



Geología y geoquímica de la composición elemental de la fosforita uranífera en la franja sedimentaria cretácica cercana a Berlín, Caldas (Colombia)

Sonia Yanina GÜIZA GONZÁLEZ¹ y German VARGAS CUERVO¹

Abstract: *GEOLOGY AND GEOCHEMIST ELEMENTAL COMPOSITION FROM URINIFEROUS PHOSPHORITE IN THE CRETACEOUS SEDIMENTARY BAND NEAR TO BERLÍN, CALDAS (COLOMBIA).* The cretaceous sedimentary sequence of Berlin in the Eastern flank from Colombia Cordillera Central, bearing the uriferous phosphorite in, which has been qualified as deposit containing as commodities primarily such as uranium and yttrium, also metals such as vanadium, silver, molybdenum, and nickel, included in this study among others (rhenium and neodymium). Geological mapping was reviewed using remote sensing, and the geochemist about elemental composition of the participants during geochemical dispersion process, establishing that recent material like sediments collected in the hydrographic system crossing the Cretaceous sedimentary band. Due to the uranium geochemist anomalies focused to the south where the synclinal closed, the litho-samples (parental material) were collected following transverses lines and taking gamma-spectrometric measures, At first uriferous geochemical anomalies identified were focused at the closure of the syncline at the south, then followed transects lines with in-field gamma spectrometry measurements for the selection of lithological samples used as parent material. Both samples (sediments and litho-samples) were analyzed by ICP-OES instrumental chemists. Then the elemental chemist results were statistical processing, besides the geochemical anomalies identified in sediments, it matched the geochemical fingerprint from the outcropping materials with high radioactive emission. The results show that uriferous phosphorite, together with pyrite and other sulfurs into the shales sequence and other sulfides, which play as the main parental materials for elements such as uranium, rare earth elements, and metals, without excluding other lithological units highlighting igneous rocks, and anthropogenic activities with tendency to remove vegetal cover. If the protective barrier provided by vegetation cover is destroyed, the natural balance with the underlying rock substrate could endanger. So, it is necessary to assess environmental risks associated with the mobilization of heavy metals such as selenium, arsenic, antimony, cadmium, and lead, including the presence of radon frequently.

Resumen: La franja sedimentaria cretácica de Berlín en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia, hacia la base de la secuencia existe un estrato llamado fosforita uranífera, catalogado como depósito mineral con elementos de interés económico tipo tierras raras, el uranio e itrio y metales como el vanadio, plata, molibdeno y níquel los cuales hacen parte de este estudio, entre otros (renio y neodimio). Se revisó la cartografía geológica aplicando teledetección y la geoquímica respecto a la composición elemental de los componentes que participan en un proceso de dispersión geoquímica, determinando que el material reciente corresponde a los sedimentos tomados a lo largo del sistema hídrico que atraviesa la franja sedimentaria cretácica. Teniendo en cuenta que las anomalías geoquímicas uraníferas se ubican en el cierre del sinclinal al sur, se llevó a cabo transversas con mediciones espectrometría gamma de campo y selección de lito-muestras (material parental).

¹ Geoquímica del grupo de Geotecnologías de la Universidad Nacional de Colombia y estudiante de doctorado en la FCNyM de la UNLP (Argentina). E-MAIL: syguizag@unal.edu.co & sguizag@gmail.com.

² Profesor coordinador del grupo de Geotecnologías de la Universidad Nacional de Colombia. Geólogo, PhD en ciencias de la tierra. E-MAIL: gvargasc@unal.edu.co

Se evidencia que la fosforita uranífera, junto con la secuencia lutítica con presencia de pirita y otros sulfuros, actúan como principales materiales parentales de elementos como el uranio, otras tierras raras, y metales, sin descartar que estos pueden provenir de otras unidades litológicas como las rocas ígneas principalmente, y actividades antrópicas proclives a destruir la cobertura vegetal. Se destaca la necesidad de evaluar los riesgos ambientales asociados a la movilización de metales pesados como el selenio, arsénico, antimonio, cadmio y plomo, incluyendo la presencia de radón que destruye la barrera que ejerce la cobertura vegetal, se colocaría en riesgo el equilibrio natural existente con el sustrato rocoso donde habitan.

Key words: Uranium. REE. Metals. Dispersion, Mobility.

Palabras clave: Uranio. ETR. Metales. Dispersión. Movilidad.

1. Introducción

Este estudio se centra en el área de Berlín, ubicada en el flanco oriental de la Cordillera Central en el departamento de Caldas, Colombia, debido a ser el único depósito mineral uranífero con cálculo de reservas, se toma como base estudios previos y observaciones de campo desarrolladas en la década de 1970 y los reportes de factibilidad minera en la primera década del presente siglo (Inwood, *et al.*, 2012; Klerk, *et al.*, 2013). A partir de los resultados de composición química elemental de sedimentos a lo largo de toda la franja, y la toma de lito-muestras tomadas a lo largo de transversas que atraviesan el cierre del sinclinal al sur de la franja, se definen como líneas de composición geoquímica base donde la fosforita uranífera, fuente natural de emisión radioactiva, se encuentra en equilibrio con su entorno natural sin riesgo alguno a pesar de ser conocidos sus afloramientos.

Ante el reconocimiento del importante potencial para la exploración de uranio en fosforitas, cabe la posibilidad de encontrarse en alguna otra secuencia sedimentarias similar en otros sitios ubicados en las cuencas sedimentarias cretácicas colombianas como el Valle del Magdalena (Guerrero, *et al.*, 2000) y la Cordillera Oriental (Sarmiento, 2001; Mahoney, 2018; Güiza-González, 2006 y 2020) donde prevalecen los estratos de lutitas negras en estas secuencias con niveles fosfáticos y calcáreos, este estudio puede servir como una guía exploratoria, para aquellas

que siendo uraníferas siguen sin ser reportadas, al igual que en otras cuencas sedimentarias de América Latina. Cabe resaltar que desde el punto de vista metalogénico las fosforitas podrían ser estériles y ser únicamente de interés como materia prima para fertilizantes.

Las fosforitas ampliamente reportadas a nivel mundial de las cuales se destacan por ser catalogadas a nivel mundial como depósitos uraníferos (Dahlkamp, 2009; Harraz, 2016; OECD-NEA, 2018) e incluso han sido mencionadas como una solución posible, frente a la creciente demanda de elementos críticos como las tierras raras (Emsbo, *et al.*, 2015). A manera de ejemplo en América, el distrito minero en la región de Montana-Wyoming se encuentran en su relación estratigráfica, secuencias de fosforitas uraníferas y lutitas, junto con ocurrencias minerales de los elementos de las tierras raras (King y Hausel, 1991; Dahlkamp, 2010) de manera similar a Berlín.

Debido a la disponibilidad pública por parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC-MIIG), se logró compilar información obtenida en la primera fase de exploración tanto de radiometría y composición química elemental en sedimentos y rocas (Castaño, 1979; Castaño y Menicucci, 1984; Naranjo, 1983; PNUD, 1983) que además de este artículo, ha servido de fundamento para otras publicaciones (Téllez, *et al.*, 2019 y Porras, *et al.*, 2019) y la información base para el desarrollo de la segunda fase (Volp, 2008) pero la información generada en la fase de exploración avanzada se limita

a la divulgación realizada en un par de trabajos de grado (Pimiento-Rueda, 2011 y Ríos-Guerrero, 2012) y los reportes de factibilidad minera, con base en los resultados de perforaciones para ensayos geo-metalúrgicos (Inwood. *et al.*, 2012; Klerk, *et al.*, 2013).

El presente artículo realizó, la revisión geológica utilizando sensores remotos y la geoquímica, se basa las mediciones en superficie de la emisión de radiación principalmente al sur en el cierre del pliegue sinclinal donde es bien conocido que aflora la fosforita uranífera, estrato localizado en la base de la columna estratigráfica, con dichas medidas por su alta emisión radioactiva se seleccionaron litomuestras y se analizaron por ICP-OES (SGS, 2020). Además, se llevó a cabo un muestreo de sedimentos tomados de la red del drenaje como quebradas y ríos que cruzan la franja cretácica sedimentaria, por lo que se cuenta con resultados de la composición química elemental de las litomuestras y sedimentos.

Los resultados de composición química elemental pueden ser calificados como indicadores medioambientales (Manahan, 2005; Lottermoser, 2010 y 2016) que representan un proceso de dispersión geoquímica donde secuencia estratigráfica en la que hace parte la fosforita uranífera, se corresponde al material parental de elementos, por ejemplo las tierras raras por minerales hacen parte del arreglo mineralógico del apatito, autúnita, churchita, y monacita, susceptibles de disgregación de itrio, lantano y lutecio (Cáceres, 2012 y Cáceres-Bottia, *et al.*, 2023).

La cadena de decaimiento del uranio que genera elementos como el radón (Rn) y el plomo (Pb) junto a otros metales que además de la fosforita uranífera, tienen origen en los sulfuros reportados en las lutitas negras, los cuales terminan siendo transportados en el sistema hídrico, por lo que los sedimentos son uno de los materiales recientes donde queda registrado el alcance espacial de la movilización de los elementos químicos liberados desde el material parental (Rose, *et al.*, 1979; Licht, 1998; Lett y Jackaman, 2004; Wellmar, *et al.*, 2008).

A pesar de la emisión de radiación por el decaimiento radiogénica constante de la fosforita uranífera, desde aquellos afloramientos expuestos en la superficie al igual que el proceso de dispersión geoquímica desde los sulfuros como la pirita en la secuencia lutítica principalmente, persiste un equilibrio natural entre la movilización de los elementos químicos y su entorno, debido a la exuberante cobertura vegetal, tal como quedó registrado en los reportes de labores de campo como levantamiento de columnas estratigráficas y descripción de afloramientos (Castaño, 1979; Naranjo, 1983; Pimiento-Rueda, 2011; Ríos-Guerrero, 2012; Ortiz-Martin, 2015 y Rueda y Rodríguez, 2016).

Actualmente, las autoridades locales deben estar atentas ante la remoción vegetal y apertura de trincheras, se deben consultar las fichas minero-ambientales respecto al manejo de accesos para el mantenimiento de cuerpos de agua y lo que respecta a la generación de material particulado y gases. La mejor prevención y mitigación del impacto sobre sus ecosistemas es la protección del bosque ante cualquier intento de intervención humana, siendo la teledetección y sensores remotos una excelente alternativa de monitoreo y control.

Por lo tanto, este estudio enseña que los resultados de composición química elemental en la franja sedimentaria cretácica sin intervención antrópica de impacto, señala aquellos elementos radiogénicos que pueden ser detectados por un gamma-espectro (uranio, torio, potasio), junto a los contenidos de elementos química, los cuales desde la columna estratigráfica se movilizarían al sistema hídrico y que pueden ser detectados en los sedimentos.

A sabiendas que los afloramientos se encuentran cubiertos por vegetación y desarrollo del perfil de suelos, que los reconocimientos de campo como el levantamiento de una sección estratigráfica se llevaba a cabo siguiendo el lecho de una quebrada, la descripción de los trabajos geológicos adelantados en el área de estudio registran la necesidad de descapotar para poder describir las estructuras sedimentarias, siendo

necesaria la excavación de pequeñas trincheras, también llamadas apiques para poder encontrar la base de la columna estratigráfica donde se encuentra el nivel de la fosforita uranífera, también se menciona que para una adecuada descripción de las unidades litológicas, es necesaria la remoción de perfiles de suelo para observar la roca sin alteración (Castaño, 1979).

El territorio que ocupa la franja sedimentaria cretácica de Berlín, donde la cobertura vegetal que vive sobre los suelos desarrollados en el sustrato rocoso, se encarga de mitigar el riesgo de la emisión radioactiva desde la fosforita uranífera, además ralentizar la movilización metales que incluye los sulfuros reportados de la secuencia lutítica. La cobertura vegetal es una salvaguarda a los ecosistemas; impide que los contenidos de los elementos movilizados superen los niveles permisibles y así permite que prevalezca en un saludable equilibrio natural (Landmeyer, 2012; Dold, 2014 y Sinha, *et. al.* 2014).

2. Geología y geomorfología

El área de Berlín se encuentra en el sistema montañoso de los Andes Colombianos en el flanco oriental de la Cordillera Central, al noreste del departamento de Caldas y cercana al municipio de Berlín (Figura 1). La franja sedimentaria cretácica presenta un relieve abrupto e irregular con cotas entre 1929 a 390 msnm, con cerros de pendientes muy inclinadas donde la vegetación es moderada a diferencia de las laderas de los cañones de ríos y quebradas donde se conserva el bosque natural. Generalmente, el sustrato rocoso se encuentra cubierto de vegetación, por lo que para desarrollar labores de geología de campo debe ser descapotado lo que en la jerga colombiana se llama apiques.

La geología regional predomina las unidades metamórficas del Complejo Cajamarca, compuesto principalmente por esquistos, gneises y anfibolitas, que representan el basamento más antiguo. Sobre este complejo se disponen unidades sedimentarias de edad cretácica, depositadas en ambientes marinos someros donde hubo condi-

ciones favorables para la precipitación de fosfatos y la concentración de uranio (Etayo-Serna, 2015). La interacción entre eventos orogénicos y magmáticos como el Batolito de Sonsón durante el Cretácico inferior y durante el paleógeno cuerpos de menor tamaño (< 100 Km) en la plancha geológica denominados “stocks”, en español plútones, emplazados durante el Paleógeno (Barrero y Vesga, 1976), los cuales causaron la deformación tectónica y el actual relieve, bajo el control estructural principalmente por el Sistema de fallas de Palestina.

Se resalta como guía geográfica para los mapas presentados en este artículo, la Laguna de San Diego es descrito como un cuerpo volcánico denominado “Maar” con potencial geotérmico de (Monsalve, *et al.* 2019) con estudios petrológicos de las rocas ígneas que afloran en la zona de estudio (Ortiz-Martin, 2015; Rueda y Rodríguez, 2016 y Rueda-Gutiérrez, 2019).

La franja sedimentaria cretácica ocupa una pequeña área al noreste restringidas a la parte central del área de estudio, orientada Norte-Sur (12 Km * 4 Km aprox.) en la plancha geológica 188-Dorada (Barrero y Vesga, 1976) donde se le denomina esta unidad como Horizonte Fosilífero de Berlín (Kib) donde se detectó una alta emisión radiogénica ubicando su fuente, el cual en este artículo se denomina fosforita uranífera, estrato ubicado hacia la base de la columna estratigráfica y cercano al contacto con las rocas metamórficas.

La unidad se describe como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas, químicas y bioquímicas de ambiente marino, compuestas por areniscas cuarzosas, lutitas gris oscuros y conglomerados, hacia su base de la secuencia se reconoce un estrato con alta emisión radioactiva descrita como una fosforita uranífera (Barrero y Vesga, 1976). Se destaca el estudio de los fósiles encontrando en algunas perforaciones en la franja cretácica sedimentaria, identificó que la fauna común en la biota de aguas de plataforma templadas de amplia extensión latitudinal durante el Cretácico superior, del Albiano a Cenomaniano (Etayo-Serna, 2015).

Para este estudio se realizó una interpretación geológica de imágenes georreferenciadas Landsat ETM en forma digital con planos en 2D,

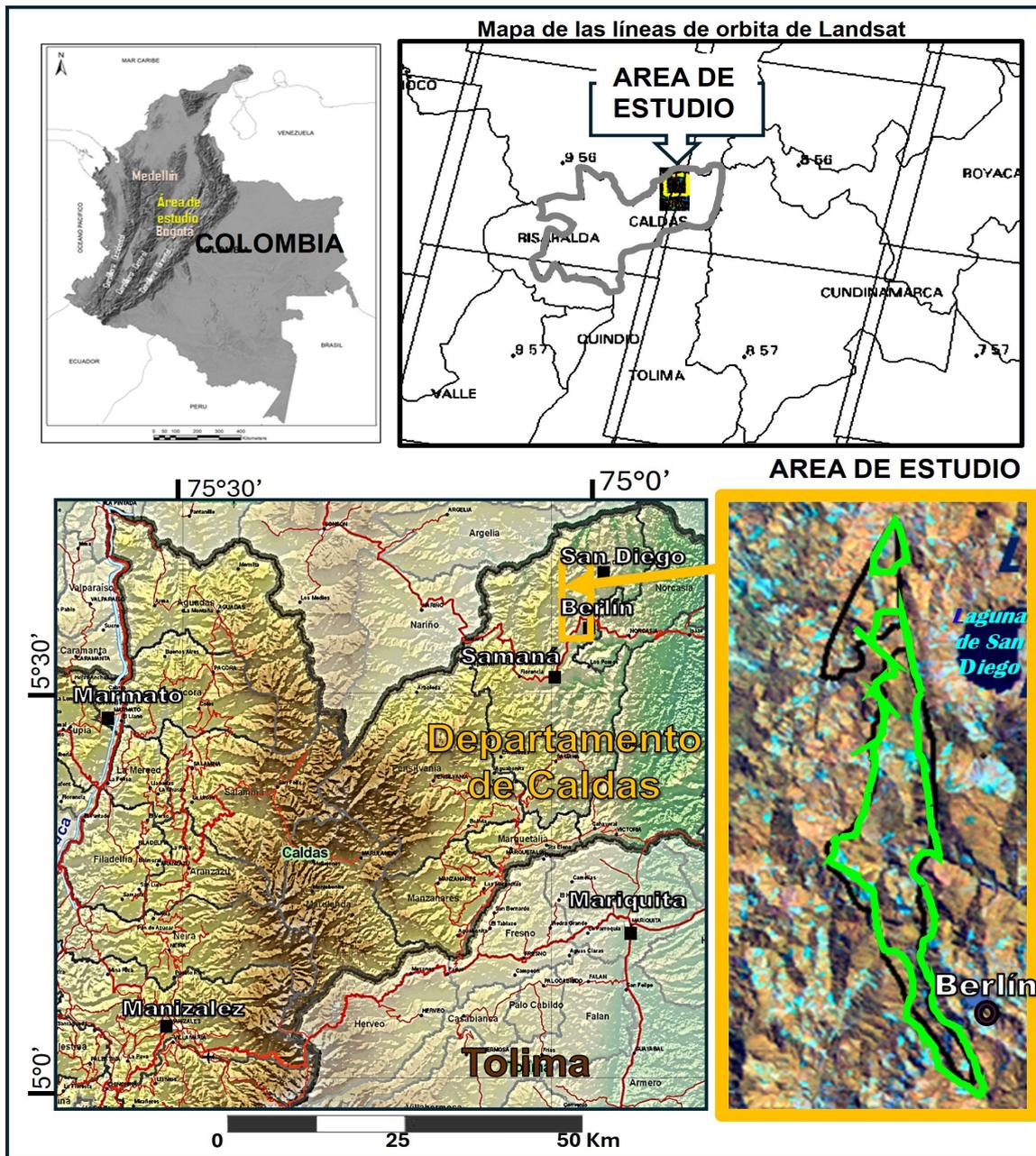


Figura 1. Localización geográfica de la franja sedimentaria cretácica./**Figure 1.** Geographic ubication of Cretaceous sedimentary band.

estereoscópicas y con la ayuda de un modelo digital de terreno en vistas 3D como fundamento de la interpretación y cartografía se realizó teniendo en cuenta criterios espectrales, geométricos, texturales y estructurales visualizados en las imágenes (Vargas, 2015). Por lo que el mapa geológico en contexto a la franja sedimentaria cretácica corresponde a una escala media 1:50.000, con lo cual se mejoró y detalló las geoformas que presentan las unidades

litológicas e incluyó un conjunto importante de rasgos estructurales.

2.1. Geología estructural

El grupo conformado por estructuras mayores como fallas de menor jerarquía y de edad más reciente comparada con el sistema Palestina, corresponden a fallas verticales que se interpreta como estructuras de rumbo que

cortan y desplazan a las fallas antiguas (Cortes, 1990; Paris y Romero, 1993).

Hay algunos sectores donde las fallas conforman corredores estructurales (Figura 2) que se manifiestan morfológicamente como

depressiones, generando procesos morfodinámicos como deslizamientos a lo largo de sus trazos con lineamientos de menor magnitud, como las fallas locales o sistemas de fracturación significativa.

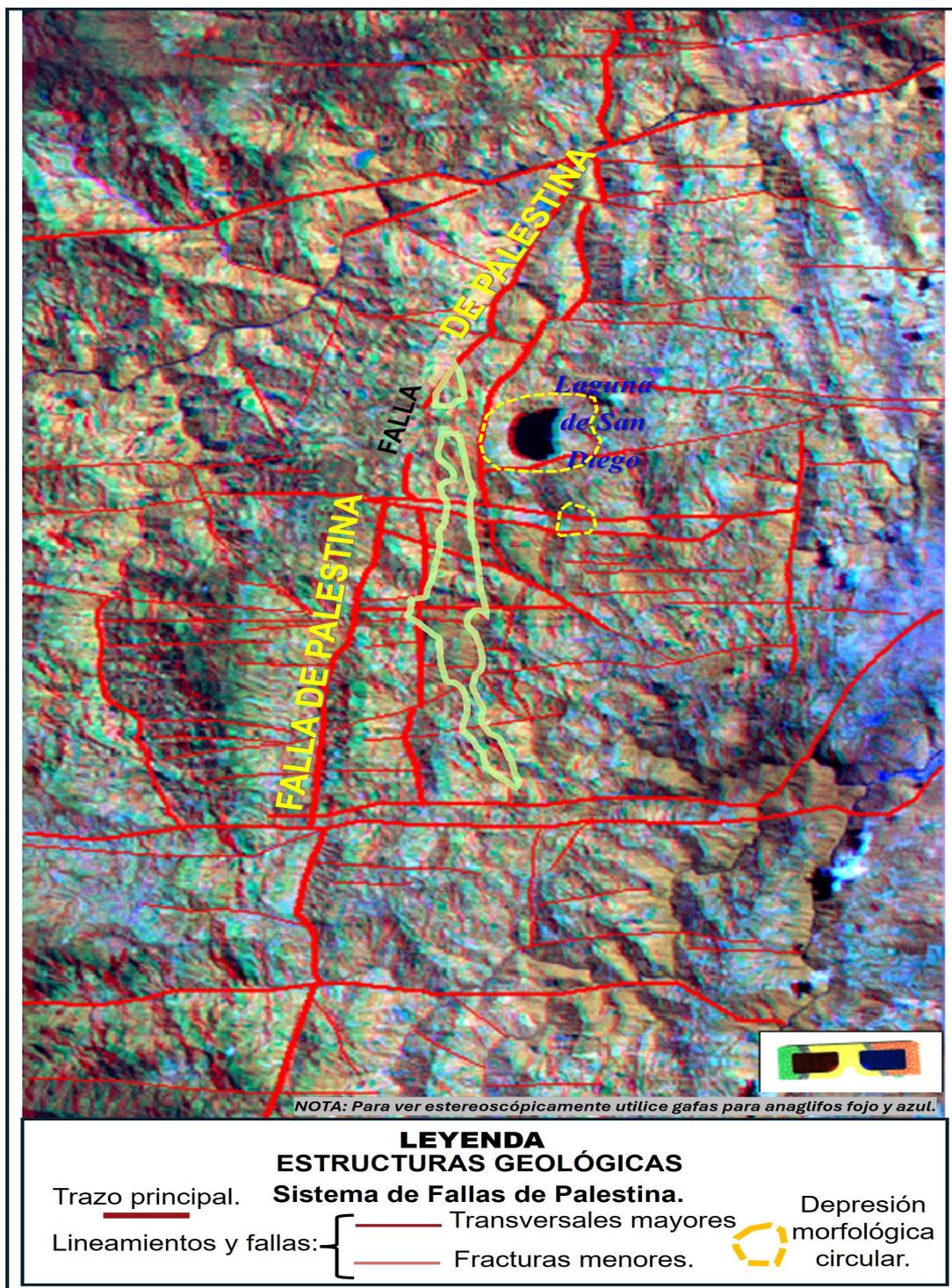


Figura 2. Mapa-imagen del sistema de estructuras asociados a la Falla de Palestina./**Figure 2.** Map-image of the Palestine's structural system.

2.2. Unidades litológicas

En cuanto a la litología, se logró establecer una cartografía informal de unidades litológicas por su contraste espectral y morfología (Figura 3). El área estudiada corresponde a una superficie aproximada de 202 Km². Las unidades litológicas se agruparon en cuatro categorías: los depósitos inconsolidados y las rocas

sedimentarias, ígneas y metamórficas, las cuales se describen a continuación.

Depósitos inconsolidados (DI) agrupa materiales inconsolidados recientes y subrecientes denominados, del cuaternario (Barrero y Vesga, 1976). Se aprecian deslizamientos (Didz) cuyos materiales se acumulan en la base de laderas o cauces fluviales, la mayoría tiene dimensio-

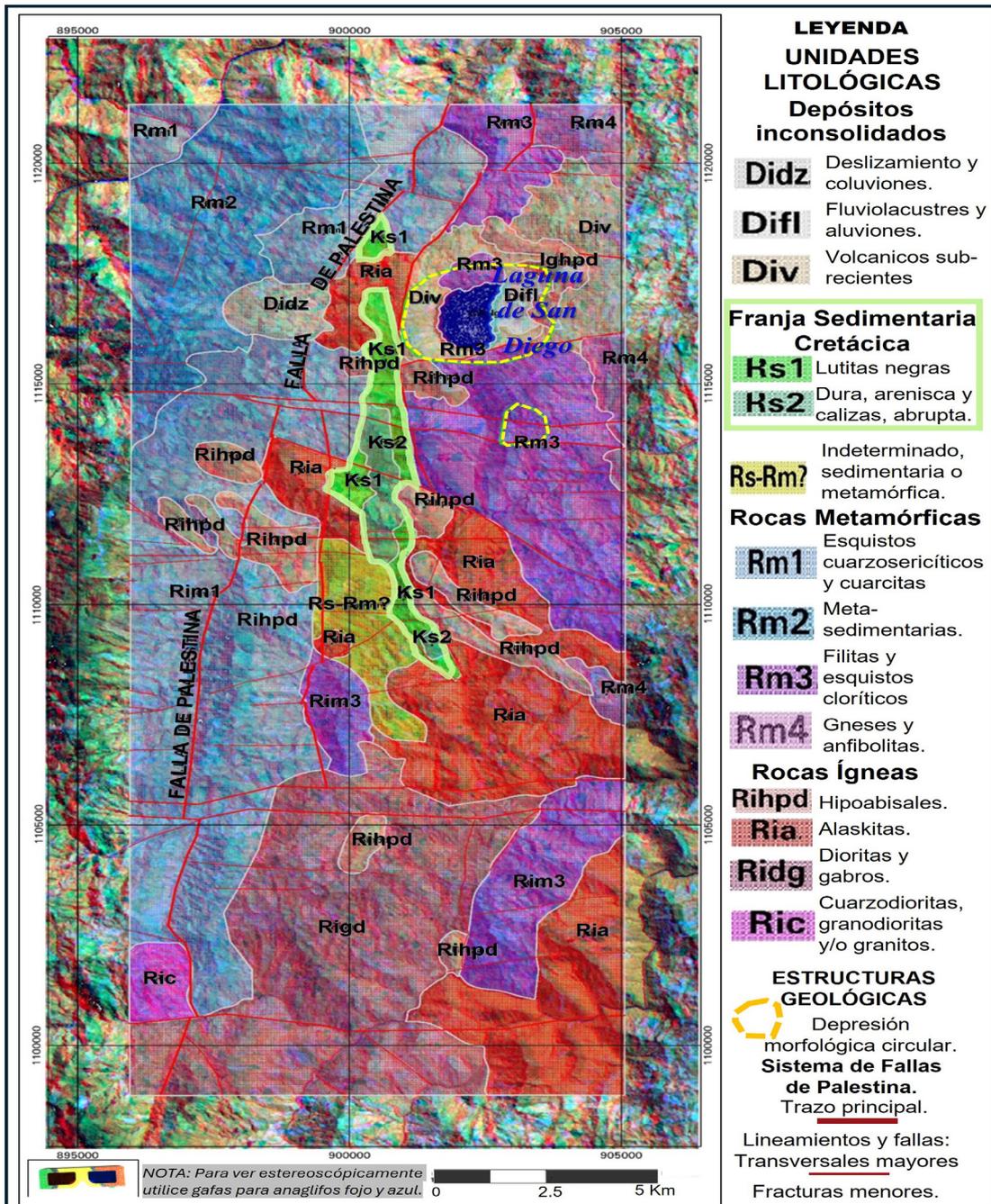


Figura 3. Mapa-imagen geológico a escala media 1:50 000./Figure 3. Map-imagen of geology framework to scale of 1:50 000.

nes menores a 3 ha, lo que dificulta su cartografía a escala 1:50.000. Sin embargo, se identificó un gran depósito de aproximadamente 221 ha al occidente de la Laguna de San Diego, el cual fue cartografiado. Los depósitos aluviales (Difl) en cambio se localizan restringidamente a lo largo de los cauces y presentan escasa extensión, lo que limita su representación a esta escala.

Los Depósitos volcánicos subrecientes (Div) subreciente de edad cuaternaria, se encuentran alrededor de la Laguna de San Diego y están compuestos por flujos de andesita y lodos volcánicos, aglomerados y cenizas se encuentran relacionados a eventos volcánicos recientes.

Franja sedimentaria cretácica (Ks) representa únicamente a la franja sedimentaria cretácica, con base en su litología y consistencia se delimitaron dos unidades principales: la unidad (Ks1) lutítica o arcillosa negra (*shales*) de consistencia blanda y morfología suavemente ondulada y la unidad (Ks2) de consistencia dura, compuesta por areniscas y calizas con algunos niveles intercalados de lutitas.

La secuencia sedimentaria se conoce como Horizonte Fosilífero de Berlín (Kib) debido a los fósiles encontrados como los de tipo amonitas (Etayo, 2015) catalogados como fauna que habitó en la edad cretácica, por lo que, por lo que en los mapas las rocas sedimentarias de las dos unidades delimitadas por sensores remotos se denominan Ks1 y Ks2.

Algunas expresiones geomorfológicas se muestran en la Figura 4 focalizadas al norte de la franja, mientras las otras versiones enseñan la franja sedimentaria cretácica como un solo cuerpo (Barrera y Vesga, 1976; Castaño, 1979; Naranjo, 1983; Inwood, *et al.*, 2012 y Klerk, *et al.*, 2013), la observación de las imágenes de satélite redefinió los bordes, además de enseñó que al norte de la franja corresponde a un bloque aislado del resto de la franja afectada por una intrusión ígnea.

Las *Rocas Metamórficas* (Rm) con edades asignadas al triásico (Barrera y Vesga, 1976) con registros de los efectos por procesos de metamorfismo regional y afectadas por metamorfismo dinámico y térmico, generados por

eventos tectónicos e intrusiones ígneas, respectivamente.

Las rocas metamórficas que afloran principalmente bordeando la pequeña franja sedimentaria cretácica, en su flanco occidental resalta el trazo principal de la Falla de Palestina por lo que se reportan lugares donde es difícil determinar si corresponden a rocas sedimentarias o metamorfias. Al sur de la franja sedimentaria se define que las rocas metamórficas corresponden a esquistos cuarzosericíticos y cuarcitas (Rm1) y rocas de bajo grado de metamorfismo de origen sedimentario (2) relacionadas al Complejo Cajamarca principalmente. Mientras que en el flanco oriental aparecen entre las rocas ígneas, otros dos tipos de rocas metamórficas, las filitas esquistos cloríticos y cuarzosericíticos (Rm3) y los neises y anfibolitas (Rm4).

Entre las *Rocas Ígneas* (RI) se resalta la presencia de un cuerpo intrusivo tipo alaskita que al norte separa la franja sedimentaria cretácica y también se ubican en el sector sur de la franja las cuales fueron estudiadas en la primera fase de exploración (Muñoz, 1983). Se caracteriza por una morfología geométrica definida en laderas rectas, estas rocas intruyen unidades metamórficas del Paleozoico y se corresponde con el cuerpo ígneo cretácico denominado Aláskita de Samaná (Barrera y Vesga, 1976) donde se reportan afectaciones por eventos ígneos posteriores tanto en el Paleógeno como en el Neógeno.

Localmente aparecen al suroeste de la franja rocas ígneas intermedias a ácidas de tipo cuarzodiorita a granito, se relacionan con el grupo de los denominados "*stocks*" intrusivos ocurridos posteriormente durante el Paleógeno (Barrera y Vesga, 1976) además de reportes de afloramientos que intruyen las rocas metamórficas y las sedimentarias cretácicas al este de la franja (Muñoz, 1983; Ortiz-Martin, 2015; Rueda y Rodríguez, 2016 y Rueda-Pimiento, 2019).

El cuerpo intrusivo tipo alaskita también registró evidencias de que fueron cortados por diques tabulares de pórfidos dacíticos y andesíticos orientados en dirección noroeste, a los cuales se les asignó en el Paleógeno, mientras que aparición de

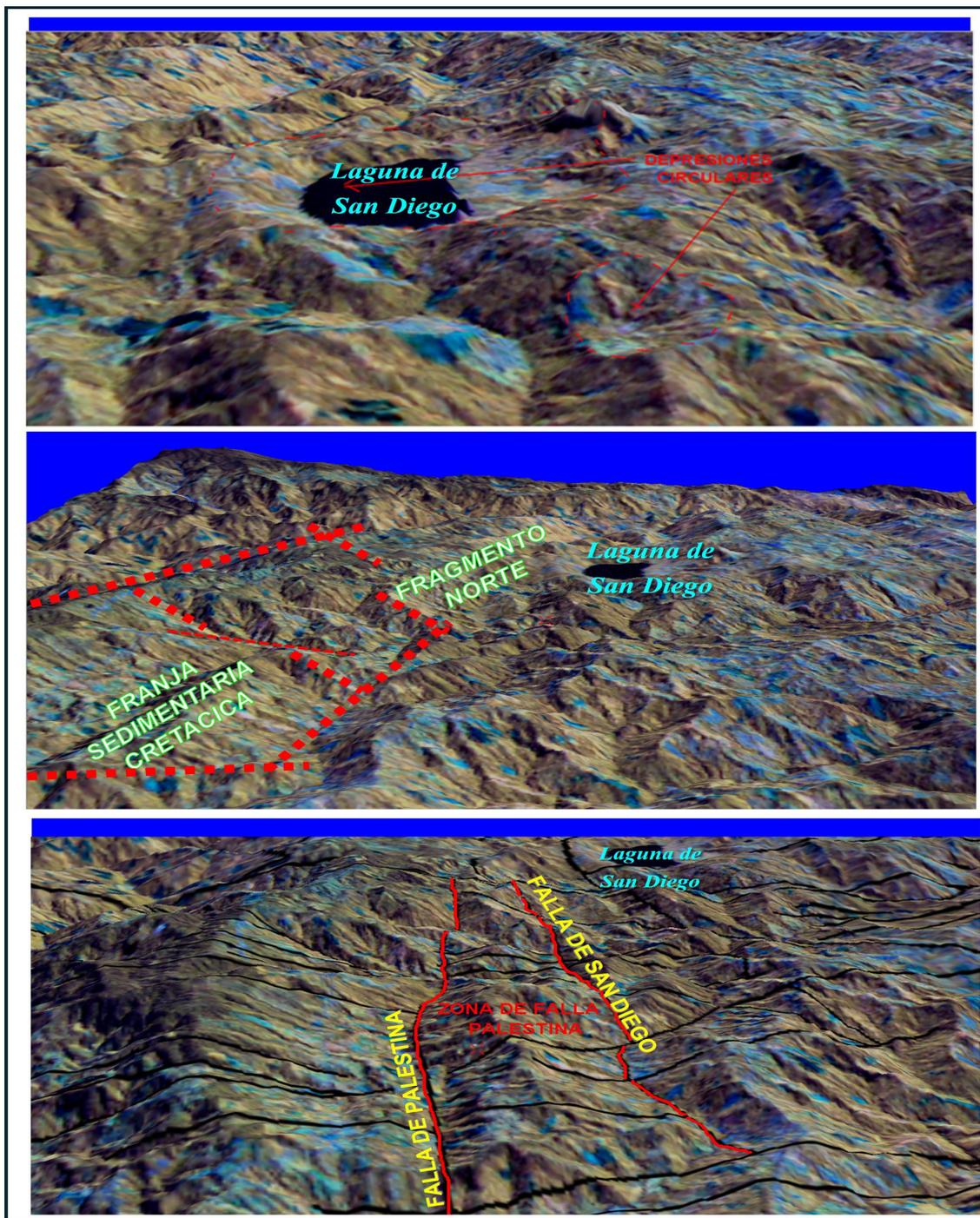


Figura 4. Trazos morfológicos en perspectiva 3D del sector norte, visto como un fragmento separado de la franja sedimentaria cretácica./**Figure 4.** Morphological traces in 3D perspective from the north, seen like a fragment break out of Cretaceous Sedimentary.

las rocas ígneas hipoabisales probablemente dacíticos y andesíticos correspondería al en el Neógeno. Estos pequeños cuerpos ígneos aparecen sobresaliendo sobre las rocas metamórficas circundantes como montículos aislados.

3. Materiales y métodos

Para el desarrollo de la evolución geoquímica por un proceso de dispersión originados por materiales parentales como serían las unida-

des litológicas cuyo registro se puede identificar por la composición química elemental de estos y los materiales recientes como los sedimentos (Figura 5). Se llevó a cabo en tres fases, la primera la compilación de información de estudios previos permitió el reconocimiento de los métodos empleados para ser retomados y actualizados, haciendo énfasis en la consecución de resultados de composición química elemental. Con lo cual se planeó y llevaron a cabo las actividades de campo con énfasis en el muestreo geoquímico; sedimentos y litomuestras.

3.1. Compilación geoquímica

A partir de informes técnicos de la primera fase de exploración registraron que inició con el levantamiento de columnas estratigráficas siguiendo los lechos de las quebradas y luego, para comprobar la continuidad del estrato de la fosforita uranífera ubicado en la base de la columna estratigráfica, se llevó a cabo la excavación de trincheras también llamadas apiques alrededor de los bordes en ambos flancos del sinclinal de la franja, entre otras como apertura de algunos túneles y perforaciones (Castaño y Menicucci, 1984).

Se compiló la información generada por el extinto Instituto de Asuntos Nucleares (IAN) actualmente del Servicio Geológico Colombiano) cuyos informes se basan en labores de campo, se resalta la cartografía geológica, el estudio de ema-

nometría (radón) en aguas, muestreos en aguas y sedimentos activos, analizadas en su laboratorio químico para algunos elementos químicos por absorción atómica uranio, vanadio, molibdeno (U, V, Mo respectivamente) y fósforo (P) dado como fosfato ($\text{PO}_4^{=}$) por colorimetría (Garzón, 1984; Muñoz, 1983 y Naranjo, 1983).

Respecto a la segunda fase de exploración avanzada se consultaron los últimos reportes de factibilidad minera disponibles focalizada en la fosforita uranífera de la franja sedimentaria cretácica (Inwood, *et al.*, 2012 y Klerk, *et al.*, 2013). Se hace especial mención al aporte de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, con un par de trabajos de grado (Pimiento-Rueda, 2011 y Ríos-Guerrero, 2012) y las últimas publicaciones con información geoquímica y mineralógica en su Boletín Geológico (Cáceres-Bottia, *et al.*, 2023).

3.2. Sedimentos y Lito-muestras

El muestreo (Figura 6) de sedimentos realizado en los cauces de quebradas y ríos cruzando la franja sedimentaria cretácica y en el sector sur hacia el cierre del sinclinal, siguiendo el trazo de transversas con lecturas sistemáticas de gamma-espectrometría se seleccionaron lito-muestras.

Para esta investigación, se aplicó un protocolo de muestreo de sedimentos activos sobre la red del drenaje como quebradas y ríos cruzando la franja sedimentaria cretácica y para optimizar el

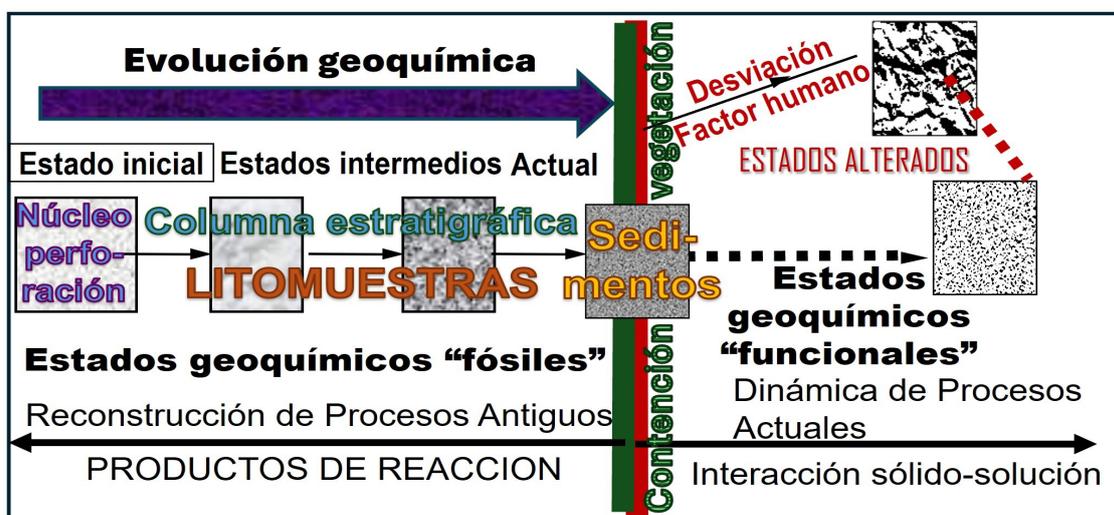


Figura 5. Relación de los componentes de movilización de elementos químicos por un proceso dispersión geoquímica./Figure 5. Mobilization of chemist elements from those components during the geochemist dispersion process.



Figura 6. Fotografías tomadas durante el muestreo de sedimentos y lito-muestras respectivamente./**Figure 6.** Photographs taken during the sediments and litho-samples respectively.

cubrimiento espacial y la representatividad geoquímica se priorizaron aquellos sitios de muestreo ubicados en el ápice de la desembocadura de microcuencas ($<1 \text{ km}^2$).

Además, Se adelantó una campaña radiométrica de campo tan solo en el sector sur de la franja, con base en de transectos perpendiculares, los puntos con medición radiogénica se distribuyeron en intervalos de 100 metros. El espectrómetro gamma portátil permitió la detección y diferenciación in situ de radioisótopos de potasio 40 (K40), uranio 238 (U238) y torio 232 (Th232) los cuales, representan la radiactividad natural emitida desde los materiales geológicos aflorantes (IAEA, 1979 y 2004; Minty y Hovgaard, 2002) para este caso, la fosforita uranífera corresponde a la mayor fuente de emisión radioactiva.

A partir de los registros de espectrometría gamma, se seleccionados como sitios de de lito-muestras los contenidos atípicos del uranio ($>100 \text{ ppm}$) y según las observaciones de campo, incluían en mayor medida lutitas negras (shale), seguidas por arenitas, y unas pocas alaskitas y metasedimentos

Las muestras fueron tratadas bajo condiciones controladas en el laboratorio químico (SGS, 2020). Los sedimentos se tamizaron a

mallá de 140 y las litomuestras fueron pulverizadas, todas las muestras se sometieron a digestión con ácidos múltiples y la composición química elemental multi elemental, fue obtenida por espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado de inducción conocido como ICP-OES (*Induction Couple Plasm, optic emission spectroscopy*) por sus siglas en inglés (SGS, 2020).

Para el tratamiento de datos, se utilizó el software estadístico *Statgraphics*, entre los valores centrales, se seleccionó la mediana también llamada percentil 50 (P50) calificado de parámetro estadístico central óptimo, para realizar comparaciones entre grupos de datos, debido que el valor dado descarta el sesgamiento generados por los valores atípicos de la distribución estadística de datos, como si ocurre con el promedio (Batanero y Díaz, 2008).

Bajo esta misma premisa para detectar valores atípicos (Gonçalves, *et al.*, 2001) también conocidas como anomalías geoquímicas, correspondió a los resultados con un contenido por encima del percentil 95 (P95) que queda también registrado por el método gráfico de caja y bigotes (*boxplot*). Se prefiere el P95 al valor umbral (*threshold*) tradicional para la anomalía geoquímica en exploración de recursos minerales, debido a que relaciona el promedio y la des-

viación estándar (promedio más dos veces la desviación estándar) por lo tanto, ante valores muy altos sesga la medida ocultando puntos atípicos o anomalías geoquímicas.

4. Resultados

El proceso geoquímico dinámico y permanente conocido como dispersión geoquímica esta, formado por unos materiales parentales que conforman el macizo rocoso donde el arreglo mineralógico característico tiene la capacidad de liberar elementos químicos, siendo el agua el principal mecanismo de movilización en los materiales recientes (Gaviria, 2015; Rose, *et al.*, 1979 y Rose, 1994).

4.1. Comparación entre componentes de dispersión geoquímica

Para este caso se definen como materiales parentales a las litomuestras de esta investigación, se debe tener en cuenta el sustrato rocoso del subsuelo y la secuencia de lutitas, mientras los sedimentos se definen como materiales recientes (Gaviria, 2015). La Tabla 1 resume los contenidos de cada uno de los elementos químicos, iniciando con los valores de referencia los establecidos para lutitas negras (Reimann, *et al.*, 2005) extrapolando lo que podría esperarse en la misma litología.

La siguiente columna en la tabla llamada fosforita-uranífera, corresponde a los resultados de las muestras seleccionadas de testigos de perforación para las pruebas de geo-metalurgia (Inwood, *et al.*, 2012 y Klerk, *et al.*, 2013) y calificada como material parental primario, con la menor exposición de los elementos químicos que contiene sus minerales, a diferencia de las litomuestras sometidas a proceso de intemperismo por estar en la superficie. Las demás columnas corresponden a las medianas también conocido como percentil 50 de las litomuestras y sedimentos.

La composición química elemental de

las lito-muestras registra para más de la mitad de la población un contenido de fósforo (P) del 2% (fosforita uranífera) de los cuales algunos alcanzaban hasta un 30% en calcio (Ca) por lo que respecto al contenido de fósforo, en la tabla se dividieron en dos conjuntos, identificadas las columnas con mayor y menor al 2% ($P > 2\%$ y $P < 2\%$) también catalogadas como material parental al igual que las lutitas y fosforita-uranífera. Y la mediana de los sedimentos que representan el material reciente.

Los elementos químicos se dispusieron de la manera siguiente: elementos mayores por su alto contenido en porcentaje, los demás elementos su unidad de medida era partes por millón (ppm) y se dispusieron así: los elementos con interés económico en la fosforita uranífera catalogada de recurso mineral y que pueden pertenecer a cualquiera de los grupos según la clasificación Goldsmith (Licht, 1998 tomado de Goldsmith, 1958). A continuación, entre paréntesis se menciona a que grupo pertenecería estos elementos.

Los demás elementos, se dividieron en la tabla de la forma siguiente (a manera de ejemplo, entre paréntesis los de interés económico): elementos de las tierras raras todos litófilos (interés económico el uranio e itrio) con afinidad al calcio, metales calcófilos (vanadio, plata, molibdeno, níquel y zinc) con afinidad al azufre y metales siderófilos con afinidad al hierro (ninguno).

Los elementos mayores medidos en porcentaje, se encuentran el aluminio (Al) que destaca por su alto contenido en los sedimentos (7,6%) junto a otros elementos con máximo contenido en los sedimentos, como son: hierro (Fe), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na) y titanio (Ti). El calcio (Ca) reportado para las pruebas de geometalurgia en la fosforita uranífera (Inwood, *et al.*, 2012 y Klerk, *et al.*, 2013) estaba por encima del 27%, superando cualquier otro contenido, también se destacaron el azufre (S) y fósforo (P) por sus altos contenidos en la fosforita.

Los elementos con interés económico (*comodi-*

GRUPO	Según clasificación Goldsmith	Elemento		Material parental				Reciente SEDI-MENTOS
				Lutita	Fosforita-uranífera	LITOMUESTRA Fosforo		
		Nombre	Simbolo	Valor referencia	Perforación (geometalurgia)	Mayor a > 2%	Menor a < 2%	
ELEMENTOS MAYORES (%)	L	Aluminio	Al	0,91	0,72	2,85	3,43	7,58
	L	Calcio	Ca	0,22	27,85	4,57	0,12	0,34
	S	Hierro	Fe	5,5	0,77	3,20	1,42	3,53
	L	Potasio	K	2,7	0,25	0,64	0,64	1,61
	L	Magnesio	Mg	1,6	0,42	0,16	0,26	0,55
	L	Sodio	Na	1,3	0,04	0,17	0,2	0,84
	L	Titanio	Ti	0,6	0,05	0,10	0,12	0,22
	C	Azufre	S	0,11	0,92	0,15	0,19	0,06
L	Fosforo	P	0,08	3,30	2,00	0,3	0,01	
ELEMENTOS DE INTERES ECONOMICO (ppm)	L-ETR	Uranio	U	3,2	794	785	45	3,90
	L-ETR	Itrio	Y	30	333	285	212	11
	L-Metal	Vanadio	V	130	2500	3214	759	258
	C-Metal	Plata	Ag	0,08	2,00	0,79	1,48	0,35
	C-Metal	Molibdeno	Mo	2	496	60	35	6
	S-Metal	Níquel	Ni	70	1933	39	28	41
	C-Metal	Zinc	Zn	100	2100	117	47	198
ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS (ppm)	LITOFILOS	Torio	Th	12	3,00	7,05	6,3	7,15
		Cerio	Ce	80	85	99	29	39
		Cesio	Cs	SD	NR	3,40	3,40	6,32
		Hafnio	Hf	4	NR	1,22	1,25	1,86
		Lantano	La	40	186	209	16,8	18,90
		Lutecio	Lu	0,6	2,00	2,46	0,38	28,50
		Neobio	Nb	SD	NR	4,05	4,10	7,15
		Tantalo	Ta	SD	NR	0,42	0,43	0,73
		Talio	Tl	1	30	8,14	2,05	0,96
		Itterbio	Yb	3,2	13	15,7	2,2	1,4
		METALES (ppm) excepto marcado con asterisco ***	CALCOFILO (azufre)	Arsénico	As	13	138	63
Cadmio	Cd			0,25	19,00	2,09	0,39	1,60
Cobre	Cu			45	131	110	42,8	41
Plomo	Pb			22	48,00	18,50	11	12,40
(*) Selenio	Se			0,3	232	7,5	1	1
Antimonio	Sb			1	56	37,4	17,8	5,14
(**) Telurio	Te			0,009	NR	0,64	0,39	0,07
SIDEROFILO (Fe)	Cobalto		Co	20	7,00	2,55	1,3	11,5
	Manganeso		Mn	850	77	66	43	406
	Tungsteno		W	SD	NR	3,2	2,5	1,05
LITOFILO (calcio)	Bario		Ba	550	1065	1536	1036	910
	Berilio		Be	3	2,00	2,25	1	2,30
	Bismuto		Bi	0,25	20	0,25	0,19	0,48
	Cromo		Cr	100	527	1731	333	225
	Escandio		Sc	15	4,00	8,35	7,9	20,8
	Estroncio		Sr	250	736	545	69,7	78,6
	Galio		Ga	SD	NR	7,90	8,70	18,78
	Litio		Li	60	18	13	14	0,21
	Rubidio		Rb	140	NR	36	37	85
	Zirconio		Zr	SD	52	41	42	61

SD = Sin Dato; NR = No Reporta (*) Se = no metálico; (**) Te = semimetálico

Tabla 1. Comparación entre los componentes de un proceso de dispersión geoquímica./Table 1. Comparison among components from the geochemist dispersion process.

ties) en la fosforita uranifera calificada de depósito mineral, todos se encuentran en mayor contenido comparado con los demás (litomuestra con fosforo mayor y menor al 2% de fosforo (P) y sedimentos, excepto el vanadio (V) que fue mayor en las litomuestras con fosforo mayor al 2%, al igual que el uranio (U) e itrio (Y) pero en menor cantidad. Los otros elementos, plata (Ag), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn) sus contenidos superan los de cualquier otra muestra, pero la plata (Ag) en sedimentos es más alta que la de la litomuestra con fosforo menor al 2% (P<2%).

Se resalta que las medianas de níquel (Ni) y zinc (Zn) supera el contenido en sedimentos que en la litomuestra con fosforo mayor y menor del 2 % (P>2% y P<2%).

El grupo de los elementos de las tierras raras todas litofilas, se resalta al torio (Th) por ser un elemento radioactivo y acompañante del uranio, sin mayor relevancia en este caso donde el valor de referencia para shales es alto y el menor contenido corresponde a la fosforita, los contenidos tanto en los dos grupos de litomuestras, fosforo mayor y menor al 2% (P>2% y P<2%) y sedimentos, son

comparables entre sí. Respecto a las demás tierras raras. Se destaca el lantano (La), talio (Tl) e iterbio (Yb) por su alto contenido en la fosforita y las litomuestras con fósforo mayor al 2%. El valor de referencia del hafnio (Hf) en lutitas es superior a cualquiera de los otros grupos y el del lutecio (Lu) en sedimentos.

Los metales calcófilos con afinidad al azufre son los más importantes por sus implicaciones medioambientales (Banzi, *et. al.*, 2015; Woods, *et. al.*, 2015; Satybaldiyev, *et. al.*; 2015) con un alto contenido en la fosforita-uranífera, se hallaban los siguientes: el arsénico (As), cadmio (Cd), plomo, selenio (Se) y antimonio (Sb). Sin resultado para el telurio (Te) en la fosforita-uranífera, se reporta el mayor contenido en las litomuestras con fósforo con menos de 2% ($P > 2\%$). Los elementos que se encontraron por encima en los valores de referencia de las lutitas respecto a los resultados de este estudio (litomuestras y sedimentos) fueron: cobre (Cu), plomo (Pb).

Los metales siderófilos como el cobalto (Co) y manganeso (Mn) con contenidos más altos en sedimentos seguidos por el valor de referencia de las lutitas que superan a las litomuestras. El tungsteno (W) la información es insuficiente.

Finalmente, los metales litófilos el bismuto (Bi), estroncio (Sr) y litio (Li) tienen los contenidos más altos en la fosforita-uranífera, mientras que el bario (Ba) y cromo (Cr) se encuentra en altos contenidos en la litomuestra con fósforo mayor al 2% ($P > 2\%$) y el escandio (Sc), galio (Ga), rubidio (Rb) y zirconio (Zr) mayor en sedimentos está, con valor de referencia de lutitas mayor en berilio (Be), litio (Li) y rubidio (Rb).

4.2. Anomalías geoquímicas

Se identificó para cada sitio del total de 248 muestras de sedimentos, aquellos elementos químicos con contenidos atípicos, estadísticamente correspondientes a contenidos mayores del percentil 95 ($>P_{95}$). De

esta manera se llegó a una cobertura con 102 sitios que contaban con un conjunto entre 1 a 9 elementos químicos atípicos también conocidos como anomalías geoquímicas.

Para la distribución espacial de los puntos atípicos en sedimentos se dispusieron en dos mapas (Figura 7) ambos resaltan del uranio (U). El mapa primer (izquierda) registra aquellos elementos económicos (*comodities*) establecidos para la fosforita-uranífera calificada de depósito mineral, los cuales son los litófilos el fósforo (P), uranio (U) e itrio (Y), y metales la plata (Ag), molibdeno (Mo), vanadio (V) y zinc (Zn). El mapa adjunto, el símbolo del set de elementos se refiere al grupo predominante dado por la clasificación según Goldschmidt (Licht, 1998) respecto a las afinidades de los elementos químicos a formar unos determinados compuestos. Se observa claramente en ambos mapas en el sector sur de la franja una mayor densidad de anomalías geoquímicas.

4.3. Transversas radiométricas en el sector sur

Las mediciones con el gamma-espectrometro portátil corresponden a 1500 puntos realizadas al sur de la franja donde se ubica el cierre del sinclinal y se comprueba la continuidad del estrato-uranífero, la data de campo del levantamiento de las transversas radiométricas aquí expuesta.

La mediana calculada del conjunto de las mediciones realizadas corresponde al valor representativo (*background*) de la emisión radiogénica, el contenido calculado para el potasio (K) fue de 0.9%, uranio (U) de 4,5 ppm y torio (Th) de 6,7 ppm. A pesar de que la mediana del torio (Th) es mayor a la de uranio (U), el valor máximo es de apenas 466 ppm en el torio (Th) mientras que el contenido del uranio (U) estaba por encima de las 3000 ppm.

El mapa del levantamiento de las transversas en campo respecto a la distribución puntual del contenido de uranio (ppm) donde se resaltaron aquellos sitios con un contenido de uranio mayor a 100 ppm en la lectura del gammaespectrometro en campo (Figura 8) y la ubicación de otras labores adelantadas en la primera

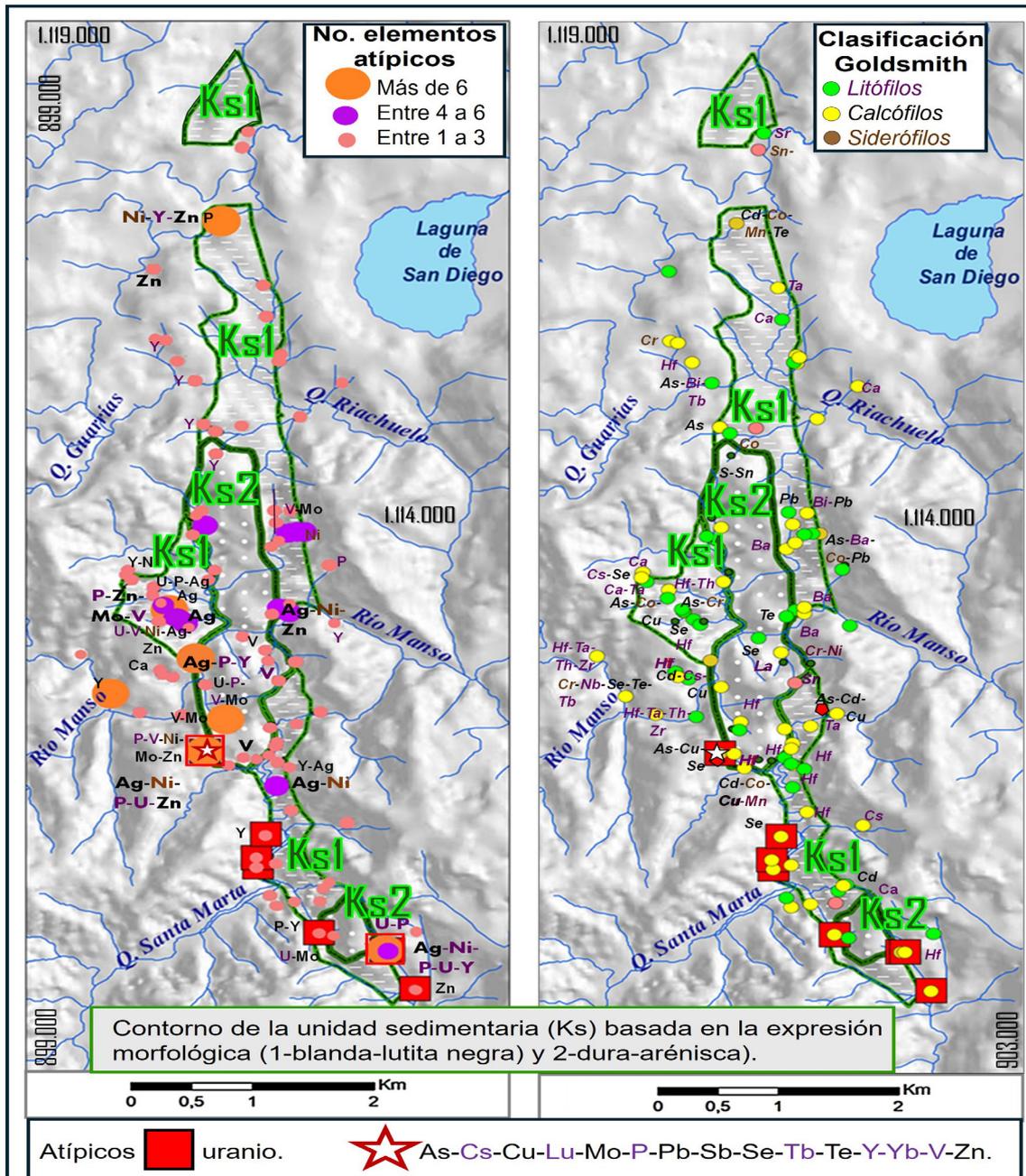


Figura 7. Fotografías tomadas durante el muestreo de sedimentos y lito-muestras respectivamente. / **Figure 7.** Photographs taken during the sediments and litho-samples respectively.

fase de exploración como son algunos túneles y perforaciones (Castaño, 1979; Castaño y Menicucci, 1984). Los puntos resaltados de uranio señalan la ubicación de corresponden a la ubicación de las lito-muestras con resultados del análisis instrumental multielemental por ICP-OES (SGS, 2020). Se observa una focalización de puntos anómalos del uranio al sur en el cierre del sinclinal.

El mapa la distribución espacial del contenido de uranio en las lito-muestras recolectadas durante el levantamiento de las transversas, la cobertura geológica utilizada para el sur corresponde al levantamiento a escala detallada realizado por el Instituto de Asuntos Nucleares (IANI actualmente Servicio Geológico Colombiano (Garzón, 1984) utilizada durante la segunda fase de exploración avanzada (Fi-

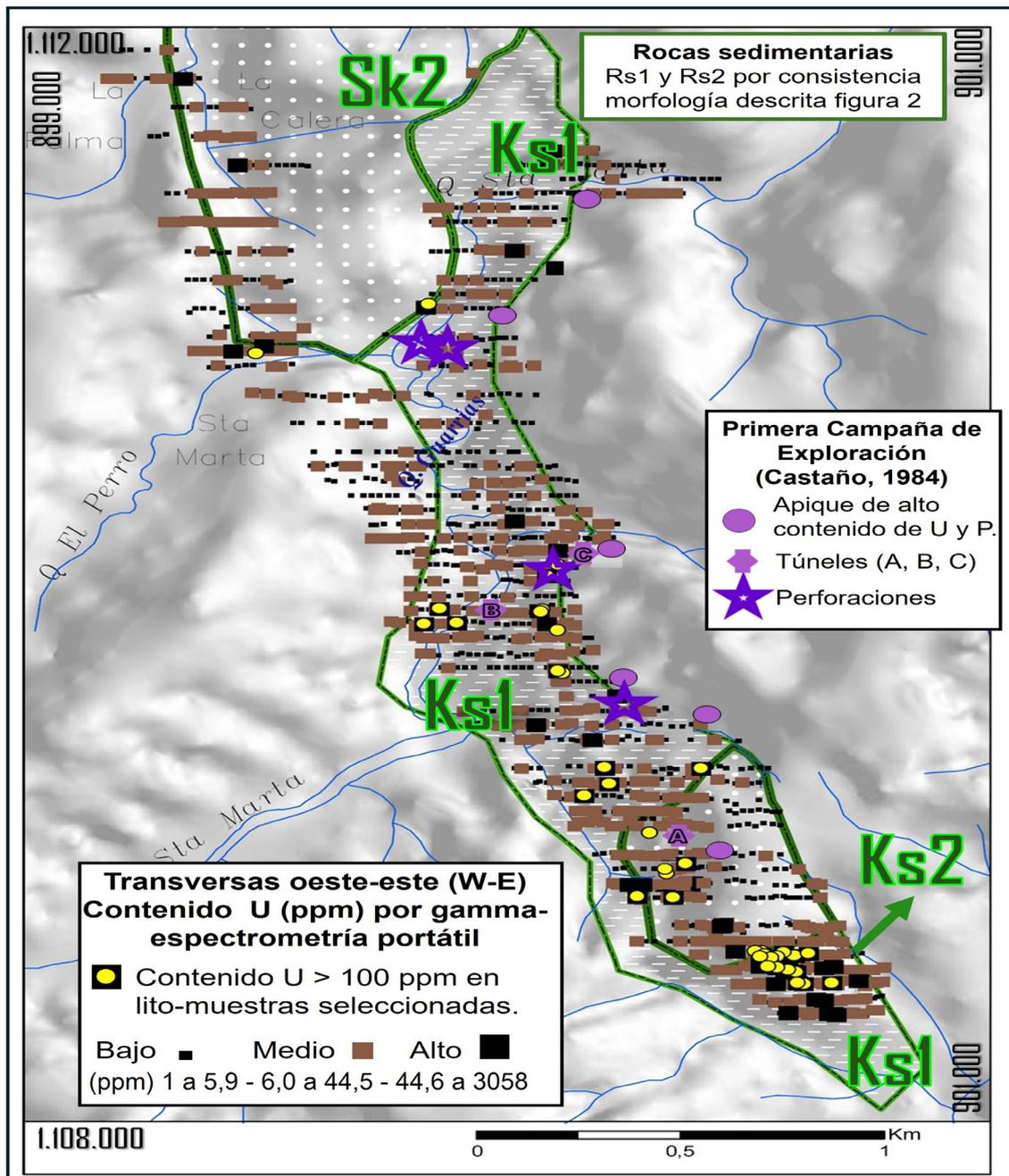


Figura 8. Mapa de transversas con el contenido de uranio por el gamma-espectrómetro en el sector sur./**Figure 8.** Map of uranium measures by gamma spectrometer on transverses across at the south sector.

gura 9) por lo que se incluyó la ubicación de las perforaciones realizadas para cálculo de reservas y estudio de factibilidad (Inwood *et al.*, 2012; Klerk *et al.*, 2013). Del total de 49 sitios de muestreo, 33 contaban con un conjunto entre 1 a 8 elementos químicos atípicos estadísticamente, por lo que se resaltó la ubicación en el mapa de dos lito-muestras con 11 elementos atípicos, en ambos casos

con los siguientes elementos: lutecio (Lu), terbio (Tb), itrio (Y) e iterbio (Yb).

4.4. Comparación estadística entre sedimentos y litomuestras

La correlación bivariada de Spearman para variables no-paramétricas focalizada en el uranio (U) en las lito-muestras, a pesar de la reconocida importancia del fósforo (P) el coeficiente de correlación con el uranio (U) era bajo, al igual que con

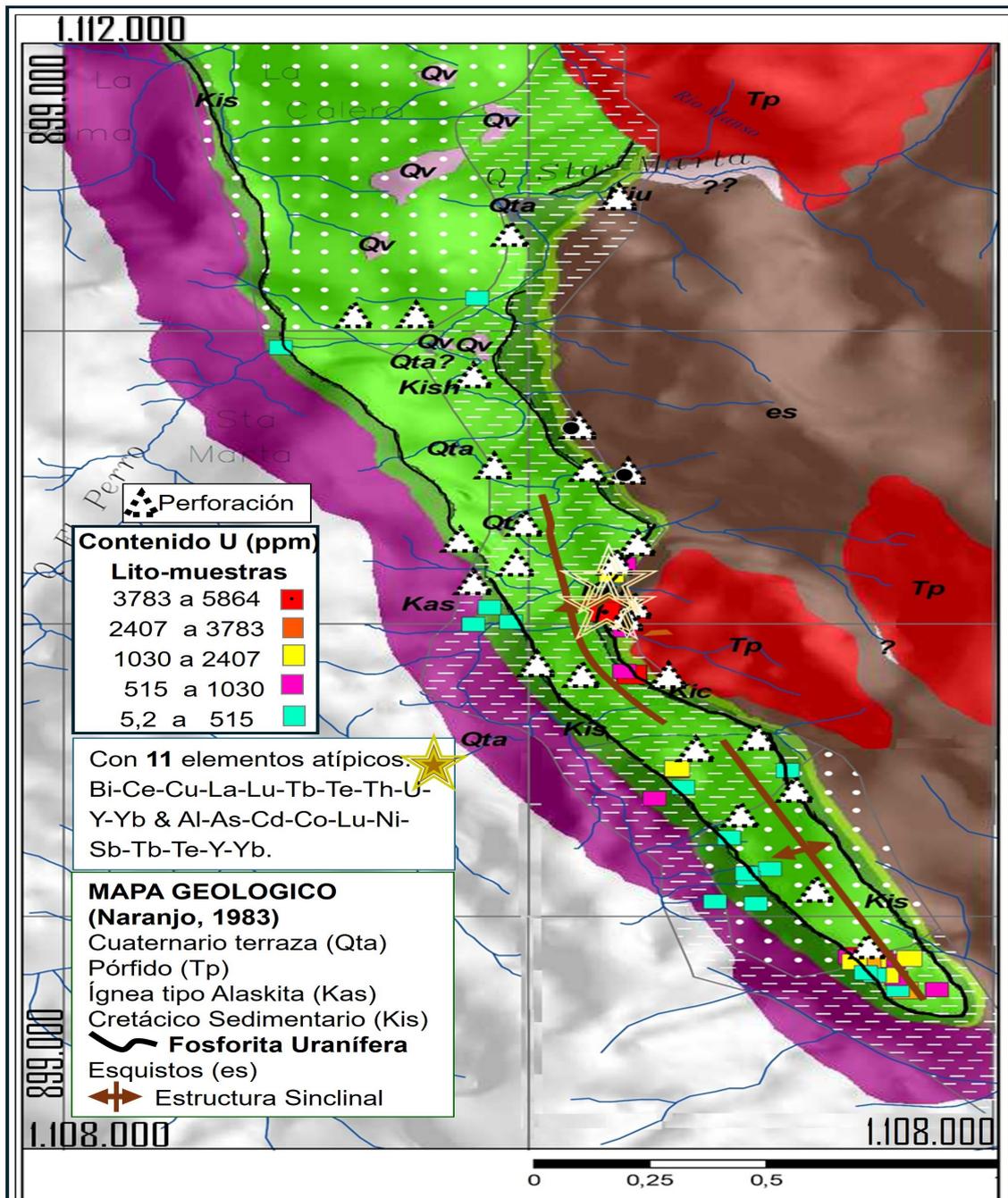


Figura 9. Mapa de la distribución puntual del uranio por ICP-OES en lito-muestras al sur./**Figure 9.** Map of uranium by ICP-OES punctual distribution of litho-samples.

cualquier otro elemento debido a la relación numérica, es necesario de nuevo mencionar que el contenido de fósforo (P) en más de la mitad de los resultados, era del 2% (20.000 ppm).

A diferencia del calcio (Ca) en las lito-muestras si registró una alta correlación junto al uranio (U) y con los siguientes elementos relacionados a las tierras raras: cerio (Ce), lantano (La), lute-

cio (Lu), terbio (Tb), talio (Tl), itrio (Y) e iterbio (Yb) también algunos metales como el vanadio (V) que hace parte de los elementos de interés económico, el telurio (Te) como metaloide calcófilo con afinidad al azufre y el estroncio (Sr) metal litófilo con afinidad al calcio (Ca) muestras altos coeficientes de correlación. Por hacer parte de la cadena del decaimiento radiogénico del uranio (U) como se presenta en la

Figura 10 se incluyó tanto el plomo (Pb) como el torio (Th) el cual presenta baja correlación bivariada con todos los elementos antes mencionados. Se incluye al germanio (Ge) por sus altos coeficientes con este grupo de elementos. La Tabla 2 muestra los coeficientes de correlación para el grupo de elementos antes explicado y los mismos fueron seleccionados para los sedimentos, en su mayoría con bajos coeficientes de correlación, excepto el cerio (Ce) con el torio (Th) y telurio (Te).

Finalmente, se presenta un resumen de los análisis univariado y multivariado en la Tabla 3 para sedimentos y lito-muestras respectivamente. Siendo el uranio el elemento más importante de este estudio solo se presentan los parámetros estadísticos del análisis univariado para este elemento, donde es posible observar que en las lito-muestras, el contenido puede superar en varios cientos respecto a los sedimentos, lo cual demostraría al parecer que su movilidad si se mantiene limitada y hasta confinada a la fosforita ura-

nífera, al igual que en la secuencia lutítica.

Teniendo en cuenta que el parámetro comúnmente utilizado para definir una anomalía geoquímica es el valor umbral (*threshold*) se compara la mediana y el promedio, aquellos elementos en los que el promedio supera a la mediana como es el caso de uranio tanto en sedimentos como lito-muestras. La comparación entre el valor umbral y el percentil 95 (P95) muestra aquellos elementos que podrían enmascarar una anomalía geoquímica como las que presentan los reportes de exploración, los cuales utilizan el promedio para el cálculo del valor umbral, como es el caso del uranio (U) en sedimentos y en las lito-muestras, el plomo (Pb) y antimonio (Sb) metales de alto impacto ambiental pueden ser liberados desde la fosforita uranífera

El análisis multivariado se presenta los coeficientes de correlación del uranio (U) respecto a otros elementos químicos, resaltando su relación intrínseca con respecto a los de las tierras raras, el lutecio (Lu), itrio (Y) en iterbio (Yb) tanto en sedimentos como lito-muestras, entre otros elementos en sedimentos como el antimonio (Sb).

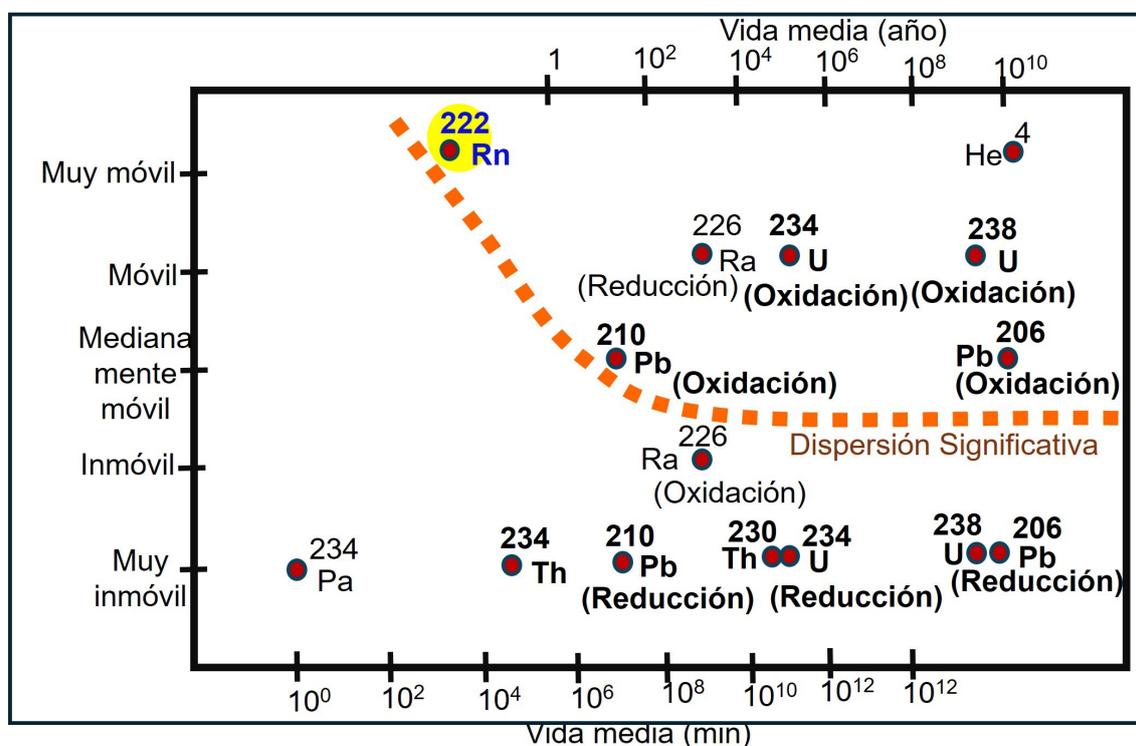


Figura 10. Productos de la cadena de decaimiento del uranio: movilidad, vida media y expectativa del grado de dispersión. Tomado y adaptado del apéndice de Rose, *et al.*, 1979. / **Figure 10.** Mobility, half-life and expected degree of dispersion of some radioactive decay products of uranium. Taked and adapted from "appendix of Rose, et al., 1979.

LITO-MUESTRAS															
	Ca	Ce	Ge	La	Lu	Pb	Sr	Tb	Te	Th	Tl	U	V	Y	Yb
Ca		0,720	0,549	0,745	0,797	0,645	0,821	0,780	0,723	0,338	0,484	0,590	0,767	0,843	0,812
Ce	0,720		0,805	0,968	0,854	0,853	0,773	0,961	0,866	0,767	0,747	0,781	0,787	0,875	0,889
Ge	0,549	0,805		0,847	0,753	0,670	0,512	0,846	0,622	0,629	0,681	0,691	0,508	0,783	0,772
La	0,745	0,968	0,847		0,863	0,797	0,742	0,968	0,836	0,668	0,761	0,840	0,753	0,899	0,894
Lu	0,797	0,854	0,753	0,863		0,695	0,828	0,910	0,729	0,479	0,708	0,768	0,731	0,980	0,994
Pb	0,645	0,853	0,670	0,797	0,695		0,762	0,802	0,850	0,783	0,565	0,527	0,815	0,717	0,731
Sr	0,821	0,773	0,512	0,742	0,828	0,762		0,779	0,787	0,429	0,557	0,582	0,881	0,824	0,841
Tb	0,780	0,961	0,846	0,968	0,910	0,802	0,779		0,854	0,644	0,732	0,810	0,762	0,934	0,941
Te	0,723	0,866	0,622	0,836	0,729	0,850	0,787	0,854		0,643	0,617	0,648	0,890	0,743	0,766
Th	0,338	0,767	0,629	0,668	0,479	0,783	0,429	0,644	0,643		0,596	0,460	0,529	0,473	0,520
Tl	0,484	0,747	0,681	0,761	0,708	0,565	0,557	0,732	0,617	0,596		0,816	0,655	0,714	0,726
U	0,590	0,781	0,691	0,840	0,768	0,527	0,582	0,810	0,648	0,460	0,816		0,604	0,785	0,796
V	0,767	0,787	0,508	0,753	0,731	0,815	0,881	0,762	0,890	0,529	0,655	0,604		0,743	0,756
Y	0,843	0,875	0,783	0,899	0,980	0,717	0,824	0,934	0,743	0,473	0,714	0,785	0,743		0,987
Yb	0,812	0,889	0,772	0,894	0,994	0,731	0,841	0,941	0,766	0,520	0,726	0,796	0,756	0,987	

SEDIMENTOS															
	Ca	Ce	Ge	La	Lu	Pb	Sr	Tb	Te	Th	Tl	U	V	Y	Yb
Ca		0,276	0,135	0,300	0,277	0,028	0,287	0,315	-0,001	0,110	-0,193	0,083	-0,037	0,329	0,282
Ce	0,276		0,285	0,891	0,586	0,267	-0,522	0,721	0,017	0,811	0,063	0,501	-0,054	0,493	0,586
Ge	0,135	0,285		0,267	0,126	0,144	-0,009	0,184	-0,115	0,314	-0,160	-0,009	-0,189	0,055	0,104
La	0,300	0,891	0,267		0,506	0,348	-0,470	0,276	0,258	0,625	0,267	0,601	0,256	0,491	0,495
Lu	0,277	0,586	0,126	0,506		0,148	-0,548	0,122	0,113	0,718	0,226	0,748	0,026	0,907	0,985
Pb	0,028	0,267	0,144	0,348	0,148		-0,203	0,165	0,189	0,242	0,265	0,257	0,179	0,121	0,134
Sr	0,287	-0,522	-0,009	-0,470	-0,548	-0,203		-0,515	-0,095	-0,561	-0,232	-0,586	-0,042	-0,461	-0,554
Th	0,315	0,721	0,184	0,640	0,906	0,165	-0,515		0,084	0,727	0,120	0,665	-0,049	0,878	0,913
Tb	-0,001	0,017	-0,115	0,258	0,113	0,189	-0,095	0,727		-0,062	0,531	0,372	0,646	0,233	0,101
Te	0,110	0,811	0,314	0,625	0,718	0,242	-0,561		-0,062		0,059	0,548	-0,162	0,517	0,704
Tl	-0,193	0,063	-0,160	0,267	0,226	0,265	-0,232	0,120	0,531	0,059		0,635	0,778	0,306	0,207
U	0,083	0,501	-0,009	0,601	0,748	0,257	-0,586	0,665	0,372	0,548	0,635		0,469	0,757	0,727
V	-0,037	-0,054	-0,189	0,256	0,026	0,179	-0,042	-0,049	0,646	-0,162	0,778	0,469		0,170	0,019
Y	0,329	0,493	0,055	0,491	0,907	0,121	-0,461	0,878	0,233	0,517	0,306	0,757	0,170		0,918
Yb	0,165	-0,084	-0,217	0,138	0,088	0,139	-0,013	0,913	0,350	-0,134	0,507	0,727	0,510	0,222	0,080

Tabla 2. Correlación bivariada del uranio en litomuestras, mismo grupo de elementos extraído de los sedimentos./
Table 2. Bivariate correlation of uranium in litho-samples, for the same element set also used for the sediments.

Se incluyen las componentes, que muestran grupos de elementos relacionados entre sí, el grupo de la componente I llama la atención en los sedimentos aquellos elementos que tienen una relación negativa (NEG) como son el vanadio (V), molibdeno (Mo), antimonio (Sb), selenio (Se) y telurio (Te) pero si hacían parte de la componente II junto al uranio (U) y fósforo (P). El plomo (Pb) es un elemento aislado.

5. Discusión de resultados

Desde el inicio de las labores de exploración, tanto los valores radiométricos asignados a la columna estratigráfica generalizada junto al mapa (Figura 11) donde se compara el contorno de la unidad sedimentaria (Castaño, 1979) superpuesto el definido para este estudio junto a la ubicación de las primeras las trincheras abiertas,

Clasificación	Elemento		Material parental				Reciente	
			Lutita	Fosforita-uranífera	LITOMUESTRA Fosforo		SEDI-MENTOS	
	Nombre	Símbolo	Valor referencia	Perforación (geometalurgia)	Mayor a > 2%	Menor a < 2%		
ELEMENTOS MAYORES (%)	Aluminio	Al	0,91	0,72	2,85	3,43	7,58	
	Calcio	Ca	0,22	27,85	4,57	0,12	0,34	
	Hierro	Fe	5,5	0,77	3,20	1,42	3,53	
	Potasio	K	2,7	0,25	0,64	0,64	1,61	
	Magnesio	Mg	1,6	0,42	0,16	0,26	0,55	
	Sodio	Na	1,3	0,04	0,17	0,2	0,84	
	Titanio	Ti	0,6	0,05	0,10	0,12	0,22	
	Azufre	S	0,11	0,92	0,15	0,19	0,06	
ELEMENTOS DE INTERES ECONOMICO (ppm)	Fosforo	P	0,08	3,30	2,00	0,3	0,01	
	Uranio	U	3,2	794	785	45	3,90	
	Itorio	Y	30	333	285	212	11	
	Vanadio	V	130	2500	3214	759	258	
	Plata	Ag	0,08	2,00	0,79	1,48	0,35	
	Molibdeno	Mo	2	496	60	35	6	
	Niquel	Ni	70	1933	39	28	41	
CALCOFILO (azufre)	Zinc	Zn	100	2100	117	47	198	
	Arsénico	As	13	138	63	24	15	
	Cadmio	Cd	0,25	19,00	2,09	0,39	1,60	
	Cobre	Cu	45	131	110	42,8	41	
	Plomo	Pb	22	48,00	18,50	11	12,40	
	(*) Selenio	Se	0,3	232	7,5	1	1	
	Antimonio	Sb	1	56	37,4	17,8	5,14	
(**) Telurio	Te	0,009	NR	0,64	0,39	0,07		
SIDERO-FILO (Fe)	Cobalto	Co	20	7,00	2,55	1,3	11,5	
	Manganeso	Mn	850	77	66	43	406	
	Tungsteno	W	SD	NR	3,2	2,5	1,05	
ELEMENTOS LITOFILOS (calcio)	TIERRAS RARAS (ETR)	Torio	Th	12	3,00	7,05	6,3	7,15
		Cerio	Ce	80	85	99	29	39
		Cesio	Cs	SD	NR	3,40	3,40	6,32
		Hafnio	Hf	4	NR	1,22	1,25	1,86
		Lantano	La	40	186	209	16,8	18,90
		Lutecio	Lu	0,6	2,00	2,46	0,38	28,50
		Neobio	Nb	SD	NR	4,05	4,10	7,15
		Tantalo	Ta	SD	NR	0,42	0,43	0,73
		Talio	Tl	1	30	8,14	2,05	0,96
	Itterbio	Yb	3,2	13	15,7	2,2	1,4	
	OTROS	Bario	Ba	550	1065	1536	1036	910
		Escandio	Sc	15	4,00	8,35	7,9	20,8
		Estroncio	Sr	250	736	545	69,7	78,6
		Rubidio	Rb	140	NR	36	37	85
		Zirconio	Zr	SD	52	41	42	61

SD = Sin Dato; NR = No Reporta (*) Se = no metálico; (**) Te = semimetálico

Tabla 3. Resumen estadístico de la composición química elemental de los sedimentos y litomuestras. / **Table 3.** Statistical summary of elemental chemist composition results for the sediments and litho-samples.

también llamadas apiques con los resultado de uranio obtenidos por absorción atómica en laboratorio químico, ratifican los obtenidos en esta investigación, que cataloga a la fosforita uranífera como principal material parental, al igual que la secuencia lutítica y los mayores contenidos de uranio están ubicados al sur en el cierre del sinclinal de la franja sedimentaria cretácica, tal como fue ratificado

en trabajos posteriores como los de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (Pimiento-Rueda, 2011, Ríos-Guerrero, 2012).

Cabe aclarar que una medida realizada por un gamma-espectrómetro directamente en campo, sus resultados en cuentas por minuto (cpm) y luego convertidas a porcentaje de potasio (K) y partes por millón de uranio (U) y torio (Th)

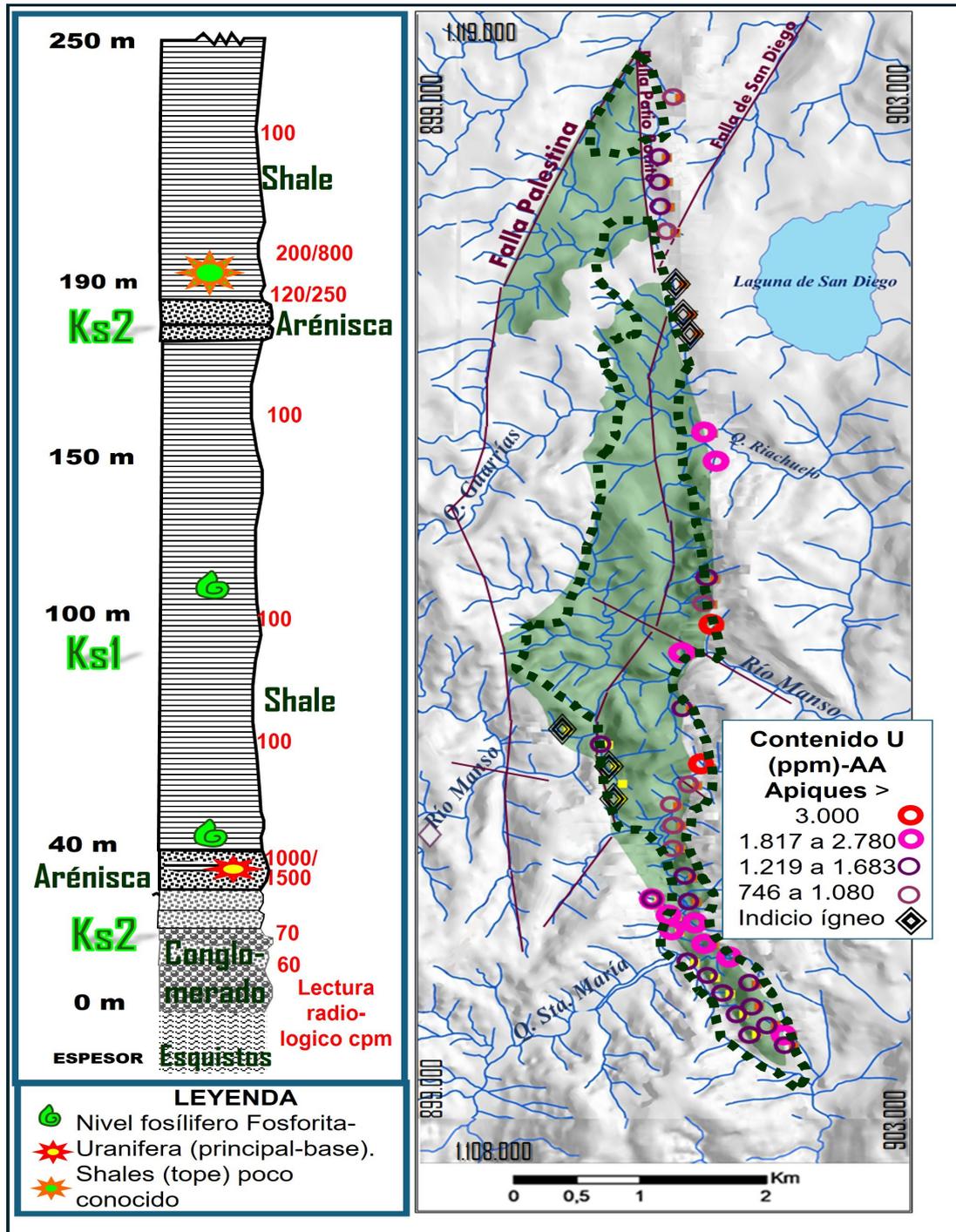


Figura 11. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia sedimentaria cretácica junto al mapa la distribución del uranio obtenida de los primeros apiques abiertos (trincheras) alrededor de la franja sedimentaria cretácica (Tomado y adaptado de Castaño, 1979). / **Figure 11.** For the cretaceous sedimentary sequence, to the left shows the stratigraphic column generalized with information about the thickness and radiologic lecture used as counts per minute (cpm). To the right, the map of uranium measured during the first trenches opened surrounding uriferous phosphorate, overlapping both versions of sedimentary sequence borders.

resultan incomparables de manera numérica y metodológica, con los resultados químicos obtenidos por una rutina instrumental en condiciones de laboratorio, siendo la manera recomendable de determinar aquellos elemen-

tos químicos que también resultaron enriquecidos junto al uranio.

Se contemplan tres temas, las condiciones ambientales durante la formación de la secuencia sedimentaria haciendo énfasis en el estrato uraní-

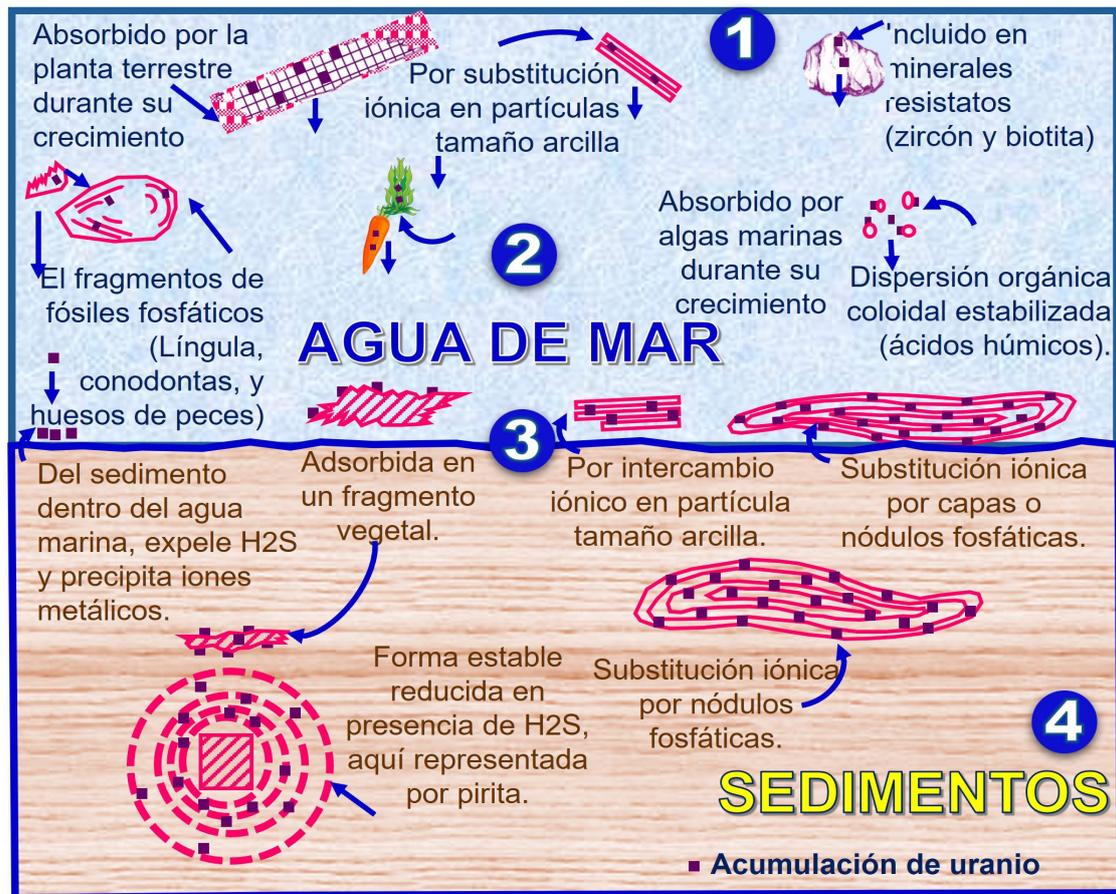


Figura 12. Diagrama esquemático de las asociaciones y periodos de emplazamiento del uranio en los componentes de los shales o lutitas negras marinas (cuadraditos violetas). El proceso es el siguiente (1) El uranio es incluido y transportado por el material fuente al sitio de deposición, (2) El uranio se absorbe o adsorbe desde el agua de mar reordenándose para ser depositado, (3) El uranio es adsorbido o precipitado en la superficie de la deposición del sedimento (4) El uranio es adsorbido o precipitado dentro del sedimento empapado de agua cayendo justo en la superficie de la secuencia sedimentaria. Tomado y adaptado de “Enriquecimiento de hidrocarburos y uranio en lutitas negras” página 5 (Swam, 1960)./ **Figure 12.** Diagrammatic sketch showing associations and time of emplacement of uranium with common constituents of marine black shale, uranium represented by violet squares. (1) Uranium included in source area material and transported to site of deposition, (2) Uranium absorber or adsorbed from sea water enroute to site of deposition. (3) Uranium adsorbed or precipitated at the surface of sediment deposition. (4) Uranium adsorbed or precipitated within water-soaked sediment just below the surface of deposition. Taken and adapted from “Oil yield and uranium content of black shales” page 5 (Swam, 1960)

fero (fosforita), el radón producto del decaimiento radiogénico del uranio y la fuente en sulfuros, principalmente de los metales que fueron registrados en las anomalías geoquímicas.

5.1. Emplazamiento del uranio en un ambiente marino

El enriquecimiento de uranio y elementos asociados en estratos fosfáticos se atribuye a un origen epigénico (Castaño, 1979) ocurridos durante el proceso de sedimentación en el cretácico, donde los iones disu-

tos en aguas marinas habrían sido atrapados por sedimentos, actuando los niveles fosfáticos como trampas que favorecieron la precipitación de elementos traza sensibles a cambios fisicoquímicos (Swanson, 1960). El proceso se resume así: desde un material fuente para este caso en ambiente marino, se incluyó y transporto el uranio junto a otros iones, se absorbe y precipita hasta ser depositado y hacer parte del material sedimentado (Figura 12).

Etayo-Serna (2015) respalda esta interpretación con el estudio de las amonitas presentes en la secuencia sedimentaria cretácica también

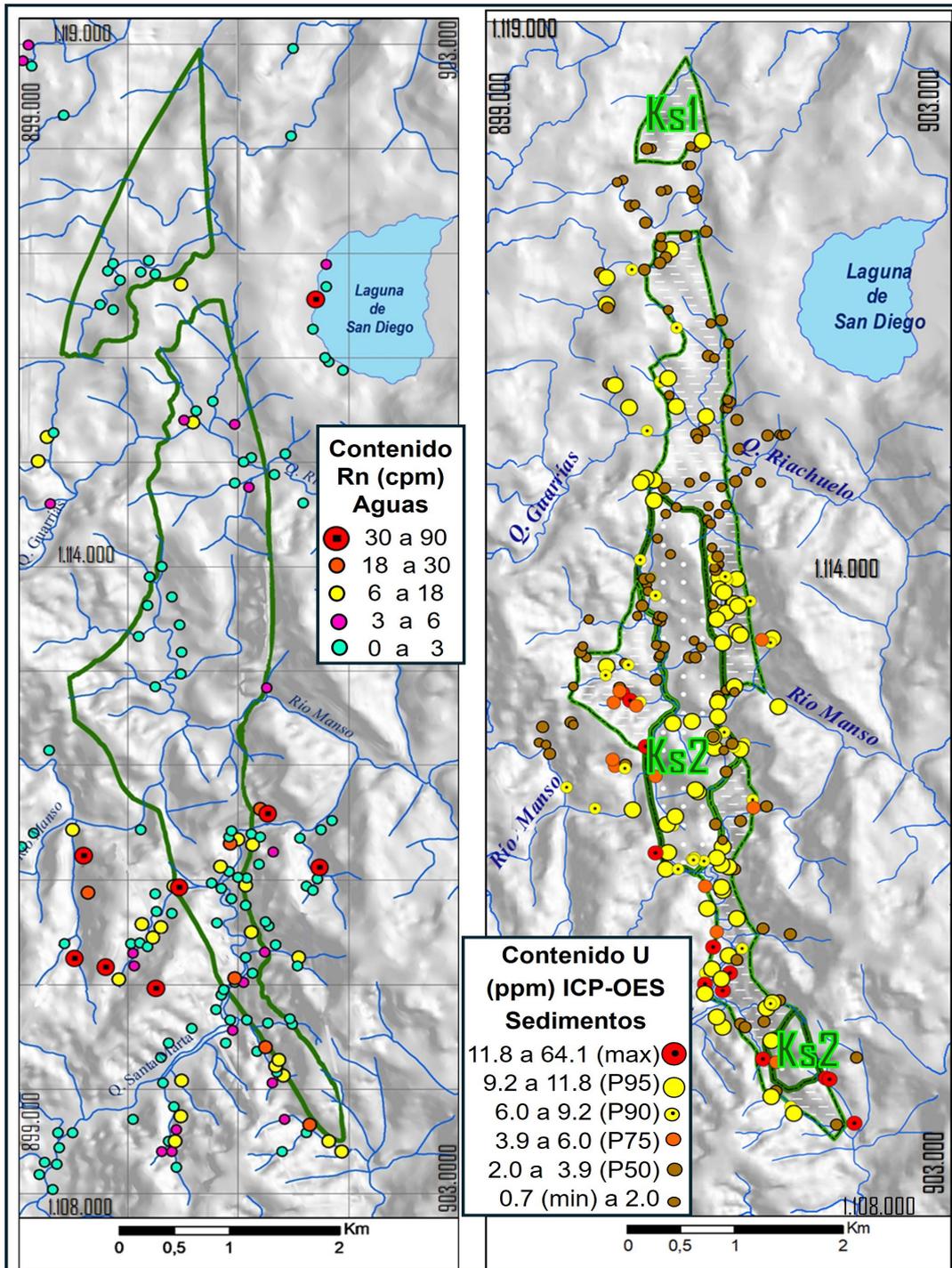


Figura 13. Mapa la distribución puntual del radón en aguas junto al de la distribución puntual del uranio en sedimentos de este estudio./**Figure 13.** Map of radon-waters punctual distribution joint to the map of uranium distribution content.

lladado horizonte fosilífero de Berlin (Barre-ra y Vesga, 1976), fauna marina la cual existía inicios del Albiano cuando la Cordillera Central emergió temporalmente como islas, antes de una gran inundación que depositó la secuencia lutítica, situación similar que permite encontrar estratos similares en otros

sectores de la cuenca sedimentaria (Barrero *et al.*, 2007).

Calificados como de origen epigenético en ambientes marinos como los procesos de oxidación-reducción que enriquecen los estratos fosfóricos de iones resaltando el uranio acompañados de algunas tierras raras y meta-

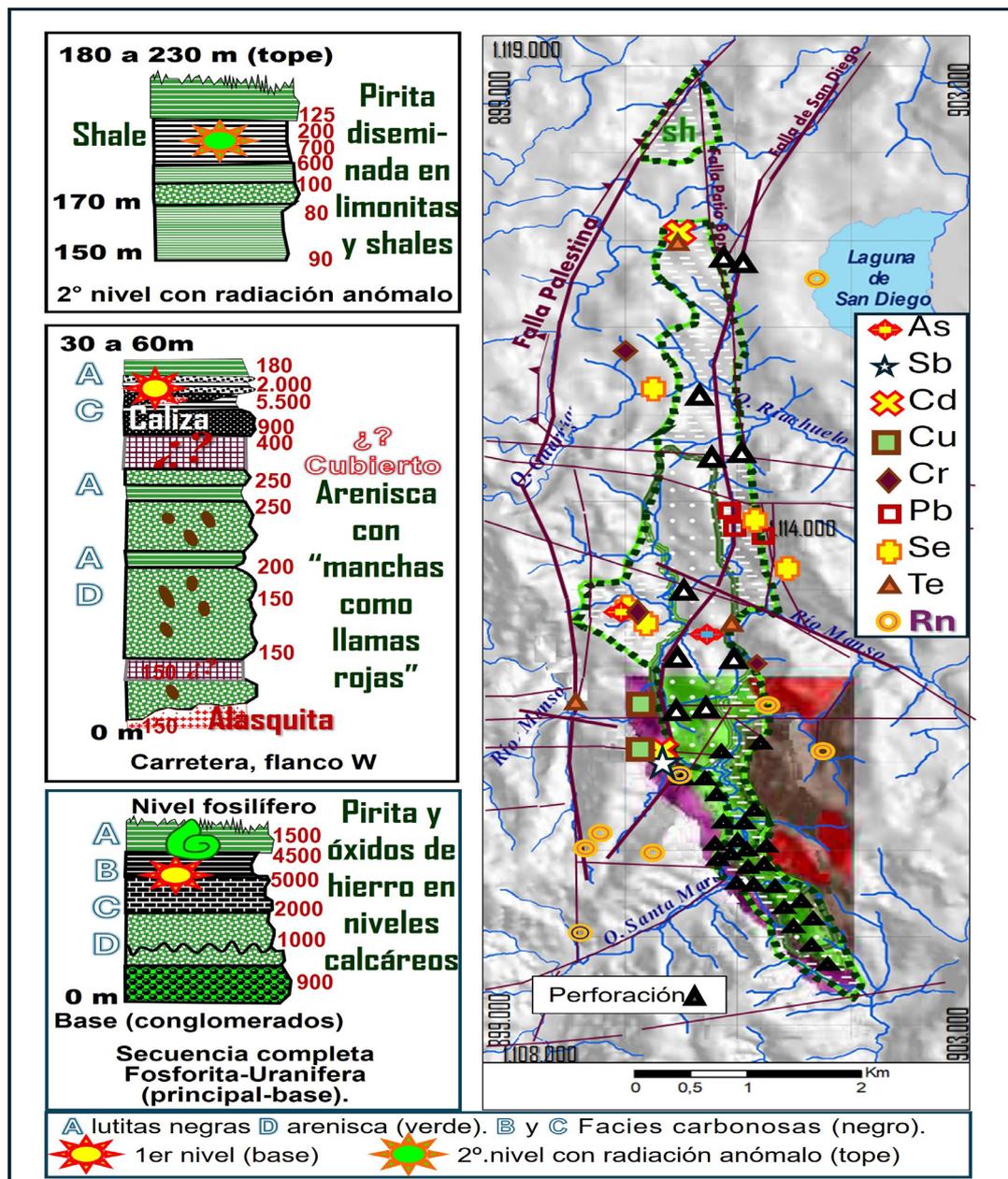


Figura 14. Algunas columnas estratigráficas con registros de la radiación y evidencias de sulfuros y mapa resumen de anomalías geoquímicas de metales pesados y por su importancia, se incluyó al radón en aguas. / **Figure 14.** Some local stratigraphic sections showing sulfur evidence and radioactive lectures and the map of heavy metals like geochemist anomalies, and the radon-Rn of waters for its relevance.

les (Al-Bassam & Magna, 2018; El-Anwar, 2019; Fleurance, et al., 2013; Kechiched et al., 2020; Lipinski et al., 2003) además del proceso de piritización observado en los estratos de lutitas negras, observado principalmente cerca de los bordes entre la columna de agua y los estratos ricos en carbono orgánico y querógeno, puede explicar el enriquecimiento en azufre (Lev y McLennan, 1999; Eder, 2020).

5.2. El radón radioisótopo de la cadena de decaimiento del uranio

Además del torio (Th) y el plomo (Pb) que si se encuentran incluidos en los resultados de composición química elemental en los sedimentos y lito-muestras incluso en la información compilada, los procesos de oxidación y reducción son difíciles de identificar. Debido a la importancia del radón (Rn) entre los elementos que se generan durante la cadena de decaimiento



Figura 15. Mosaico de fotografías que muestra la cobertura vegetal que cubren afloramientos rocosos donde se desarrollan los suelos donde crecen./**Figure 15.** *Photographic parthchwork showing the vegetable.*

del uranio, dentro de la compilación realizada se encontró su detección en aguas en campo, por una técnica aplicada durante las labores de exploración y reconocimiento de fuentes uraníferas denominada emanometría (Gingrich, 1984).

La figura 13 muestra el mapa de la distribución puntual del contenido de radón en aguas (emanometria) y se observa en el mapa

del radón que su contenido aumenta al alejarse de la fuente, sugiriendo mayor movilidad que el uranio. Este mapa comparado con el de la distribución del contenido del uranio en los sedimentos de este estudio se aprecia en ambos mapas hacia el sur de la franja se observa un incremento en el radón (Rn) en aguas y el uranio en sedimentos respectivamente, similar a los mapas de uranio generados de los resultados compilados (Naran-

jo, 1983) tanto la fracción gruesa (malla 80) y la fina (malla 200).

Cabe mencionar que el radón (Rn-222) único dato hidrogeoquímico disponible para el área de estudio, isótopo fue mencionado en el estudio de factibilidad del depósito uranífero de Berlín, como gas tóxico y radiactivo emitido durante la remoción del recurso (Klerk *et al.*, 2013).

5.3. La pirita y sulfuros fuentes de metales

Ante los reportes de óxidos de hierro en afloramientos meteorizados por procesos de oxidación de la pirita lo que evidencia la presencia de sulfuros, cuya oxidación genera sulfatos altamente solubles en agua y liberadores de iones (Lottermoser, 2010 y 2016) tiene especial relevancia como fuente de metales representando un riesgo para los ecosistemas, además la secuencia lutítica es reconocida por los sulfuros (Fleurance, *et al.*, 2013).

Durante los levantamientos de campo en transversales se observaron por escorrentía de aguas, alteraciones por oxidación en planos paralelos de la secuencia lutítica, reconociendo diaclasas y cavidades rellenas con óxidos de hierro (Castaño, 1979) por lo que además de la fosforita uranífera, los sulfuros presentes en la secuencia lutítica son una fuente importante.

Otras referencias como los reportes de sulfuros ratificados por Cáceres, 2012 y Cáceres-Bottia, *et al.*, 2023, Pimiento-Rueda, 2011, Ríos-Guerrero, 2012 por núcleos de perforación y verificación de campo. Se seleccionaron algunas secciones estratigráficas con sus respectivos espesores y lecturas radiométricas, las cuales fueron tomadas y adaptadas de Castaño (1979) y se muestran junto a un mapa resumen (Figura 14) que ubica valores atípicos de metales con alto riesgo ambiental.

5.4. Otros materiales parentales

A partir del análisis estadístico, los sedimentos registraron otros materiales parentales distintos a la fosforita uranífera y la secuencia lutítica pueden aportar contenidos importan-

tes de elementos químicos, siendo las otras unidades litológicas circundantes a la franja como las rocas ígneas y metamórficas. Otros elementos también podrían haber sido movilizados mediante procesos ígneos e hidrotermales, tal es el caso del radón (Rn) con una anomalía en la Laguna de San Diego y que se relaciona con el sistema volcánico de la Cordillera Central.

Cabe mencionar que se compilaron los resultados químicos con énfasis en la alaskita (Muñoz, 1983) del IAN (Instituto de Asuntos Nucleares) y posteriormente el Servicio Geológico Colombiano, adelanto estudios con un enfoque para la geotermia con énfasis en las rocas ígneas del lugar (Rueda y Rodríguez, 2016 y Rueda-Gutiérrez, 2019) que ratifican los resultados obtenidos en sedimentos, es decir que los elementos de los sedimentos con contenidos por encima a los obtenidos en las litomuestras, se movilizaron desde otros materiales parentales como las rocas ígneas.

También es posible que rocas metamórficas contribuyan como fuente de ciertos elementos, tal es el caso del níquel mencionado en el Complejo de Cajamarca (Álvarez, 1983; Nivia *et al.*, 2006 y Restrepo *et al.*, 2009) incluso como aporte a la misma secuencia durante su proceso de formación (Swanson, 1960).

Conclusiones y recomendaciones

Se postula a la fosforita uranífera como el principal material parental en la franja sedimentaria cretácica, como mayor aporte del proceso de dispersión geoquímica. La composición química elemental de las litomuestras así como a los sedimentos (material reciente) registra que el uranio se encuentra focalizado en el cierre del sinclinal al sur de la franja sedimentaria cretácica.

Evidencias de campo respecto a la presencia de sulfuros reportadas en columnas estratigráficas, afloramientos y perforación, se asume que la secuencia lutítica puede ser otro trascendental material parental, con registros de pirita y otros sulfuros capaces de liberar metales pesados,

como el arsénico, antimonio, cadmio, cromo, plomo y selenio, elementos calificados de potencialmente peligrosos en caso de que el suelo quede desnudo para sus fuentes hídricas. Su cobertura vegetal debe ser preservada y mantener un control y monitoreo periódico, así como identificar aquellos iones capaces de absorber sus raíces (Figura 15).

Para complementar, profundizar y comprender mejor el comportamiento geoquímico dentro de la secuencia sedimentaria cretácica, se hace necesaria la revisión de la cadena de decaimiento radioactivo del uranio, con especial atención a la distribución isotópica de radón y plomo, así como aquellos metales calcófilos con afinidad el azufre.

A pesar del evidente origen epigenético de la fosforita uranífera junto a la secuencia lutítica en la columna estratigráfica, se deben contemplar otros materiales parentales principalmente las rocas ígneas sin descartar también las metamórficas.

Agradecimientos

Se enaltece el trabajo de aquellos geólogos colombianos inéditos, quienes adelantaron y desarrollaron las diversas campañas de campo a lo largo de décadas, aportando su invaluable conocimiento de la franja sedimentaria cretácica donde alberga el único recurso uranífero con cálculo de reservas en Colombia, cuyo aporte permanece desconocido. Y al Servicio Geológico Colombiano al mantener disponible la información en el Motor de Integración de Información Geo-científica -MIIG de Colombia.

Referencias bibliográficas

- Al-Bassam, K. y Magna, T. 2018. Distribution and significance of rare earth elements in Cenomanian-Turonian phosphate components and mudstones from the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Bulletin of Geosciences*, 347-368. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1687>
- Álvarez, A. 1983. Geología de la cordillera Central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides meso-cenozoicos. *Boletín Geológico*, 26(2), 1-175. Recuperado a partir de <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/53>
- Barrero, D. y Vesga, C., 1976. Mapa Geológico del Cuadrángulo K-9 Armero y Mitad sur del Cuadrángulo J-9, a escala 1:100.000 La Dorada (plancha 188). Servicio Geológico de Colombia.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. y Martínez, J. 2007. *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Edited and compiled by: ANH and B&M Exploration Ltda. ISBN: 978-958-98237-0-5.
- Batanero, C. y Díaz, C. 2008. Análisis de datos con *Statgraphics*. Departamento de Didáctica de la Matemática Facultad de Ciencias de la Educación. Universidad de Granada. ISBN: 978-84-691-4796-2
- Cáceres, A. 2012. *Genesis of the sediment-hosted uraniferous phosphate deposit in the Berlin Project, Central Cordillera, Colombia, and its implications for exploration*. M.Sc. Thesis, Queen's University, Ontario, Canada.
- Cáceres-Bottia, A., Mantilla-Figueroa, L.C., Ríos-Reyes, C.A. and Pimiento-Rueda, R., 2023. *General considerations on the genesis of Uranium and Vanadium occurrence in the Cretaceous sedimentary rocks of the Berlin Synclinal, Central Cordillera (Colombian Andes)*. *Boletín de Geología*, 45(3), pp.79-93.
- Castaño, R. 1979. Informe Fin de Campaña del Permiso 2 Berlín. Informe No.109. G-388. Minatome Colombiana Ltda.
- Castaño, R. y Menicucci, S. 1984. Geología y mineralización urano-fosfática en el sinclinal de Berlín, Caldas (Colombia). Geología y metalogénesis de los depósitos y manifestaciones uraníferos de Sudamérica. IAEA, Vienna, pp 239-244. *IUREP-Orientation phase mission report Colombia*.
- Cortes, R. 1990. Observaciones y Descripciones Petrológicas y Estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina. *Geología Colombiana*, 17, pp.211-218.
- Dahlkamp, F. 2009. *Uranium Deposits of the World Asia*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-78557-6
- Dahlkamp, F. 2010. *Uranium Deposits of the World USA and Latin America*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-78555-2.
- Dold, B. 2014. Mineralogical and Geochemical Controls in Biomineralization and Bioremediation. Pag. 119. From book *Geomicrobiology and Biogeochemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-41837-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-41837-2
- Eder, V. 2020. *Pyritization of Rocks in Black Shale/Host*

- Rock Transition Zones: Evidence from the Bazhenov Formation, Western Siberia*. Lithology and Mineral Resources, 55(3), 218-230. <https://doi.org/10.1134/S0024490220030025>
- El-Anwar, Abou. 2019. *Lithologic characterization of the phosphorite-bearing Dumi Formation (Campanian), South Esna, West Nile Valley, Egypt*. Carbonates and Evaporites, 34(3), 793-805. <https://doi.org/10.1007/s13146-018-0442-1>
- Emsbo, P., Mclaughlin, P. I., Breit, G. N., Edward, A. y Koenig, A. E. 2015. *Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis*. Gondwana Research, 27(2), 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.008>
- Etayo-Serna, F. 2015. Paleontología de los niveles fosilíferos del “horizonte de Berlín”. (Anexo F). Forma parte del Producto “Geología del Área Geotérmica de San Diego, Caldas. Versión año 2016” ID-11434. Interno. Servicio Geológico Colombiano.
- Fleurance, S., Cuney, M., Malartre, F., & Reyx, J. 2013. *Origin of the extreme polymetallic enrichment (Cd, Cr, Mo, Ni, U, V, Zn) of the Late Cretaceous–Early Tertiary Belqa Group, central Jordan*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 369, 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.10.020>
- Garzón, T. 1984. Síntesis de los trabajos Geológicos-Mineros realizados en el prospecto Urano-Fosfático de Berlín-Caldas. Instituto de Asuntos Nucleares. 36 p. IAN-AMP (10-067.0).
- Gaviria, S., 2015. Química para geología. Aplicación en laboratorio y campo. Universidad Nacional de Colombia. ISBN; 978-775-430-8
- Gingrich, J.E. 1984. *Radon as a geochemical exploration tool*. Journal of Geochemical Exploration 21, 19–39. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(84\)90032-3](https://doi.org/10.1016/0375-6742(84)90032-3)
- Goldsmith, V. 1958. Geochemistry. Londres, Oxford, Universidad de Press.
- Gonçalves, M., Mateus, A., Oliveira, V. 2001. *Geochemical anomaly separation by multifractal modelling*. Journal of Geochemical Exploration. Volume 72, Issue 2, Pages 91-114, ISSN 0375-6742. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00156-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00156-X)
- Guerrero, J., Sarmiento G., Navarrete R. 2000: *The Stratigraphy of the West Side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of Selected Areas and Type Localities Including Aípe, Guaduas, Ortega, and Piedras*. Geología Colombiana 25, Pgs. 45-110, 12 Pl., 5
- Güiza-González, S. 2006. Compilación y diagnóstico de la información geoquímica histórica, en la parte central de la cordillera Oriental. Tomos 1 y 2. Informe interno. Bogotá. Ingeominas.
- Güiza-González, S. 2020. Factibilidad geoquímica de elementos críticos en la Cordillera Oriental. Artículo inédito. DOI: 10.13140/RG.2.2.34907.69927 Acceso libre en
- Harraz, H. 2016. Phosphorite ore deposits. DOI: 10.13140/RG.2.1.4738.6487
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 1979. *Gamma ray Surveys in Uranium Exploration*. Technical Reports Series No. 186. Viena. STI/DOC/010/186. ISBN 92-0-145079-6
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 2004. *Recent developments in uranium exploration, production, and environmental issues*. IAEA-TECDOC-1463. Nuclear Fuel Cycle and Materials Section. Vienna International Centre P.O. Box 100 1400 Vienna, Austria.
- Inwood, N., Goode, J., Miller, P. 2012. *Berlin project, Colombia*. National Instrument NI 43-101. Report Prepared by Coffey Mining Pty Ltd. on behalf of: U3O8 Corp.
- Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Kocsis, L., Salmi-Laouar, S., Bosch, D., Ameur-Zaimeche, O., Fougou, A., & Larit, H. 2020. *Comprehensive REE + Y and sensitive redox trace elements of Algerian phosphorites (Tébessa, eastern Algeria): A geochemical study and depositional environments tracking*. Journal of Geochemical Exploration, 208, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2019.106396>
- King, J. y Hausel, D. 1991. *Rare Earth Elements and Yttrium in Wyoming — From Oddities to Resources*. Mineral Resources of Wyoming. 42nd Annual Field Conference Guidebook, Pages 49-70
- Klerk, L., Niemann, P., Miller, P., Véliz, P., Corley, D. 2013. *Preliminary economic assessment on the Berlin deposit, Colombia*. Report Prepared for U3O8 Corp. Tenova Mining & Minerals.
- Landmeyer, J. 2012. Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater Historical Foundation, Hydrologic Control, and Contaminant Remediation. Springer Science. ISBN 978-94-007-1956-9. DOI 10.1007/978-94-007-1957-6
- Lett, R. y Jackaman, W. 2004. *Stream geochemical survey guide*. Geofile 2004-07. British Columbia Ministry of Energy and Mines.
- Lev, S. y McLennan, G. 1999. *Mineralogical Controls on Rare Earth Mobility During Black-Shale Diagenesis*. SEPM Journal of Sedimentary Research, Vol. 69. <https://doi.org/10.1306/d4268b0d-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Licht, O. 1998. *Prospecção Geoquímica - Princípios, Técnicas e Métodos*. Rio de Janeiro. CPRM. 236 P. 10.13140/RG.2.1.3359.0485
- Lipinski, M., Warning, B., Brumsack, H. J. 2003. *Trace metal signatures of Jurassic/Cretaceous black shales from the Norwegian Shelf and the Barents Sea*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Volume 190. Pages 459-475. ISSN 0031-0182. <https://doi.org/10.1016/>

- S0031-0182(02)00619-3.
- Lottermoser, B. G. 2010. Chapter 6. *Radioactive Wastes of Uranium Ores. Book Mine wastes: Characterization, treatment, and environmental impacts* (3rd ed). Springer. ISBN 978-3-642-12418-1 e-ISBN 978-3-642-12419-8 DOI 10.1007/978-3-642-12419-8
- Lottermoser, B. G. 2016. Chapter 1. Predictive Environmental Indicators in *Metal Mining Environmental indicators in metal mining*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-319-42729-4 ISBN 978-3-319-42731-7 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-42731-7
- Mahoney, C. 2018. *Inorganic geochemical characterization of the Cretaceous source rocks of the Eastern Cordillera, Colombia*. Newcastle University. PhD Thesis.
- Manahan, S. 2005. *Environmental Chemistry*. 8.a ed. Nueva York : CRC Press LLC. ISBN: 1-566706335.
- Minty B. y Hovgaard J. 2002. *Reducing noise in gamma-ray spectrometry using spectral component analysis*. Exploration Geophysics 33, 172-176. <https://doi.org/10.1071/EG02172>
- Monsalve, M.L., Ortiz, I, Norini, G. 2019. El Escondido, a newly identified silicic Quaternary volcano in the NE region of the northern volcanic segment (Central Cordillera of Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 383, Pages 47-62. ISSN 0377-0273. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.12.010>
- Muñoz, C. 1983. Determinación del Potencial Uranífero de la Alaskita de Samaná, Departamento de Caldas, Colombia. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- Naranjo, J. 1983. Investigación del Potencial Uranífero en los Shales Negros del Sinclinal de Berlín, Caldas. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- Nivia, A., Marriner, G. F., Kerr, A. C., & Tarney, J. (2006). The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 423-436.
- OECD-NEA, Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. 2018. *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*, NEA No. 7413. OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Paris.
- Ortiz-Martin, I., 2015. Modelo Estructural del Maar de San Diego, volcán septentrional de los Andes Colombianos. Tesis de magister en geología. Departamento de geociencias, facultad de ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Paris, G. y Romero, J. 1993. Fallas activas de Colombia. *Boletín Geológico*, Vol. 34 (2 - 3) - Ingeominas
- Pimiento, R., 2011. Mineralogía y petrografía de la mineralización de uranio en fosforitas del cretácico inferior, sinclinal de Berlín, Cordillera Central, (Departamento de Caldas, Colombia). Proyecto de grado. Escuela de geología, facultad de fisicoquímica, Universidad Industrial de Santander.
- PNUD-Organismo Internacional de Energía Atómica. 1983. Prospección de Uranio en Colombia, conclusiones y recomendaciones. Informe preparado para el Gobierno de Colombia en su carácter de Organismo de Ejecución del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD. IAEA/UNDP-COL-76-031-TR.
- Porras, A. y Díaz-Velásquez, J. 2019. El uranio como recurso energético y su actualidad minera en Colombia. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69576>
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. 2005. *Background and threshold: critical comparison of methods of determination, Science of The Total Environment*. Volume 346, Issues 1–3. Pages 1-16. ISSN 0048-9697.
- Restrepo, J., Ordóñez-Carmona, O., Martens, U., & Correa, A. 2009. Terrenos, complejos y provincias en la cordillera central de Colombia. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 9(2), 49-56.
- Ríos-Guerrero, J. 2012. Estratigrafía y ambiente de depósito del sinclinal de Berlín, Cordillera Central, (Departamento de Caldas, Colombia). Proyecto de grado. Escuela de geología, facultad de fisicoquímica, Universidad Industrial de Santander.
- Rose, A., Hawkess, H. and Webb, J. 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Second edition. xvii + 657 pp. London Academic Press. ISBN 0 12 596250 9 & 0 12 596252 5
- Rose, A. 1994. *Drainage geochemistry in uranium exploration*. In: Hale, M. and Plant, J. A. (Eds.). *Handbook of Exploration geochemistry*. Vol 6 - Drainage geochemistry. p.559-599
- Rueda, J. y Rodríguez, O. 2016. Geología del área geotérmica de San Diego, Caldas. Informe Técnico (Interno). Forma parte del Producto “Geología del Área Geotérmica de San Diego, Caldas. Versión año 2016” ID-11434. Servicio Geológico Colombiano.
- Rueda-Gutiérrez, J. 2019. Aportes al conocimiento del Magmatismo de la Cordillera Central de Colombia en su Flanco Oriental: Área geotérmica de San Diego, Samaná, Caldas. *Boletín de Geología*, 41(2), 45-70. DOI: 10.18273/revbol.v41n2-2019003
- Sarmiento, L. 2001. *Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes*. Thesis to PhD of the Tectonics Department, Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam. Netherlands Research School of Sedimentary Geology (NSG). Publication number; 2002.01.01. ISBN 9287-25-5.
- SGS-Laboratory Testing Services. 2020. *Geochemistry-guide*.

- Sinha, A., Sinha, R., Khare, S. 2014. Chapter 6. Heavy Metal Bioremediation and Nanoparticle Synthesis by Metallophiles. Pag. 101. From book Geomicrobiology and Biogeochemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-41837-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-41837-2
- Swanson, V. 1960. *Oil yield and uranium content of black shales. Geological Survey Professional Paper 356- A.* <https://doi.org/10.3133/pp356A>
- Téllez, N., Vargas, S. y Pérez, A. 2019. Uranio. En: Recursos minerales de Colombia, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Vargas, G. 2015. Guía y catálogo de unidades geomorfológicas en Colombia por sensores remotos. Universidad Nacional de Colombia. ISBN: 978-958-775-223-6
- Volp, K. 2008. *Independent technical reports on the uranium exploration properties in Colombia.* Reporte inédito.

Recibido : 19 de febrero del 2025

Aceptado : 01 de octubre del 2025