco oriental de la Cordillera Central, cerca al valle del río Magdalena (**Ver Figura D**)

3.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA

La topografía es montañosa profundamente disectada por la red de drenaje orientada en dirección (E), (SE) o (NE), drenando últimamente en el río Magdalena, el cual forma un amplio valle entre las Cordilleras Central y Oriental de los Andes Colombianos. Las alturas varían entre un mínimo de 425 (m.s.n.m.) y un máximo de 1450 (m.s.n.m.) (**VerFigura No.5**).La quebrada Santa Marta y sus tributarios, así como el Rio Manso drenan toda la parte sur del área. Hacia el norte el área está drenada por la quebrada La Concha, quebrada Mesones Sur, Quebrada Calera y toda la red de tributarios.

Figura 4. Localización del depósito de Berlín.4a. Localización departamento de Caldas. 4b. Localización del depósito Berlín al (NE) del departamento de Caldas. 4c. Vías de acceso, áreas en concesión y fisiografía de área del depósito de Berlín.



Fuente: www.u3o8corp.com.

Hacia el noreste se encuentra la laguna San Diego. El clima es cálido súper húmedo, pertenece a un piso cálido a templado con temperaturas medias anuales superiores entre 23° - 27°C. Posee además un régimen pluviométrico anual de 3.500 (mm). (Naranjo, 1983).

Figura 5. Fisiografía del área del depósito de Berlín. Al norte se aprecia la laguna de San Diego, la topografía abrupta, las zonas de cultivos, zonas boscosas y al sur el corregimiento de Berlín. Los trazos en amarillo indican las principales vías.



Fuente: Google Earth, (2011).

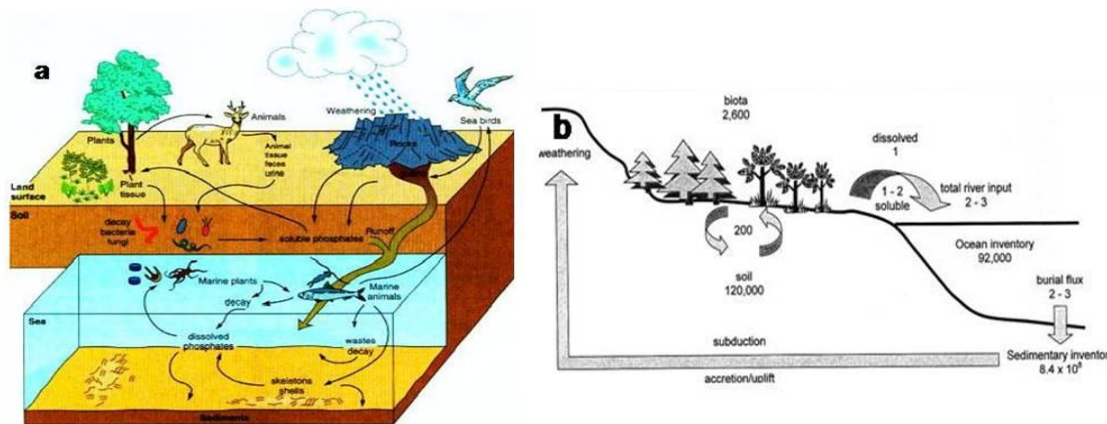
4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

4.1 CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL FÓSFORO

Como fuente inicial de fósforo (P) al sistema terrestre se puede comparar con el contenido en meteoritos donde ocurre como elemento minoritario pero importante. Los fosfatos están presentes en todos los grupos de meteoritos, incluidos los pétreos (condritas 200 – 2000 ppm (partes por millón) P), las siderolitas y las sideritas.

Ocurren como minerales accesorios (**Ver Tabla No. 1**) alcanzando el (1%) en volumen (Melgarejo, 2003). En la corteza terrestre el fósforo se encuentra en pequeñas cantidades (0.09 % p/p (porcentaje/peso)) y es interesante anotar que en rocas marcianas su contenido es el doble al terrestre (Filippelli, 2008).

Figura 6. a. Esquema del ciclo biogeoquímico del fósforo pre humano. Tomado de: www.neptune.gsfc.nasa.gov en www.msu.edu. 6b. Esquema del balance de masas del ciclo biogeoquímico del fósforo pre humano, indicando reservorios en [Tg: Tera gramos (1 millón de toneladas métricas de fósforo)] y flujos con flechas en [Tg fósforo/año].



Fuente: Filippelli, (2002) en Matthew et.al. (2002).

Tabla 1. Especies minerales de fosfatos en meteoritos.

Nombre	Fórmula química	Grupo espacial	Sistema cristalino	Referencia
Whitlockita(1)	$\text{Ca}_9(\text{Mg,Fe})\text{Na}(\text{PO}_4)_7$	R3c	Ditrigonal	Fuchs (1962)
Clorapatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	$\text{P6}_3/\text{m}$	Hexagonal	Fuchs y Olsen (1965)
Hidroxiapatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	$\text{P6}_3/\text{m}$	Hexagonal	Fuchs (1969c)
Farringtonita*	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{P2}_1/\text{n}$	Monoclínico	DuFresne y Roy (1961)
Sarcópsido	$(\text{Fe,Mn,Mg})_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{P2}_1/\text{a}$	Monoclínico	Olsen y Fredriksson (1966)
Graftonita	$(\text{Fe,Mn,Ca})_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{P2}_1/\text{c}$	Monoclínico	Olsen y Fredriksson (1966)
Brianita*	$\text{Na}_2\text{CaMg}(\text{PO}_4)_2$	$\text{P2}_1/\text{a}$	Ortorómbico	Fuchs <i>et al.</i> (1967)
Panethita *	$\text{Na}_2(\text{Mg,Fe})_2(\text{PO}_4)_2$	$\text{P2}_1/\text{n}$	Monoclínico	Fuchs <i>et al.</i> (1967)
Stanfieldita *	$\text{Ca}_4\text{Mg}_2\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_6$	$\text{P2}/\text{c}(\text{?})$	Monoclínico	Fuchs (1967)
Buchwaldita*	NaCaPO_4	$\text{Pmn}2_1$	Monoclínico	Olsen <i>et al.</i> (1977)
Chladniíta*	$\text{Na}_2\text{CaMg}_7(\text{PO}_4)_6$?	Hexagonal	McCoy <i>et al.</i> (1993)

* Especie desconocida en rocas terrestres.
 (1) Descrita comunmente como merrilita en meteoritos. Véase discusión en el texto

Fuente: Melgarejo, (2003).

Una generalización del ciclo del fósforo (**Ver Figura No.6**) se describe como, una fuente de proveniencia en las rocas ígneas con el mineral fluorapatito como accesorio de formación temprana o en rocas metamórficas, que al ser expuestas en la superficie terrestre por su meteorización y alteración en general, pasa al suelo transformándose en rocas sedimentarias para luego ser absorbido por las plantas, más adelante pasa a los animales (concentrándose en sus huesos) que lo eliminan con sus productos de desasimilación, para ser disuelto, transportado al medio marino y depositado en estratos a los que puede ocurrir metamorfismo o fusión y donde recomienza un nuevo ciclo. (UPME, 2005). El ciclo del fósforo no ha sido constante en el pasado, sus variaciones responden a altas tasas de levantamiento y denudación, por ejemplo el rápido levantamiento de la placa Himalaya-Tíbet genero un incremento en la meteorización aumentando el aporte de fósforo a los océanos generando una abundancia biológica. De la misma forma se ve interrumpido el ciclo del fósforo durante las épocas glaciales acumulándose en reservorios de márgenes continentales y reactivándose en transgresiones del nivel del mar. Actualmente el ciclo del fósforo terrestre es muy intervenido por la agricultura y otras actividades humanas dado el uso excesivo de fertilizantes, la

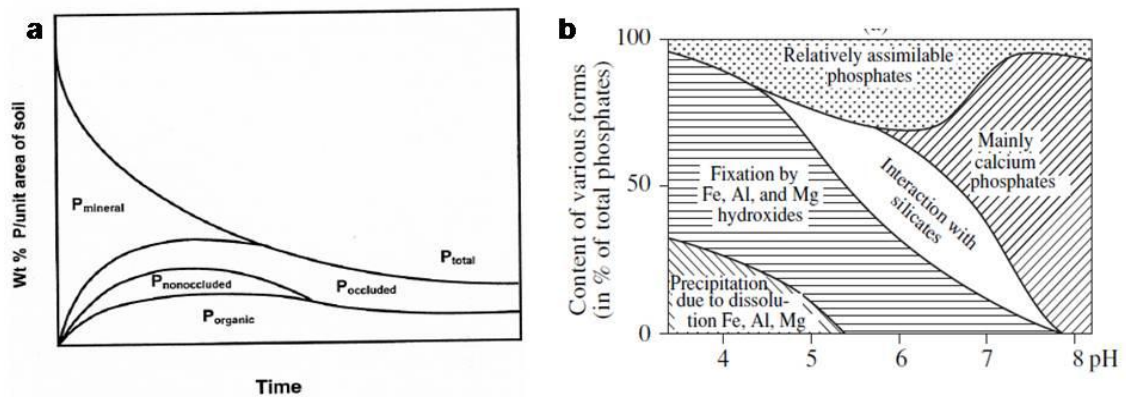
deforestación, pérdida de suelos y vertimiento de aguas residuales que generan el fenómeno de eutrofización (Filippelli, 2008).

Los minerales del grupo apatito meteorizan de forma homogénea, se alteran a productos disueltos en un solo paso como resultado de la reacción con dióxido de carbono disuelto en la forma de ácido carbónico según la siguiente ecuación:



El fósforo en los suelos se presenta de varias formas con gran variabilidad a través del tiempo y el desarrollo de los suelos. Estas formas se pueden agrupar en refractarios (muy baja bio-disponibilidad) y lábil (buena bio-disponibilidad). Las formas refractarias incluyen el fósforo en el mineral apatito y es co-precipitado y/o adsorbido en oxi-hidróxidos (llamado P ocluido). Los oxi-hidróxidos reducibles tienen gran capacidad de vincular fosfatos debido a su gran área y numerosos puntos con cargas positivas. Las formas lábiles incluyen el fósforo en los poros del suelo (en forma de ión fosfato disuelto) así como incorporado en materia orgánica del suelo. Con el paso del tiempo y el desarrollo de suelos el fósforo cambia de forma mineral no ocluida a ocluida y orgánica en el sistema del ciclo geoquímico del fósforo (**Ver Figura 7**).

Figura 7. a. Disponibilidad de las formas de fosfatos a través del tiempo y su ocurrencia según el (pH) del ambiente. Transformación del (P) mineral a través del tiempo, observar la continua pérdida del (P) total en el sistema. Tomado de: Filippelli, (2008). 7. b. Distribución de varias formas de fosfatos en el suelo respecto al (pH). La actividad biológica es un factor principal en la formación de diferentes formas de fosfatos.



Fuente: Kholodov, (2003).

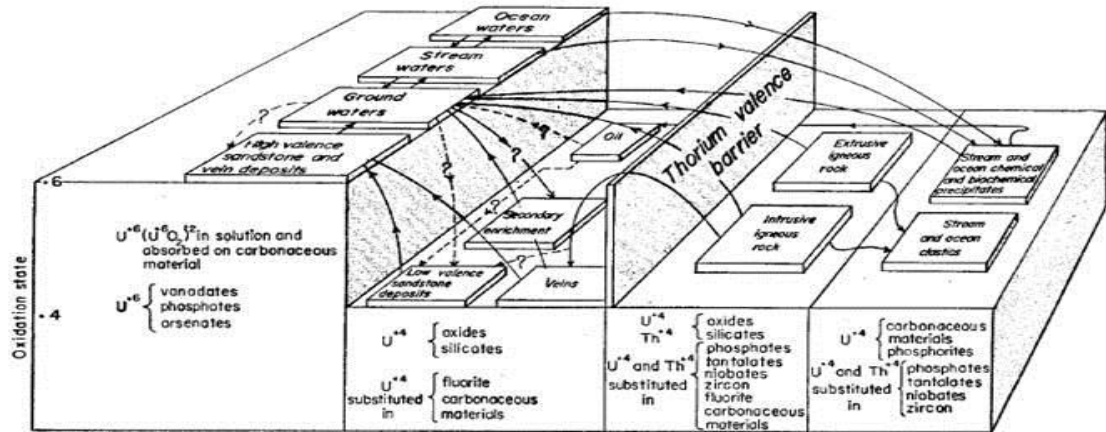
Eventualmente el sistema alcanza una etapa terminal en la cual el fósforo en el suelo es muy reciclado y cualquier pérdida es balanceada por nuevo fósforo derivado de la meteorización del apatito en la base de la columna del suelo.

4.2 CICLO GEOQUÍMICO DEL URANIO

El Uranio fue descubierto y nombrado por el Químico Alemán Martin Heinrich Klaproth (1789) quién también descubrió el Circonio y el Titanio. Su número atómico es (92) y su peso atómico es de (238.07 g/mol). Se constituye de tres isótopos naturales (^{238}U , ^{235}U y ^{234}U), con abundancias relativas de (99, 2739; 0,7204 y 0,0057%), respectivamente. Sus estados de oxidación varían entre (+2 y

+6), sin embargo los estados (+4 y +6) son los más importantes desde el punto de vista geoquímico (**Ver Figura No. 8 - 10**).

Figura 8. Esquema del ciclo geoquímico del uranio. Obsérvese la recurrente asociación del uranio con material carbonaceo.



Fuente: mckelvey et.al. (1955).

Su abundancia promedio dada por el Índice “Clarke” es de (2.7 ppm) y a pesar de su relativa escasez, el uranio manifiesta una característica importante: su tendencia a concentrarse en rocas ácidas, donde es diez veces más abundante que en las rocas básicas, esto debido a que en las primeras al llegar estas por evolución geodinámica a la superficie los procesos exógenos secundarios permiten que eventualmente se alcancen concentraciones de interés comercial (del orden de 1 kg/ton) (Gonzales et.al., 2008).

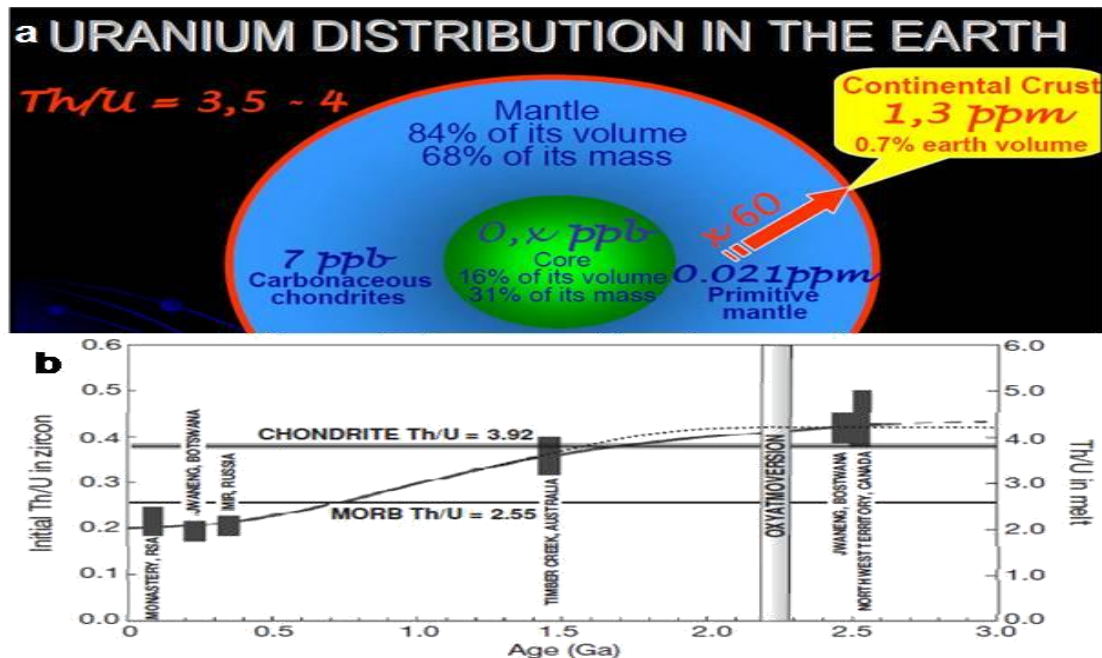
El ciclo geoquímico del uranio está limitado por la barrera de valencia del Torio (**Ver Figura 8**). La composición promedio de uranio (U) en el planeta Tierra antes de cualquier proceso de diferenciación interna se presume equivalente a la de los condritos carbonaceos (7 ppb U) y con una relación (Th/U= 3.5 – 4.0) (**Ver Figura 9**), este valor se utiliza para calcular el flujo de calor promedio en la superficie del

planeta derivado del decaimiento radiactivo de la serie del uranio. En todo el ciclo geológico del uranio, desde la fusión del manto hasta la alteración en superficie, el uranio se presenta en estado disuelto en los magmas o fluidos ó asociado a fases solidas (Poty, 2010).

En las rocas ígneas se encuentra en estado tetravalente en minerales primarios. En rocas graníticas el uranio se concentra en minerales accesorios como torita, zircón, monazita y xenotima que tienen cationes tetravalentes que pueden ser sustituidos por (U^{+4}), y en aquellos como el apatito y la esfena con iones de calcio presentan propiedades estructurales inusuales que permiten ajustar su valencia. El uranio puede permanecer en solución hasta la última etapa de solidificación hasta que finalmente es depositado como una patina en la superficie de los granos principales. La concentración en la etapa magmática tardía se indica por la alta concentración en algunas pegmatitas de minerales como uraninita, uranothorita, monazita y complejos tantalatos y niobatos. En rocas ígneas el uranio y el torio están íntimamente ligados. El uranio en venas hidrotermales se caracteriza por bajo contenido en torio. Cuando las concentraciones de uranio son expuestas en superficie al intemperismo la uraninita se oxida rápidamente. En la mayoría de condiciones ambientales el uranio es removido por aguas superficiales y subterráneas y eventualmente llevado al mar precipitando en lodos que contienen materia orgánica o fosfatos. El proceso más probable de precipitación de uranio es causado por la reducción en ambientes que presentan condiciones reductoras suficientes para cambiar de $((U^{+6} O_2)^{+2})$ a (U^{+4}) . Los principales procesos que concentran uranio son la reducción, la precipitación y/o adsorción (**Ver Figura 10**). El petróleo puede contener varias ppm de uranio así como los pellets asfálticos en sedimentos (McKelvey, D. L. et.al. 1955). Gupta, (2003), considera que el uranio, no es un elemento raro o escaso, por el contrario su amplia distribución en toda la naturaleza lo hace aparecer en abundancias comparables (2 a 4 ppm) a las del Arsénico y el Berilio y en proporciones mayores que el Mercurio, Cadmio, Bismuto y la Plata.

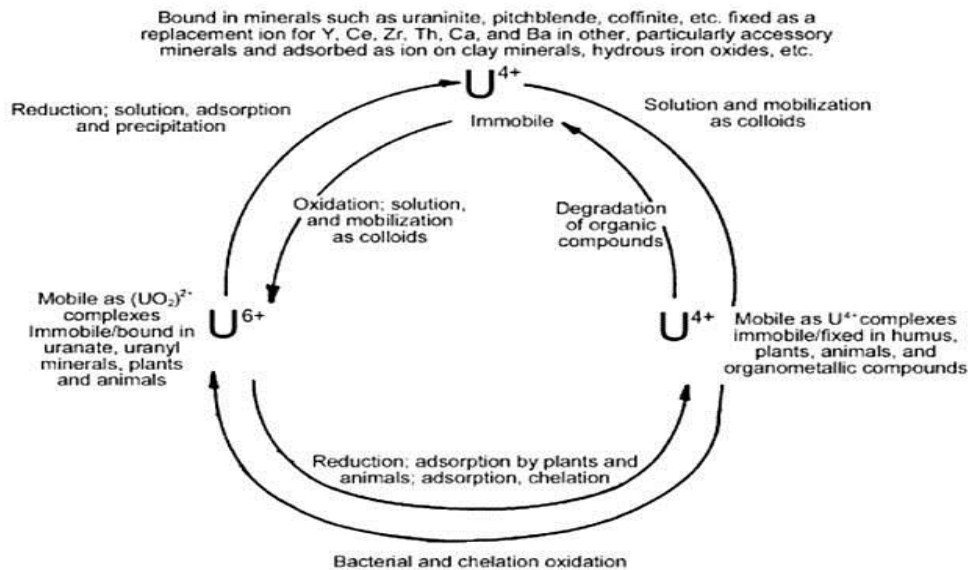
El ciclo geoquímico del uranio se ciñe al carácter cíclico de la evolución petrogenética de la corteza terrestre, es decir, las concentraciones o acumulaciones de depósitos minerales del elemento suceden en todos los tres principales ambientes de su ciclo: ígneo, sedimentario y metamórfico, por interconversión de uno en otro. En este orden de ideas, se identifican tres estados de formación de los depósitos de uranio, que son: **a)** estado primario por procesos magmáticos endógenos; **b)** estado secundario atribuido a procesos sedimentarios exógenos y, **c)** estado terciario vinculado a procesos metamórficos.

Figura 9. Distribución de uranio en el planeta Tierra indicando el porcentaje en volumen y masa equivalente del núcleo, manto y corteza con su respectivo índice de "Clarke" de uranio. Se indica el valor en condritos carbonáceos y la relación (Th/U). Tomado de: Cuney,(2010).9.b. Evolución de la relación (Th/U) en zircones kimberlíticos desde el Arqueano al presente. La curva a trazos es propuesta para la relación antes del proceso de reciclaje de uranio y de la oxidatmoversión (Aumento del oxígeno en la atmosfera por el surgimiento de las plantas terrestres).



Fuente: Cuney, (2010).

Figura 10. Ciclo de interconversión del U^{4+} y el U^{6+} en la naturaleza.



Fuente: Gupta, (2003) en Gonzales, (2008).

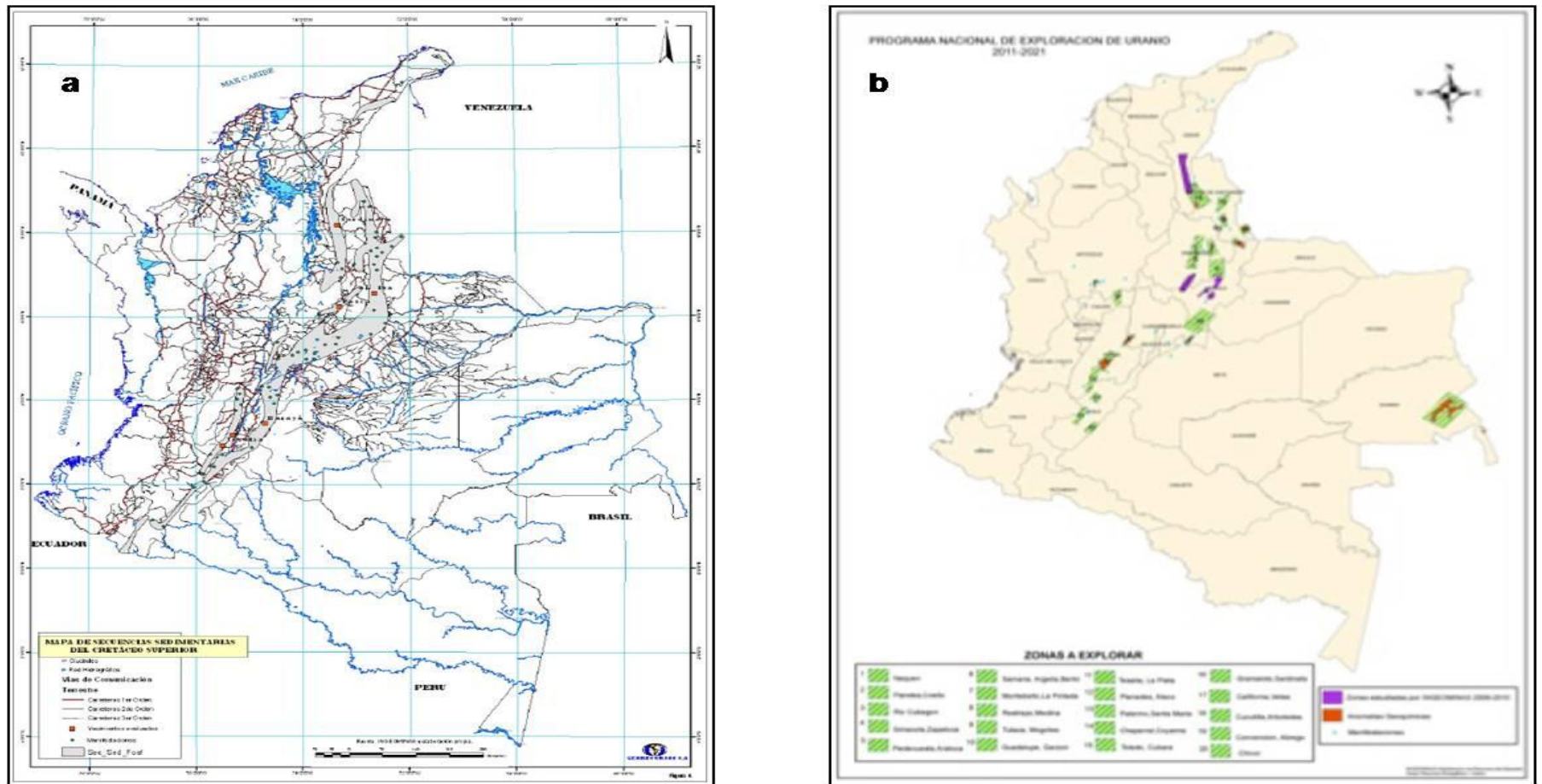
4.3 DEPÓSITOS DE FOSFORO Y URANIO EN COLOMBIA DE EDAD CRETÁCICO

Las secuencias sedimentarias de edad Cretáceo Superior (Santoniano – Campaniano – Maastrichtiano), que corresponden principalmente al **Grupo Guadalupe** y las **Formaciones La Luna** y **Montserrat** que básicamente se desarrollan en la Cordillera Oriental contienen los principales depósitos de fosforo en Colombia. Todas estas secuencias están, en general, caracterizadas por series diversas de transgresiones marinas, lo cual ha provocado gran variedad de facies. El **Grupo Guadalupe** ubicado en el centro del país (**Ver Figura No. 11. a**), está constituido por una gruesa sección de materiales clásticos tales como areniscas, que se extienden por la Sabana de Bogotá y sus alrededores. El espesor de las secuencias estratigráficas disminuye hacia el norte (Laguna de Tota, Boyacá) y el sur (Páramo de Sumapaz). La **Formación La Luna** se presenta esencialmente en

los departamentos de Norte de Santander y Santander (**Ver Figura 11. a**). La secuencia consta predominantemente de cherts, calizas, arcillas negras y fosforitas.

La **Formación Monserrate** se presenta al sur, en el Tolima y el Huila (**Ver Figura 11. a**), con facies de areniscas gruesas en el techo, las cuales gradan a grano medio, con intercalaciones de limonitas, cherts, algunas arcillolitas y niveles fosfáticos. El Grupo Guadalupe y la Formación Monserrate, corresponden mayormente a facies de litoral, en comparación con la Formación La Luna, por lo que presentan mayor potencial para las concentraciones notables de fosforitas, lo cual está en correspondencia con algunos de los depósitos industriales más importantes del mundo. No obstante es importante destacar que más al sur, en el Departamento del Putumayo, se han localizado unas ocurrencias de rocas fosfatadas, donde no se desarrolla la Formación Monserrate, sino que para ese territorio una secuencia de edad semejante, ha sido denominada **Formación Villeta**. Es posible que esta última formación pueda tener continuidad pasando los límites fronterizos hacia el Ecuador (**Ver Figura No. 11. a**), donde se desarrolla la Formación Napo, que en Lago Agrio, presenta un depósito de rocas fosfatadas, que tiene evaluadas reservas por 166-205 millones de toneladas con tenores de 25-35% de P_2O_5 .

Figura 11. Mapas de secuencias sedimentarias Cretácicas y de áreas para prospección de Uranio. 11. a. El área gris representa la zona prospectiva de fosfatos e incluye yacimientos de fosfatos y manifestaciones en el territorio nacional. Tomado de: UPME, (2005). 11. b. Zonas prospectivas para Uranio, en rojo los títulos actuales.



Fuente: Velandia, (2010).

Se encuentra en explotación. También es de destacar, para la Cuenca del Magdalena Medio, la **Formación Umir** de edad Maastrichtiano, ubicada de manera discordante sobre la Formación La Luna, la cual en su zona de desarrollo en la región Venegas – El Conchal – La Azufrada – San Vicente de Chucurí, presenta en su zona basal una capa de areniscas glauconíticas fosfáticas, poco calcáreas, de hasta 3m de espesor y contenido de 16% P₂O₅.

En la Orinoquía y la Amazonía, pertenecientes al Escudo de Guyana, son territorios de alto potencial para la localización de depósitos fosfatados en sienitas nefelínicas, carbonatitas así como itabiritas (con menas de apatito –magnetita), como los extensos yacimientos de estos tipos del vecino Brasil.(UPME, 2005).A. E. Belluco en (IAEA, 1983), propone las “Unidades geológicas uraníferas” para América Latina de las cuales en Colombia ocurren parcialmente cuatro de las seis unidades propuestas lo que es bastante excepcional para un país. Las unidades según Belluco (IAEA, 1983) y su favorabilidad para descubrir depósitos de Uranio se resume a continuación:

Unidad Escudo Guayanés –Brasileño: desde el punto de vista metalogénico, los depósitos más probables son de edad Precámbrico y de tipo relacionados a inconformidad, conglomerado de oro-pirita, mineralizaciones de uranio relacionados con granitos, sienitas, alcalinos y carbonatitas y mineralizaciones de uranio de tipo potásico metasomático, como el de *Espinharas* e *Itataia* en Brasil.

Unidad de la Cuenca Subandina, cubre alrededor de 460.000 km² del territorio Colombiano. Aunque se han reconocido algunas mineralizaciones de uranio en areniscas terciarias, su potencial uranífero global es mínimo y no deben esperarse significativas ocurrencias de uranio en este medio en Colombia.

Unidad de la Orogenia Andina, de la cuál Colombia cuenta con una quinta parte de la extensión total de orogenia Andina en todo el continente. Prácticamente todas las ocurrencias de uranio significativas de Colombia ocurren en este dominio

y el potencial de exploración es considerable. (**Ver Figura No. 11. b**). En las tres cordilleras que forman los Andes Colombianos la favorabilidad para depósitos de uranio parece disminuir de este a oeste a medida que las litologías pasan de continentales a oceánicas. En la cordillera oriental forman distritos extensos, alargados y paralelos a la dirección de deformación Andina, (p.ej. Zapatoca-Contratación, Quetame- Caño negro).

El potencial de la cordillera Central es más modesto aunque ocurren depósitos significativos como el de **Berlín, Caldas aunque parece tratarse de particularidades de la geología regional**, tal es el caso de los Batolitos de Antioquia del Cretácico y el Batolito de Ibagué del Triásico- Jurásico que son insuficientemente estudiados para uranio. El potencial para uranio en la cordillera Occidental es limitado dado su contexto geodinámico de arco de islas, desfavorable para concentrar uranio. (IAEA, 1983).

Unidad Centroamericana, de la cuál Colombia cuenta con solo 20.000 Km² y su potencial para uranio es prácticamente desconocido.

Según Velandia, (2010), oficialmente no existen yacimientos, ni cifras, ni recursos y/o reservas. Actualmente hay seis títulos (áreas en color rojo en la **Figura No. 11. b**) y 240 solicitudes de uranio.

A modo de resumen de los depósitos de uranio se presenta en la **Tabla No. 2** las correspondencias entre dominios y terrenos para la prospección de Uranio en Colombia indicando el tipo de depósito, las unidades geológicas donde yace y el ambiente litológico, entre otros.

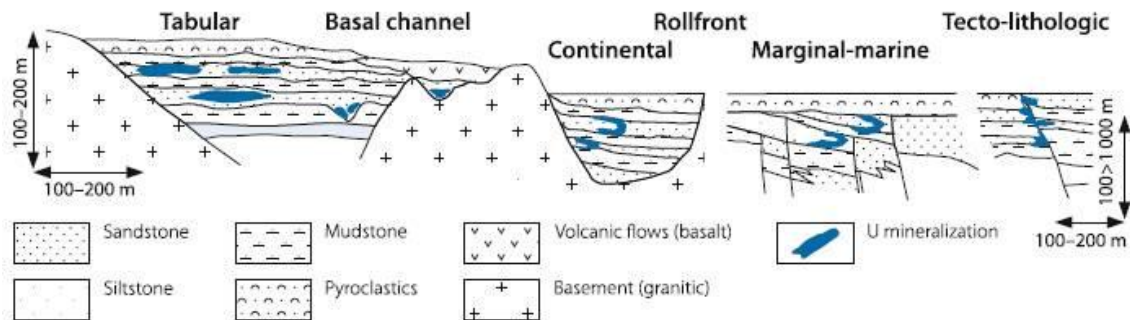
4.4 DEFINICIÓN: DEPÓSITOS DE URANIO HOSPEDADO EN ARENISCAS (IAEA, 2009)

Los depósitos de Uranio hospedado en areniscas ocurren en areniscas que contienen carbón y/o pirita asociado a ambiente fluvial (menos común a ambiente marino), arcósicas, de grano medio a grueso, interestratificadas y delimitadas por horizontes menos permeables. Los minerales de uranio primarios son generalmente pitchblenda, cofinita y en menor cantidad vanadatos y fosfatos. El U es precipitado bajo condiciones reductoras causado por una variedad de agentes reductores dentro de la arenisca (p. ej. Material carbonaceo, sulfuros y minerales de Mg y Fe como clorita). El rango de edad de los principales depósitos de U en areniscas conocido es del Paleozoico al Terciario. Hay pocos depósitos de U en areniscas Precámbricos asociados a material carbonaceo de origen posiblemente algal. Los depósitos de U en areniscas pueden subdividirse en cuatro principales tipos (**Ver Figura No. 12**):

- **Roll front**— Moinkum, Inkai and Mynkuduk (Kazakhstan), Crow Butte y Smith Ranch (USA) y Bukinay, Sugraly y Uchkuduk (Uzbekistan).
- **Tectónico-litológico** — Mikouloungou (Gabón) y Mas Lavayre, Lodève district (Francia).
- **Canal basal** — Dalmatovskoye, Transural region y Khiagdinskoye, Vitim district (Rusia) y Beverley (Sur de Australia).
- **Tabular** — Ambrosia Lake, Grants Mineral Belt, New Mexico (USA); Westmoreland (Australia), Akouta, Imouraren y Arlit (Niger), Coutras (France) y Colorado Plateau (USA).

“Con pocas excepciones los depósitos de U en areniscas son de origen diagenéticos-epigenéticos de baja temperatura”.

Figura 12. Esquemas de tipos de depósitos de U en areniscas de edad Fanerozoico asociado con materia orgánica vegetal y Proterozoico con materia orgánica algal.



Fuente: Dahlkamp, 2009.

4.5 ANTECEDENTES DEPÓSITO DE BERLÍN

El área de Berlín es conocida como tal, desde diciembre de 1974, cuando una campaña de prospección hecha por la compañía (TOTAL), encontró unas anomalías radioactivas en la proximidad de Berlín (Caldas).

Usnarski, (1979), en sus informes mensuales de campaña (MINATOME) reporta anomalías radiométricas de hasta 12500 (cps) destacando que las mayores radiometrías corresponden a la mayor presencia de fosfatos, notando que la radiometría aumenta siempre con la profundidad. Se concluye que los datos de superficie indican una mineralización importante en los sedimentos de Berlín.

Castaño, (1979), realizó una descripción petrográfica en el sector sur del depósito. La mayoría de rocas de textura arenosa, fosfática y alta reacción al molibdato de amonio con ácido nítrico. Describió los fosfatos como minerales de origen autigénicos principalmente en la matriz y actuando como material cementante con minerales como apatito, candralita, dahlita. Identifico abundante material

carbonoso, óxidos de hierro, goethita, feldespatos alterados, zircón y turmalina como accesorios. Establece una proporcionalidad no lineal entre uranio y fosfatos.

Muñoz, (1983), concluye que los resultados químicos de uranio en rocas descartan un aporte de iones de uranio para las mineralizaciones urano-fosfáticas de los shales negros de Berlín ya que es una intrusión posterior a esta unidad y el nivel anómalo no se presenta en el contacto, siendo continuo en toda la estructura de la secuencia sedimentaria.

Tabla 2. Correspondencias entre dominios y terrenos para la prospección de Uranio. El depósito de Berlín, Caldas, se describe en la primera fila de la tabla.

Dominio	Terrenos	Tipo de depósito	Depósito	Unidad	Ambiente Litológico	Comentarios
Flanco Oriental de la Cordillera Central	Payande, Cajamarca	U sedimentario (Shale negros)	Cuenca de Berlín		Cuenca anóxica restringida. Shales negros del Hauteriviano-Barremiano (Cretácico Temprano) interstratificados con tobas y flujos de andesita de composición	
Valle Superior del Magdalena		U sedimentario (Shale negros)	Ataco (Tolima), Coyaima			
Guajira, Este	Cosinas	U en areniscas	Ninguno	La Quinta y Rancho Grande (TJ)	Sedimentitas en capas gruesas de areniscas de grano medio a grueso, shales rojas-verdes-grises, rocas clásticas rojas,	Las anomalías gravimétricas negativas o cero sugieren una corteza transicional o continental.
Noreste de Santa Marta	Sierra Nevada	U en areniscas	Ninguno		Capas del triásico y limolitas volcanogénicas, brechas y rocas	
Sureste de Santa Marta	Sierra Nevada	U en areniscas	Ninguno	Fm. Guatapurí (T)	Limolita, capas rojas, brechas y rocas volcánicas.	Estudio aeroradiométrico japonés, 1970-1980.
Perija	Perija	U en areniscas	Ninguno	Mz- J: Guatapurí, Los Portales, Río Negro y La Quinta	Lechos rojos y volcanoclásticos.	Cratón. La información gravimétrica indica corteza continental.
San Lucas	Payande (San Lucas)	U en areniscas	Ninguno		Calizas carbonáceas blancas y negras de edad Cretácico Superior en el piedemonte	Anomalías por radiometría aérea.
Norte de la Cordillera Oriental	Cordillera Oriental, Santander	U en areniscas	Azapatoaca, Contratación			Numerosas anomalías aeroradiométricas. Anomalías de U en sedimentos activos
Macizo de Santander	Santander; Floresta	U en venas (Pinchblenda), Au-cuarzo	Au diseminado; Cu escaso, Mo venas de U.		Intrusivos Mesozoicos félsicos a intermedios (pórfido dacítico).	
Quetame	Quetame	Cu con Au y U en capas rocas y verdes	Caño Negro	Grupo Farallones (Devónico-Carbonífero)	Sedimentos marinos someros a continentales de lodolita negra, cuarcita, caliza, lutitas rojas y verdes y arenitas.	Información gravimétrica escasa sugiere una corteza continental. Anomalías de U Cu-Ag.
Araracuara	Meta-Vichada y Caqueta-Amazonas	Tierras Raras	Ninguno		Sienitas nefelínicas.	Anomalías gravimétricas relativas, positivas de 20-40 miligales ocurren sobre cuerpos de sienita.
Vichada	Meta-Vichada	Tierras Raras	Ninguno	Parguaza en Venezuela	Complejo granítico	

Fuente: INGEOMINAS, 1986 en Güiza.

Naranjo, (1983), presenta mapa geológico y cortes estructurales de los sedimentos cretácicos. Concluye que no siempre los valores radiométricos (SPP-2) más altos coinciden con los mayores tenores de uranio, se considera una capa de 1,5 m de espesor con un tenor promedio de 1216 (ppm) de Uranio y de 2 (m) con un tenor de 986 (ppm). Se define el depósito como polimetálico existiendo relación directa entre Uranio – Vanadio, Uranio – Molibdeno y Uranio – Fosfatos.

Garzón, (1984), presenta un modelo genético donde aparentemente, la depositación estuvo influenciada al comienzo de la secuencia por emanaciones volcánicas continentales que posiblemente fueron las portadoras del material radiactivo y causaron una depositación rápida de los restos de organismos marinos que luego formaron las arenas fosfáticas. Posteriormente, al episodio de sedimentación se presenta una orogénesis que causo plegamientos, fallamiento y cizallamiento de las rocas Cretáceas. Esta orogenia fue seguida por emplazamientos de batolitos y stocks de composición granítica.

Gómez y Lizcano, (1990), enfocan su trabajo dirigido por el profesor Andreas Kammer en la tectonoestratigrafía de la secuencia sedimentaria de Berlín, Caldas concluyendo que el plegamiento (sinclinal de Berlín) está genéticamente relacionado con la tectónica del Cretácico tardío que origino la Falla Palestina así como la lineación subhorizontal de alargamiento, la deformación de fósiles y esquistosidad de los sedimentos de Berlín. Describen cinco secciones delgadas indicando las estructuras y texturas de deformación como poligonización del cuarzo, lamelas subbasales, suturas, recristalización dinámica y grietas de tensión rellenas de cuarzo en el sector Norte del depósito. Concluyen que el metamorfismo de grado medio a bajo determinado a partir del cuarzo poligonizado en las secciones delgadas pudo alcanzar una temperatura de hasta 200 °C.

Renaud, (2010), a partir de los primeros resultados del presente trabajo realiza análisis de microsonda (JEOL JXA 733 - 5 espectrómetros EDS) para investigar la

mineralogía de la matriz y el cemento de tamaño arcilla en el caso de las rocas sedimentarias junto con la química mineral de fases minerales asociadas a uranio y otras de vanadio, cromo, molibdeno y tierras raras para adelantar ensayos metalúrgicos para la compañía. Describe cinco rocas clasificadas como areniscas mineralizadas, brechas de falla y rocas ígneas intrusivas alcalinas tipo leucogranito y alaskita. Según los resultados de química mineral identifica fosfatos portadores en mayor proporción de uranio, vanadio, itrio, tierras raras y en menor proporción de hierro, aluminio, titanio, cobre, calcio y cromo localizados en la matriz y el cemento en minerales como la roscoelita, churchita, monazita, autunita, meta autunita y cacoxenita, este último ocurre euhedral radial con zonación composicional de hierro y en agregados rellenando los intersticios de la matriz, planos de debilidad y postulan que puede ser producto de alternancia en condiciones oxido reductoras o debido a infiltración de fluidos. En algunos granos de cuarzo describen oclusiones de tierras raras y zonas de debilidad con evidencia de paso de fluidos. En general las rocas sedimentarias presentan un bajo grado de deformación. Las rocas ígneas analizadas presentan textura granofirica, con fenocristales de plagioclasas, mica, cuarzo y feldespatos de bario y potasio. El cuerpo intrusivo contiene fosfatos de itrio, zircones uraníferos, monazita rica en tierras raras en la zona de contacto con las areniscas fosfáticas. Plantea la posibilidad de que la unidad intrusiva fue la fuente de calor y de los fluidos mineralizantes adjunto a la arenisca.

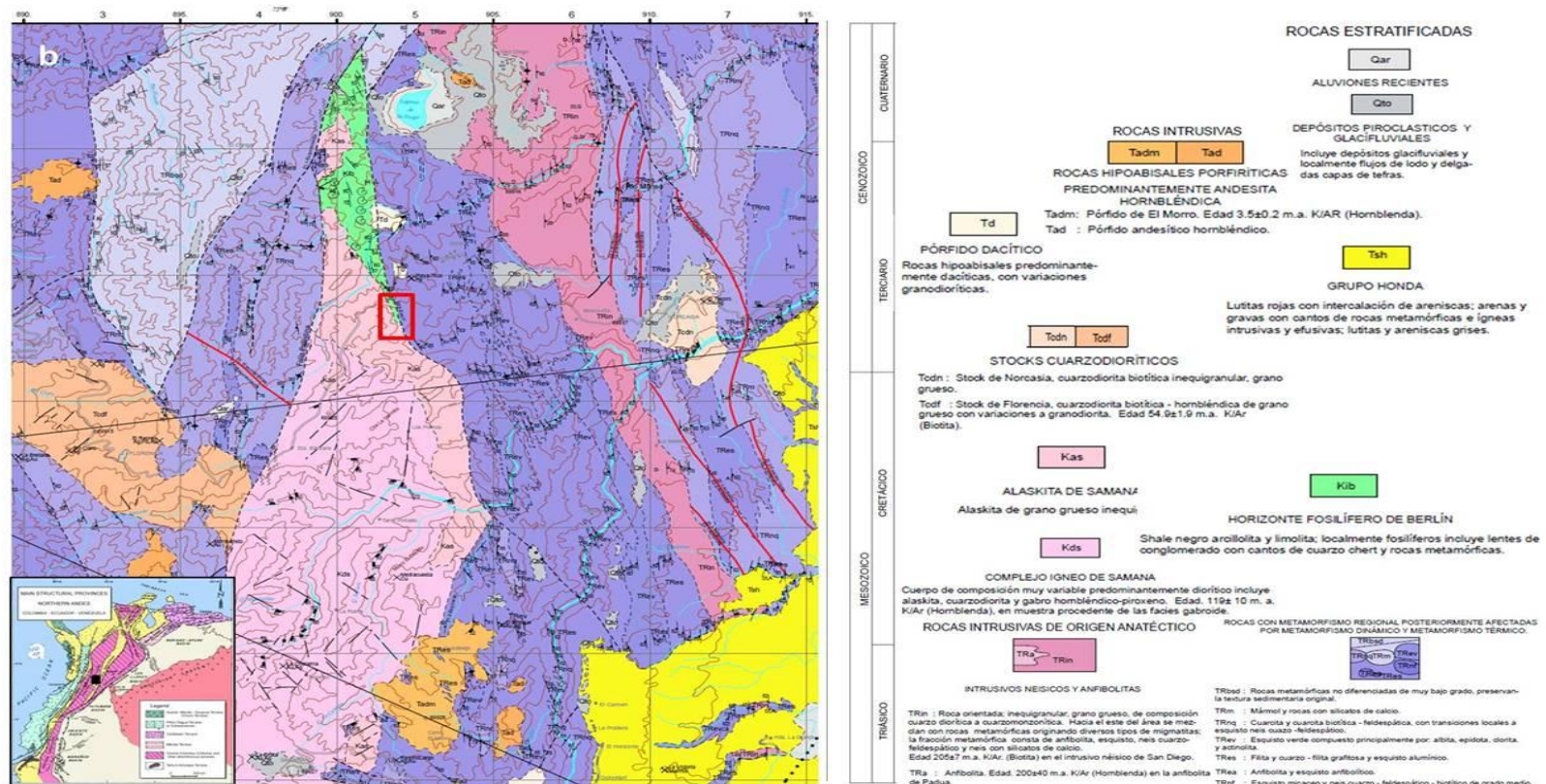
5. GEOLOGÍA REGIONAL

A partir de las características geológicas y estructurales de los Andes del Norte actuales, podemos subdividirlo en tres segmentos: los Andes Venezolanos (o de Mérida), los Andes Colombianos y los Andes Ecuatorianos. El área de estudio se encuentra en el sistema montañoso Norandino, en los Andes Colombianos, en la región central del flanco Oriental del Cordillera Central (**Ver Figura 13 a.**). La evolución del occidente de los Andes Colombianos abarca una compleja historia de amalgamación de múltiples *terrenos alóctonos* (según la definición de Coney et.al., 1980) en el tiempo y espacio. Los Andes Colombianos y Ecuatorianos corresponden a típicas cadenas montañosas asociadas a subducción, desarrolladas a lo largo del margen continental. Durante el Jurásico ocurre extensión en un margen pasivo y se forman sistemas divergentes controlados por los terrenos Paleozoicos, hasta que en el Cretácico comienzan a chocar con el margen continental varios terrenos oceánicos, junto con un intenso magmatismo, metamorfismo y reactivación de paleo suturas como las Fallas Romeral y Palestina. Mientras que en la Cordillera Central ocurre una actividad magmática y volcánica abundante (p.ej. Batolito Antioqueño) con evidencias de migración y ensanchamiento del arco volcánico, la Cordillera Oriental carece de volcanismo excepto por un aislado volcanismo básico Cretácico. (Toussaint & Restrepo, 1982). Cambios a lo largo del rumbo en los Andes Colombianos y Ecuatorianos resultaron de variaciones en la extensión Mesozoica así como por el hecho de que Colombia Occidental se situaba en el recorrido de la Placa Caribe. Una pronunciada extensión Mesozoica en Colombia produce la separación de la Cordillera Central de la Oriental, actualmente separadas por el sistema de Fallas de Palestina (**Ver Figura 13.b**) la cuál es producto de la tectónica Cretácica tardía y en el área de estudio está relacionada genéticamente con el sinclinal de Berlín, la lineación subhorizontal de alargamiento, la deformación de fósiles y la esquistosidad de los sedimentos de Berlín (Gómez y Lizcano, 1990).

La colisión durante el Cretácico Tardío de terrenos alóctonos (**Ver Figura 14.a**) causó la inversión tectónica y el alzamiento de la Cordillera Central junto a una suave deformación en la Cordillera Oriental de Colombia. La Falla Romeral separa la Cordillera Occidental de la Central y ha sido interpretada como una sutura o paleo zona de subducción.

Toussaint, (1996), considera que las rocas sedimentarias del Cretáceo Inferior del norte de la Cordillera Central, incluidas por este autor dentro del "Terreno Tahamí", se formaron a cientos de kilómetros al sur de su posición actual(Ecuador) y viajaron hacia el norte a través de fallas de rumbo. Estas sedimentitas se encuentran distribuidas de manera discontinua, sobre un basamento metamórfico pre-Cretáceo llamado Complejo Cajamarca (González & Núñez, 1991). Dentro de éstas se incluyen las **sedimentitas de Berlín (Barremiense-Aptiense; NE de Caldas)**(**Ver Figura No.13.b**), las rocas sedimentarias de San Luis (Hauteriviense-Aptiense; sur este de Antioquia), la Formación La Soledad (Albiense), los Intervalos San Félix y Valle Alto al norte de Caldas (Berriasiense-Albiense; antiguas Formaciones Abejorral y ValleAlto) (**Ver Figura No. 14 A-B**). Para sustentar esto, Toussaint (1996) se basa en la gran similitud entre las rocas de basamento del "TerrenoTahamí" (parte del actual Complejo Cajamarca) con las del "Terreno Tahuin" de Ecuador, lo que parece sugerir contigüidad de estas áreas durante el Cretáceo Temprano(**Ver Figura 14 A-B**).

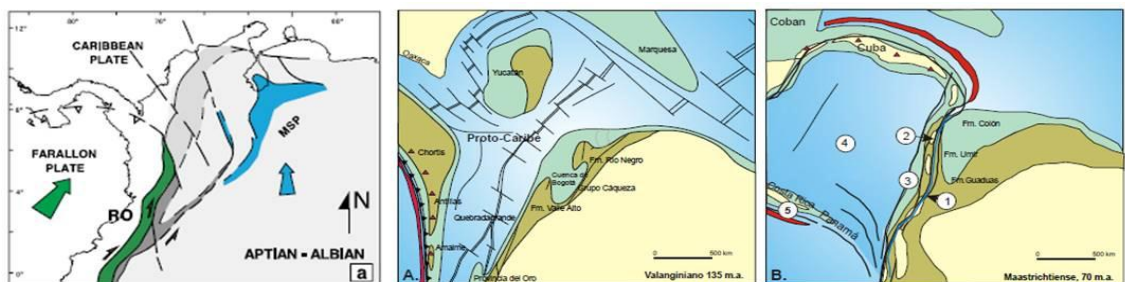
Figura 13. Esquema y mapa geológico regional ESC 1:100000 del área de estudio. 13. a. Principales unidades estructurales y terrenos de los Andes del Norte (área de estudio punto negro). Tomado de: Ferrando, (2007). 13. b. Mapa geológico regional indicando el área de estudio (cuadro en rojo) con isogradas (líneas en rojo) de metamorfismo.



Fuente: Barrero y Vesga, (1976).

Toussaint (1996) resalta además la ausencia de registro sedimentario en la Cordillera Central durante el Cretáceo Tardío en contraste con su continuidad al oriente como una prueba de la disimilitud entre estas dos áreas. Es necesario tener en cuenta que la falta de registro sedimentario puede ser explicada tanto por ausencia de sedimentación como por procesos de erosión diferencial posteriores. Sin embargo, si esta hipótesis es cierta las unidades mencionadas serían alóctonas y no correlacionables con las del oriente Colombiano (p.ej. Cordillera Oriental). El desplazamiento de bloques como estos desde el sur es una posibilidad teórica coherente con la componente dextral de algunas fallas generadas por colisión oblicua (transpresión) de la Placa Caribe durante el Cretácico. Esto podría además explicar la presencia de algunas vulcanitas básicas del Cretáceo temprano (Formación San Pablo) situadas al este del Complejo Cajamarca, las cuales han sido hasta ahora interpretadas como el resultado de obducción de materiales oceánicos en este sector (Restrepo & Toussaint 1973; Toussaint 1982) en Pardo et.al., (2002).

Figura 14. Esquemas de evolución geológica durante el Cretácico en el Noroeste de Suramérica. **14. A-B.** Esquema para el Valanginiano y Maastrichtiense, los números representan la posición espacial de las rocas que componen los complejos estructurales. 1: Complejo Quebradagrande; 2: Complejo Arquía; 3: Complejo Amaime; 4: Complejo Cordillera Occidental y 5: Complejo Chocó. Tomado de: Pardo et.al., (2002). **14. a.** Desarrollo tectónico durante el Aptiano – Albiano, llegada y acreción del terreno Romeral (Placa Farallones, RO en color verde) y primera aparición del Arco de Mérida, en azul.



Fuente: Cediell et.al., (2003).

6. GEOLOGÍA LOCAL

6.1 ESTRATIGRAFÍA

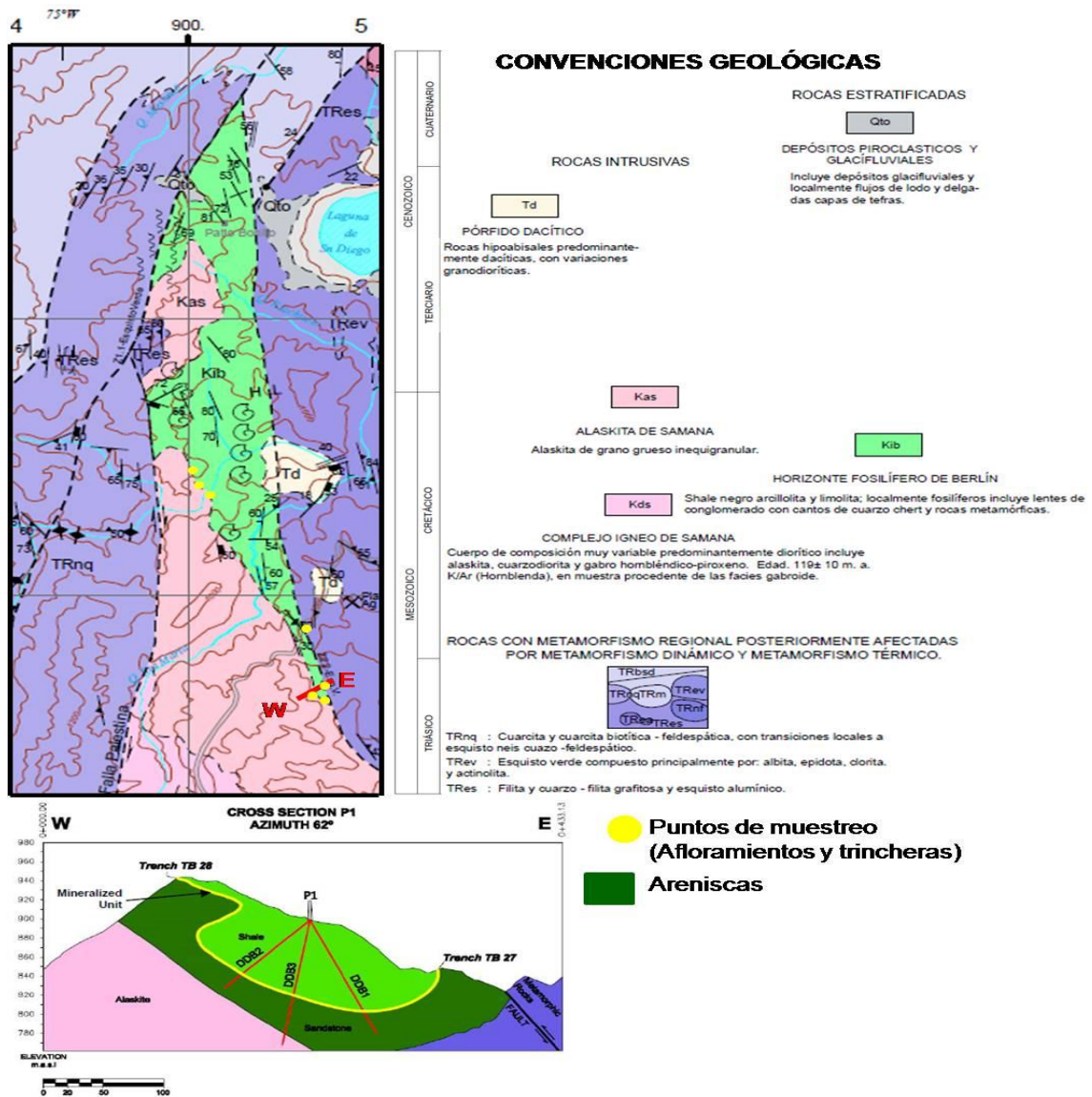
En el área de estudio se encuentran rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas y depósitos volcánicos que comprenden desde la era Precámbrica hasta la Cenozoica, siendo identificadas en campo cinco unidades litológicas que afloran principalmente en los cauces de las quebradas ya que en la mayoría del terreno se presenta intensa meteorización, dadas las condiciones tropicales de la región. Los principales rasgos estructurales son el sinclinal de Berlín y la falla Palestina al Oeste.

Rocas Metamórficas (Ver Figuras 15 - 16)

Se distribuyen en fajas alargadas bordeando al Este y Oeste la franja sedimentaria y las rocas ígneas intrusivas. Se observan rocas de metamorfismo regional de bajo grado: Pizarras, Filitas, Esquistos cuarzo- sericíticos y esquistos grafitosos, metareniscas de colores verde gris blanco negro y marrón. Es común encontrar cuarzo lechoso de varios centímetros de espesor dentro de los esquistos formando textura áugen y bandas plegadas y microplegadas así como lentes de cuarcitas. Se encuentran rocas que conservan su estratificación original por lo que se trata generalmente a estas como metasedimentos. Es probable que el protolito de estas rocas hayan sido rocas sedimentarias constituidas por una intercalación de Lutitas y areniscas cuarzosas según la textura actual que refleja su origen a partir del metamorfismo de areniscas. Estas rocas metamórficas son correlacionables con el Grupo Cajamarca, originalmente descrito como Serie Cajamarca por (Nelson, W., 1957) de edad Paleozoica, constituida por un conjunto en su mayoría esquistos que afloran en el flanco oriental de la cordillera Central entre Ibagué y Armenia, que comprende esquistos verdes, anfíbolitas, esquistos

grafitosos, filitas cuarzosas, esquistos cuarzosos néisicos, rocas de transición, diabasas y calizas cristalinas, las cuales afloran en ambos flancos de la cordillera Central.

Figura 15. Mapa geológico del área de Berlín, se indican con línea roja el corte geológico y puntos amarillos los afloramientos y trincheras de muestreo para el presente trabajo. ESC 1:100.000.



Fuente: Barrero y Vesga, (1976) (Mapa) y www.u3o8corp.com (Corte).

Figura 16. Roca metamórfica esquistosa en textura áugen (izquierda) y conservando la estratificación del protolito (derecha).



Rocas Ígneas (Ver Figuras 15 - 17)

Se distribuyen de manera irregular en el área de estudio, intruyen las rocas metamórficas y la secuencia sedimentaria, donde se presentan diques concordantes y cortando la estratificación. Según Barrero et.al., (1976) subdivide los cuerpos intrusivos en Alaskita de Samaná y Pórfidos dacíticos.

Rocas ígneas acidas

Se observó una gran variación composicional predominando alaskita, tonalita, granitos, ocasionalmente granodioritas, encontrándose en algunos lugares dioritas, presentan una textura holocristalina, hipidiomórfica, equigranular fanerítica de grano medio, predomina el cuarzo y las plagioclasas con esporádicas micas biotitas. Se observan variaciones en el tamaño de grano y contenido de máficos. Históricamente se le asigna una edad Cretácico medio a superior aunque pueden ser Terciarias. Posiblemente se trata de un solo cuerpo ígneo con diferentes pulsos magmáticos. Naranjo, (1983), describió una sección delgada

hacia el contacto con los sedimentos cretácicos clasificándola como granodiorita (Streckeisen, 1974) con cuarzo (39%), ortoclasa (17%), albita a oligoclasa (44%), con muscovita como accesorio mayor y apatito y circón como accesorios menores; sericita y caolín producto de alteración, textura fanerítica hipidiomórfica. En el Complejo Ígneo de Samaná, al cual se encuentra asociado este leucogranito se obtuvo una datación radiométrica sobre hornblenda por el método de K/Ar de 119 ± 10 m.a. (Barrero et.al., 1976) y dadas sus relaciones con los sedimentos cretácicos de edad Valanginiano – Hauteriviano (Flórez, 1978 en Naranjo, 1983) y sus relaciones tectónicas con la falla Palestina (producto de eventos tectónicos tardi-cretáceos) parece probable que pertenezca al Cretácico medio a superior (Gómez y Lizcano, 1990).

Rocas ígneas intermedias

Al Este del área aflorandos cuerpos posiblemente correspondientes al mismo pulso magmático que intruye las rocas metamórficas y las sedimentarias cretácicas, tratándose de una roca mesocrática holocristalina de grano grueso,

Figura 17. Afloramiento de alaskita vía Berlín – Florencia, sector quiebra del guayabo (izquierda) y contacto intrusivo con roca metamórfica. Tomado de: U3O8 Corp. Informes internos. 2008.



subhedral, inequigranular, fanerítica compuesta por plagioclasas, cuarzo y anfíboles, de tipo Granodiorita.

Composicionalmente predominan las rocas dacíticas de textura porfirítica aunque también ocurren cuerpos riolíticos de poco espesor (20 centímetros) observados en la quebrada Santa Marta hacia la confluencia con el Rio Manso y en la desembocadura de la quebrada Riachuelo (Gómez y Lizcano, 1990).

Rocas Sedimentarias (Ver Figuras 15 - 18)

El presente trabajo se desarrolla específicamente en un sector del bloque Sur del depósito en el nivel mineralizado de fosforitas que se encuentra en esta secuencia sedimentaria descrita a continuación. La secuencia sedimentaria que aflora en el área se extiende en dirección Norte – Sur en una franja que se ensancha en el centro y se angosta hacia los extremos. Los afloramientos se restringen a un tramo en la vía Berlín – La Tulia en el trayecto conocido como la Quebra del Guayabo.

La roca se encuentra muy alterada por lo que las muestras para petrografía se tomaron en las fosforitas más frescas de la columna en el camino de la Quebra del Guayabo y en las trincheras del sector.

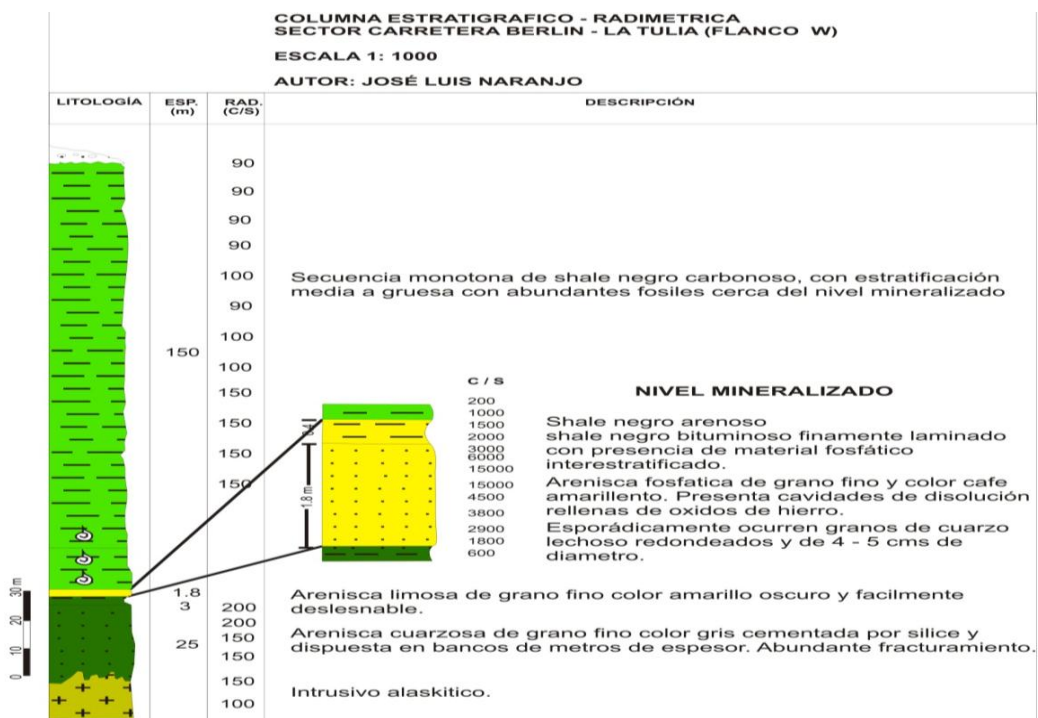
En el área no se han realizado estudios estratigráficos detallados aunque en el trabajo de (Naranjo, 1983), se presenta una buena estratigrafía del sector sur basada en columnas levantadas en afluentes, un pozo perforado y columnas de tres túneles. Hacia el sector Norte se evidencia existencia de cambios de Facies y espesor lo que hace necesario separar en sector Norte y Sur (Gómez y Lizcano, 1990). En general afloran tres tipos de roca sedimentaria como son, conglomerados, areniscas y lutitas con esporádicos niveles calcáreos. En la campaña de perforación 2011 se reportan además en profundidad un importante

nivel de calizas con sector mineralizado y limolita calcárea. Debe tenerse en cuenta el hecho de que la secuencia se encuentra invertida en el flanco este del sinclinal, pero no presenta fallamiento interno según Gómez y Lizcano, (1990). La secuencia Sedimentaria de edad Cretácea descansa en para conformidad sobre las rocas metamórficas y de base a techo se identifican tres segmentos:

Metaconglomerados (Ver Figura 19)

A la base de la secuencia sedimentaria, el segmento de metaconglomerados suprayace directamente en contacto discordantemente el basamento metamórfico y consta de una alternancia de metaconglomerados cuarzosos con cantos angulares hacia la base y subangulares a subredondeados al techo,

Figura 18. Columna estratigráfica radiométrica de la secuencia sedimentaria del depósito de Berlín. Se detalla la estratigrafía del nivel mineralizado.



Fuente: Naranjo, (1983).

los fragmentos son principalmente de cuarzo y rocas metamórficas y pocos de rocas ígneas. Los metaconglomerados son cantosoportados con matriz de arena media. Se presentan alternancias de delgados niveles de areniscas de grano fino, ligeramente arcillosas. El espesor medio de este segmento es de 13 metros. El segmento arenoso suprayace concordantemente el segmento conglomerático. En este segmento predominan las areniscas de grano fino, con granos angulares a subangulares, en contactos predominantemente suturados, cóncavo-convexos y longitudinales, bien seleccionados, con cuarzo mayor al 90%, feldespatos en trazas, mica y zircón como accesorios. Composicionalmente corresponde a cuarzoarenitas grises a grises oscuras cementadas por sílice.

Figura 19. Metaconglomerados a la base de la secuencia sedimentaria.



Secuencia arenosa (Ver Figuras 15 – 18 – 20)

Hacia el techo se presenta una litología más variada con intercalaciones de fosforitas en capas centimétricas a métricas, de grano fino a medio y localmente con partículas tamaño grava, granos angulares a subangulares, colores pardo oscuro a amarillo, con huellas de disolución, bien seleccionadas, con cuarzo (60 – 65%), óxidos (hasta 15%), fosfatos (mayor a 20%), accesorios menores de biotita

y circón. Arenisca calcárea fosilífera (amonites y gasterópodos), de grano fino, granos subangulares a subredondeados, los cuales están en contactos flotantes, cóncavo-convexos y longitudinales, con cuarzo (60%) y esparita (35 – 40%), cemento esparítico, variando a caliza arenosa con granos de arena fina a media, granos en contacto flotante, subangulares a subredondeados con selección regular, cuarzo (20-25%), micrita (45-55%) y esparita (25-30%) que corresponde a una biomicrita cuarzosa, la cual infrayace a veces el nivel mineralizado. Areniscas arcillosas de grano fino a medio, color gris a amarillo en espesores entre 10 centímetros a 2 metros y lentes de liditas (chert). El espesor medio del segmento arenoso es de 25 metros.

Nivel mineralizado (Ver Figuras 15 – 18 – 21)

Se presenta al techo de la secuencia arenosa y a la base de las lutitas, corresponde a areniscas limosas fosfáticas con alto contenido de materia orgánica (fosforitas), laminación plana inclinada y ondulosa intercalados con niveles decimétricos de lutitas, areniscas muy finas, areniscas friables y limolitas silíceas con alto contenido de materia orgánica.

Figura 20. Cuarzo arenitas color amarillo en estratos masivos (izquierda) y detalle de arenisca con delgado dique silicificado color negro (derecha).



El nivel mineralizado tiene espesores que varían desde 1,5 hasta 3 m con un máximo observado en un pozo de 9.2 metros y en una trinchera de 6,7 m. El nivel mineralizado se encuentra en las fosforitas y varía en ciertos sectores al shale, a las calizas y a la limolita calcárea. La mineralización de interés consiste en fósforo, uranio, vanadio y en ciertos sectores se hallan concentraciones medias de tierras raras.

Lutitas (*shales*)

Suprayaciendo concordante el anterior segmento se encuentra una secuencia monótona de lutitas fisiles de color negro, carbonosas y en algunas partes bituminosas. Es la unidad de mayor espesor, contiene fósiles de Amonites y gasterópodos ligeramente deformados. Presenta estratos delgados de centímetros a decímetros con laminación plana paralela y óxidos de hierro relleno de fracturas. Es común la presencia de pirita diseminada y delgados niveles calcáreos. Las lutitas se encuentran plegadas, fracturadas y cizalladas. Naranjo (1983), asigna una edad a esta secuencia con un análisis de la fauna fosilífera realizado por Alberto Forero, atribuyéndole una edad Valanginiano al Albiano. El espesor de este segmento es de 240 metros.

Depósitos volcánicos y aluviales

En el límite oriental de la zona, al occidente de San Diego se encuentra el volcán San Diego que según Toro,(1989), es el volcán más septentrional y oriental de América del Sur. Se puede diferenciar un cono volcánico riolítico (Cerro San Diego) y al Noroeste y Suroeste de éste un cono adventivo y el cráter de colapso que corresponde a la laguna de San Diego (Gómez y Lizcano, 1990). Los depósitos de tefras se encuentran como un material arcilloso, producto de la

meteorización de Tobas líticas, hacia las partes más altas de la zona y hacia el Norte en el sector de la laguna de San Diego. Los depósitos aluviales se constituyen de material grueso, desde cantos hasta bloques, subangulares a subredondeados, canto soportados y en menor proporción matriz arcillo arenosa. La extensión de estos depósitos es restringida a pocos metros por lo que no están cartografiados.

Esta secuencia sedimentaria cretácea no ha sido correlacionada con ninguna unidad formal de las que afloran en la Cordillera Central. Gómez y Lizcano, (1990) proponen según observaciones en campo y relación con el basamento correlación con la Formación Abejorral, la Formación San Pablo y la Formación La Soledad (Albiano inferior), Departamento de Antioquia en el flanco occidental de la Cordillera Central.

Figura 21. Nivel mineralizado en fosforitas con laminación plana paralela de colores gris oscuro, pardo claro y amarillo oscuro con vetilleo vertical de minerales de uranio color azuloso y verde azules cortando la laminación (arriba izquierda). La mineralización ocurre en costras de óxidos color rojo oscuro en cuarzoarenitas de color amarillo claro (arriba derecha). Agregados de minerales de uranio brotoidales color verde claro en fosforitas concentrados en las paredes de las oquedades rellenas de limolita blanca (abajo).



6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la zona de interés de Berlín los sedimentos forman una estructura sinclinal (**Ver Figura 15**), limitada por esquistos sericíticos, metasedimentos y cuerpos intrusivos

al Este y por el Complejo Ígneo de Samaná al Oeste. La estructura presenta el flanco oriental invertido y con cabeceo hacia el norte, además se encuentra formando un graben, como consecuencia de las fallas de Palestina al Oeste y Falla de Berlín al Este en dirección N-S y de tipo inverso. Otras fallas menores se desprenden de las anteriores, paralela y oblicuamente a lo largo de toda la zona, el trazado de estas, forma cañones profundos y las rocas se encuentran bastante fracturadas y cizalladas. Predominan los buzamientos mayores de 45° siendo muy frecuentes los buzamientos verticales. Hay inversiones locales en el flanco oriental y pliegues secundarios bastante apretados en toda la zona, así como abundante diaclasamiento. La historia tectónica de los sedimentos de Berlín comprende intrusiones ácidas y plegamiento en el Cretáceo superior e incremento de los esfuerzos compresivos hacia el Terciario, lo que ocasiona varias fases de fallamiento intenso dentro de un estilo estructural predominante que originan el relieve actual. Las estructuras tectónicas son ramificaciones de la Falla Palestina, la cual posee un rumbo regional nornoroeste hacia el norte, fuera del área de trabajo y que a la altura de la Laguna de San Diego se ramifica en lineamientos Norte Sur no tan marcados como la estructura principal.

Estas estructuras son principalmente Fallas y lineamientos llamados Falla Occidental, Falla Oriental, Lineamiento Central, Lineamiento Oriental y otros lineamientos menores.

7. RESULTADOS

7.1 OCURRENCIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CON FÓSFORO Y URANIO

En el área las rocas sedimentarias (Valanginiano – Albiano, Amonites, Gómez y Lizcano, 1990) están en contacto al oeste con el Complejo Ígneo de Samaná (119 ± 10 m.a. (K/Ar) en hornblenda facies gabroide – Aptiano - Albiano, Barrero y Vesga, 1976) y al este con los esquistos del Complejo Cajamarca. La relación que se puede establecer con estos datos es que el intrusivo es posterior o contemporáneo con la roca sedimentaria. Se requiere de estudios para diferenciar y datar el intrusivo en este sector y establecer mejor esta relación. Los valores de radiometría en el cuerpo intrusivo y metamórfico son muy bajos en comparación con los muy elevados valores en el nivel mineralizado de las rocas sedimentarias. El muestreo para realizar el estudio mineralógico y petrográfico se realizó en el nivel de fosforitas mineralizado en las trincheras Tb2, Tb9, Tb26 y en la columna estratigráfica descrita en el sector de la Quebra del Guayabo (**Ver Figura No. 23**). Las trincheras se ubican en los flancos este y oeste del sinclinal y la columna estratigráfica fue descrita en el flanco este del sinclinal. Las localizaciones para el muestreo se eligieron teniendo en cuenta que la secuencia no está invertida, que es el sector más estudiado y cuenta con información del pozo histórico (P1), el túnel histórico (T1), trincheras históricas (Naranjo, 1983) y el pozo actual P1 y trincheras actuales (U3O8 Corp., 2011) de forma que la información mineralógica y petrográfica podrá extrapolarse para las rocas halladas en estos sondeos. Además es importante destacar que el sector de muestreo es el más alejado de la Falla Palestina, la secuencia no se halla deformada y los buzamientos son de 15° hasta 85° . La secuencia del nivel mineralizado descrita en la columna El Volcán tiene un espesor total de 54 metros y el nivel de fosforitas mineralizado de 9 metros, igual al valor reportado en la campaña de perforación 2010. La

mineralización en la columna se confirma con los valores de radiometría medido con centellometro (Exploranium GR 135) que van desde 2000 (cps) hasta 24000 (cps). La secuencia descrita es grano creciente, a la base en contacto inferido con areniscas color amarillo presenta mezcla de material de las fosforitas con las areniscas. El nivel de fosforitas presenta oquedades posiblemente fosilíferas (restos óseos) rellenas de limolita de color blanco y en las paredes de las oquedades minerales de uranio en agregados brotoidales color verde claro. Debido a la intensidad de la cubierta vegetal se recomienda descapotar y seguir el nivel lateralmente para estudiar mejor sus estructuras sedimentarias. Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un apique a la base del nivel mineralizado hallando este tipo de estructuras (**Ver Figura 22**).

Figura 22. Apique y detalles de estructuras sedimentarias en fosforitas.



Las muestras **11 y 12** corresponden a las muestras S4M7 y S4M5b de la columna el Volcán (**Ver Figura 23 – Anexo D**) respectivamente.

Las muestras **1,3 y 10** se tomaron de la trinchera Tb2 (**Ver Figura 24**) en el nivel de fosforitas, lodolitas y limolita calcárea respectivamente.

La muestra **2** se tomó de la trinchera Tb9 donde ocurre un micropliegue. El muestreo para petrografía se tomó en el nivel de fosforita plegado (**Ver Figura No. 25**).

La muestra **9** consiste en una roca carbonatada de grano fino muestreada en la trinchera Tb26 en el sector sur, flanco oriental del sinclinal.

Las muestras **5, 6,7 y 8** se tomaron en afloramientos y trincheras en el sector norte del sinclinal con medidas de radiometrías importantes a las cuales era necesario hacer petrografía para clasificar la roca y conocer los minerales mena y ganga.

Figura 24. Trinchera Tb2, detalles metodología de muestreo y puntos muestreados para petrografía. Nivel de fosforitas (arriba izquierda), lodolitas (abajo izquierda) y calcáreo (derecha).



Figura 25. Trinchera Tb9 indicando rejilla (cuerda color verde) para detallar el micropliegue y medidas de radiometría. Detalle a la (izquierda) del nivel muestreado para petrografía.



8. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA Y PETROGRÁFICA CON MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA Y REFLEJADA, (SEM) Y (EPMA) DE LA MINERALIZACIÓN DE URANIO Y FOSFORO EN FOSFORITAS DE BERLÍN

8.1 MUESTRA No. 12 (MUESTRA S4M5B: BASE COLUMNA ESTRATIGRÁFICA EL VOLCÁN)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (45%) (Ver Figura No. 26g-hy Figura 27)**:Tamaños arena fina a media predominantemente de cuarzo la mayoría con ocluidos de REE (EPMA), fracturados, subredondeados, moderadamente seleccionados en contacto flotante y opacos que en luz reflejada son iridiscentes con sobre crecimientos.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (40%) (Ver Figura No. 28)**: Limolita. Limos ricos en (U, V, P, W, Ti, Fe), silicatos, en escamas intercaladas y diseminados en la matriz. Granos tamaño limo esferoidales con estructura similar a fragmentos de foraminíferos por su superficie oquerosa (SEM). Piritita de tamaño muy fino diseminada. Materia orgánica.

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (10%)**:

Cemento fosfático rico en vanadio, en láminas onduladas de superficie reniformes intergranular y rellenando fractura transgranulares. Se introduce por fracturas intragranulares y separa los fragmentos del grano al precipitar aumentando su volumen.

Fábrica: Lodosoportada.

Porosidad (5%): primaria intergranular rellenas de minerales radiales de birrefringencias de segundo orden precipitados en las paredes.

CLASIFICACIÓN TEXTURAL

Porcentajes (normalizados al 100%) de los constituyentes del ARMAZÓN (principales y accesorios): **Arenisca limosa**

Terrígenos: Cuarzo mono cristalino.

Aloquímicos: posibles fragmentos de foraminíferos, oides.

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL: Arenisca limosa fosfática

Notas diagenéticas y naturaleza de la porosidad: suturas intragranulares, en la **Figura No 26 g-h** se aprecia un contacto neto (**Ver Figura No.26**) semivertical entre dos dominios, uno de granos redondeados (izquierda) y otro de granos angulares (derecha).

Descripción integrada de la muestra No. 12: Arenisca limosa fosfática (según Folk, 1974) – Bindstone fosfático (según Trappe, 2001) lodosoportada con laminación ondulosa paralela de arena fina a media predominantemente de cuarzos ubredondeados, moderadamente seleccionados en contacto flotante, la mayoría con ocluidos de REE, matriz limosa mineralizada con U, V, P en escamas y agregados esferoidales, cemento fosfático intergranular y relleno de fracturas intragranulares. Minerales radiales en las paredes de los poros. En luz reflejada granos iridiscentes, fracturas y sobre crecimientos, pirita diseminada. Materia orgánica indiferenciada.

Figura 26. Microscopía de luz transmitida muestra No.12. Escala lente 5X,**26c-d**. Lente 10X. Ver explicación en el texto.

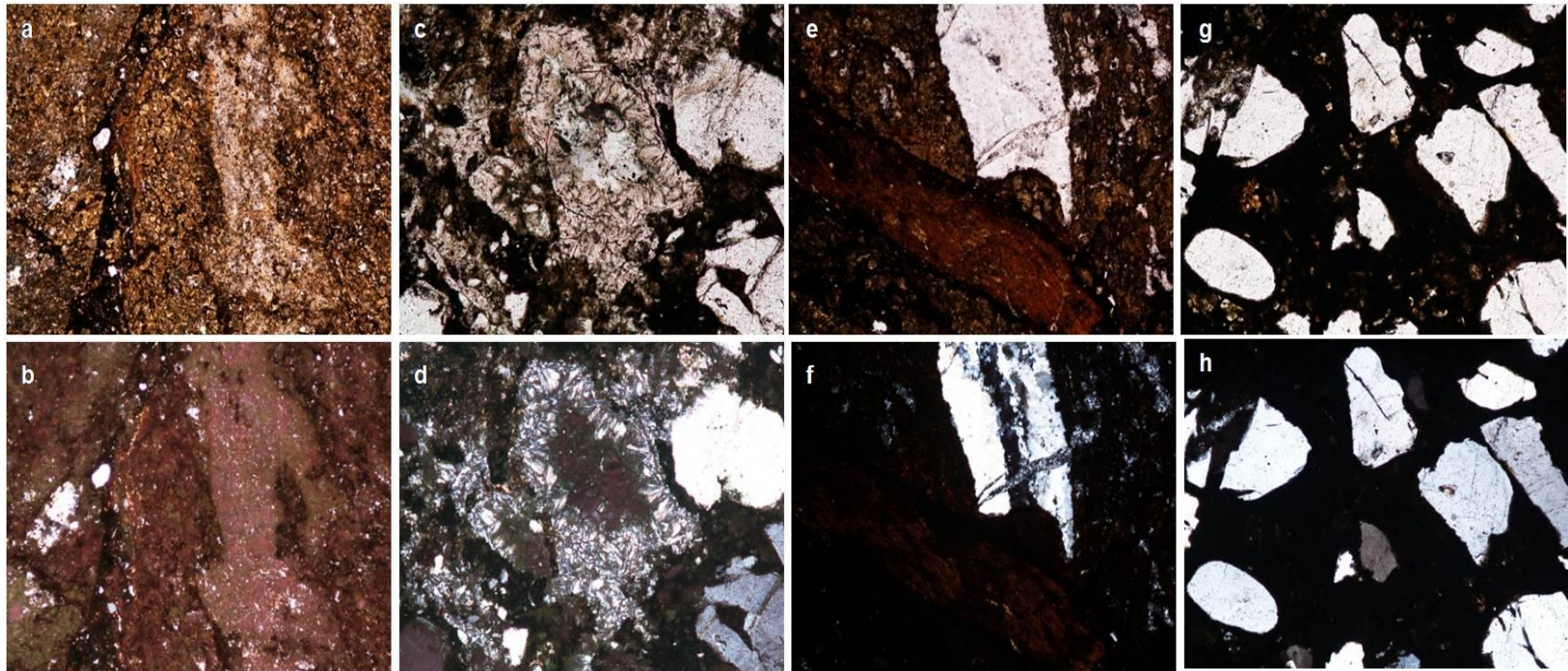


Figura 27. Microscopía de luz reflejada, muestra No.12. Escala lente 5X. Ver explicación en el texto.

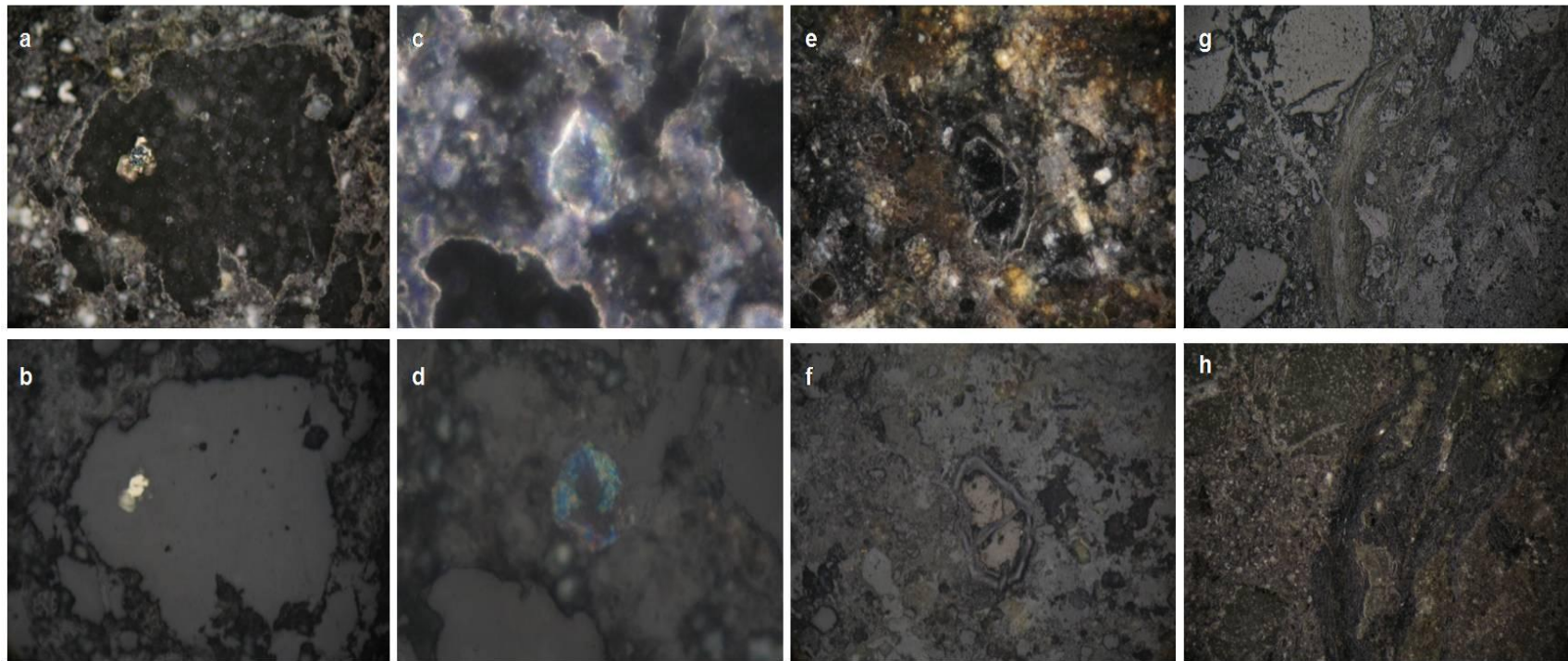
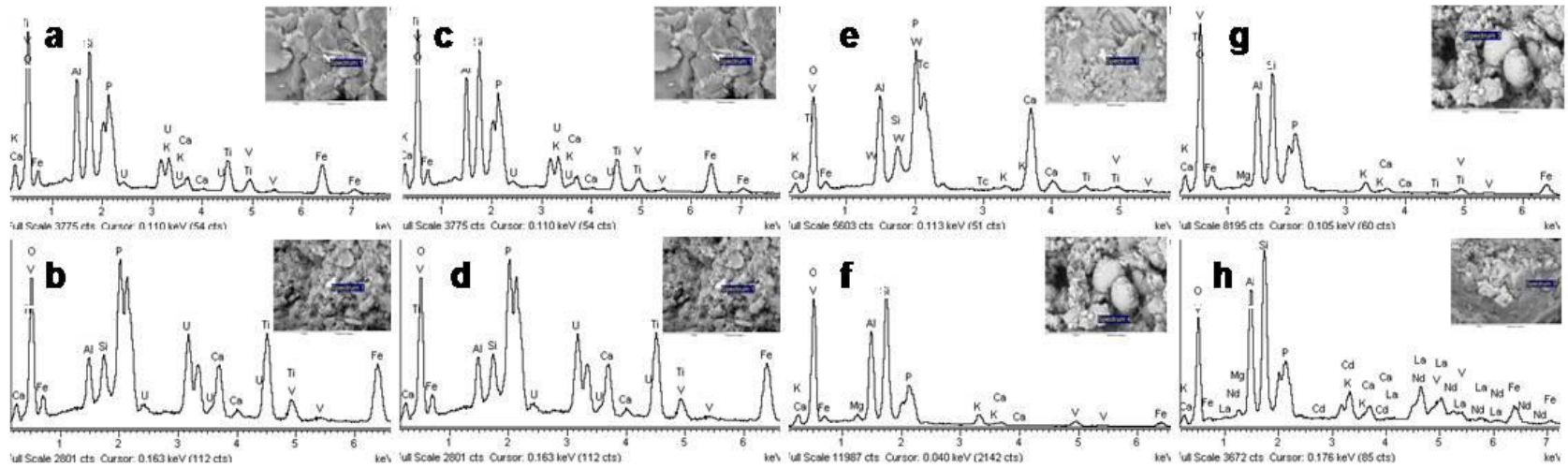
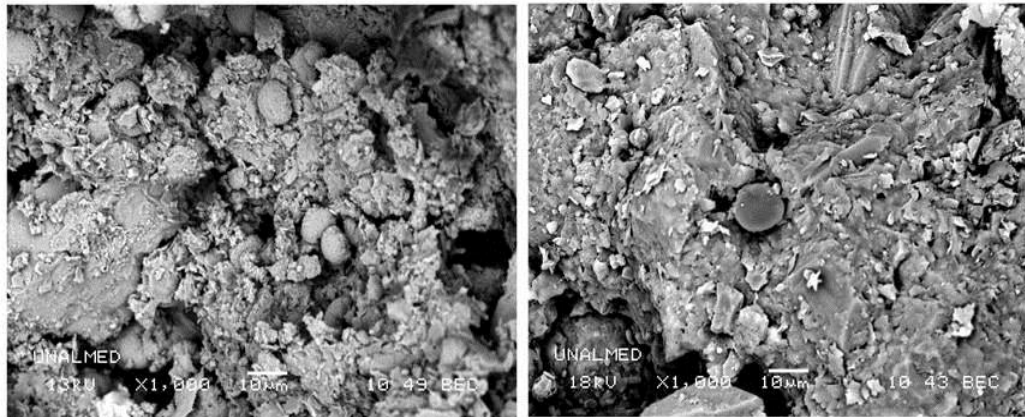


Figura 28. Imágenes (SEM) y espectrogramas muestra No.12. Ver explicación en el texto.



8.2 MUESTRA No. 11 (MUESTRA S4M7: TECHO COLUMNA ESTRATIGRÁFICA EL VOLCÁN)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (50%) (Ver Figura No. 29)**: Tamaño arena muy fina a fina de cuarzo angular a subredondeado, bien seleccionado en contactos flotantes.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (25%)**: tamaño arcilla, aspecto coloidal y/o criptocristalino, fosfático de colores anaranjado, amarillo y pardo. Abundante materia orgánica. En luz reflejada goethita y muy poca pirita, algunos granos de color azul, granos de cuarzo tamaño arena media **(Ver Figura 30)**

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (20%)**: fosfático color anaranjado cortando la matriz de color amarillo.

Fábrica: Grano soportada

Porosidad (5%): secundaria debida a fracturas posteriores a la depositación.

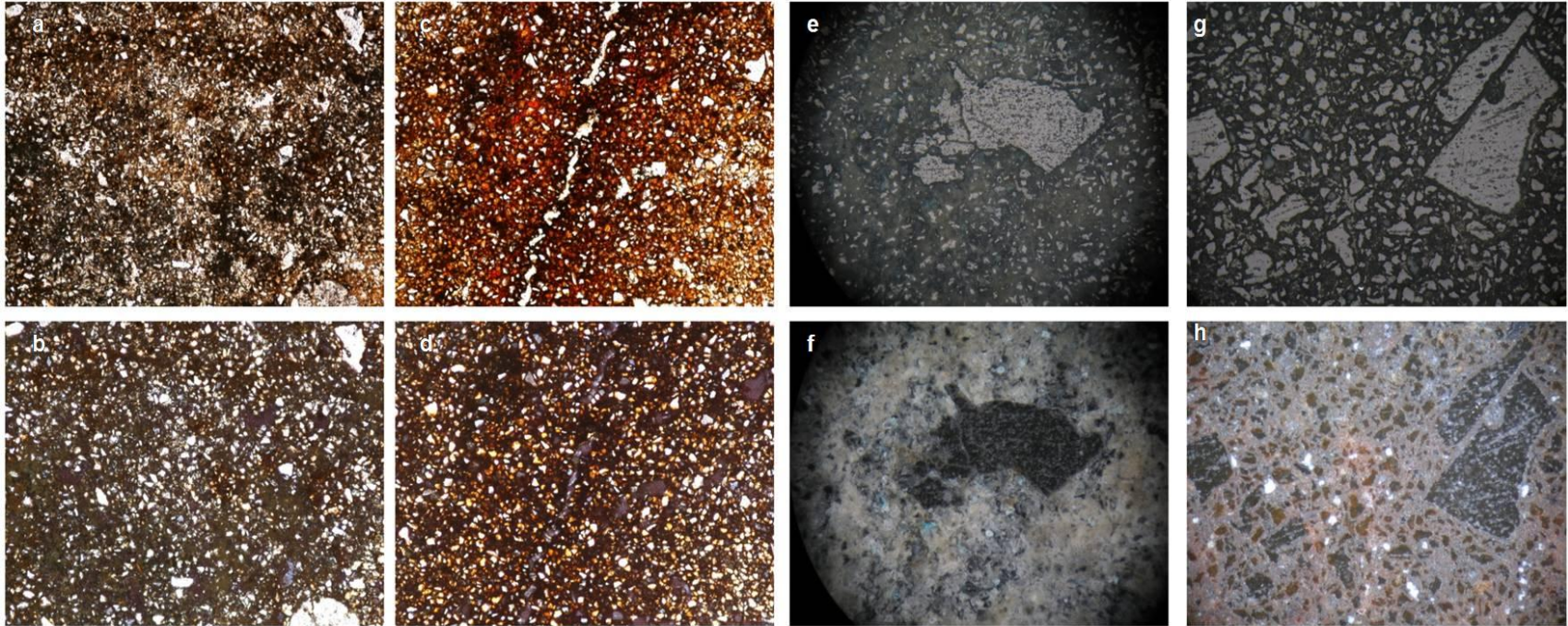
CLASIFICACIÓN TEXTURAL: Arenisca lodosa

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL: Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974)

Descripción integrada de la muestra No. 11: Arenisca lodosa fosfática, granosoportada, masiva, de cuarzo tamaño muy fino a fino, angular a subredondeado, bien seleccionado en contactos flotantes con matriz

criptocristalina y cemento fosfático, goethita en óxidos rellenando fracturas y pirita como accesorio. Abundante materia orgánica indiferenciada.

Figura 29. Microscopía de luz transmitida (**29.a-b-c-d**) y reflejada (**29.e-f-g-h**), muestra No. 11. Escala lente 5X. Ver explicación en el texto.



8.3 MUESTRA No. 1 (MUESTRA BE1001005FCM: TRINCHERA TB2)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (30%)**: tamaño arena media a gruesa de cuarzo, angulares a subredondeados, mal seleccionados, en contactos flotantes con ocluidos de REE y lamelas de exsolución (**Ver Figura No. 30b**). Muy pocos granos con textura micrográfica y clastos fosfáticos lenticulares. Cloritas tamaño medio asociadas con cacoxenita, cuarzo, roscoelita y fosfatos.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (50%)**: tamaño de grano fino a criptocristalino. Los granos de apatito de sección cuadrada la mayoría con inclusiones de color negro, zircones de grano fino con inclusiones de fosfato de uranio (**Ver Figura No. 30 a y c**). La laminación fina ondulosa paralela conforma parte de la matriz y está compuesta de micas de Ba – V (Roscoelita) (**Ver Figura No. 32e y f**), fosfato de Y (churchita) y fosfatos de Fe, Ca, U, Cu de habito micáceo con birrefringencia de primer y tercer orden que en luz reflejada son de color verde claro isotrópicos (**Ver Figura No. 31g y h**), agregados de cacoxenita (**Ver Figura No. 30 c y d**) como reemplazamiento en la matriz. Bornita y granos iridiscentes tamaño arena fina euédral y subédrales en luz reflejada (**Ver Figura No. 31**).

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (17%)**: apatitos, cacoxenita (fosfato de Fe y Al) y fosfatos con contenidos de Ca, U, Cu mezclados en láminas intragranulares uniendo y rodeando los granos (**Ver Figura No. 32**).

Fábrica: lodos o portada. Laminación fina ondulosa paralela.

Porosidad (3%): secundaria en fracturas intergranulares (primer fracturamiento) en igual sentido y transgranulares (segundo fracturamiento) en otros sentidos.

CLASIFICACIÓN TEXTURAL Arenisca lodosa

Terrígenos: cuarzo, zircones

Ortoquímicos: roscoelita, cacoxenita, churchita.

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974) – Bindstone fosfático (Trappe, 2001)

Notas diagenéticas y naturaleza de la porosidad: fracturas intragranulares que evidencian un evento de fracturamiento anterior al flujo de los fluidos mineralizantes y un segundo fracturamiento transgranular que generó porosidad secundaria ocurriendo la mineralización posteriormente en ambos casos. Reacomodamiento mineral, neomorfismo, orientación de granos que indican una componente de metamorfismo de bajo grado.

Descripción integrada de la muestra No. 1:

Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974) – Bindstone fosfático (Trappe, 2001) lodosoportada con laminación fina ondulosa paralela, cuarzo tamaño arena media a gruesa, angulares a subredondeados, mal seleccionados, en contactos flotantes con ocluidos de REE y lamelas de exsolución; apatitos, zircones, churchita de grano fino a muy fino con roscoelita en láminas ondulosas y agregados de cacoxenita como ortoquímicos reemplazando el material de la matriz preexistente y como cemento rodeando y rellenando las dos familias de fracturas intergranulares e intragranulares transgranulares respectivamente. La roca presenta un componente de metamorfismo de grado bajo evidente en el reacomodamiento mineral, neomorfismo y orientación de granos. Materia orgánica indiferenciada.

Asociación de cuarzo, apatito, roscoelita, cacoxenita, churchita, fosfatos multicomponentes y clorita.

Figura 30. Microscopía de luz transmitida muestra No. 1. **49 a-b-g-h** Escala lente 5X, **49 c-d.** Escala lente 40X. **49 e-f** 100X. Ver explicación en el texto.

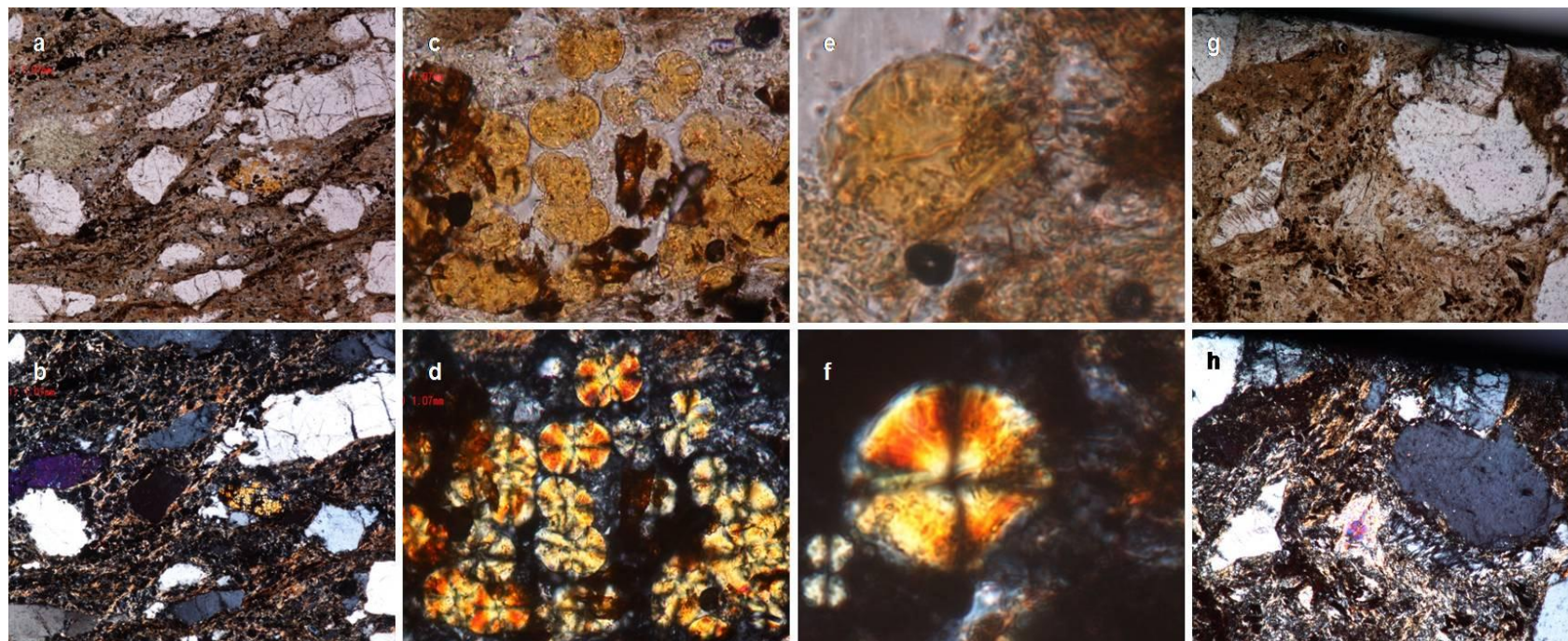


Figura 31. Microscopía con luz reflejada muestra No.1. Escala lente 5X, imágenes **50 a-b-e-f** Escala lente 10X. Ver explicación en el texto.

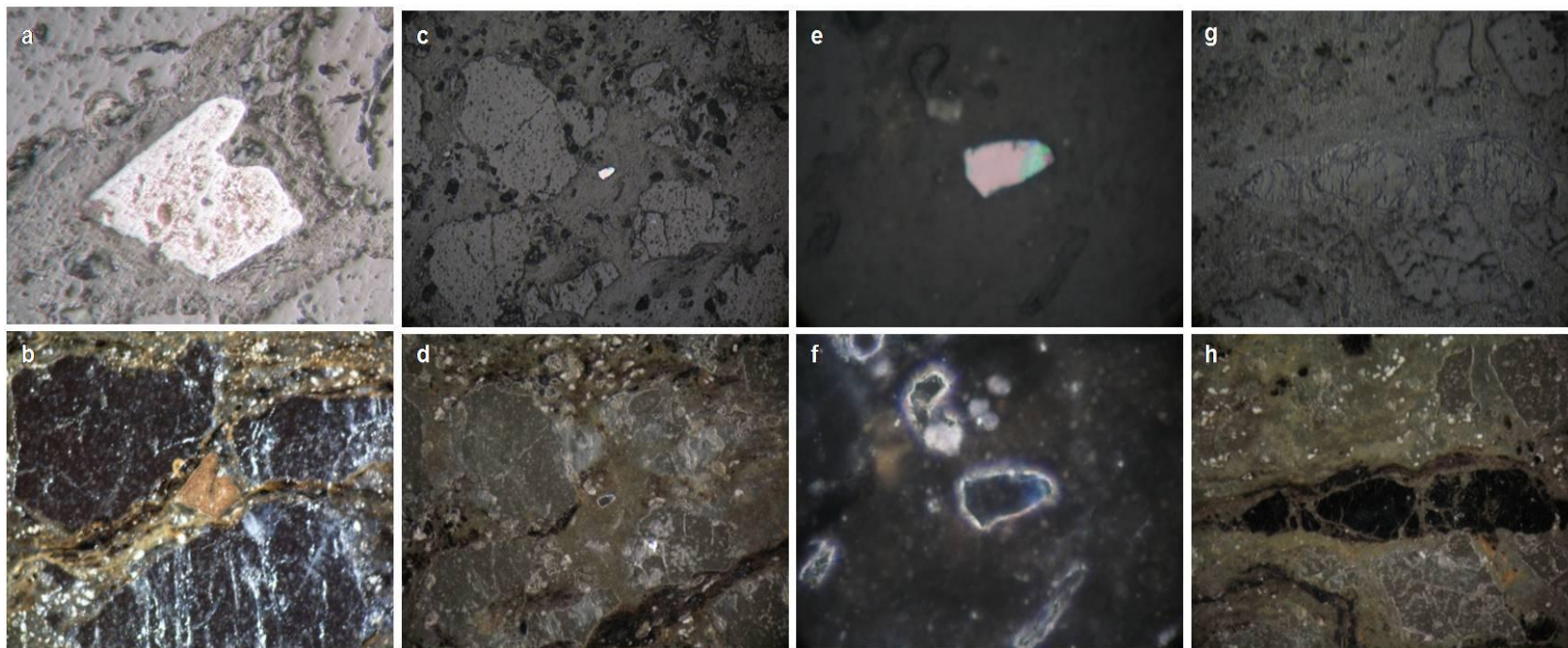
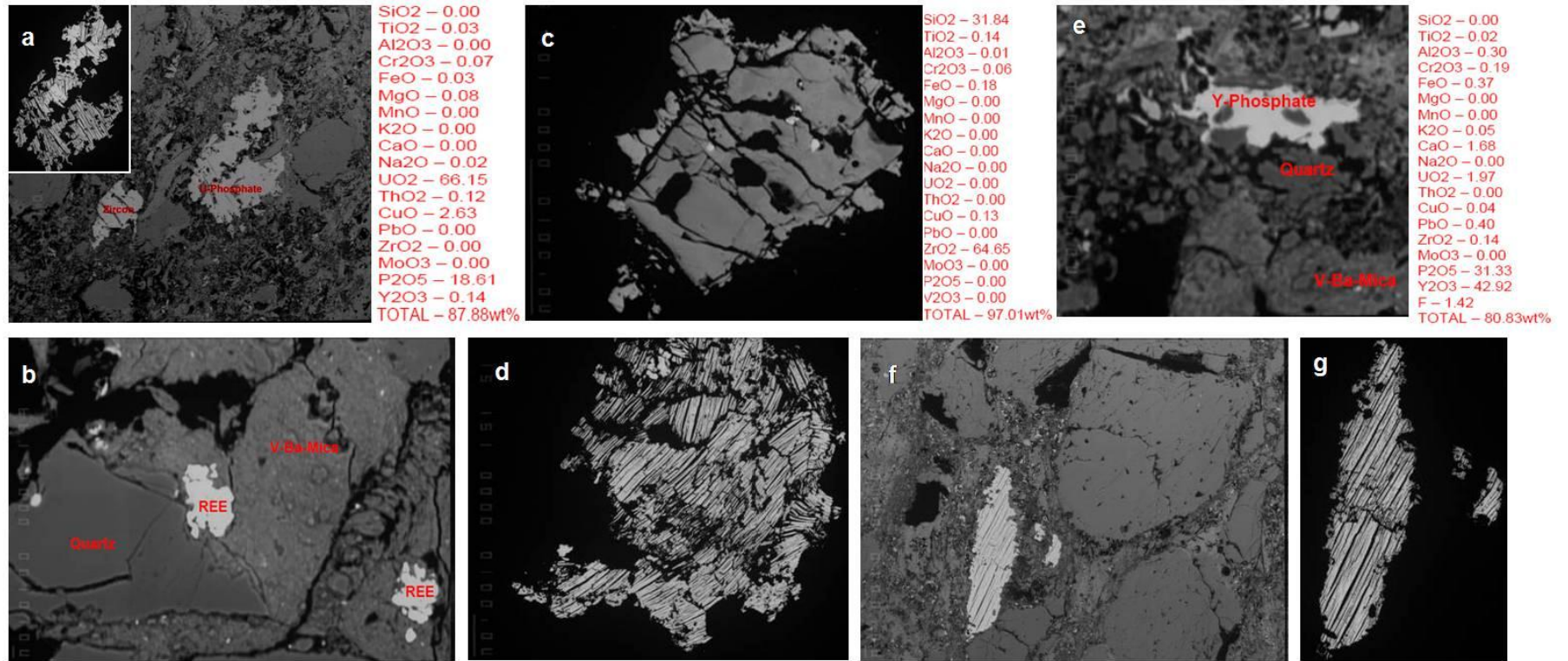


Figura 32. Imágenes y química mineral (EPMA) muestraNo.1.Ver explicación en el texto.



Fuente: Renaud, 2010.

8.4 MUESTRA No. 3 (MUESTRA BE1001005ECM: TRINCHERA TB2)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (45%)**: tamaño arena muy fina a media de cuarzo, subangulares a redondeados, con embahiamiento y formas de uña de gato, mal seleccionados, en contactos tangenciales y suturados con lamelas de exsolución y de deformación, embahiamiento producto de posible corrosión de los fosfatos en los cuarzos, planos de deformación con disolución por presión, (**Ver Figura 33**). En luz reflejada granos subhedrales tamaño arena fina de bornita e iridiscentes de exfoliación perfecta en una dirección y amorfos de color amarillo a naranja (**Ver Figura 35**).

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (30%)**: tamaño arcilla a limo de fosfatos, materia orgánica y opacos. Los fosfatos ocurren en agregados aciculares y en escamas en los intersticios entre granos esféricos y ovoides en la matriz. Consta de apatitos euhedrales de sección cuadrada diseminados en la matriz y como cemento con ocluidos de monazita (**Ver Figura 37**), churchita, zircones y fosfatos de U, Fe, Al de tamaño arena fina. Se aprecia un reemplazamiento en la matriz de los fosfatos amorfos color naranja (**Ver Figuras 34 c y d**) aciculares y escamosos por material preexistente posiblemente calcáreo. En general la matriz presenta dos fases, una de textura masiva con apatitos euhedrales, agregados de cacoxenita ovoides y fosfatos aciculares y otra fase en láminas muy finas o bandas ondulosas que se introducen por las fracturas y planos de deformación compuesta por fosfatos en escamas y amorfos.

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (23%)**: Cacoxenita euhedral y amorfa (**Ver Figuras 33 - 37**) y material fosfático con uranio y vanadio de aspecto coloidal cementando los granos y parte de la matriz indicando infiltración de fluidos que alteran la roca en condiciones de óxido reductoras.

Fábrica: granosoportada, granos de cuarzo deformados y alineados ligeramente en una dirección, laminación muy fina ondulosa de color pardo claro a oscuro de roscoelita y fosfatos amorfos, fracturas transgranulares paralelas entre si y perpendiculares a la laminación, rellenas por material de aspecto coloidal.

Porosidad (2%): primaria intergranular y secundaria por fracturas intragranulares transgranulares así como producto de alteración por corrosión y flujo de fluidos ácidos que generan embahamiento y reticulados en la matriz. Los minerales aciculares de la matriz representan una porosidad secundaria.

CLASIFICACIÓN TEXTURAL Arenisca lodosa

TERRIGENOS: cuarzo, zircones

ORTOQUÍMICOS: cacoxenita, roscoelita, apatitos, churchita, fosfatos con uranio y vanadio.

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974)
– Bindstone fosfático (Trappe, 2001)

Notas diagenéticas y naturaleza de la porosidad: Disolución por presión evidente en fracturas rellenas que separan las partes de los granos fracturados. Deformación de los granos y orientación ligeramente en una misma dirección. Fracturamiento paralelo transgranular.

Descripción integrada de la muestra No. 1:

Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974) – Bindstone fosfático (Trappe, 2001) lodosoportada con laminación fina ondulosa paralela. Cuarzo tamaño arena muy fina a media, subangulares a redondeados, mal seleccionados, en contactos tangenciales y suturados con ocluidos de REE y lamelas de exsolución, de deformación, embahamiento y deformación por presión; apatitos, zircones,

churchita de grano muy fino y fosfatos tamaño arcilla a limo con roscoelita en láminas onduladas y agregados de cacoxenita como ortoquímicos reemplazando el material de la matriz preexistente y como cemento rodeando y rellenando las dos familias de fracturas perpendiculares a la laminación ondulosa. Los fosfatos en el cemento y la matriz, roscoelita en agregados de granos aciculares, cacoxenita en granos ovoides de superficie lisa y silicatos ricos en vanadio esferoidales de superficie granular.

Asociación de cuarzo, apatito, roscoelita, cacoxenita, churchita, fosfatos multicomponentes.

Figura 331. Cacoxenita en individuos con zonación que varía según la composición de Fe (EPMA).

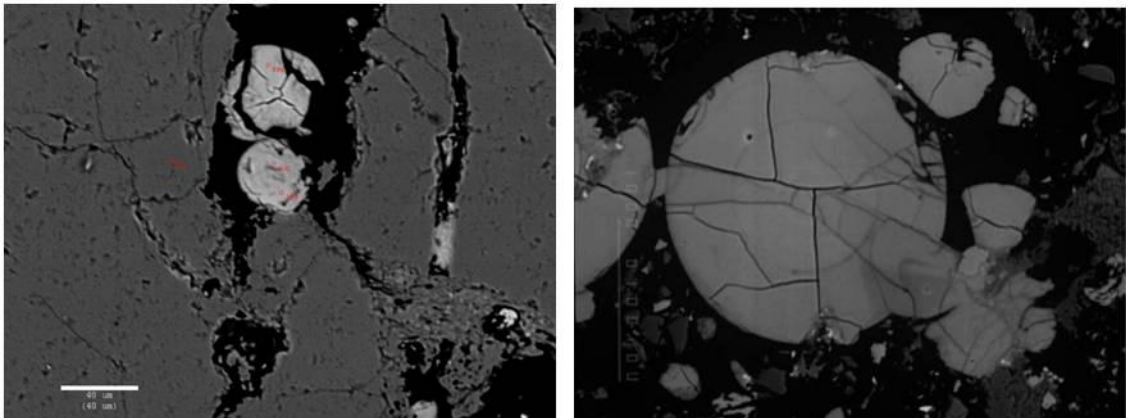


Figura 34. Microscopía de luz transmitida muestra No.3., los círculos en rojo indican las zonas donde se tomaron datos con (EPMA), Escala lente 5X. Ver explicación en el texto.

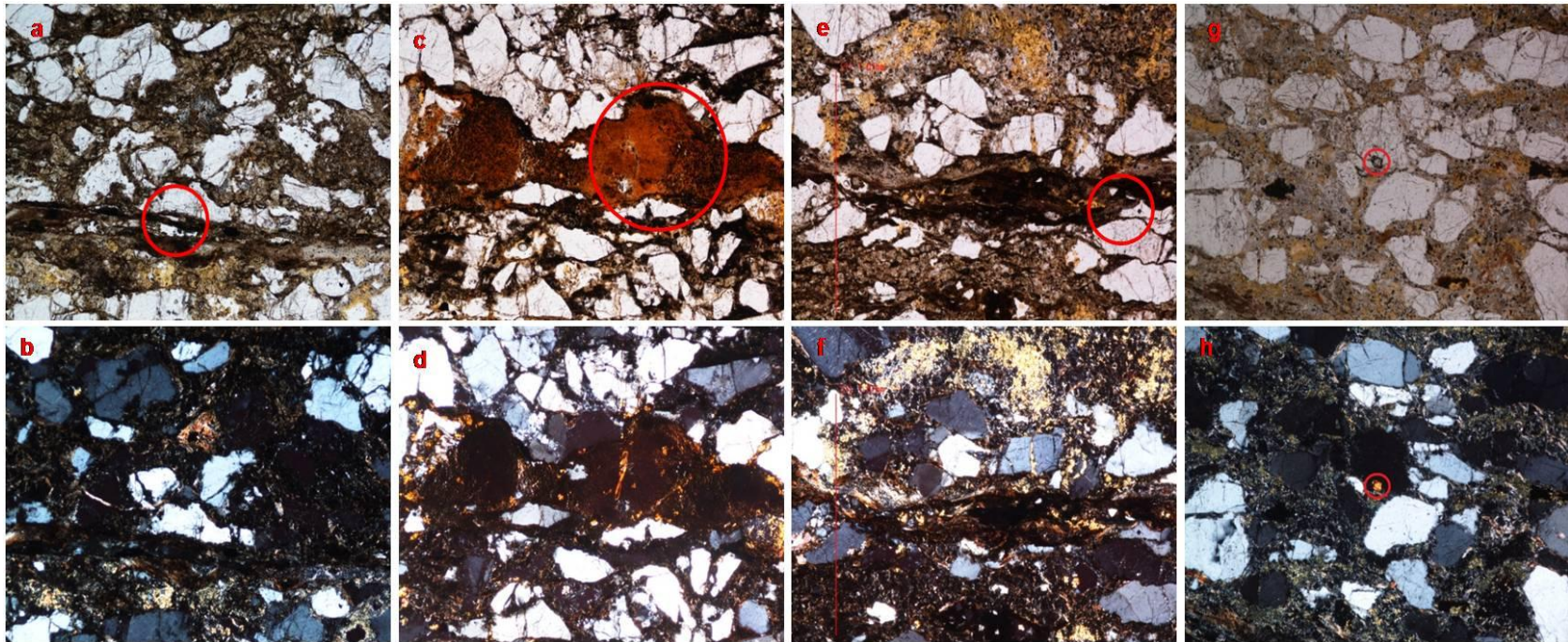


Figura 35. Microscopía con luz reflejada muestra No.3., Escala lente 5X, recuadros en imágenes a, b, c y d con lente 50X. Ver explicación en el texto.

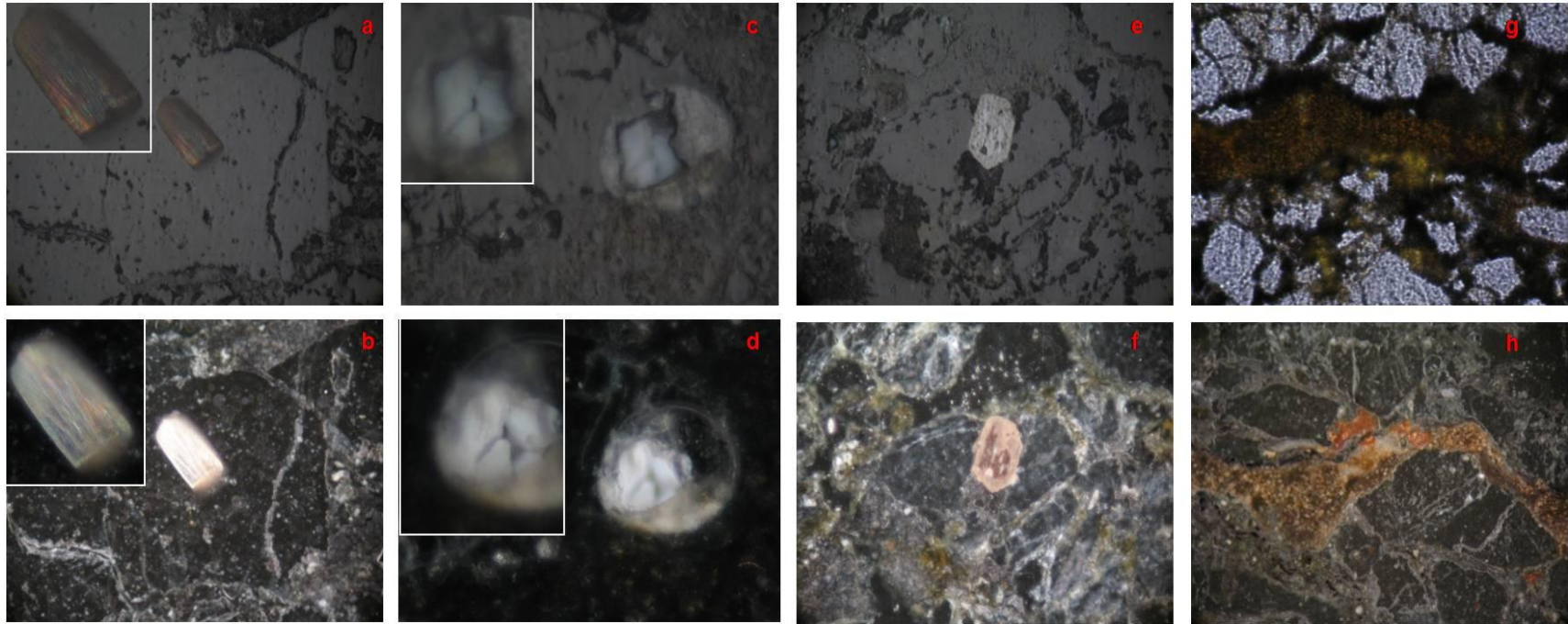


Figura 36. Imágenes y espectrogramas (SEM) muestra No.3. Ver explicación en el texto.

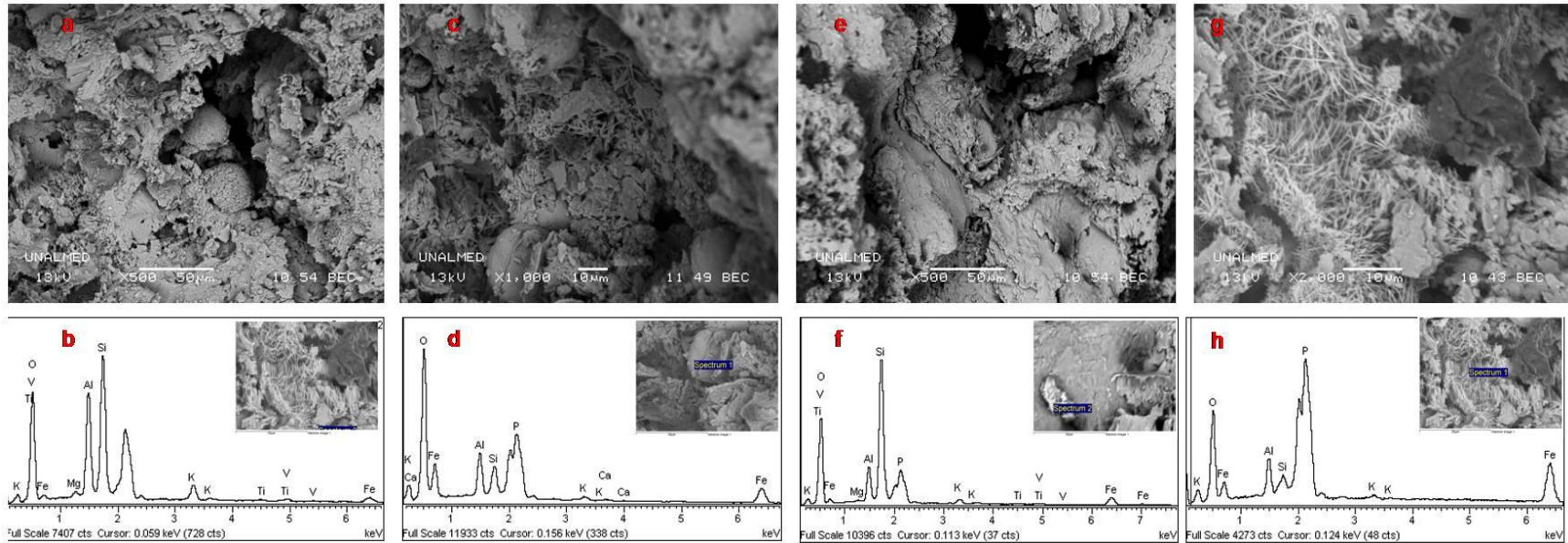
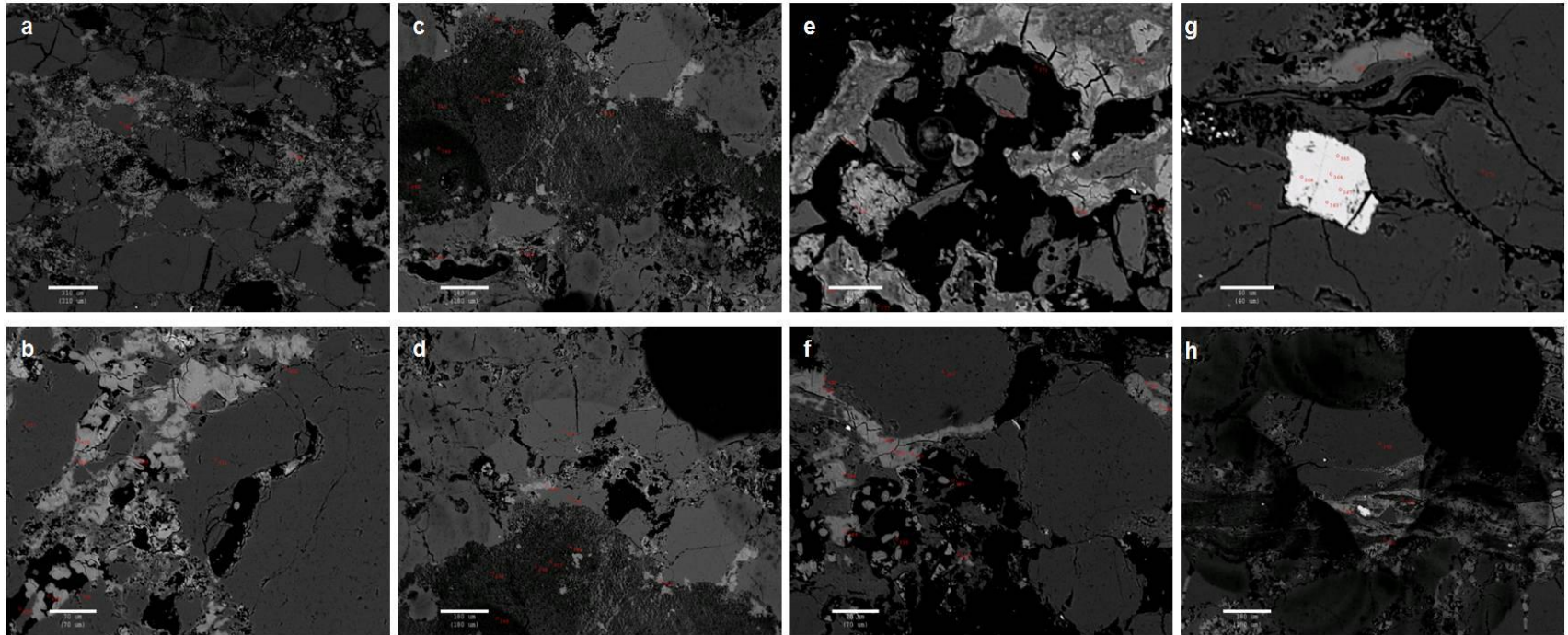


Figura 37. Imágenes (EPMA) muestra No.3. Se indican los puntos donde se analizó la química cuantitativa mineral. Ver explicación en el texto.



8.5 MUESTRA No. 10 (BE1005007ACM: CAMINO QUIEBRA DEL GUAYABO AL POZO P1)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (40%)**: Tamaño arena muy fina a fina de cuarzo angular a subredondeado, bien seleccionado en contactos flotantes. **(Ver Figura 38)**

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (45%)**: tamaño arcilla a limo, aspecto coloidal y/o criptocristalino, fosfático de colores pardo claro a oscuro, amarillo y naranja. Abundante materia orgánica. En luz reflejada goethita, limolita, pirita diseminada, clara evidencia de condiciones oxido reductoras**(Ver Figura No. 38 g-h)**

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (12%)**: fosfático color pardo claro a oscuro.

Fábrica: lodosoportada

Porosidad (3%): secundaria debida a fracturas posteriores a la depositación.

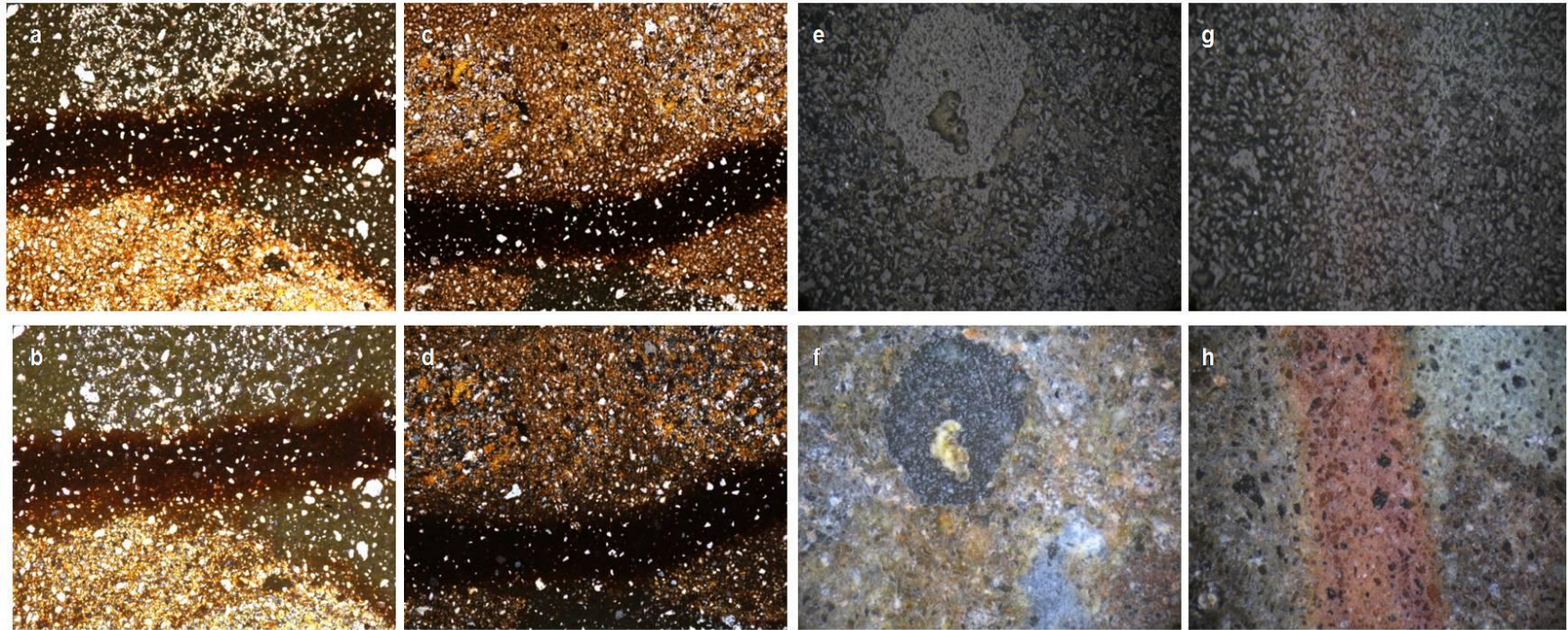
CLASIFICACIÓN TEXTURAL: Arenisca lodosa

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL: Arenisca lodosa fosfática (según Folk, 1974)

Descripción integrada de la muestra No. 10: Arenisca lodosa fosfática, granosoportada, masiva, de cuarzo tamaño muy fino a fino, angular a subredondeado, bien seleccionado en contactos flotantes con matriz criptocristalina y cemento fosfático, goethita, limolita y pirita en óxidos en la matriz.

Abundante materia orgánica indiferenciada. Roca alterada con óxidos y fosfatos con uranio teniendo en cuenta los valores de radiometría.

Figura 38. Microscopía de luz transmitida (**38 a-b-c-d**) y reflejada (**38 e-f-g-h**), muestra No. 10. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



8.6 MUESTRA No. 9 (BE1005TB26OS: TRINCHERA TB26, FLANCO ORIENTAL DEL SINCLINAL)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (55%)**: tamaño medio a grueso de bioclastos calcáreos y fragmentos en forma de conchas, terrígenos de cuarzo. Granos en forma de abanico a los bordes de la sección.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (20%)**: lodo calcáreo microcristalino (micrita). Abundante pirita y calcopirita en vetilleo y diseminada. La calcopirita es la más abundante en las vetillas y la pirita como granos muy finos diseminados en las mismas vetillas. El vetilleo se presenta en forma de rejilla "stockwork" (**Ver Figura No. 39 e-f**).

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (22%)**: cortando la estratificación de los bioclastos consta principalmente de micrita y calcita.

Fábrica: biosoportada. Los bioclastos están siguiendo una estratificación, se hallan orientados y son cortados por vetilleo con sulfuros, calcopirita y pirita.

Porosidad (3%): primaria interpartícula y secundaria por fracturamiento

CLASIFICACIÓN (según Dunham, 1962) **Packstone (Ver Figura No. 40 - 41)**

Descripción integrada de la muestra No. 9: Packstone calcáreo biosoportada con ortoquímicos y abundante calcopirita y pirita diseminados y en vetillas en la matriz de micrita. Los bioclastos están orientados y son cortados por el vetilleo de sulfuros. Porosidad primaria interpartícula y secundaria por fracturamiento.

Figura 39. Microscopía de luz transmitida y reflejada (39 c-d), muestra No. 9. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

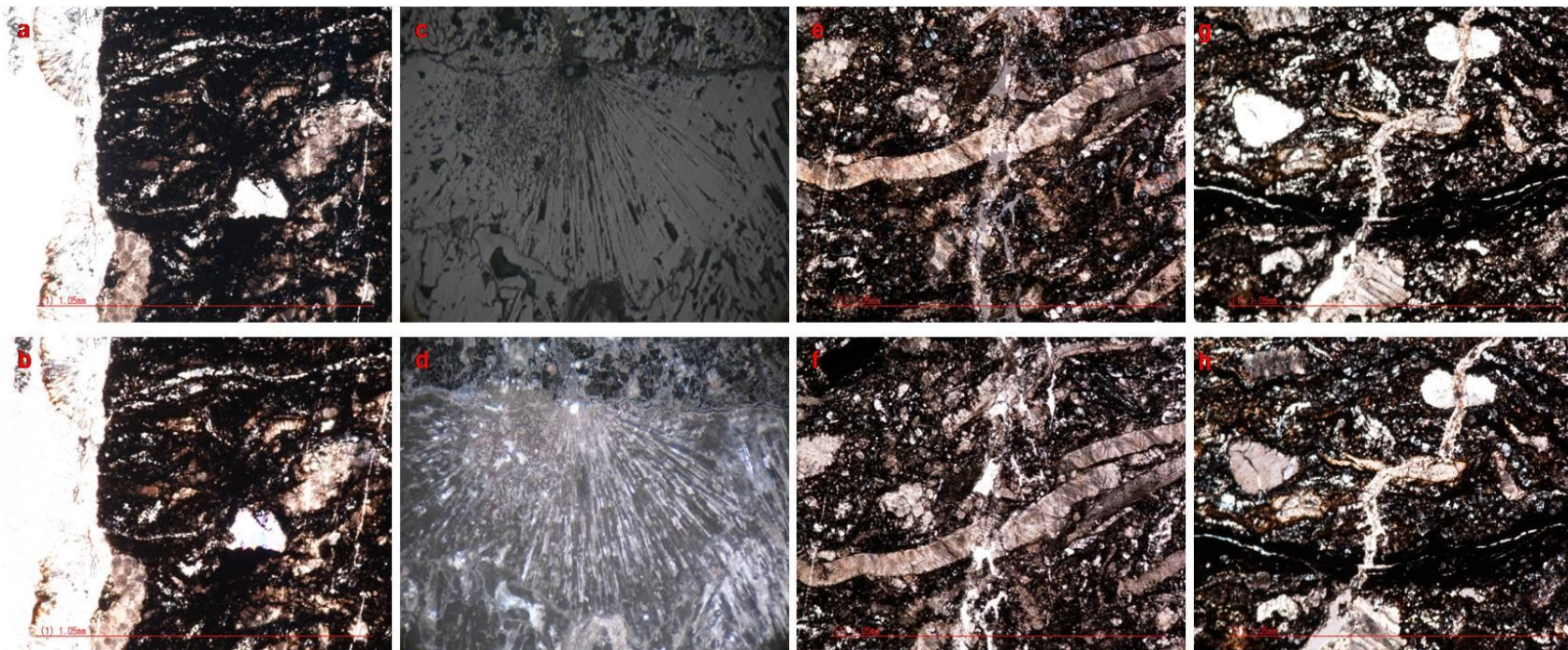
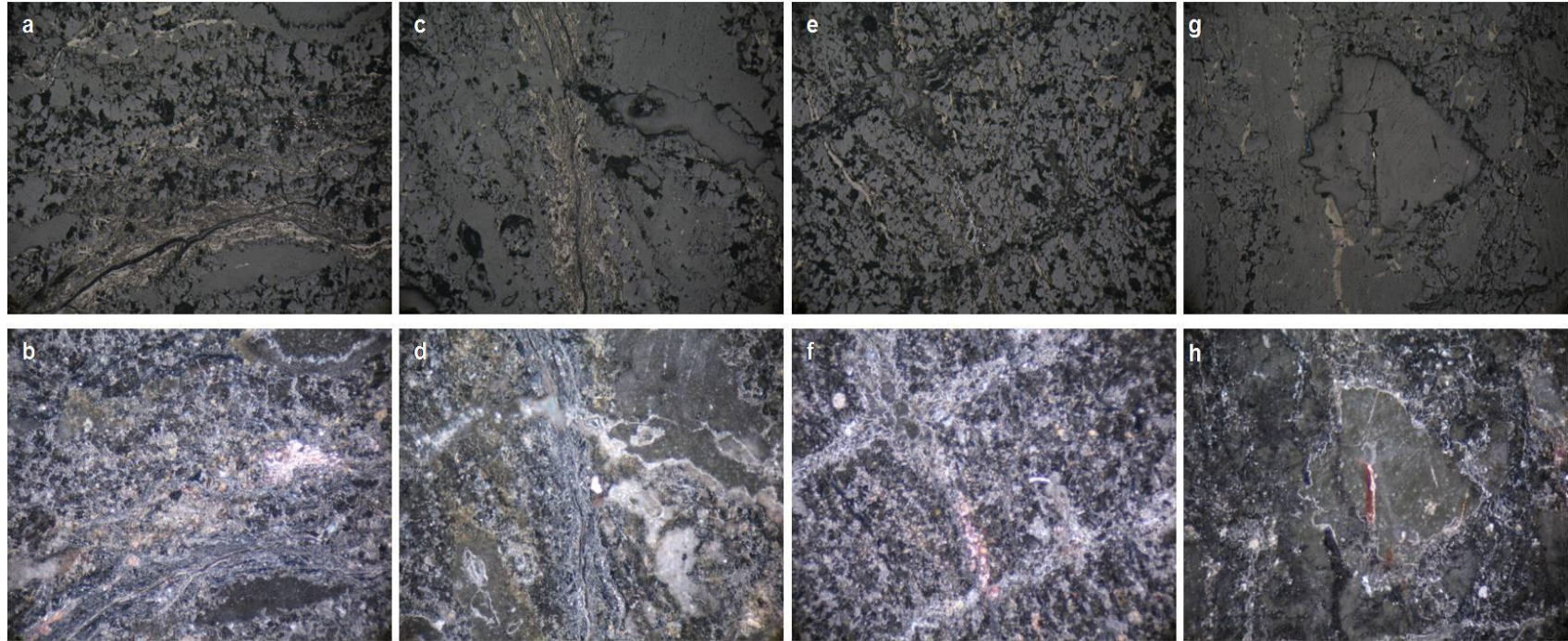


Figura 40. Microscopía con luz reflejada muestra No. 9. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



8.7 MUESTRA No. 2 (BE1003TB9COS: TRINCHERA TB9, VEREDA LA TULIA)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (60%)**: tamaño arena fina a gruesa de cuarzo, angulares, mal seleccionados, contactos flotantes y tangenciales, con embahiamiento, coronas de reacción, zircones tamaño fino, bornita y minerales iridiscentes en luz reflejada. La muestra presenta un grado de deformación y presenta dos fragmentos o dominios (**Ver Figura No.41 g-h**). Uno se constituye de cuarzos con elongación y granos de cacoxenita en laminación paralela. El otro fragmento no está deformado y es dominado por cuarzo con cacoxenita y fosfatos uraníferos intersticiales.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (25%)**: tamaño muy fino a fino de apatito, churchita, roscoelita, cacoxenita y fosfatos de U, Fe y Al evidentes en los granos brillantes en las imágenes con EPMA (**Ver Figura No. 42**).

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (5%)**: cacoxenita y apatito de grano muy fino, fosfatos criptocristalinos en láminas que rellenan los intersticios.

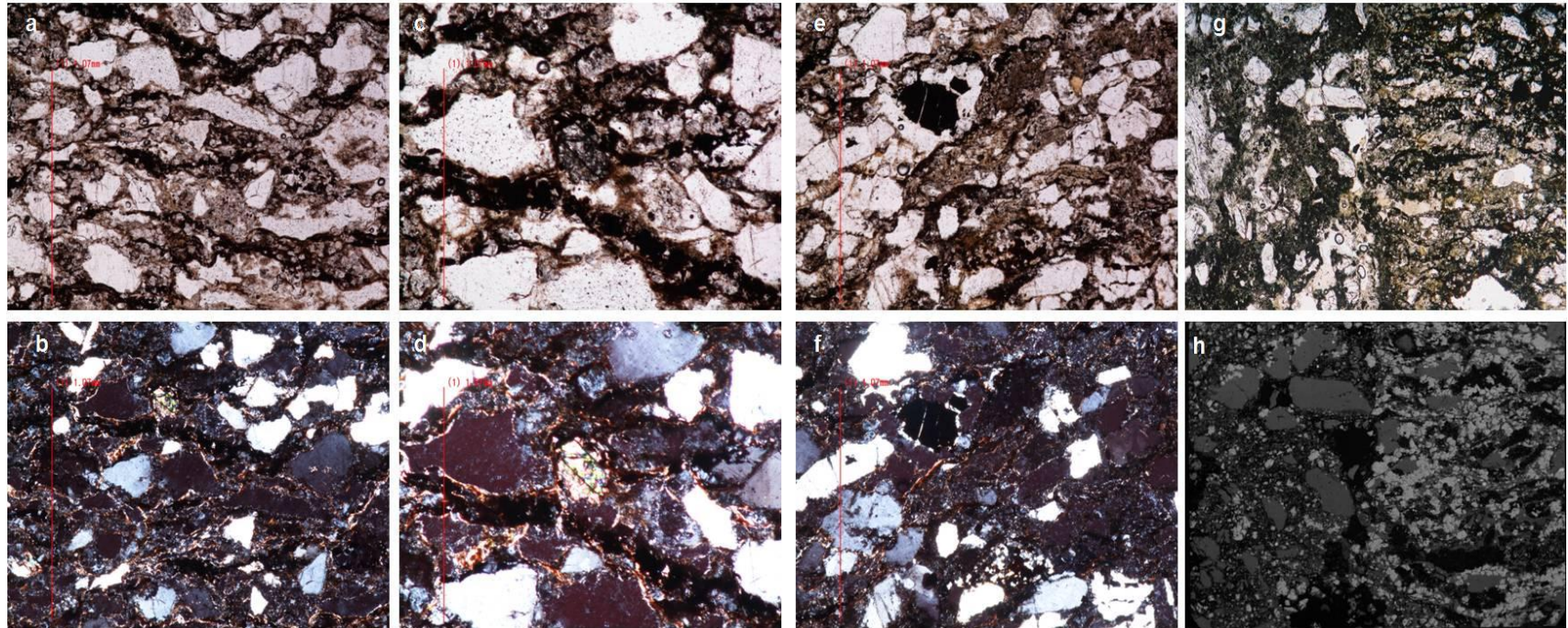
Fábrica: granosoportada. Dos dominios, uno deformado y otro sin deformación, indicando proximidad a una zona de falla. Los granos presentan fracturas intragranulares que sugieren un evento de fracturamiento anterior a la mineralización.

Porosidad (10%): en muestra de mano se disgrega fácilmente y en sección delgada es interpartícula primaria. Las fracturas internas y transgranulares representan la porosidad secundaria.

CLASIFICACIÓN TEXTURAL Arenisca

**CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL Arenisca fosfática Folk, 1974 –
Grainstone fosfático Trappe, 2001.**

Figura 41. Microscopía con luz transmitida y (EPMA 40-h) muestra No. 2. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



Descripción integrada de la muestra No. 2: Arenisca fosfática – Grainstone fosfático de cuarzo tamaño arena fina a gruesa, angulares, con embahiamiento, mal seleccionados con zircones como accesorios de tamaño fino, bornita y granos iridiscentes en luz reflejada, matriz tamaño muy fino a fino de apatito, churchita, roscelita, cacoxenita y fosfatos de U, Fe y Al, cemento fosfático. Presenta una parte con deformación evidente en los granos de cuarzo elongados y otra no deformada.

Figura 42. Microscopía con luz reflejada muestra No. 2. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

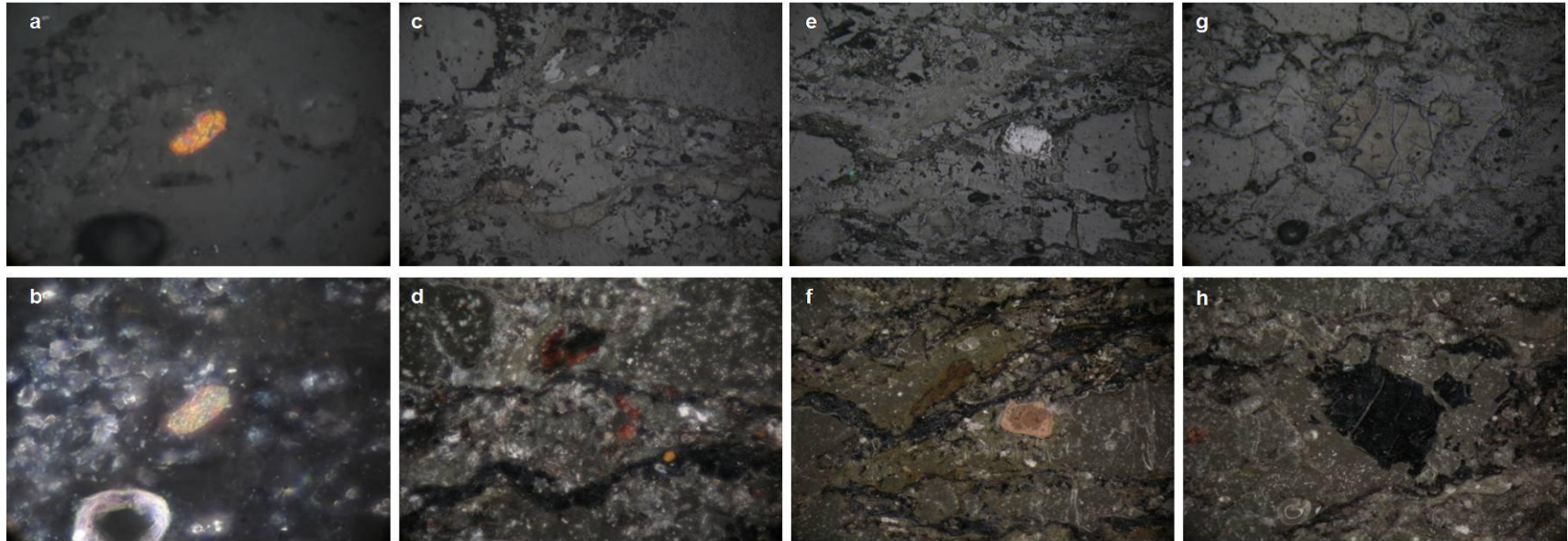
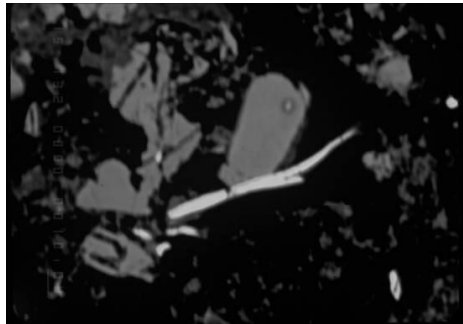


Figura 43. Imagen (EPMA) muestra No.2. Churchita, grano alargado brillante. Tomado de: Renaud, 2010.



8.8 MUESTRA No. 5 (BE1004006JS: TRINCHERA TB14 VEREDA ALTO SAN JUAN CERCA DE UN AFLUENTE DE LA QUEBRADA EL PERRO)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de lámina delgada: 5		Localización: Tb14
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Noviembre 2010
1. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (75%)	Fanerítica	Fenocristales con Pertitas
Muscovita (3%)	Tabulares deformados e incluidos	Accesorio
Feldespato K (20%)	Tamaño grueso, aspecto terroso. Microfracturas perpendiculares a lamelas de exsolución	Incluidos de alta birrefringencia
Luz reflejada		
Goethita (1%)	En vetillas y diseminado	Color rojo parduzco
Granos iridiscentes (1%)	Individuos iridiscentes y coloreados ¿Crisocola?	Colores azules y rosados
2. Texturas y microestructuras:alotriomórfica con vetilleo de cuarzo		
3. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal:Granitoide rico en cuarzo M=0; Q =75; A= 20; P= 0; F= 0;		
Observaciones: zonas con granos de mayor tamaño. Evidencia del paso de fluidos por un micro vetillas que traspasa la sección Ver Figuras No. 44 – 45		

Figura 44. Microscopía con luz transmitida, muestra No. 5. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

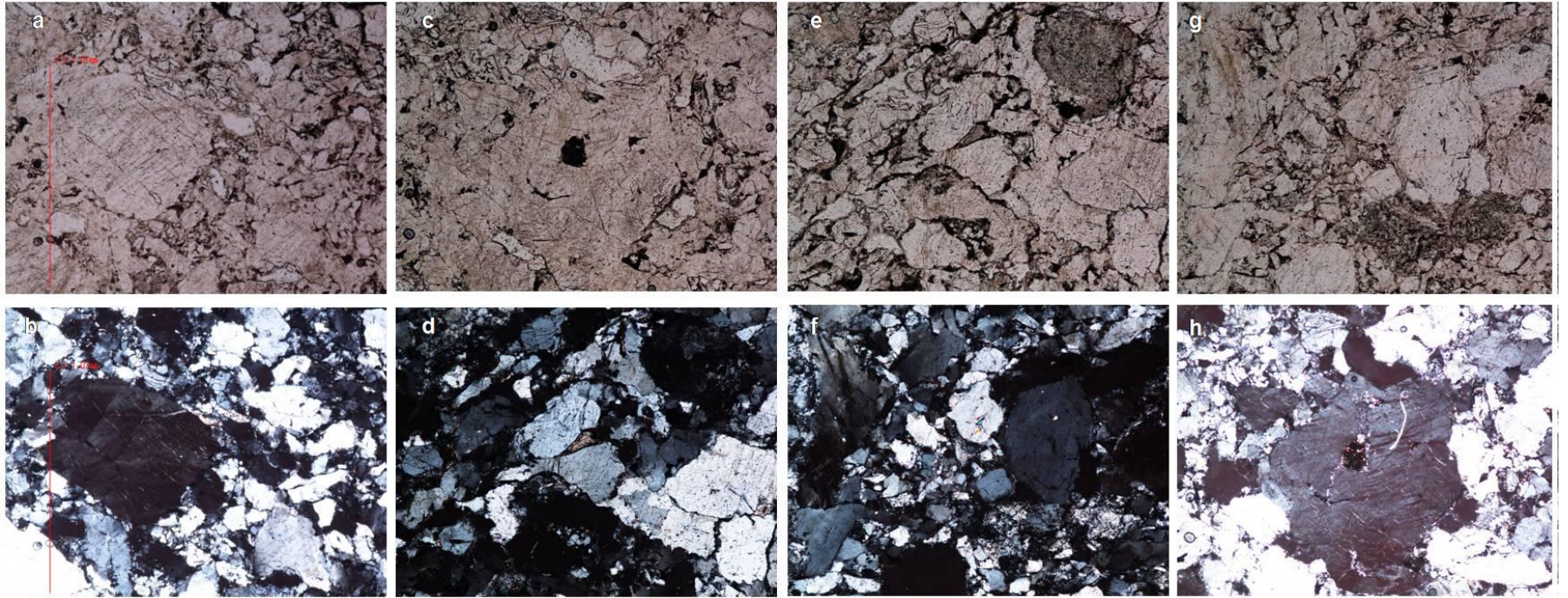
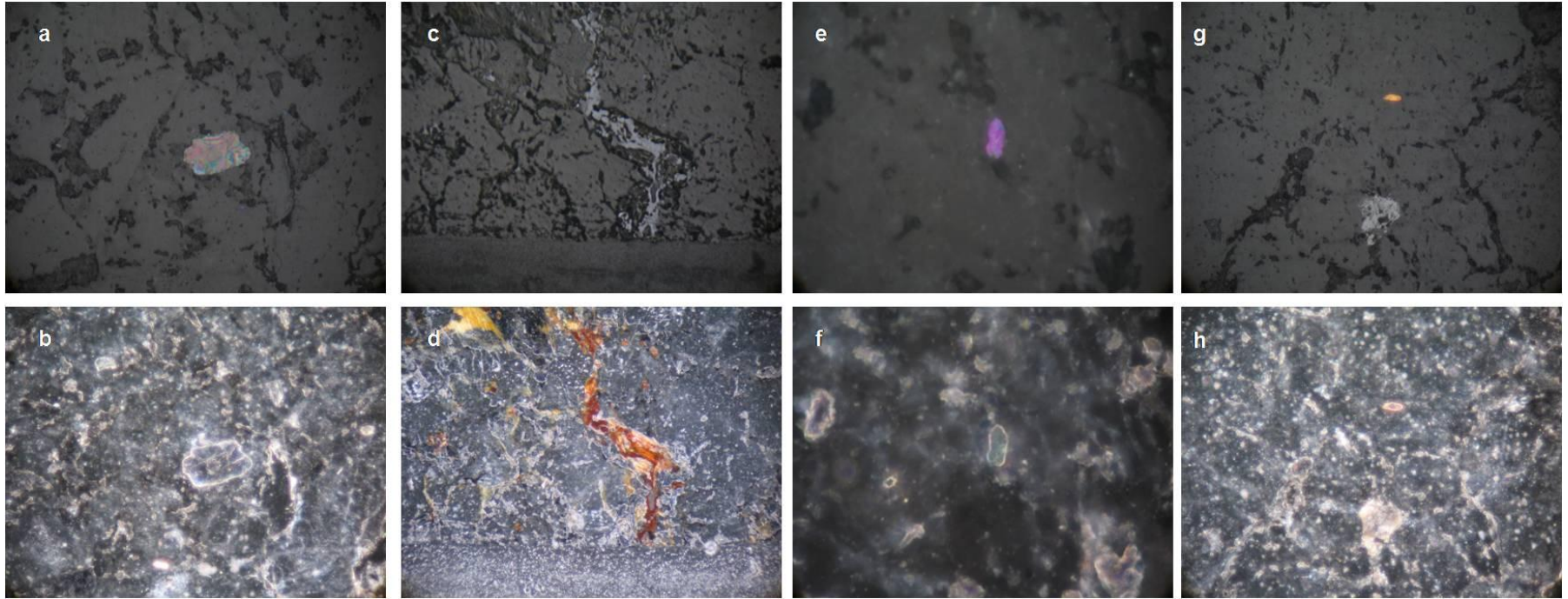


Figura 45. Microscopía con luz reflejada muestra No. 5. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



8.9 MUESTRA No. 4 (BE1004006CM: TRINCHERA TB17 QUEBRADA LA CALERA)

Tamaño de grano y composición predominantes del **armazón (50%)**: tamaño arena muy fina a fina de cuarzo, microcristalino. Apatito de grano fino diseminado.

Tamaño de grano y composición predominantes de la **matriz (20%)**: tamaño criptocristalino de cuarzo en laminación ondulosa subparalela.

Composición química predominante y naturaleza del **cemento (28%)**: calcedonia
Fábrica: lodosoportada. Vetilleo muy delgado de cuarzo continuas y discontinuas. Presenta foliación primaria que luego es cortada por el vetilleo.

Porosidad (2%): secundaria por fracturas

CLASIFICACIÓN TEXTURAL Lodolita silicificada (Chert)

CLASIFICACIÓN COMPOSICIONAL Silexita (Flint) Folk, 1974

El *flint* es chert criptocristalino que exhibe una fuerte fractura concoidea y colores grises a negros derivados de la materia orgánica incluida en su estructura.

(Ver Figuras 46 – 47)

Figura 46. Microscopía con luz transmitida muestra No. 4. **46. g-h.** Exhibe deformación y dos generaciones de cuarzo. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

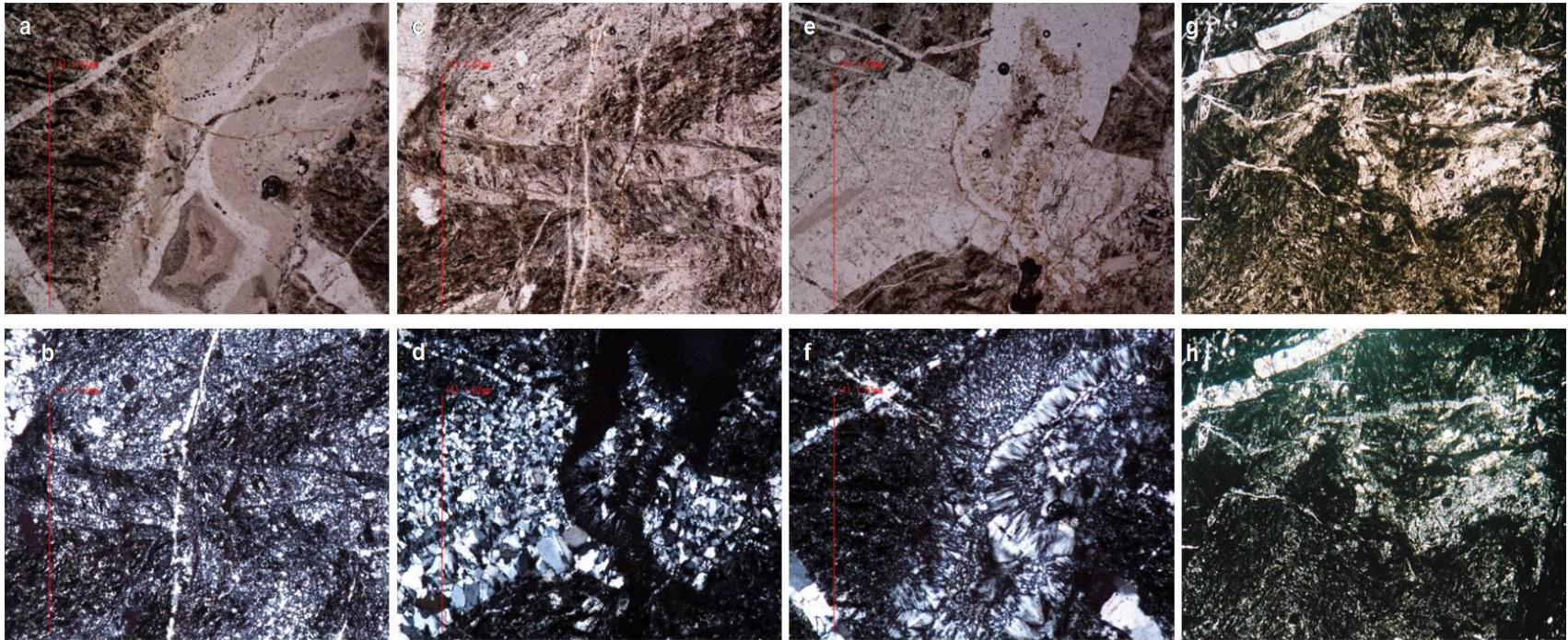
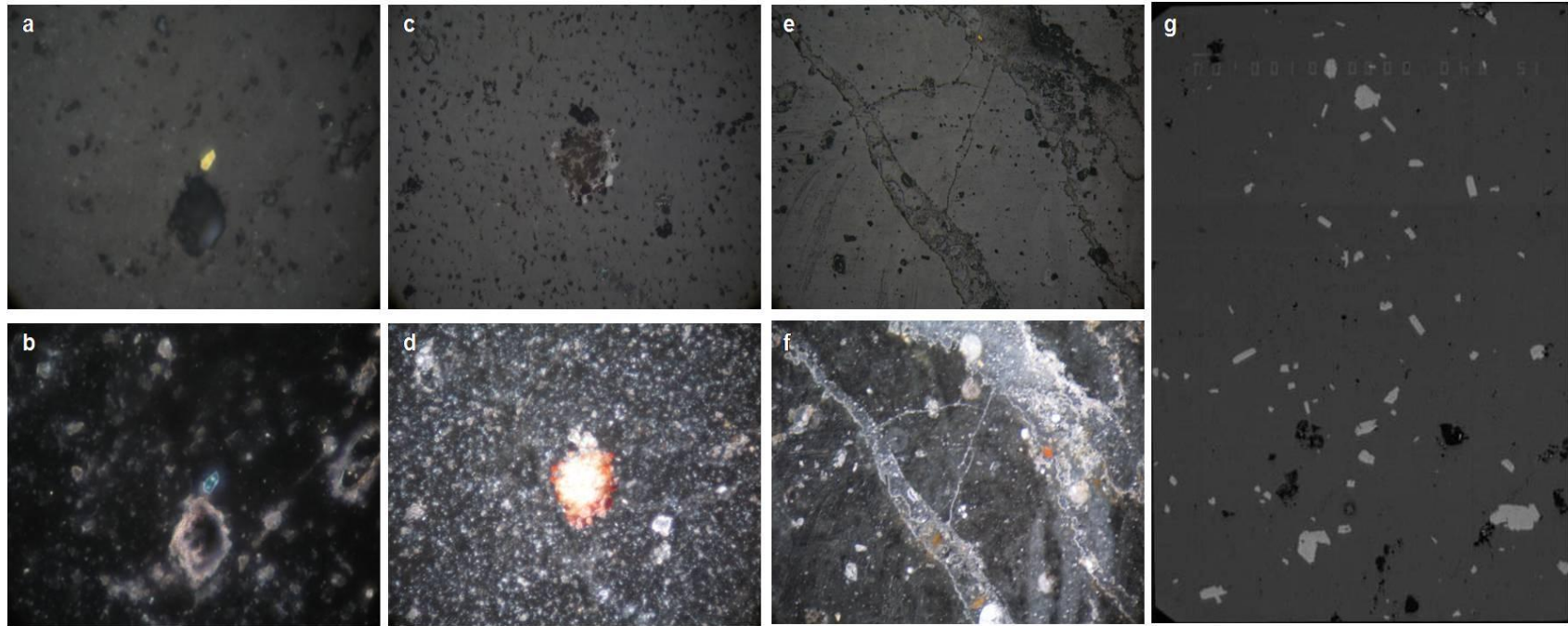


Figura 47. Microscopía con luz reflejada muestra No. 4. **47. g.** Imagen de EPMA de apatitos (granos blancos o brillantes) diseminados en la matriz Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



8.10 MUESTRA No. 6 (BE1004003BCM: TRINCHERA TB17 AFLUENTE QUEBRADA LA CALERA)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de lámina delgada: 6		Localización: Tb17
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Noviembre 2010
1. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo(70%)	Subidiomórficos, inequigranular	esferulitos
Feldespato K (5%)	Fenocristales Xenomorfos	Incluidos de birrefringencia de primer orden
Zircón (5%)	Individuos en pequeños granos asociados a cuarzo y muscovita	En asociación
Muscovita (5%)	Idiomórficos, equigranular	En asociación
Pirita (15%)	Individuos subhedrales y anhedrales	Diseminado
2. Texturas y microestructuras: fanerítica. Presenta fracturas sin relleno y orientación de los granos tabulares		
3. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Granitoide rico en Cuarzo Q = 70; P= 0; A= 5; F= 0; M= 0		
Observaciones: orientación de granos en ciertos sectores, en luz reflejada minerales fantasma coloreados		
Ver Figuras No. 48 – 49		

Figura 48. Microscopía con luz transmitida muestra No. 6. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

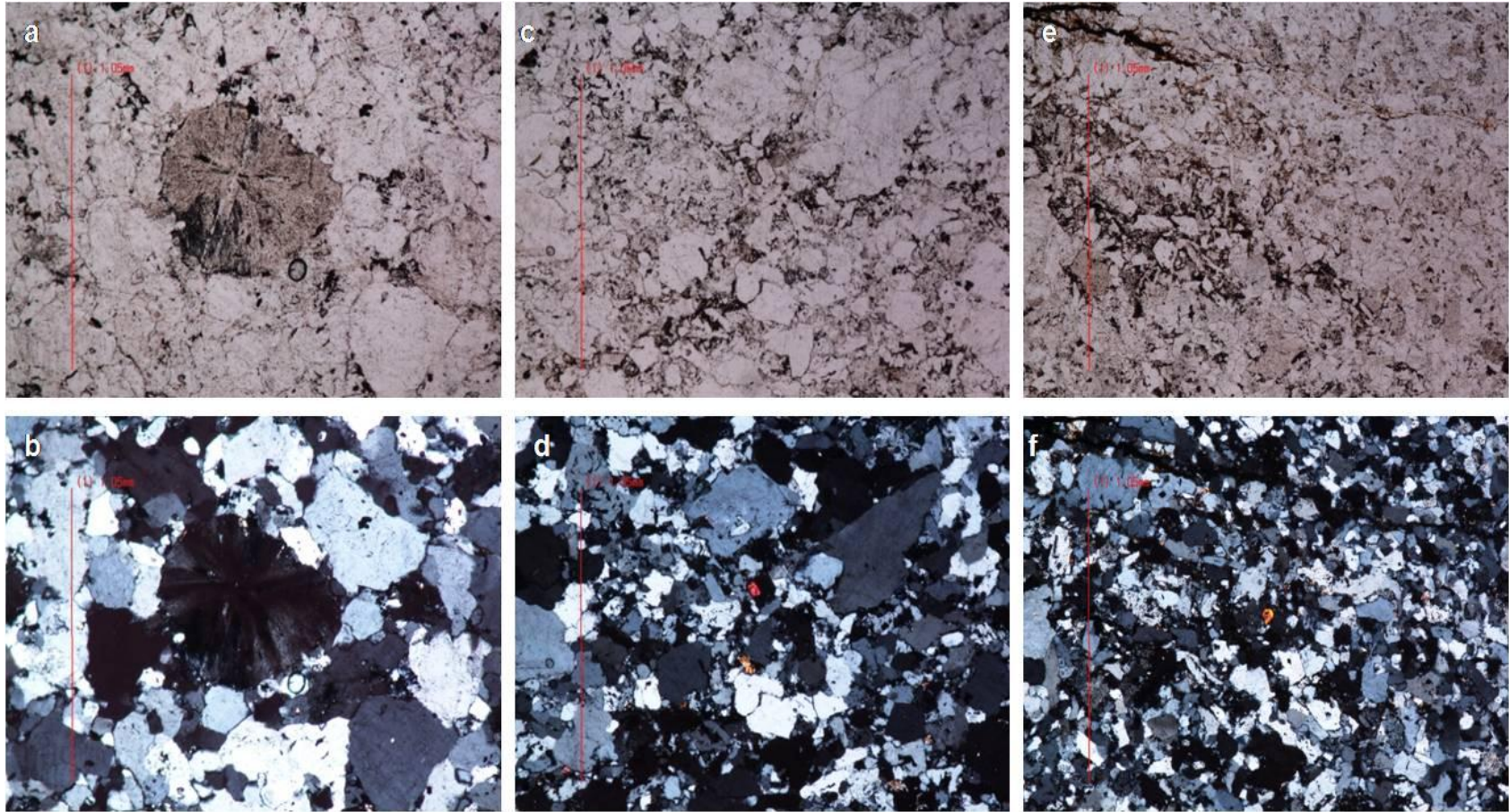
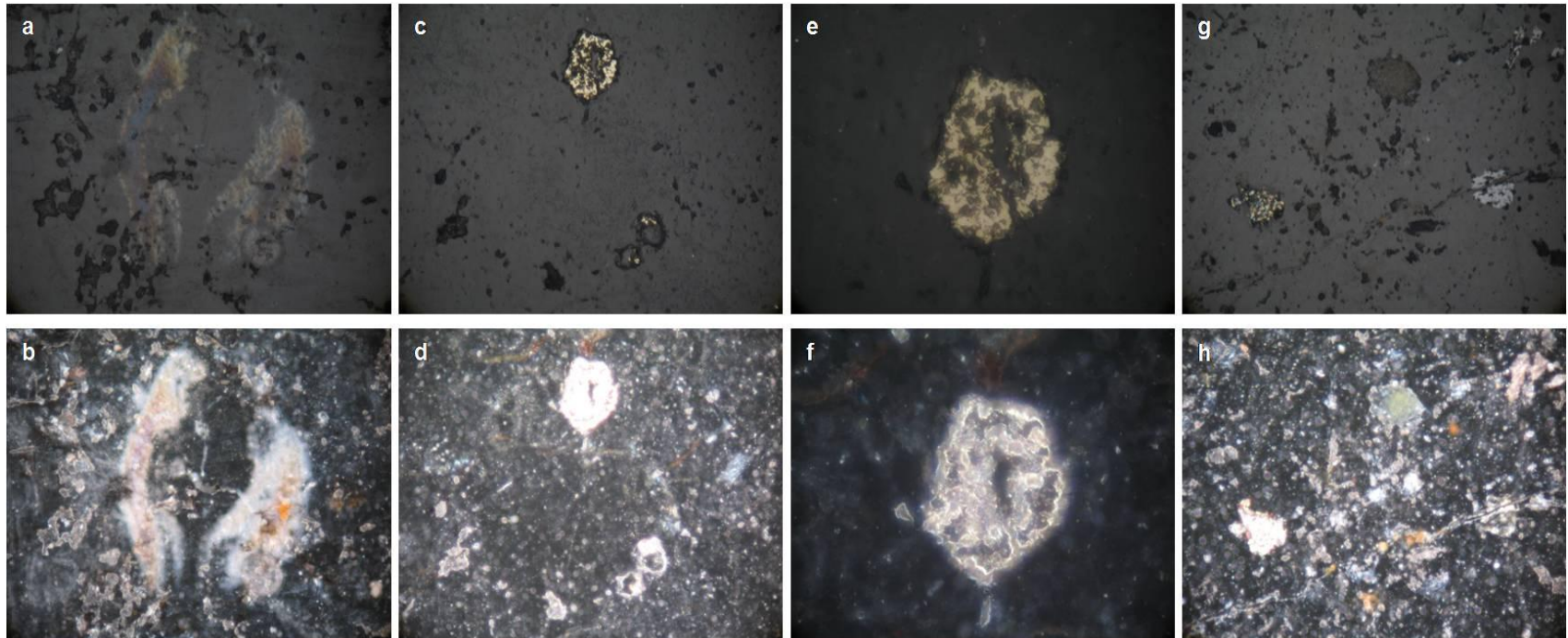


Figura 49. Microscopía con luz reflejada muestra No. 6. Escala lente 5X. 49. E-f. Escala lente 20X. Ver explicación el texto.



8.11 MUESTRA No. 7 (BE1004003ACM: TRINCHERA TB17 AFLUENTE QUEBRADA LA CALERA) VER FIGURAS. 50 – 51 – 52

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de lámina delgada: 7		Localización: Tb17
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Noviembre 2010
1.Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (10%)	Esquelético con textura mirmequítica	Intercrecimientos
Feldespatos Alcalinos (40%)	Esquelético con textura mirmequítica	Feldespatos de K y Ba
Plagioclasa Albita(40%)	Relictos de granos conservando maclas	fenocristales
Apatito (2%)	Subidiomórficos afanítica	Imagen EPMA
Muscovita (2%)	Agregados con colores de 2 orden	Intercrecimientos
Sericita (3%)	Aspecto terroso colores de primer orden	Alteración de muscovita
Zircón (3%)	Micro fenocristales Idiomórficos	Trazas aciculares
Rutilo(Trazas)	Subidiomórficos con incluidos de REE	Tabular fino incluido en feldespatos K
Monazita(Trazas)	Microcristalino, analizado con EPMA	Intercrecido con rutilo
Fosfatos de Y (Trazas)	Agregados tabulares zonados según más o menos contenido de fosforo	Pequeños sobrecrecimientos en el borde de rutilo
2.Texturas y microestructuras:granofírica y mirmequítica perfecta		
3. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Cuarzomonzonita Q = 10; P= 40; A= 40; F= 0; M= 0		
Observaciones: en luz reflejada agregados de goethita euhedrales de tamaño finos y medios. Intercrecimientos de plagioclasa y cuarzo. Alteración de la plagioclasa al Feldespatos de Ba y K. Inclusiones de zircón y rutilo en albitas.		

Figura 50. Microscopía con luz transmitida muestra No. 7. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

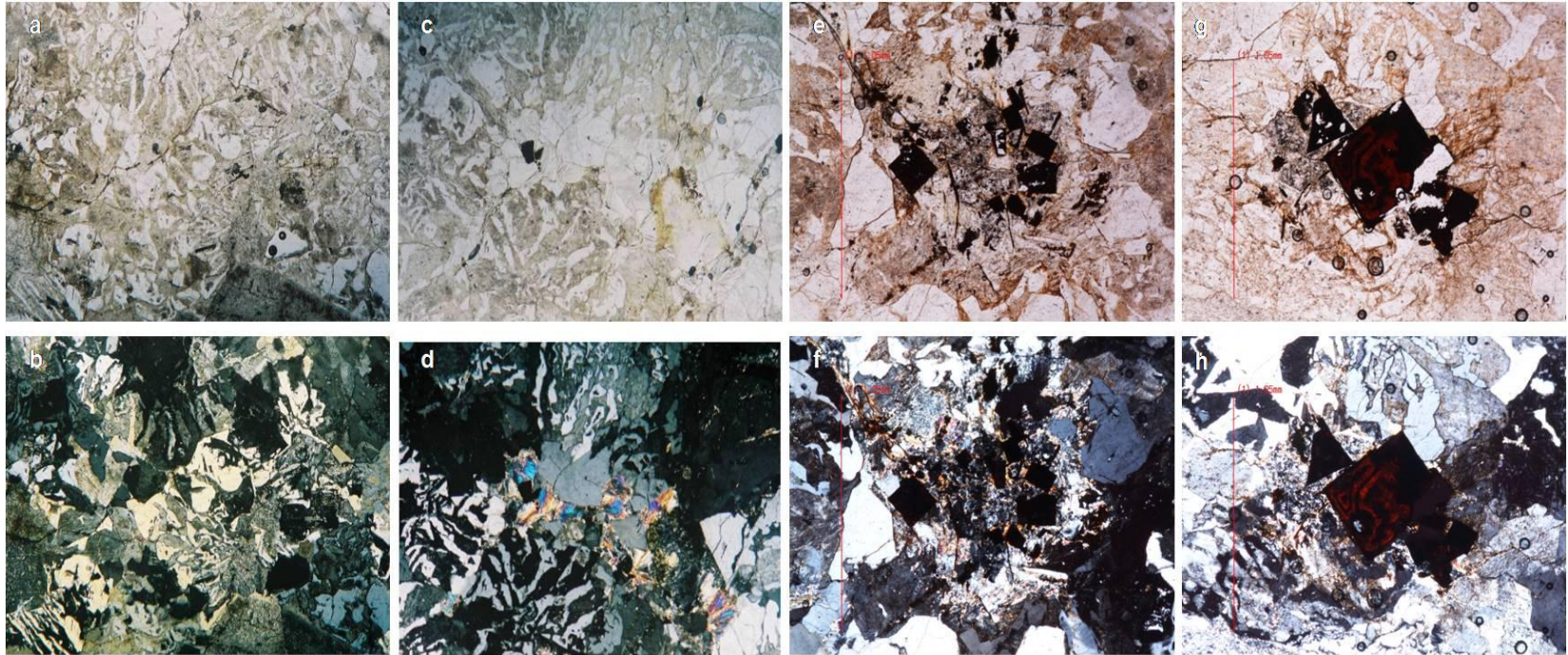


Figura 51. Microscopía con luz reflejada muestra No. 7. Escala lente 5X. 51. a-b. Ensamble de imágenes con lente Escala 20X. Ver explicación el texto.

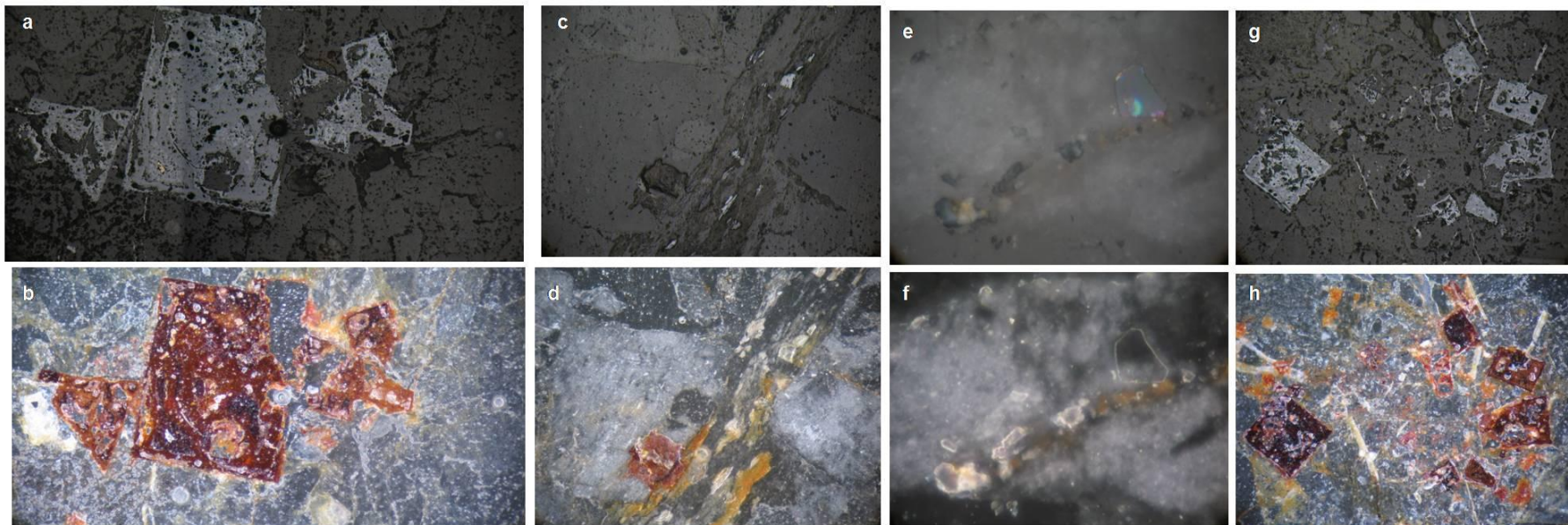
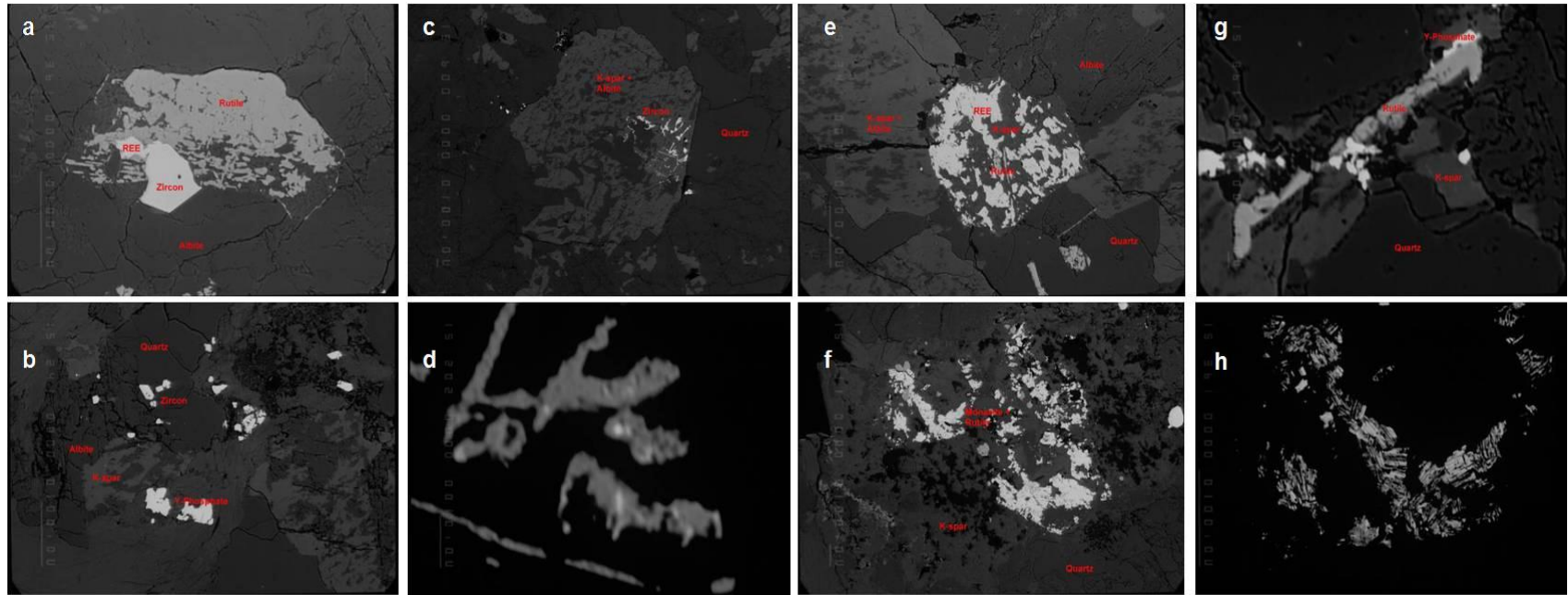


Figura 52. EPMA muestra No. 7. Ver explicación el texto.



8.12 MUESTRA No. 8 (BE1004013CMVEREDA LA RESACA. QUEBRADA LA CALERA)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de lámina delgada: 8		Localización: Quebrada La Calera
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Noviembre 2010
3. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (45%)	Microcristalino	en la matriz y vetillas
Muscovita (3%)	Microcristalino aciculares	Alteradas pasando a sericita
Feldespato K (10%)	Agregados hipidiomórfica fanerítica	En drusa
Plagioclasa (40%)	Subidiomórficos con corona de reacción	diseminados
Pirita (2%)	Individuos idiomórficos y agregados en maclas	Abundante en toda la sección
4. Texturas y microestructuras: Microlítica con vetillas		
4. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Granito rico en cuarzo Q = 45 ; P= 40 ; A= 10 ; F=0 ; M= 0		
Observaciones: en luz reflejada maclas de pirita, y anillos de reacción. Vetilleo de plagioclasas e individuos de apatito isotrópico.		

Figura 53. Microscopía con luz transmitida muestra No. 8. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.

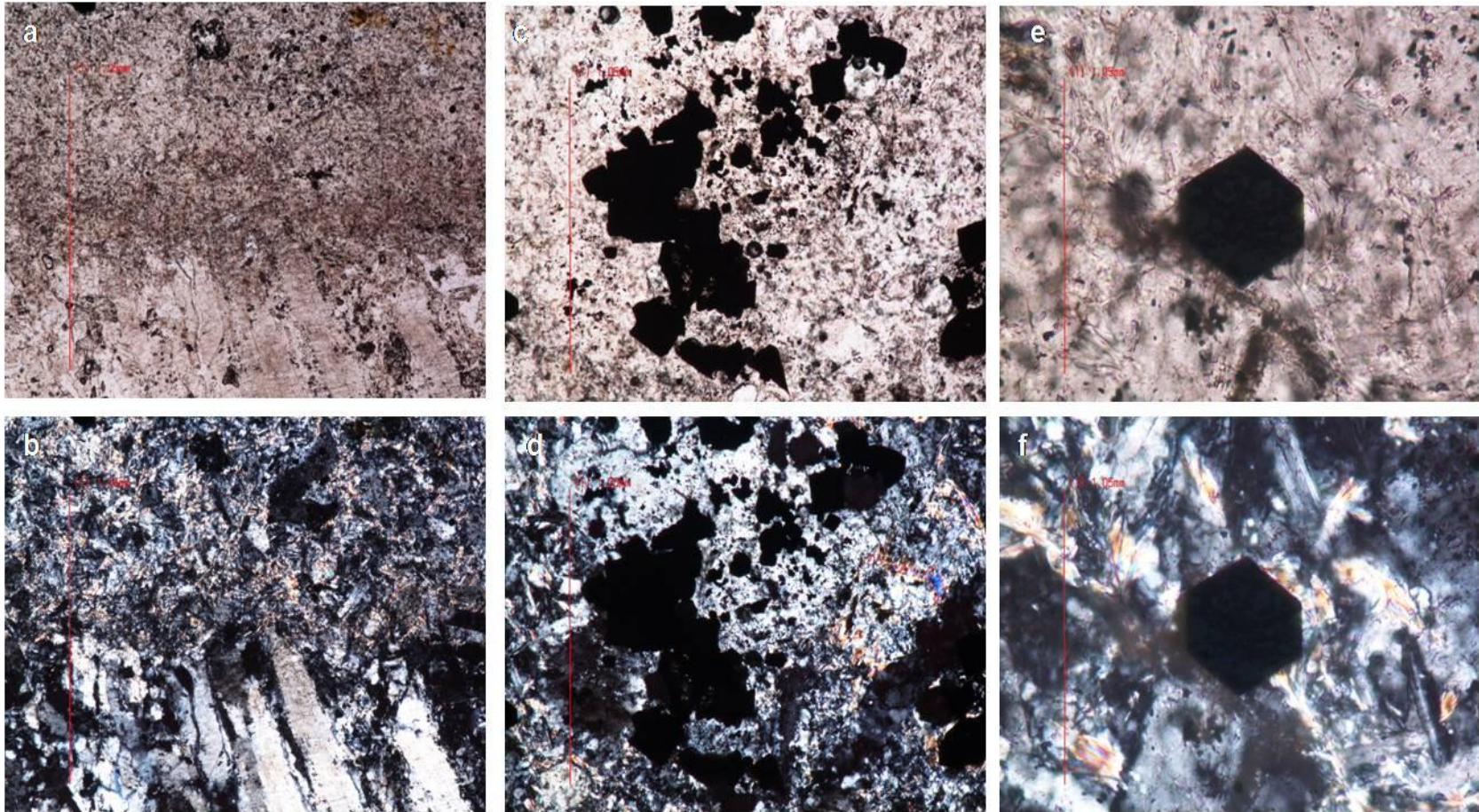
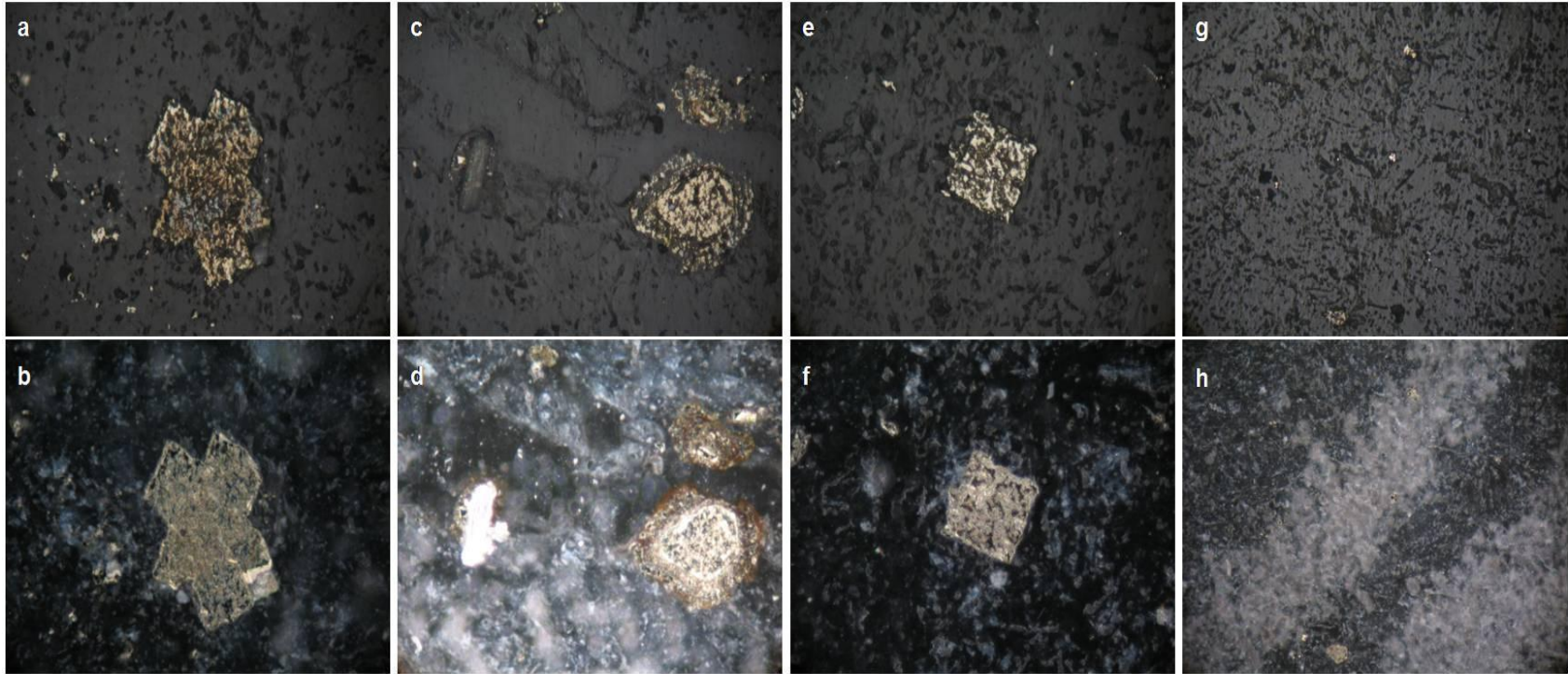


Figura 54. Microscopía con luz reflejada muestra No. 8. Escala lente 5X. Ver explicación el texto.



9. HIPÓTESIS DE TRABAJO PRELIMINAR SOBRE LA GÉNESIS DE LA MINERALIZACIÓN DE FÓSFORO Y URANIO EN EL SINCLINAL DE BERLÍN

Minerales mena: fosfatos, vanadatos y complejos uranilos fosfatados neoformados que según su abundancia son apatito, roscoelita, autunita, metaautunita, cacoxenita, churchita, monazita (REE) e incluidos de REE en los cuarzos.

Minerales ganga: cuarzo detrítico, materia orgánica grafito, calcita, piritita, goethita, hematita, bornita, zircón, muscovita, clorita y rutilo.

Asociación mineral principal: apatito, roscoelita, cacoxenita, autunita, metaautunita y materia orgánica

La mineralización de U, P, V y REE en el depósito del sinclinal de Berlín se hospeda en una secuencia sedimentaria que de base a techo son metaconglomerados, areniscas cuarzosas, fosforitas, limolitas y arcillolitas (*shale*) de edad Valanginiano-Albiano (Naranjo, 1983). En el área de estudio la secuencia es normal e intruida al oeste por el Complejo Ígneo de Samaná (119 ± 10 m.a. K/Ar en hornblenda de Facies gabroide) en Barrero y Vesga, (1976) y al este en inconformidad con el Complejo Cajamarca de edad Paleozoico. Los principales rasgos estructurales son la Falla de Palestina y el sinclinal de Berlín de edad Cretácico tardío. Las rocas presentan un bajo grado de deformación en el área de estudio ubicada al Sur del depósito evidente en la elongación de los cuarzos detríticos, poligonización del cuarzo, lamelas de deformación, disolución por presión y fracturamiento que en la parte Norte es reportado como metamorfismo de bajo grado con temperaturas de hasta 200 °C (Gómez y Lizcano, 1990). La mineralización se hospeda principalmente en el nivel de fosforitas variando a las lodolitas, areniscas y limolitas calcáreas en asociaciones minerales de apatito,

roscoelita, cacoxenita, autunita, metaautunita y materia orgánica en la matriz y como cementos relleno de fracturas y microfracturas que actúan como canales para la percolación de los fluidos mineralizantes y que ocurre en dos generaciones, la primera a través de la porosidad primaria reemplazando el material primario ¿calcáreo? en la matriz y la segunda a través de la porosidad secundaria generada en los canales de la paleoporosidad primaria por fluidos ácidos pH 4 – 5, que a su vez rellenan las micro fracturas aumentando el volumen por el paso de fluidos ¿clorurados?, separando los fragmentos de los granos detríticos y generando un embahiamiento o reemplazamiento incipiente del cuarzo y feldespatos por fosfatos evidente en coronas de reacción en los bordes de los granos. El proceso mineralizante es epigenético y se genera como producto de la remobilización del P, U y V, por fluidos oxidados de baja temperatura (< 200 °C) en un medio ácido que cuando alcanzan las condiciones reductoras producto de la interacción con la materia orgánica aumenta el pH y precipita granos euhedrales de apatito de sección cuadrada, radiales de cacoxenita y fosfatos de hábito tabular y agregados aciculares de minerales de uranio sin ninguna evidencia de transporte así como fosfatos amorfos de roscoelita y autunita de aspecto coloidal y en agregados escamosos o laminares. En los datos de EPMA se evidencia una relación lineal directamente proporcional de P/U que ocurre en fases ricas en Fe. El P en su mayoría es un componente remobilizado por los fluidos hidrotermales y el U podría ser la remobilización del basamento ígneo metamórfico o haber sido extraído de minerales detríticos de U. A partir de los resultados obtenidos se considera que las Facies arenosas con mayor permeabilidad y contenido en materia orgánica son las más favorables para hospedar la mineralización y su estudio estratigráfico permitirá hacer seguimiento a la continuidad de la mineralización. Las Facies calcáreas pueden ser en parte, producto de la carbonatación generada por el transporte del material primario disuelto en la matriz y cemento hallándose sin minerales mena lo que implicaría un proceso epigenético primario que evidencia la disolución inicial y generación de porosidad

secundaria requiriéndose comprobar si el material calcáreo es singenético o epigenético.

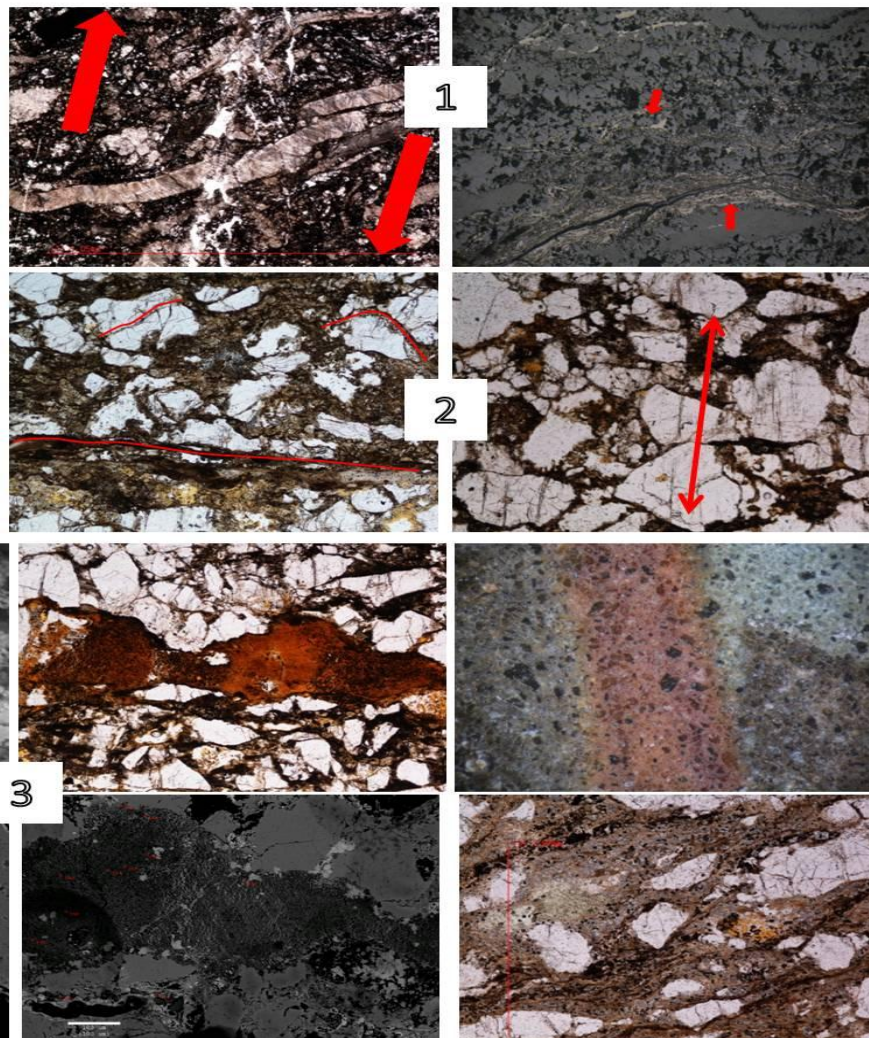
Teniendo en cuenta los dos canales para que se dé la mineralización se propone un nuevo criterio de exploración basado en la continuidad y correlación de las Facies arenosas con alta permeabilidad y ricas en materia orgánica en la secuencia sedimentaria del depósito de Berlín.

Modelo hipotético de la génesis de la mineralización de U, P y V en Berlín

1. Roca primaria posiblemente con matriz y cemento calcáreo, rica en materia orgánica (pirita), fósiles y porosidad primaria de edad Valanginiano Albiano (Naranjo, 1983)

2. Incursión de fluidos ácidos de baja temperatura a través de porosidad secundaria por deformación, efecto de la Falla Palestina durante el Cretácico tardío (Gómez y Lizcano, 1990) y deformación sinclinal, aumento de la paleoporosidad primaria y permeabilidad por disolución por presión, microfracturamiento, disolución de material primario en la matriz posiblemente carbonatos y corrosión o embahiamiento de granos detríticos principalmente Cuarzo y feldespatos por los fosfatos.

3. Mineralización epigenética hidrotermal por fluidos oxidados ricos en U, V y P, precipitación de minerales mena en medio reductor en la matriz, cementos, fracturas y microfracturas.



CONCLUSIONES

Se identificaron y caracterizaron los minerales menay ganga perteneciendo los primeros al grupo de fosfatos, vanadatos y complejos uranilos fosfatados ocurriendo como minerales neoformados que según su orden de abundancia de mayor a menor son apatitoseuhedrales, roscoelita, autunita y metautunita amorfos, cacoxenitaeuhedrales, churchita y monazita (REE) subhedrales e incluidos de REE en los cuarzos detríticos, muy finos a finos ($>5 \mu\text{m}$), moderadamente seleccionados en contactos flotantes y tangenciales. Los minerales ganga son cuarzo detrítico ligeramente deformado con embahiamiento, materia orgánica grafito, calcita, pirita, goethita, hematita, bornita, zircón, muscovita, clorita, rutilo.

La principal asociación mineral consta de apatito, roscoelita, cacoxenita, autunita, metautunita y materia orgánica como reemplazamiento y relleno en la matriz, como material cementante relleno de fracturas y microfracturas con morfologías que reflejan un sub enfriamiento rápido.

Mediante el análisis con (SEM) y microsonda electrónica (EPMA), se caracterizó e identificó la asociación de minerales mena neoformados que ocurre en relaciones texturales de individuos euhedrales ovoides y esféricos y en agregados aciculares y micáceos en la matriz y cemento y contienen según la química mineral una relación lineal U/P en fases ricas en Fe.

El proceso mineralizante es epigenético y se genera como producto de la remobilización del P, V y U, este último puede ser proveniente del basamento ígneo metamórfico o extraídos de minerales detríticos con U y que precipitan con morfologías que sugieren la incorporación de fluidos oxidados hidrotermales de baja temperatura ($<100 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$) ricos en complejos uraníferos fosfatados a través de paleoporosidad primaria en un medio ácido probablemente con pH 4.0 – 5.0

que en condiciones reductoras producto de la interacción con la materia orgánica aumentan el pH y precipitan los minerales mena.

Teniendo en cuenta los dos canales por donde puede ocurrir la mineralización se propone un nuevo criterio de exploración basado en la continuidad y correlación estratigráfica de las Facies más arenosas con alta permeabilidad y ricas en materia orgánica en toda la secuencia sedimentaria del depósito de Berlín.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio estratigráfico para identificar la variación de Facies más arenosas con alta permeabilidad, ricas en materia orgánica que presentarían porosidad primaria disuelta y porosidad secundaria resolviendo la variación que presenta la mineralización en los niveles de fosforitas, lodolitas y limolitas calcáreas.

Se requiere de un análisis detallado de las rocas calcáreas que rodean las zona mineralizada para conocer si ocurrió carbonatación producto de un proceso epigenético primario proveniente de la disolución de la matriz calcárea de la roca original que fueron reemplazados por los fosfatos ricos en U y V.

Realizar un estudio de isotopos de Deuterio y Oxigeno para conocer el tipo de fluido mineralizante.

Investigar el grado de diagénesis de la secuencia sedimentaria para definir el proceso predominante en la génesis del depósito.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRERO D. y Vesga C., 1976. Geología de la Plancha 188 La Dorada. ESC 1:100000. Ingeominas.
2. CASTAÑO, R. 1979. Informe de fin de campaña.1979. Permiso No. 2. Berlín. Anexos. Instituto de Asuntos Nucleares (IAN). Minatome Colombiana Ltda. 33 p.
3. CEDIEL, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres, 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815– 848.
4. CONEY,P.J., Jones, D. L., and Monger, J.W.H.,1980.Cordilleran suspect terranes. Nature 288. pp 329 – 333.
5. CUNEY Michel., 2010 Febrero. Evolution of Uranium Fractionation Processes through Time: Driving the Secular Variation of Uranium Deposit Types. Economic Geology,v. 105, pp. 553–569.
6. CUNEY Michel., 2010 Octubre. Uranium mineralization processes. Society of Economic Geologists. Conference. Universidad Industrial de Santander. U3O8 CORP.
7. DAHLKAMP, F. J., 2009. Uranium Deposits of the World. Asia. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.pp. 6 – 8.

8. Disponible en Internet:
<https://www.ucursos.cl/ingenieria/2007/1/GL55C/1/.../3902>
9. Disponible en Internet: Google Earth. Versión 6.0.2.2074. 2001.
10. Disponible en Internet: www.neptune.gsfc.nasa.gov
11. Disponible en Internet: www.msu.edu
12. Disponible en Internet: www.u3o8corp.com
13. FERRANDO, U. R., 2007. Los Andes del Norte. Departamento de Geología, FCFM, Universidad de Chile.
14. FILIPPELLI G., 2008. The global phosphorous cycle: past, present, and future. Elements. Vol. 4, p. 89-95.
15. FOLK, R. I., 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemp. hill. Publ. Co., Texas, 182 p.
16. GARCÍA R., C. A. 2007. Manual de prácticas de petrología metamórfica. Escuela de Geología. Facultad de Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Ediciones UIS. 88 p.
17. GARZÓN, T., 1984. Síntesis de los trabajos Geológicos-Mineros realizados en el prospecto Urano-Fosfático de Berlín-Caldas. Instituto de Asuntos Nucleares. 36 p.
18. GÓMEZ G. P. D. y Lizcano P. M. A., 1990. Estudio tectónico – estratigráfico de la franja sedimentaria Cretácea de Berlín, Caldas, Cordillera Central. Tesis

- pregrado Geología. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología.
120 p.
19. GONZALES, O. L., Vásquez L. E., Muñoz R., Gómez H., Parrado G., Vargas S. S., 2008. Exploración de recursos energéticos. Exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivata (Boyacá). Informe final. INGEOMINAS.
20. GÜIZA, S., 1986. Depósitos de Uranio y Torio. Perspectivas en Colombia. Ingeominas.
21. GUPTA, C.K., 2003. Chemical Metallurgy. Principles and Practice. Wiley – VCH Verlag. Pag.71-75.
22. IAEA, 1983. Prospección de Uranio, Colombia. Conclusiones y recomendaciones. IAEA/UNDP-COL-76-031-TR TERMINAL REPORT. Organismo Internacional de Energía Atómica.
23. KHOLODOV, V.N., 2003. Geochemistry of Phosphorus and Origin of Phosphorites: Communication 2. Sources of Phosphorus in Continents and Genesis of Marine Phosphorites. Lithology and Mineral Resources, Vol. 38, No. 6, 2003, pp. 477–494. Traducido de: Litologiya i Poleznye Iskopaemye, No. 6, 2003, pp. 563–583.
24. MACKENZIE, W. S., Adams, A. E. 1997. Atlas de rocas sedimentarias. MASSON. 106 p.
25. MANTILLA, L.C., 2003. Guía de laboratorios de petrología ígnea. Escuela de Geología. Facultad de Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Ediciones UIS. 124 p.

26. MARSHALL D., Lyn A., Hamid M. 2004. Ore mineral atlas. Geological Association of Canada. 112 p.
27. MATTHEW J. Kohn, Rakovan J., Hughes J. M., Editors, 2002. PHOSPHATES Geochemical, Geobiological, and Materials Importance. Reviews in mineralogy and geochemistry. Volume 48. Mineralogical Society of America and The Geochemical Society.
28. MCKELVEY V. E., Everhart D. L., Garrels R. M., 1955. Origin of uranium deposits. Economic Geology. Vol. 50th Anniversary. 465 – 526 pp.
29. MELGAREJO, J-C., 2003. Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. Vol. 1 -2. Universidad de Barcelona. España. 1076 p.
30. MUÑOZ U. C.A., 1983. Determinación del potencial uranífero de la alaskita de Samana departamento de Caldas – Colombia. Tesis de pregrado Geología. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, departamento de Geociencias - Instituto de Asuntos Nucleares. Bogotá. 82 p.
31. NARANJO H., J.L., 1983. Investigación del potencial uranífero en los shales negros del sinclinal de Berlín, Departamento de Caldas. Tesis de pregrado Geología. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, departamento de Geociencias - Instituto de Asuntos Nucleares. Bogotá. 98 p.
32. NELSON WOLFANG, 1982. Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia: Sección entre Ibagué y Armenia. Boletín Geológico. Vol. 10. No. 1/3. pp. 87 – 116.
33. PARDO TRUJILLO A., Moreno Sánchez M., Gómez Cruz A., 2002. Estratigrafía de algunos depósitos del Cretáceo superior en las cordilleras

Central y Occidental de Colombia: implicaciones regionales. Revue internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie tropicales International Journal of Tropical Geology, Geography and Ecology. Número Especial: 26/2. 113p.

34. POTY, B. L'urium. Géochronique.No.113. 13 – 54 pp. Marzo, 2010.
35. PRACEJUS, B., 2008.The ore minerals under the microscope.An optical guide.Elsevier.875 p.
36. RENAUD, 2010.A Petrographic and Microprobe Investigation of the U3O8 Corp. Colombia Project, South America.Renaud Geological Consulting Ltd. Canada.53 p.
37. RÍOS, C. A., Castellanos, O. M. 2005. Atlas de minerales vistos bajo el microscopio de luz transmitida. Ediciones UIS. 98 p.
38. SCHOLLE, A.P., Ulmer-Scholle, S.D. 2003.A color guide to the petrology of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis. AAPG, Memoir 77. 459 p.
39. TORO, Gloria E., 1989. Caracterización del volcanismo de San Diego y estudio de los depósitos de San Diego (Caldas) y de Nariño (Antioquia), Colombia. Memorias del V Congreso Colombiano de Geología. Vol. 1. Bucaramanga. P. 419 - 439
40. TOUSSAINT, J.F., 1996. Evolución geológica de Colombia durante el Cretácico: Medellín, Universidad Nacional de Colombia, p. 277.

41. TOUSSAINT y Restrepo, 1982. Magmatic evolution of the northwestern Andes of Colombia. *Earth Science Reviews*, No. 18, 205-213.
42. TRAPPE Jörg. 2001. A nomenclature system for granular phosphate rocks according to depositional texture. *Sedimentary Geology*, Vol. 145, No. 1, pp. 135-150(16).
43. UPME. 2005. Análisis de la estructura productiva y mercados de la roca fosfórica. Informe final contrato 1517-08-2005. Unión temporal GI. Georecursos Bogotá, D.C. 123 p.
44. USNARSKI, G., 1979. Informes mensuales de campaña. MINATOME.
45. U3O8 Corp. 2011 – 2010 – 2008. Informes internos. www.u3o8corp.com
46. VELANDIA, F. 2010. Exploración y potencial del subsuelo Colombiano. Memorias Feria Minera 2010. Ingeominas. www.ingegominas.gov.co

ANEXOS

Anexo A. Programa de Exploración Berlín

Primera fase, trincheras ZONA SUR

Partiendo del hecho que las zonas donde se adelantan trabajos de prospección suelen tener cobertura vegetal y un perfil de suelo variable, es importante realizar destapes de dicha cobertura para apreciar la roca sin alterar, que permitan realizar una completa descripción respecto a características estratigráficas, sedimentológicas, petrográficas, mineralógicas y estructurales entre otras, necesarias para evaluar el potencial del depósito y realizar modelos geológicos. Así las trincheras son un tipo de excavación que intenta cortar de manera perpendicular el espesor del nivel mineralizado para obtener no solo información geológica pertinente, sino también para realizar los muestreos.

En el caso de la prospección de uranio la selección del sitio de excavación puede realizarse de dos maneras. La primera de ellas es que se llegue al sitio de la excavación como consecuencia de una prospección radiométrica en campo que indica valores radiométricos anómalos y se requiere hacer un destape de la cobertura vegetal. La otra situación es definir una serie de puntos sobre una base geológica y topográfica, sobre los cuales se desea hacer un control de la mineralización. El primero de ellos se define en campo, el otro en la oficina.

Teniendo en cuenta información histórica, la programación de las labores se realizara desde la oficina (**Ver Figura 1**).

Por otro lado se realizarán transectas perpendiculares al eje del sinclinal con espaciamientos cada 200 m. El objetivo de estas es tener un control sobre ambos flancos del sinclinal y por tanto realizar trincheras en la mineralización aflorante en cada flanco.

Excavación de la trinchera

La localización de las transectas y las trincheras a realizar, serán cargadas en GPS de buena precisión, esto con el fin de ubicar la capa anómala para la realización de la trinchera en rangos de precisión menores a 15 m. Es prioritario tener la certeza de ubicar la anomalía en el contacto entre los

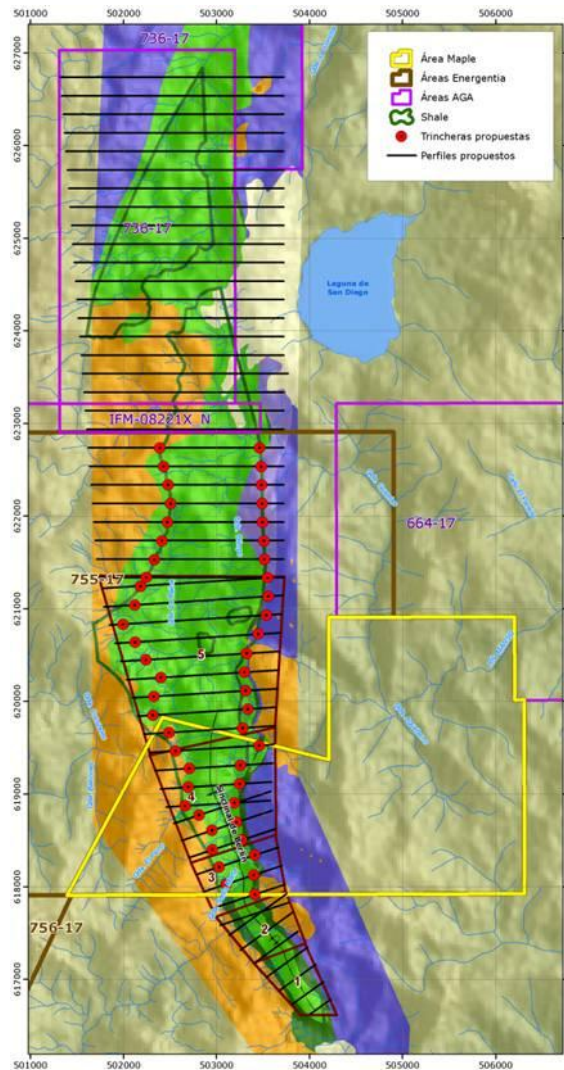


Figura 1. Programación trincheras sector Sur.

paquetes de lutitas y las areniscas antes de realizar la trinchera debido a que existen otras capas anómalas pero de menor valor y sin interés.

Equipo necesario (**Figura 2**):

- Pica
- Pala
- Barra de acero
- Machete
- Costales de lona
- Guantes (para cada persona involucrada en el procedimiento)
- Máscaras de protección respiratoria (para cada persona involucrada en el procedimiento)
- Gafas plásticas de protección (para cada persona involucrada en el procedimiento)
- Cinta reflectiva



Figura 2. Implementos necesarios para la excavación de trincheras.

Las dimensiones de la trinchera serán variables y dependerán de las características de la roca y del nivel anómalo a muestrear, por tanto estará condicionado a: (1) la resistencia de la roca, (2) la disposición de las capas y (3) la topografía en el sitio (**Figura 3**). Sin embargo se estima que la trinchera promedio

tendrá 10 m de largo, 1.5m de ancho y 2 m de profundidad. Cuando las características de pendiente topográfica y orientación de las capas lo exijan, la trinchera puede tener un diseño escalonado en el cual ningún escalón debe superar los 70 cm de alto.

La trinchera debe destapar el espesor total del nivel anómalo y en lo posible llegar hasta la roca sin alterar, aunque debido a la intensa meteorización de las rocas de la zona es posible que no se llegue a ella.

*Dada la topografía abrupta del sector, el material que se remueve de las trincheras se debe depositar en costales de lona ya que este material será utilizado posteriormente para tapar las mismas.



Figura 3. Ejemplos de trincheras

En todo caso para prevenir y mitigar el impacto sobre el ambiente que puede generar la remoción vegetal y la apertura de una trinchera se deben consultar las fichas minero-ambientales relacionadas con:

- Cuerpos de agua
- Material particulado y gases.
- Manejo de accesos.

- Manejo de residuos sólidos.
- Manejo de fauna y flora.

Definición de rangos con valores radiométricos anómalos

Los denominados valores anómalos serán aquellos valores radiométricos que sean el doble o más grandes que el *background* de las rocas circundantes a donde está la mineralización.

Herramientas (Figura 4)

- Centellometro o espectrómetro
- Decámetro o cinta métrica
- Colimador de plomo
- Aerosol



Figura 4. Elementos necesarios para marcar intervalos radiométricos.

*Se hace prioritario trabajar con espectrómetros SPP2 o en su defecto, los equipos convencionales con colimadores de plomo, con el fin de evitar errores en la radiometría por efectos de masa. Adicional a esto, cada día se debe comprobar que los centellómetros estén calibrados, realizando mediciones con los aparatos sobre los recipientes de calibración.

Tabla 1. Rangos radiométricos establecidos para la toma de muestras en la primera campaña en Berlín.

RANGO O INTERVALO RADIOMETRICO	RADIMETRÍA MENOR (c/s)	RADIMETRÍA MAYOR (c/s)
1	400	800
2	800	1200
3	1200	1600
4	1600	2000
5	2000	>2000
6	1600	2000
7	1200	1600
8	800	1200
9	400	800

En la campaña se van a tomar unos rangos o intervalos radiométricos que permitan definir en próximas campañas el tenor de corte. Por eso para la campaña en Berlín se va a tomar una muestra de cada rango sin importar que el espesor (**h**) sea menor a 0,5 m. **h**= espesor. Será la distancia medida perpendicularmente entre líneas imaginarias que limitan cada rango radiométrico (**Figura 5**).

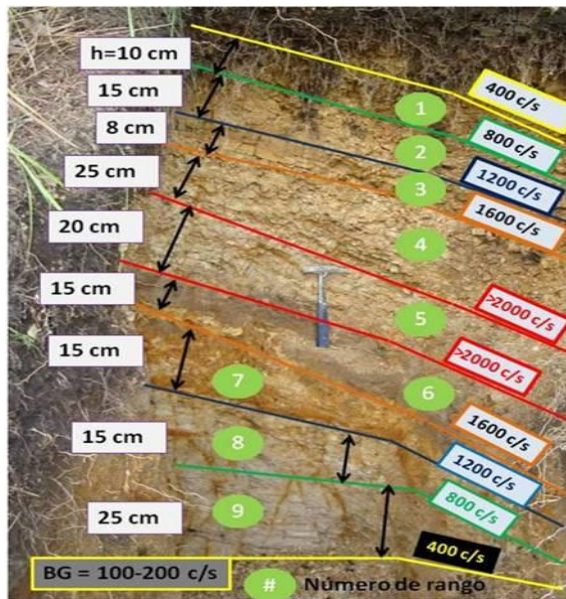


Figura 5. Se muestra un ejemplo de una trinchera en donde se han definido los valores radiométricos y los espesores (h) que tiene cada rango. Para la campaña todas las trincheras se van a muestrear como se indica en la figura sin importar el espesor del rango, es decir si el rango 3 (entre 1200 y 1600 c/s) solo tiene un espesor de 5 cm, se debe muestrear. En próximas campañas se definirán nuevos rangos y se determinarán espesores mínimos a muestrear basándose en el tenor de corte y en la curva de calibración.

IMPORTANTE:

La numeración de 1 a 9 de los rangos se realiza desde tope hacia la base de la secuencia estratigráfica muestreada. Por esta razón es de vital importancia reconocer si la secuencia está dispuesta de manera normal o está invertida. Así el rango 1 será el nivel más joven de la secuencia sedimentaria y el 9 el más antiguo, sin importar la disposición de las capas.

Tenor de Corte: Se estima el uranio de potencial interés económico.

Como dichos tenores se definen en ppm, en la campaña se comenzará a realizar una gráfica de calibración (**Figura 6**) la cual se obtiene comparando los resultados

de laboratorio (en ppm) de cada muestra y su correspondiente valor radiométrico (c/s) tomado de las bolsas con un contenido de muestra de 2 Kg mediante centellómetros con colimador de plomo. Para que la gráfica sea más realista lo ideal es hacer las mediciones radiométricas en bolsa siempre con el mismo espectrómetro.

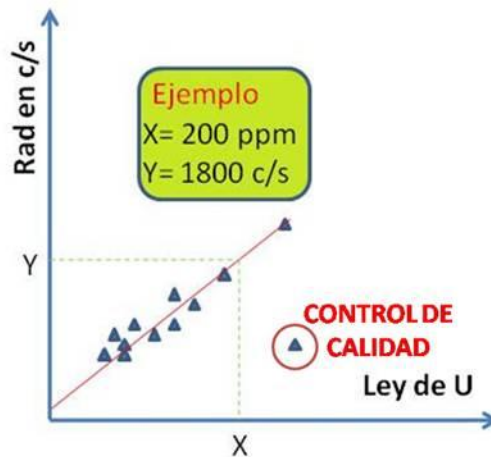


Figura 6. Gráfica de calibración. Se muestra un ejemplo del tipo de gráfico que se debe generar después de relacionar los valores de las muestras en campo (Y) (medidas en el tarro de muestreo en c/s) versus los tenores (X) de uranio para cada muestra arrojados por los análisis químicos de laboratorio.

CONTROL DE CALIDAD

En caso de obtener valores anómalos que estén fuera de la curva de calibración será necesario tomar de nuevo la radiometría de la muestra dentro del recipiente de calibración. En caso que la muestra continúe por fuera del rango estipulado se deberá informar al laboratorio para la corrección del análisis químico.

Procedimiento de muestreo en una trinchera

La muestra de canal se realizará de la siguiente manera: de 3 a 5 cm de profundidad; entre 10 y 15 cm de ancho; y la longitud será el espesor del nivel muestreado dado por el rango o intervalo de radiometría establecido.

Elementos necesarios: (**Figura 7**)

- Cincel
- Martillo, porra o mazo
- Bolsas de muestreo
- Tarjetas de muestreo
- Marcadores resistentes al agua
- Gafas de protección (ver figura 1)
- Máscara de protección respiratoria (ver figura 1)
- Guantes (ver figura 1)
- Cinta pegante



Figura 7. Algunos elementos necesarios durante el muestreo de una trinchera.

El material que se desprende mediante el cincel se irá recogiendo en la bolsa de muestreo de 7 kilos. Esta labor debe ser realizada por dos personas, la que sostiene la bolsa y la que golpea con el cincel la roca, ambas utilizando la debida protección (guantes, gafas y mascarera con filtros). El contenido representará una

muestra homogénea de un intervalo de roca. Es importante mencionar que dicho canal debe cortar perpendicularmente al buzamiento, buscando el espesor real (Ver figura 8).



Figura 8. Muestreo en canal dentro de la trinchera, nótese que el canal corta perpendicularmente los estratos.

Una vez definidos los rangos de valores anómalos se procede a tomar las muestras teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- El muestreo en la trinchera se debe realizar de abajo hacia arriba para evitar la contaminación de las muestras por el material desprendido y de menor a mayor radiometría.
- De cada muestra tomada en canal (aproximadamente 9 muestras por trinchera en la primera campaña) se deben tomar 6,5 kg de material los cuales se dividirán de la siguiente manera:
 - 1 muestra para análisis químicos. Entre **0,5 kg** cuando no se necesita duplicado **1 kg**; tanto si la muestra va a tener **duplicado** (análisis realizado en un solo laboratorio dos veces sobre la misma muestra para control de calidad del laboratorio) y/o la muestra es para **dobles análisis**

(análisis realizado en dos laboratorios diferentes sobre una misma muestra para control de calidad del laboratorio); **Ver tabla 2.**

- **1 Muestra para Calibración** la cual llenara el volumen del un recipiente escogido como estándar. **(2 kg).**
 - **1 Muestra para Compósitos** que tendrá 3,0 kg y se almacenarán en el campamento.
 - **Muestra para realizar el compósito I (1,7 kg)**
 - **Muestra para realizar el compósito II (0,85 kg)**
 - **Muestra para realizar el compósito III (0,4 kg)**
-
- Por cada trinchera obtener la relación de peso de cada rango tal y como se muestra en la **Tabla 2.**
 - En caso de que alguno de los rangos tenga más de 1 m de espesor, se debe dividir en varias muestras teniendo en cuenta que ninguna muestra en canal debe ser mayor a 1m. Por ej: si el rango 4 (1600 y 2000 c/s) tiene 1,2 m, lo ideal sería dividirlo en dos canales, cada uno de una longitud de 0,6 m. el rango hacia el tope de la secuencia sería 4A y el de la base 4B.
 - Los rangos muestreados deben ser consecutivos y por ningún motivo deben quedar vacíos entre muestras.
 - Si aparte del canal se requiere tomar una muestra de un sector en particular (ej: vena, fractura, costra de óxidos, etc) se puede hacer.
 - Para cada muestra se debe llenar una ficha de muestreo de la manera como se muestra en el anexo.
(Ver anexo tarjeta de muestreo).

EJEMPLO TRINCHERA No. 1

MUESTRA	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
ANÁLISIS QUÍMICOS (kg)	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5
TARRO (DUPLICADO) (kg)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
COMPÓSITOS (kg)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
SUBTOTAL PESO (kg)	6	6,5	6	6	6,5	6	6	6	6
TOTAL PESO MUESTRAS POR TRINCHERA (kg)	55								

	Duplicado
	Doble análisis

Tabla 2. Resumen de los tipos de muestras y peso que se deben obtener en cada trinchera catalogadas por rangos radiométricos solo para la primera campaña.

Relleno y cierre de una trinchera

A medida que se va excavando la trinchera, el material suelto se debe ir depositando en costales (preferiblemente biodegradables). En donde se vea la necesidad dependiendo de las condiciones del suelo y de la pendiente topográfica, se debe construir un trincho en la cota más baja de apertura de la trinchera, con el fin de evitar que el material sacado durante la apertura de los huecos se deslice y se pierda, lo que dificultaría el relleno de la trinchera.

Los costales rellenos con el material de la trinchera se deben disponer en las cercanías de la misma, teniendo en cuenta que no queden en un terreno inestable para evitar su deslizamiento. Así en el momento que se decida cerrar la trinchera se utilizará el mismo material que se extrajo de ellas para cerrarlas. Si los costales son de material biodegradable se pueden depositar en el hueco abierto a manera de relleno. Si no lo son, solo el material recogido en ellos se debe volver a depositar en el hueco.

Homogeneización y distribución del material para muestras

Este es un procedimiento que requiere mucho cuidado y debe ser realizado a conciencia por la persona encargada. Tiene como finalidad obtener una cantidad específica de material para cada muestra y que sea representativa del rango radiométrico muestreado.

La homogeneización, cuarteo, selección y peso de las muestras no se realizará en el mismo sitio de las trincheras en campo, dado que esta es una labor que lleva tiempo y cuidado y, teniendo en cuenta además que las pendientes pronunciadas dificultarían todos estos procedimientos. Por tanto estas labores serán realizadas en un sitio adecuado cerca del campamento que tenga servicios básicos, agua y luz.

Como ya se ha mencionado en cada trinchera se van a muestrear 9 rangos radiométricos (**ver tabla 2**) y el procedimiento que se describe a continuación se debe realizar para cada rango, es decir que al menos se debe realizar 9 veces por trinchera.

El técnico debe trabajar siempre de a una trinchera a la vez. Una vez finalice, comenzará con el procedimiento para las muestras de las otra trinchera, pero para eso debe haber lavado correctamente los implementos necesarios para la homogeneización y cuarteo de las muestras.

1- Verter el material sobre un plástico o una lona de manera que no se mezcle con otras partículas del suelo o de tierra. Esta lona se debe sacudir entre rango y rango pero se debe lavar muy bien cuando se va a trabajar con muestras de otra trinchera. Además para evitar contaminación se debe comenzar el proceso con las muestras de menor rango (primero las tomadas entre 400 y 800 c/s hasta finalizar con las tomadas entre 2000 y 2000 c/s). Ese material se

debe revolver con pala y triturar con un pisón (herramienta manual o con molino) hasta homogeneizar, con el fin de que quede la roca en partículas de tamaño y distribución más o menos uniforme.

- 2- Los 6,5 kg de material de cada muestra, ya homogeneizados se deben reunir sobre la lona a manera de torta, dividir en cuatro y tomar 2 partes opuestas que se deben hacer pasar por el separador (**cuarteador ver figura 9**).
- 3- Del material que queda en una de las bandejas se extraen 0,5 kg que se empacaran en la bolsa de muestreo correspondiente para ser enviada al laboratorio para análisis químicos y por lo tanto debe llevar los tres desprendibles de la tarjeta de muestreo con el código. Este mismo procedimiento se repetirá en caso de tener duplicado o doble análisis.
- 4- Se seleccionará también 2 Kg del material restante en las bandejas, los cuales se guardarán en bolsas separadas con su correspondiente identificación. Esta muestra será llamada Muestra de calibración. Se realizará una medición radimétrica con colimador de plomo sobre la muestra vertida dentro de la bolsa, la cual va a servir para realizar la curva de calibración, teniendo la precaución de que no haya cerca material que pueda afectar la medida. Este valor se debe consignar en las tarjetas de muestreo. Esta muestra se almacenará inicialmente en una bodega cercana al campamento. Además de la función antes mencionada esta muestra brindará material de respaldo en caso de que por alguna circunstancia así se requiera.
- 5- El material restante (aproximadamente 3,5 kg) se guarda en una bolsa; esta bolsa se cierra con un zuncho y se le cuelga una de las láminas de aluminio con su correspondiente identificación (código de la muestra más las letras CP al final, ejemplo UC0607CP). La muestra se debe enviar a Bogotá y almacenar en la bodega para cuando se necesite preparar las muestras de compósitos.



Figura 9. Cuarteador o separador visto de lado y desde arriba. El material que se vierte sobre la bandeja superior se divide en 2 bandejas.

Anotaciones de campo

Las observaciones y mediciones realizadas en la zona descubierta por la excavación se deben consignar en la libreta de campo y deberían incluir la siguiente información.

- Ubicación con GPS
- Esquema de planta y perfil de la trinchera donde se especifiquen las dimensiones de largo, ancho y profundidad de la excavación.
- Orientación de la trinchera como se orienta una línea en planta, además de distancia y dirección (cuando se pueda) a puntos fijos tales como, caminos, vías, casas, quebradas entre otros.
- Una descripción del material removido en la excavación.
- Descripción de los tipos de roca descubiertos por la trinchera que incluya:
 - Tipo de roca, mineralogía (minerales primarios y secundarios), estructuras sedimentológicas presentes o esquistosidad, color.
 - Relaciones estratigráficas, fallas, diaclasas, fracturas

- Gráficamente ubicar las líneas de cambio radiométrico con sus valores respectivos, y las de cambio litológico, que pueden o no coincidir, además ubicar las muestras con su respectivo código
- Con toda la información anterior y en oficina se pueden generar pequeñas columnas estratigráficas que indiquen las litologías, rangos radiométricos, ubicación de muestras y otras observaciones.

FORMATO TRINCHERAS


Este corresponde a un archivo de Excel, en donde se van a consignar todas las observaciones relevantes con la descripción de la trinchera. Está compuesto por tres hojas, la primera es la hoja de Excel como tal, la segunda se muestran las abreviaturas y definiciones que se emplearán para llenar los campos de la tabla y la última es una columna estratigráfica y radiométrica de la cual cada geólogo debe llevar a campo varias hojas impresas para dibujar y anotar las descripciones pertinentes relacionadas con las rocas muestreadas.

FORMATO WAYPOINTS

Es un formato de Excel compuesto por dos hojas. La primera es la tabla con los campos a llenar y la otra es la descripción de cada campo con un listado de las abreviaturas que se pueden emplear para cada uno de ellos. Este formato solo lo debe llenar el geólogo encargado de realizar el levantamiento de las transectas.

ANEXOS

1. Tarjeta de muestreo

		MAPLE NO. UC 0500							
# TRINCHERA - INTERVALO RADIMETRICO		FECHA: <u>MAYO 30/2009</u> COORD. X <u>502924</u>							
PROYECTO: <u>BERLIN</u>		COORD. Y <u>619029</u>							
TIPO MUESTRA: <u>EN CANAL 70cm</u>									
COMENTARIO: <u>ARENISCA CUARZOSA CONGLOMERÁTICA BIEN CEMENTADA, CEMENTO SILICEO OZ=90%, ACCESORIOS=5%, ÓXIDOS=5%</u>									
TODAS LAS MEDICIONES RADIMÉTRICAS TOMADAS CON ESPECTRÓMETRO GR-135 CON COLIMADOR DE PLOMO									
Registros Radiométricos		<input type="checkbox"/> SUELO							
		<input type="checkbox"/> ROCA							
		<input type="checkbox"/> TESTIGO CUTTING							
		<input type="checkbox"/> OTROS							
B.G. c/s	MUESTRA c/s	RADIM %U	QUIM %U	RADIM %U	QUIM %U	RADIM %U	QUIM %U		
TOPE	800							K	2.5
MEDIO	1150							U	120.5
BASE	1200							Th	11.4
BACKGROUND	1200								

MAPLE NO. UC 0500

MAPLE NO. UC 0500

MAPLE NO. UC 0500

Anexo B. Descripción Macroscópica de Las Rocas Sedimentarias Mineralizadas con Fósforo y Uranio

Muestra No. 12 (Muestra S4M5b: Base columna estratigráfica El Volcán)



Figura No. 1. *Bindstone* fosfático. La flecha indica la polaridad de la secuencia.
Barras de la escala en centímetros.

Descripción macroscópica muestra No. 12:

Armazón (60%): lodosoportada, constituida por cuarzo ahumado y fosfatos tamaño lodo color pardo claro a oscuro y arena muy fina color blanco. **Matriz (20%):** fosfática. **Cemento (15%):** bien cementada evidente en la buena consolidación **Fábrica:** laminación de colores blanco y negro a pardo claro y oscuro, ondulosa paralela a subparalela tipo estromatolito. En algunas láminas granos de cuarzo ahumado tamaño arena media. **Porosidad (5%):** primaria, interpartícula y secundaria, moldica.

Clasificación según Trappe, 2001:

Bindstone fosfático

Muestra No. 11 (Muestra S4M7: Techo columna estratigráfica El Volcán)



Figura No. 2. Arenisca fosfática de grano muy fino. La flecha indica la polaridad de la secuencia. Costras de óxidos en los planos de debilidad.

Descripción macroscópica muestra No. 11:

Armazón (80%): Granosoportada, constituida por cuarzo blanco, óxidos, tamaño de grano: arena muy fina, color amarillo claro. Sub redondeada, esférica, buena selección. **Matriz (3%):** indiferenciado. **Cemento (15%):** bien cementada por su buena compacidad, se aprecian bandas esporádicas de óxidos color rojo parduzco posiblemente de hierro que pueden actuar como material cementante. **Fábrica:** masiva, bien compacta, costra de óxidos **Porosidad (2%):** mala, secundaria, grietas abiertas (sin relleno), con óxidos en las paredes.

Clasificación según Folk, 1974:
Cuarzoarenita de grano muy fino

Muestra No. 1 (Muestra Be1001005FCM: Trinchera Tb2)



Figura No. 3. *Bindstone* fosfático. La capa color pardo anaranjado es la base según la polaridad del estrato.

Descripción macroscópica muestra No. 1:

Armazón (70%): lodosoportada, constituida por fosfatos tamaño arena fina a media color blanco, pardo claro a oscuro y lodo color blanco. Granos de ¿glauconita? o ¿minerales de uranio? color verde claro distribuidos al azar en la capa de color gris a negro. **Matriz (22%):** fosfática. **Cemento (3%):** mal cementada evidente en la mala consolidación **Fábrica:** laminación de colores blanco, negro a pardo claro, ondulosa paralela a subparalela tipo estromatolito. En algunas láminas granos de cuarzo tamaño arena media. **Porosidad (5%):** media, primaria, interpartícula y secundaria, moldica.

Clasificación según Trappe, 2001:

Bindstone fosfático

Muestra No. 3 (Muestra Be1001005Ecm: Trinchera Tb2)



Figura No. 4. Microsforita. La muestra presenta dos capas en contacto plano neto.

La flecha en la imagen (arriba izquierda) indica la polaridad. Detalle de la capa superior (arriba derecha) y capa inferior (abajo izquierda y derecha).

Descripción macroscópica muestra No. 3:

CAPA SUPERIOR

Armazón (50%): Granosoportada constituida por granos de cuarzo ahumado tamaño arena fina, angulares, selección moderada. Contacto con capa inferior neto similar a superficie de reactivación donde ocurre un cambio importante en tamaño de grano y condiciones hidrodinámicas del medio. **Matriz (40%):** fosfática color blanco con granos no esqueletales (pellets) color pardo oscuro. **Cemento (7%):** medianamente cementada. **Fábrica:** textura arenosa, sectores oxidados color pardo claro, granos más gruesos y redondeados en el contacto con la capa inferior. **Porosidad (3%):** primaria interpartícula.

CAPA INFERIOR

Armazón (60%): lodosoportada, lodo color negro con abundante materia orgánica, granos de cuarzo ahumado de media a muy fina, moldes de microfósiles (¿foraminíferos?). **Matriz (15%):** masiva de color negro. Glauconita como accesorio. **Cemento (5%):** bien cementada, buena compacidad. **Fábrica:** grano decreciente, con capas delgadas y láminas más masivas y menos porosas de colores grises y gris claro. **Porosidad (20%):** secundaria moldica.

Clasificación según Trappe, 2001:

Microsforita

Muestra No. 10 (BE1005007aCM: Camino desde la Quebra del Guayabo hasta el punto de perforación P1)



Figura No. 5. Packstone fosfático (Phosclast – Packstone). Se observan dos capas diferenciadas en el corte de la muestra. La flecha roja indica la polaridad.

Descripción macroscópica muestra No. 10:

Armazón (50%): Granosoportada constituida por pellets fosfáticos. **Matriz (30%):** lodo fosfático color amarillo **Cemento (10%):** fosfatos color amarillo y pardo claro a oscuro. **Fábrica:** La capa de lodolita color pardo oscuro ondulosa hace parte de un

solo cuerpo que tiene forma similar a un resto óseo indiferenciado o puede ser capas o tapetes microbianos debido a intercalaciones de láminas color pardo y verde en forma esquelética. **Porosidad (10%):** primaria interpartícula.

Clasificación según Trappe, 2001:

Packstone fosfático

Muestra No. 9 (BE1005Tb26OS: Trinchera Tb26, flanco oriental del sinclinal)



Figura No. 6. Mudstone con minerales de alteración de uranio en individuos y agregados brotoidales (detalle imagen izquierda). Flecha roja indica polaridad.

Descripción macroscópica muestra No. 9:

Armazón (90%): Iodosoportada constituida por minerales tamaño arcilla color negro y color blanco. Hacia el tope fragmentos esqueléticos tamaño arena fina a media. Matriz (0%). **Cemento (5%):** calcáreo y de minerales de uranio en agregados brotoidales. **Fábrica:** textura masiva, capas color gris oscuro y capas

color negro, granocreciente, al tope ocurre una capa de fragmentos esqueléticos, vetilleo calcáreo plano paralelo que corta la estratificación. Porosidad (5%): secundaria, moldica.

Clasificación según Dunham, 1962:

Mudstone

Muestra No. 2 (Be1003Tb9cOS: Trinchera Tb9, Vereda La Tulia)



Figura No. 7. Wackestone fosfático(Phosclast-wackstone), vetilleo de cuarzo.

Descripción macroscópica muestra No. 2:

Armazón (60%): lodosoportada, constituida por lodo color negro rica en materia orgánica, granos de cuarzo tamaño arena muy fina a fina. **Matriz (30%):** material arcilloso color negro. **Cemento(5%):** baja consolidación de la roca, posible cemento fosfático. **Fábrica:** capas de arenisca muy fina, lodolita y arenisca muy fina, mal consolidada, vetilleo plano paralelo centimétrico de cuarzo lechoso,

minerales de uranio, óxidos de hierro y material carbonoso. **Porosidad (5%):** interpartícula.

Clasificación según Trappe, 2001:

Wackestone fosfático

Muestra No. 5 (Be1004006JS: Trinchera Tb14 Vereda Alto San Juan cerca de un afluente de la quebrada el Perro)



Figura No. 8. Granitoide, con superficie de cizalla, costras de óxidos y vetilleo de cuarzo.

ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS	
Número de Muestra: 5 (Be1004006JS)	Localización: Trinchera Tb14 Vereda Alto San Juan cerca de un afluente de la quebrada el Perro
Análisis realizado por: RPR	Fecha: Septiembre 2010
1. Color: melanocrático con zonas de alteración color amarillo parduzco y costras color rojo parduzco.	
2. Estructuras y Texturas: maciza con vetilleo de cuarzo con laminación en el contacto con la roca caja. Pirita diseminada.	
3. Características del tamaño de grano: afanítica	
4. Composición Mineralógica:	

Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (30%)	Tamaño fino, alotriomórfico	Cuarzo lechoso en vetilleo y ahumado en la roca caja
Plagioclasas (20%)	Tamaño muy fino, alotriomórfico	Diseminado en granos pequeños
Máficos (40%)	Tamaño muy fino	
Óxidos (10%)	Costras de color rojo, amarillo.	

5. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal:
Q = 50; P= 33.3; A= 16.7;
Clasificación según Streckeisen, 1976:
Granitoide

Ficha de clasificación macroscópica de rocas ígneas según, Mantilla L. C., 2003.

Muestra No. 4 (Be1004006CM: Trinchera Tb17 Quebrada La Calera)



Figura No. 9. Flint (chert criptocristalino que exhibe una fuerte fractura concoidea y colores grises a negros derivados de la materia orgánica incluida en su estructura)
La flecha roja (imagen izquierda) indica la polaridad. La imagen derecha es el corte de la muestra.

Descripción macroscópica muestra No. 4:

Roca silicificada color negro, con fractura concoidea, costra de óxidos, vetilleo muy delgado de cuarzo lechoso.

Clasificación según Cruz y Caballero, 2007:

Flint

Muestra No. 6 (BE1004003bCM: Trinchera Tb17 Afluente Quebrada La Calera)

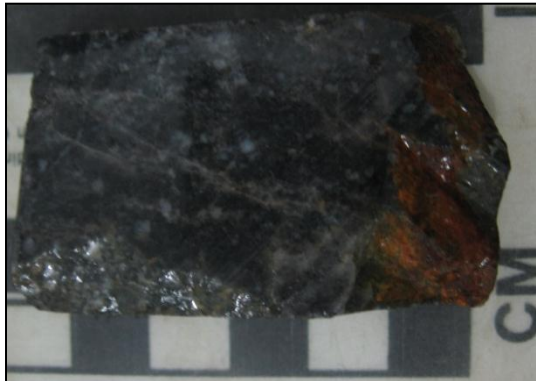


Figura No. 10. Granodiorita con vetilleo de cuarzo y óxidos.

ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de Muestra: 6 (BE1004003bCM)		Localización: Afluente Quebrada La Calera
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Septiembre 2010
1. Color: melanocrático con zonas de alteración color amarillo parduzco		
2. Estructuras y Texturas: maciza con vetilleo de cuarzo		
3. Características del tamaño de grano: afanítica		
4. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (60%)	Tamaño fino a medio, alotriomórfico	Cuarzo lechoso en vetilleo y ahumado en la roca caja
Plagioclasas (15%)	Tamaño muy fino, alotriomórfico	Diseminado en granos pequeños
Máficos (15%)	Tamaño muy fino	
Óxidos (10%)	Costras de color rojo, amarillo.	
5. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Q = 80; P=15; Clasificación según Streckeisen, 1976: Granodiorita		

Ficha de clasificación macroscópica de rocas ígneas según, Mantilla L. C., 2003.

Muestra No. 7 (Be1004003aCM: Trinchera Tb17 Afluente Quebrada La Calera)

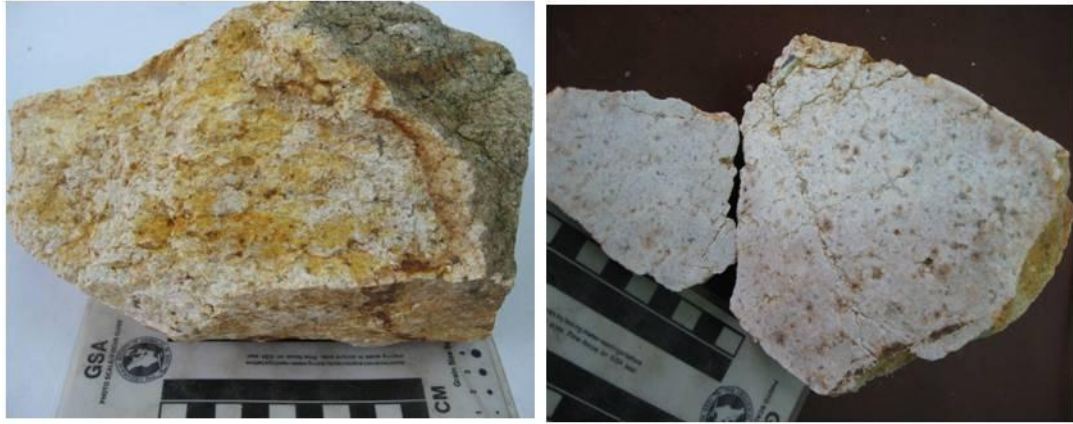


Figura No. 11. Diorita. Óxidos en capas onduladas por alteración.

ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de Muestra: 7 (Be1004003aCM)		Localización: Afluente Quebrada La Calera
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Septiembre 2010
1. Color: leucocrática		
2. Estructuras y Texturas: maciza		
3. Características del tamaño de grano: fanerítica inequigranular anhedral de grano grueso		
4. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (10%)	Tamaño medio, anhedrales	
Plagioclasas (80%)	Tamaño muy fino a fino, ocupando la mayoría del volumen de la roca	
Alcalinos (5%)	Tamaño fino diseminados	
Máficos (3%)	Tamaño fino, accesorios	
Óxidos (2%)	Color amarillo en las zonas de debilidad	
5. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Q =10.53; P=84.21; A=5.26 Clasificación según Streckeisen, 1976: Diorita		

Ficha de clasificación macroscópica de rocas ígneas según, Mantilla L. C., 2003.

Muestra No. 8 (Be1004013CM Vereda La Resaca. Quebrada La Calera)

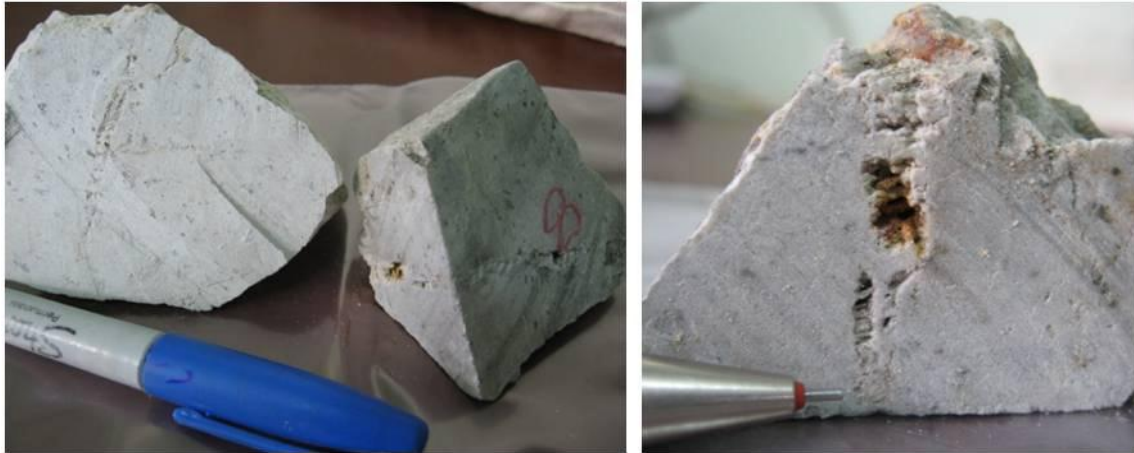


Figura No. 12. Granitoide con vena parcialmente rellena de cuarzo en drusa.

ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE ROCAS ÍGNEAS		
Número de Muestra: 8 (Be1004003aCM)		Localización: Vereda La resaca. Quebrada La Calera
Análisis realizado por: RPR		Fecha: Septiembre 2010
1. Color: leucocrática		
2. Estructuras y Texturas: maciza con vena parcialmente rellena de cuarzo en drusa (dientes de perro)		
3. Características del tamaño de grano: afanítica		
4. Composición Mineralógica:		
Mineral (% vol.)	Propiedades	Otras observaciones
Cuarzo (20%)	Tamaño fino a medio	Rellenando en parte vena en drusa
Plagioclasas (50%)	Tamaño muy fino a fino	Alteradas (caolinita)
Alcalinos (5%)	Tamaño fino disseminados	accesorios
Máficos (5%)	Tamaño fino, accesorios	accesorios
5. Clasificación de la Roca Ígnea, según análisis modal: Q =26.66; P=66.660; A=6.66		
Clasificación según Streckeisen, 1976:		
Granitoide		

Ficha de clasificación macroscópica de rocas ígneas según, Mantilla L. C., 2003.