

## **Estrategia para estudiar la distribución probabilística de recursos uraníferos en el noreste de México**

*David Sánchez Ramírez, José de Jesús Rodríguez Salinas, Sofía del Pilar Mendoza Castillo*  
*Servicio Geológico Mexicano*  
*Blvd. Felipe Ángeles km. 93.50 – 4, Col. Venta Prieta, C.P. 42083, Pachuca de Soto, Hgo. México.*  
[davidsanchez@sgm.gob.mx](mailto:davidsanchez@sgm.gob.mx), [josesalinas@sgm.gob.mx](mailto:josesalinas@sgm.gob.mx), [sofiamendoza@sgm.gob.mx](mailto:sofiamendoza@sgm.gob.mx)

*Miguel Balcázar\*, Pablo Peña García, Graciela Zarazúa, Arturo López Martínez*  
*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*  
*Carretera México – Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México, C.P. 52750,*  
[miguel.balcazar@inin.gob.mx](mailto:miguel.balcazar@inin.gob.mx), [pablo.peña@inin.gob.mx](mailto:pablo.peña@inin.gob.mx), [graciela.zarazua@inin.gob.mx](mailto:graciela.zarazua@inin.gob.mx),  
[arturo.lopez@inin.gob.mx](mailto:arturo.lopez@inin.gob.mx)

### **Resumen**

Mediante convenio ININ-SGM se propone la determinación probabilística de yacimientos de uranio del tipo *roll-fonts*, ubicados en la Cuenca de Burgos. De las publicaciones sobre los depósitos de uranio en esta cuenca en el estado de Texas y la similitud de la estratigrafía con la correspondiente al noreste de México dan solidez a la propuesta. Se propone utilizar un Sistema de Información Geográfica como plataforma de almacenamiento y procesamiento de datos geológicos, geofísicos, hidrológicos, geoquímicos y radiométricos. El acopio de información del SGM sobre los minerales radiactivos en México y la moderna infraestructura de multi análisis isotópico del ININ, permiten abordar con éxito este estudio. La sensibilidad de estos equipos es de unas cuantas partes por trillón, para los isótopos de uranio, torio y radio; se disponen de equipos portátiles de análisis en campo para isotópico de radón. Se ha identificado un área dentro de Cuenca de Burgos denominada La Coma, donde los estudios realizados permitieron establecer un modelo conceptual de los ambientes hidrogeoquímicos que definen zonas de oxidación, transición y reducción del mineral de uranio, susceptible de ser migrado por un flujo subterráneo hasta precipitarlo en areniscas receptoras del mineral. Se han realizado las primeras evaluaciones de uranio y torio en agua subterránea utilizando estándares conocidos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La generación de electricidad con combustibles nucleares es viable y económica, por lo que está considerada como la fuente de energía alternativa, en los programas gubernamentales, ya que México, desde 2012 se ha comprometido con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, fijándose metas de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, en 30% para el 2020 y por 50% para 2050, tal y como se estipuló en la Ley General de Cambio Climático (LGCC) [1]. México posee reservas de mineral uranio cuya evaluación intermitente dio inicio a mediados del siglo pasado. En 1957, el Congreso Mexicano, aprobó otorgar compensaciones económicas a individuos o compañías que exploraran y encontraran uranio. Es así como la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) inició trabajos de exploración de uranio entre 1963 y 1968.

Entre 1963 a 1983 se desarrolla en México un amplio programa de exploración de uranio iniciando un programa de radiometría aérea. Las tres principales anomalías de uranio se determinaron en 1) sedimentos terciarios en el noreste de México; 2) calizas cretácicas y rocas volcánicas terciarias en el Estado de Chihuahua; fue ahí en la sierra de Peña Blanca, dentro de una mina denominada La Margarita, donde se identificó por primera vez un nueva cristalización de mineral de uranio-vanadato de origen volcánico, denominada Margaritasita [2]; y en 3) rocas ígneas terciarias del Estado de Sonora. Derivado de la verificación terrestre de esas anomalías se desarrollaron diferentes estudios de índole geológico, geoquímico, geofísico, perforación y desarrollo de obras mineras de exploración y evaluación de reservas, llegando en algunas localidades a estudios de factibilidad y preparación de yacimientos para su explotación.

Como resultado de esa exploración, la compañía paraestatal Uranio Mexicano (URAMEX), consideraba 52 localidades importantes con manifestaciones de uranio, siendo los proyectos con mayores posibilidades los ubicados en Peña Blanca en Chihuahua, Cuenca de Burgos en Nuevo León-Tamaulipas y Los Amoles en Sonora.

Durante las décadas de los 70's e inicio de los 80's, URAMEX llevo a cabo exploración de depósitos de uranio en la Cuenca de Burgos, culminando con la detección de un centenar anomalías, que indicaban una exploración más detallada con fines evaluativos; los prospectos con mayores posibilidades fueron La Coma, Buenavista I y el Chapote entre otros.

En el momento del cierre de actividades de URAMEX, la exploración de uranio quedo suspendida desde 1983. La información técnica generada por URAMEX estuvo resguardada en diferentes instituciones, hasta que finalmente en 2005 fue entregada al Servicio Geológico Mexicano (SGM). Los diversos sitios quedaron bajo el resguardo del Consejo de Recursos Minerales (CRM), hoy SGM. En 2008 el SGM, reactiva la exploración por uranio, revisando la información generada por URAMEX y por otras fuentes, con el propósito de actualizar y validar las reservas de mineral de uranio, calculadas por URAMEX.

Adicionalmente, por ley, el SGM es la única entidad que tiene bajo su responsabilidad la exploración explotación y beneficio de minerales radiactivos. Ya que la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear [3] establece en su Artículo 5° que los minerales radiactivos, son propiedad de la Nación; y su exploración, explotación y beneficio no podrá ser materia de concesión o contrato.

La exploración y beneficio de los minerales radiactivos están definidos en la fracción IX del artículo 3o. En su artículo 9 establece que la exploración de minerales radiactivos estará a cargo exclusivo y directo del organismo público federal descentralizado denominado Consejo de Recursos Minerales, tanto en terrenos libres como no libres. Esta actividad se ajustará al programa y condiciones técnicas que determine la Secretaría de Energía la cual asignará al Organismo mencionado los lotes que se requieran, para la prospección de dichos minerales.

Y en su Artículo 10, se indica que la explotación y beneficio de minerales radiactivos estará a cargo de la Comisión de Fomento Minero, a su vez la Ley Minera del Artículo 27 Constitucional [3], ante la desaparición de la Comisión de Fomento Minero, dispone en sus artículo transitorio Quinto que las actividades que señalen otras leyes para la Comisión de Fomento Minero se entenderán encomendadas al Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio Geológico Mexicano).

El uranio es un recurso económico que cuya evaluación no es completa en México. En apoyo a esta evaluación el Servicio Geológico Mexicano realiza la exploración y evaluación de minerales

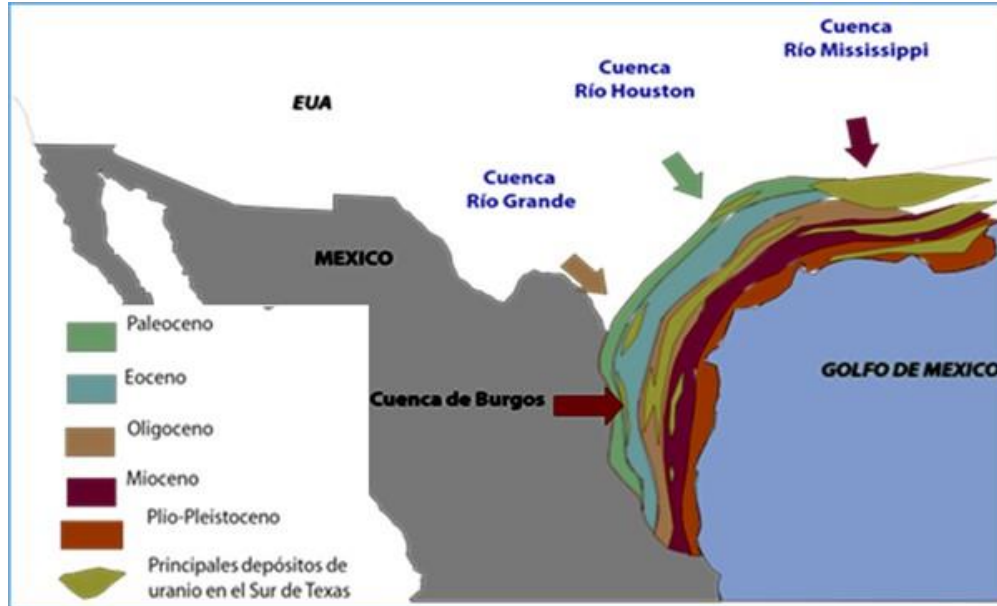
radiactivos, facultado por la Ley Reglamentaria del Art. 27 Constitucional en materia nuclear [3], con la finalidad de contribuir satisfacer las necesidades identificadas en la Prospectiva del sector Eléctrico 2013–2027 [5] y en la Estrategia Nacional de Energía 2014–2028 [6] publicadas por SENER.

Entonces el marco regulativo faculta a la SENER y al SGM como las únicas dos entidades en México para la prospección de minerales radiactivos; con este motivo el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), estableció un convenio de colaboración con el SGM en octubre de 2014 mediante el cual el ININ aporta su capacidad en Geofísica Nuclear para la determinación de Blancos de Exploración de Uranio. Esto es, determinar la distribución probabilística de los depósitos de mineral radiactivo mediante la evaluación de guías de prospección. Las guías de prospección de uranio, las constituyen las pequeñas concentraciones de sus productos de decaimiento con la sensibilidad de detección que el equipamiento actual del ININ tiene. El objetivo de este artículo es presentar las estrategias de esta determinación probabilística.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Sitio propuesto de Estudio

La Cuenca de Burgos con una extensión de 9595 km<sup>2</sup>, se localiza en el noreste de la república Mexicana, geográfica y geológicamente es contigua a la cuenca del Río Grande del sur de Texas, conformando una franja bien definida que se extienden a ambos lados de la frontera entre los dos países; el área total compartida de esta cuenca supera los 40,000 km<sup>2</sup> [7].



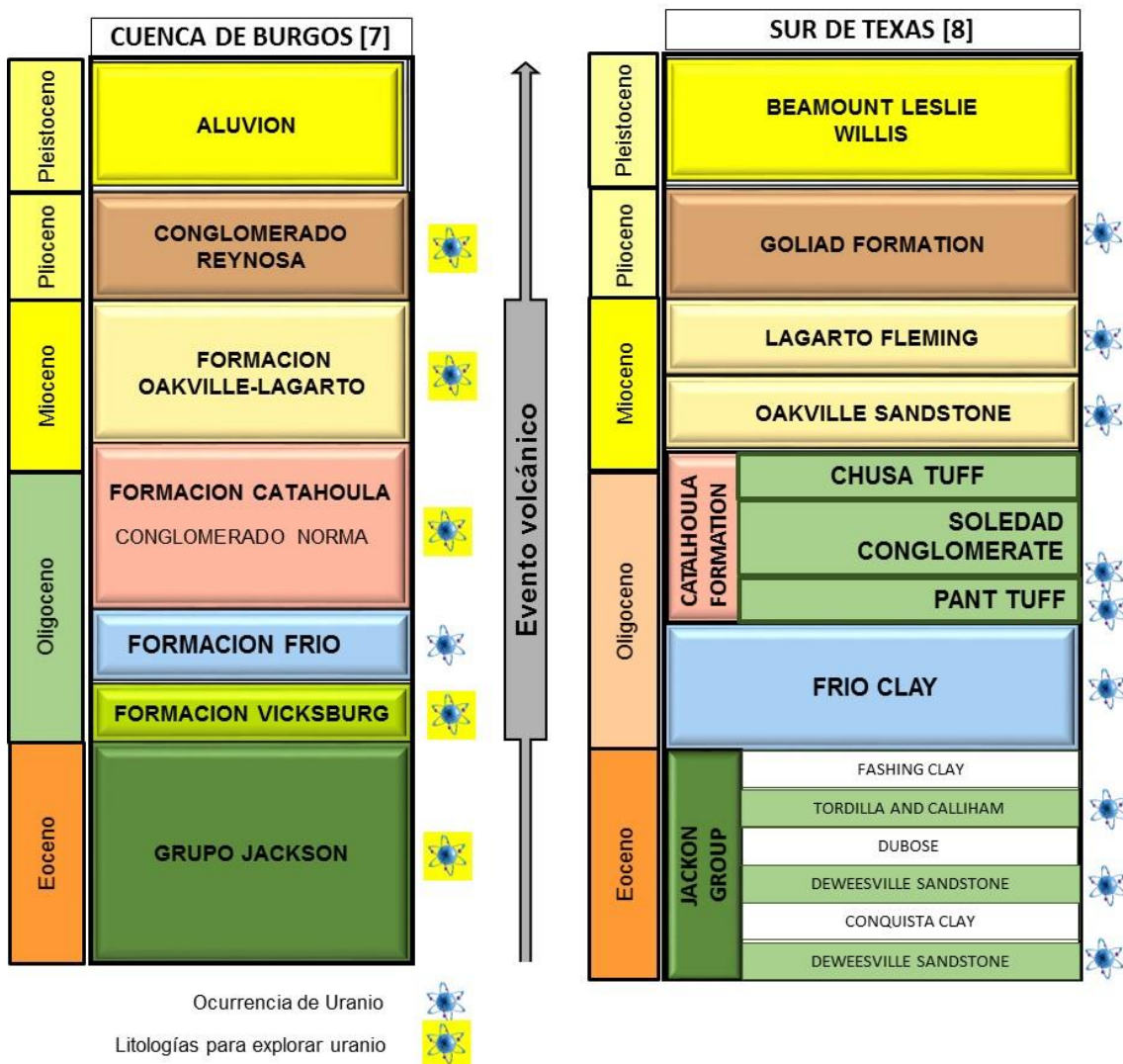
**Figura 1. Geocronología de la Cuenca de Burgos del sur de Texas y noreste del país, donde se localizan yacimientos de Uranio**

La Cuenca de Burgos en conjunción con el denominado Embahiamiento del Rio Grande del sur de Texas, conforman una sola cuenca sedimentaria relacionada con la regresión marina que inicio en el terciario inferior y continua hasta la actualidad.

Los mecanismos geocronológicos de formación de los yacimientos uraníferos del Sur de Texas, son los mismos que en el norte de Tamaulipas, por pertenecer a la misma cuenca geológica. Se identifica la conformación de una franja a lo largo de una llanura de bajo relieve de la costa central y sur de Texas, que se extiende hasta el estado de Tamaulipas, que bien puede denominarse como la Provincia Uranífera Burgos-Sur de Texas [7] (Fig. 1).

Mediante el análisis geológico, estratigráfico y geocronológico se puede constatar que existen condiciones de formación de depósitos similares entre las unidades litológicas de la Cuenca de Burgos [7] y la Cuenca del Río Grande del Sur de Texas, y es de esperarse que en la Cuenca de Burgos correspondiente al norte del estado de Tamaulipas existan las condiciones de acumulación de uranio, en las mismas unidades compartidas con las de la Cuenca del Río Grande del sur de Texas (Galloway W. E. 1979) [8] y por lo tanto se debe reenfocar la exploración por uranio en la Cuenca de Burgos sobre todo hacia las formaciones del Oligoceno y Mioceno.

La Figura 2 despliega las columnas cronológica-estratigráficas de la compartida Cuenca de Burgos del norte de Tamaulipas (izquierda) y del Sur de Texas (derecha).



**Figura 2. Columnas estratigráficas del Sur de Texas y de la Cuenca de Burgos**

En las formaciones del Sur de Texas se han identificado los yacimientos de uranio marcados en azul. En las correspondientes formaciones en la Cuenca de Burgos, solo se ha identificado la existencia de mineral de Uranio en la correspondiente formación Frio existiendo un de yacimientos de uranio (marcadas en amarillo) en las demás formaciones. El tipo de mineralización de uranio en la cuenca de Burgos, pertenece a los denominados *roll-fronts*.

## 2.2 Estudio propuesto de Depósitos *Roll-fronts*

Los yacimientos de uranio del tipo *Roll-fronts* de la cuenca de Burgos se originaron a partir de una fuente de uranio provenientes de rocas volcánicas uraníferas generalmente alcalinas. La fuente de uranio en estado oxidado ( $U^{+6}$ ) se localiza al oeste de la cuenca de Burgos donde una corriente de agua subterránea lo lixivivia de la roca y transporta corriente abajo hacia el este, al través de areniscas receptoras con buena porosidad y permeabilidad, limitadas por lutitas/arcillas a nivel regional. El uranio llega así concentrado a acuíferos confinados (acuicludos), donde existen rocas receptoras de la mineralización, conformada por areniscas fluviales o marinas, en un medio ambiente regional químicamente reductor, que alberga una interface de oxidación-reducción. El uranio reducido ( $U^{+4}$ ), se precipita en pequeños volúmenes, cuya geometría pueden tener una distribución en anchos de franjas de 3 a 40 metros, espesor de entre 2 a 8 metros y una longitud desde unos cuantos kilómetros a decenas de kilómetros; la concentración del mineral uranio se incrementa fuertemente hacia la "nariz" de los *roll-fronts*. La forma de los *roll-fronts* es convexa a favor del buzamiento de las capas receptoras; en sección transversal tiene forma de media luna, es muy común que una secuencia sedimentaria contenga múltiples capas de arena y a la vez varios *roll-fronts* con una sinuosidad extrema y compleja [9] como se indica en la Figura 3.

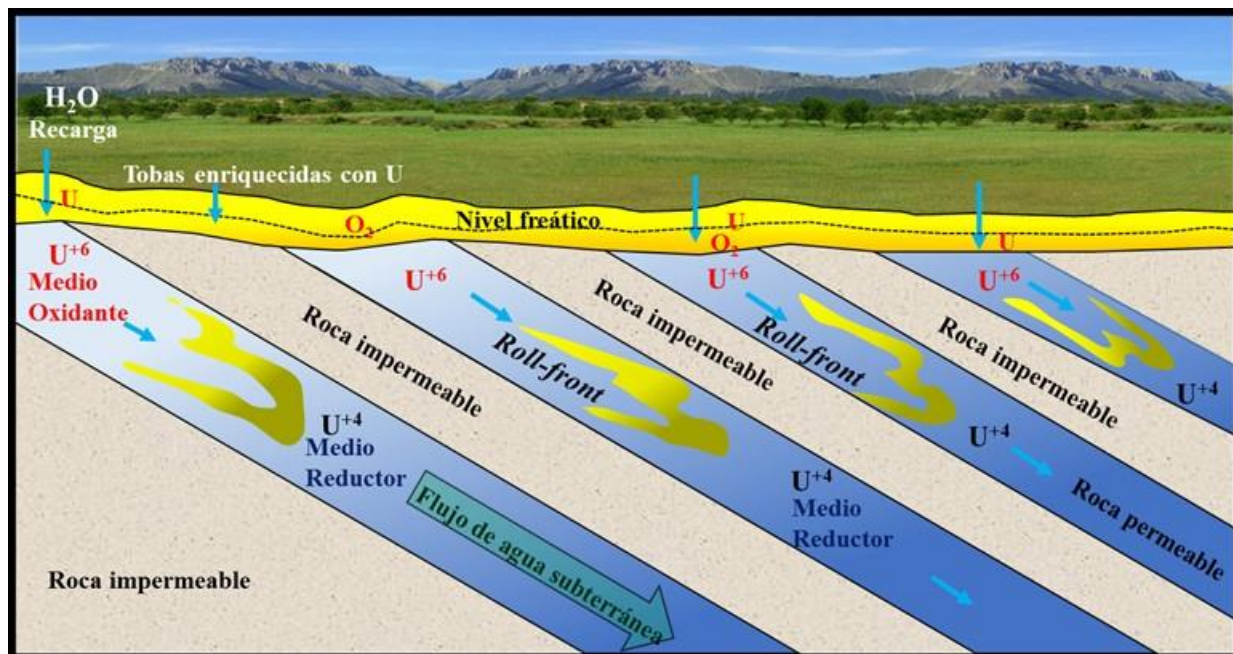


Figura 3. Mecanismos de movilización y acumulación de uranio tipo *roll-fronts* en areniscas

Los típicos depósitos de uranio en arenisca son concentraciones de uranio epigenéticos, es decir, que se introducen posteriormente en la roca huésped, y que ocurren como impregnaciones irregulares en areniscas y en algunos lugares en conglomerado e intercalaciones de grano más fino [9].

Los depósitos de uranio tipo *roll-fronts* se consideran los yacimientos más importantes de uranio alojados en areniscas y con mayores reservas de uranio con un promedio de 9,500 toneladas  $U_3O_8$ . Además de su tamaño, un aspecto significativo es que estos depósitos tienen la ventaja de poder ser explotados mediante un proceso de extracción de bajo costo denominado lixiviación *in situ* [9].

Los minerales de uranio más comunes son uraninita  $UO_2$  y/o cofinita  $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$ , que se encuentran como recubrimientos amorfos en granos de arena relleno de los espacios intersticiales, son comúnmente de grano muy fino y ocupan los espacios intergranulares y localmente sustituyen a la madera fósil. Las concentraciones ricas de minerales de uranio tienden a seguir las capas y cortan la estratificación, ya sea de forma irregular o a lo largo de expresiones fuertemente curvadas llamadas *roll-fronts* [7].

Los depósitos económicos pueden contener de 900 toneladas a 11,400 toneladas de  $U_3O_8$  y sus contenidos pueden variar desde 0.05% a 0.25%  $U_3O_8$ , las profundidades donde se han explorado varían desde 60 a 600 metros [9].

Los cambios de un *roll-fronts* en vista tridimensional hacen que su interpretación sea compleja aunado a las variaciones en la forma y dimensiones del *roll-fronts* hacen que el mapeo de cada *roll-fronts* individual sea un desafío, lo cual se complica aún más cuando se tienen *roll-fronts* múltiples apilados en la secuencia [9].

### **2.3 Parámetros de Medición en Depósitos *Roll-fronts***

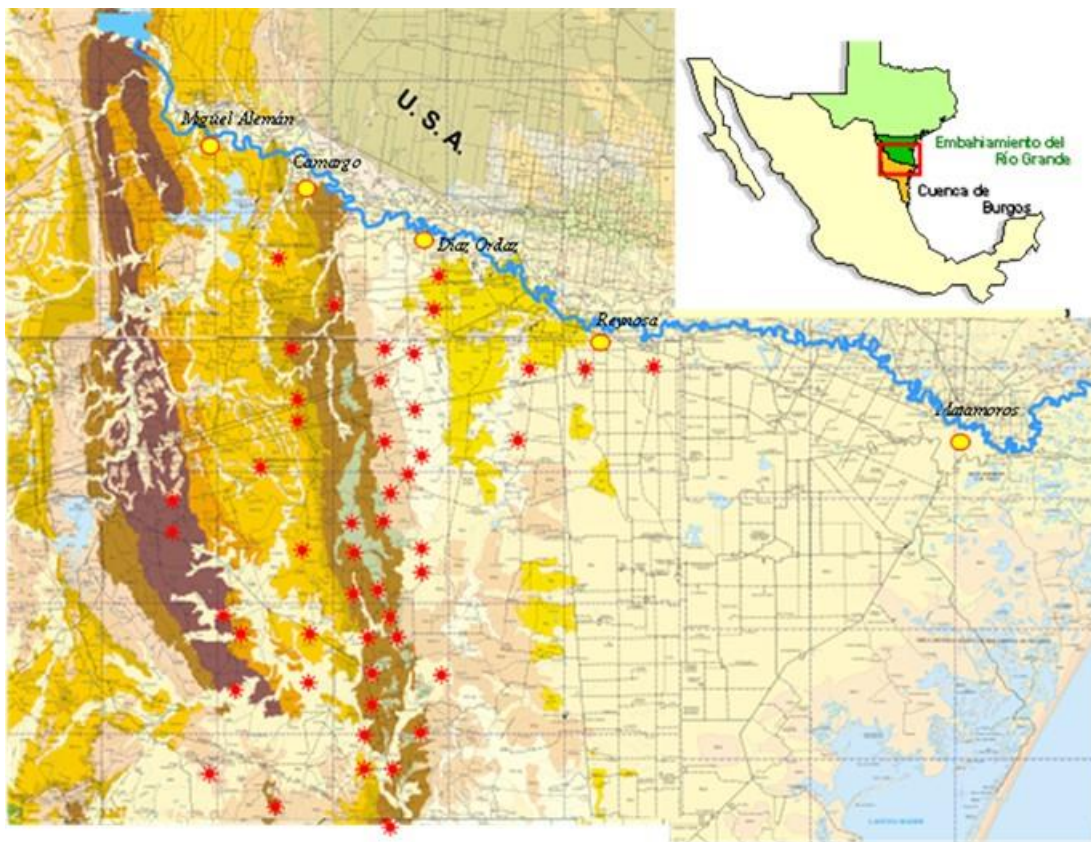
La mineralización de uranio identificada en la Formación Frio pertenece al Distrito La Coma; quedando abierto el estudio del potencial de uranio en las formaciones: Goliad, Lagarto (Fleming), Oakville, Catahoula, Vicksburg y Jackson [7], como se indicó en la Figura 2. De acuerdo a las características geológicas de la Cuenca de Burgos, comparativamente con el Sur de Texas, se interpreta que la presencia de uranio detectado en La Coma, corresponde a un poco menos del 2 % del potencial que podría descubrirse en la región. Por lo que la exploración a mediano y largo plazo se enfocará a la detección de uranio mediante métodos indirectos que contribuyan a un modelo hidrogeoquímico basado en la medición de pozos de agua [10] así como datos geofísicos, entre otros.

Con la principal finalidad de mostrar lo aquí expuesto se presentan mapas comparativos de geología y presencia de yacimientos de uranio del Sur de Texas con el Distrito de La Coma (Cuenca de Burgos):

#### **2.3.1 Sistema de información geográfica**

El sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta clave para el almacenamiento y correlación de datos geofísicos, geológicos, geoquímicos e hidrológicos. Por ejemplo, en los depósitos de uranio en areniscas, las características a tomar en consideración son la geoquímica de la fuente, las características hidrológicas para la generación de acuíferos confinados, las particularidades que tienen la roca receptora y el ambiente de depósito. Así que la determinación probabilística de este tipo de depósitos se basa en el análisis geoestadístico de todos los datos colectados, que arrojan una distribución probabilística del yacimiento. [Balcázar]

La recopilación realizada por el SGM sobre los trabajos de exploración de URAMEX, se despliega en el SIG mostrado en la Figura 4, donde se reportan 49 localidades con anomalías radiométricas, con un volumen de 1.53 millones de toneladas con 0.16 % de  $U_3O_8$  en la zona central del Distrito de la Coma, distribuidos en tres depósitos: La Coma (563,030 ton, con 0.175 % de  $U_3O_8$ ); Buenavista (659,540, con 0.16 % de  $U_3O_8$ ) y El Chapote (311,380 ton, con 0.113 % de  $U_3O_8$ ); sin embargo el SGM concluye que la información disponible generada por URAMEX es escasa e incompleta. La exploración y barrenación en la mayoría de las anomalías se realizaron a lo largo de una franja de afloramientos de la Formación Frio en la Cuenca de Burgos y sin una exploración sistemática en esta cuenca. Los trabajos complementarios del SGM han re-evaluado estas localidades, con apoyo aéreo-radiométrico y verificación en campo, determinando la presencia de 13 localidades anómalas: La Coma, El Chapote, Buenavista, La Mesa, Carta Blanca, El Tajo, Dodo 1, Dodo 2, La Plata, El Chino, El Chapote 1, Huizachitos, La Presita.



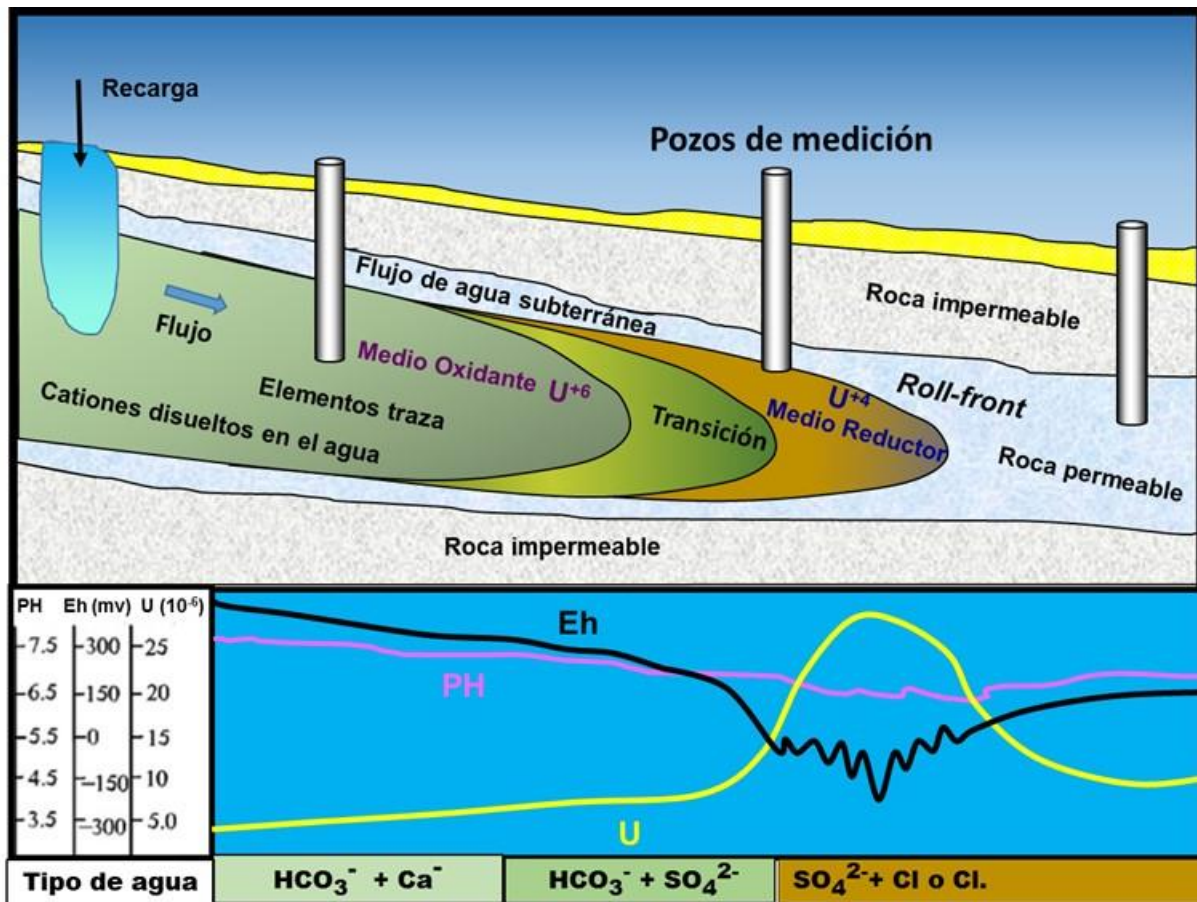
**Figura 4. Despliegue de la Cuenca de Burgos en el SIG, mostrando la localización georeferenciada de las 49 anomalías radiométricas**

### 2.3.12 Parámetros de medición

La movilidad del uranio la proporciona el medio oxidante, al llegar el flujo que lo transporta a un medio reductor su movilidad cesa y se precipita formando los *roll-fronts*; entre estos dos medios existe uno de transición. En el sitio propuesto de exploración La Coma, existen abrevaderos a los cuales se

tiene acceso para el muestreo de agua. El objetivo del análisis de las muestras en los tres medios mencionados es determinar las características fisicoquímicas del agua, así como las denominadas guías de exploración por uranio. Estas guías son las pequeñas concentraciones de uranio, su especiación y los productos de decaimiento, así como elementos traza no radiactivos. La variación de las concentraciones en cada una de los tres medios, es un indicador de los procesos geo-químico hidrológicos que indican y sitúan la probabilidad de localización del *roll-front* cuando el análisis es realizado en el SIG.

La evaluación de las concentraciones de estas guías y de los elementos traza requiere de equipos con alta sensibilidad y en algunos de los casos requiere de mediciones isotópicas in situ. En la Figura 5 se resumen los parámetros de medición en el sitio propuesto de La Coma, después de que la localización georeferenciada sea realizada por medio del SIG.



**Figura 5. Resumen de los parámetros a medir en los abrevaderos seleccionados en La Coma.**

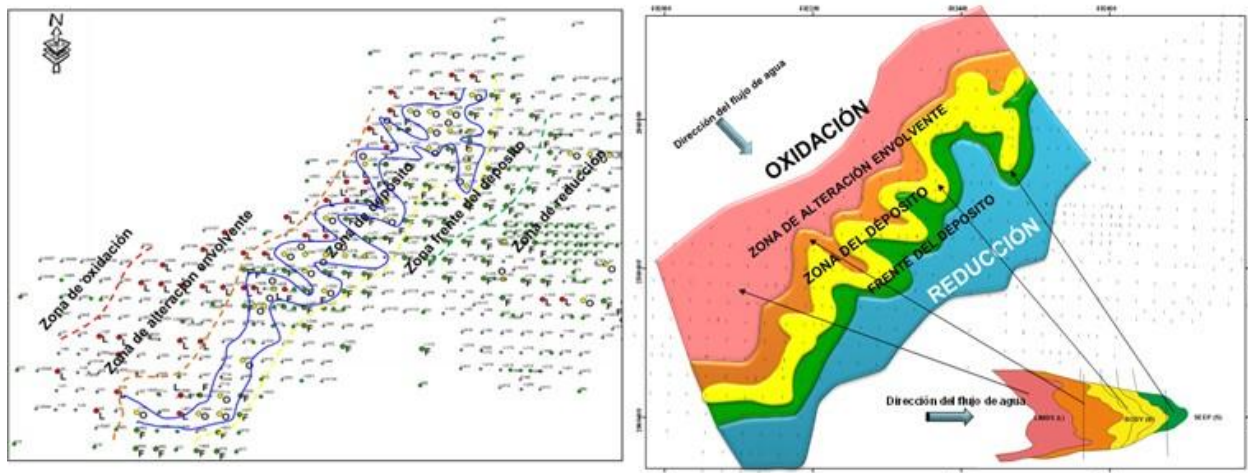
El reciente equipamiento instalado en el ININ permite la determinación de los isótopos de uranio, torio y radios, mediante un espectrómetro de masas con una fuente de plasmas, con límites de detección tan bajos como unas cuantas partes por trillón; dos equipos de fluorescencia de rayos-x para la determinación multi elemental, incluyendo uranio y torio, con límites de detección del orden mg/kg hasta los  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; un cromatógrafo de líquidos, que acoplado al espectrómetro de masas permitirá la



especiación de los compuestos de interés, incluyendo el uranio; dos espectrómetros portátiles para la determinación en campo de los isótopos de radón; estándares para la calibración de los equipos mencionados. Mediante proyecto sometido a CONACYT, se planea la adquisición de un equipo para la medición in situ, de isótopos de radio y radón en agua con una sensibilidad de  $28 \text{ Bq L}^{-1}$ . La correspondiente química y parámetros físicos del agua los realizará el SGM.

### 3. RESULTADOS

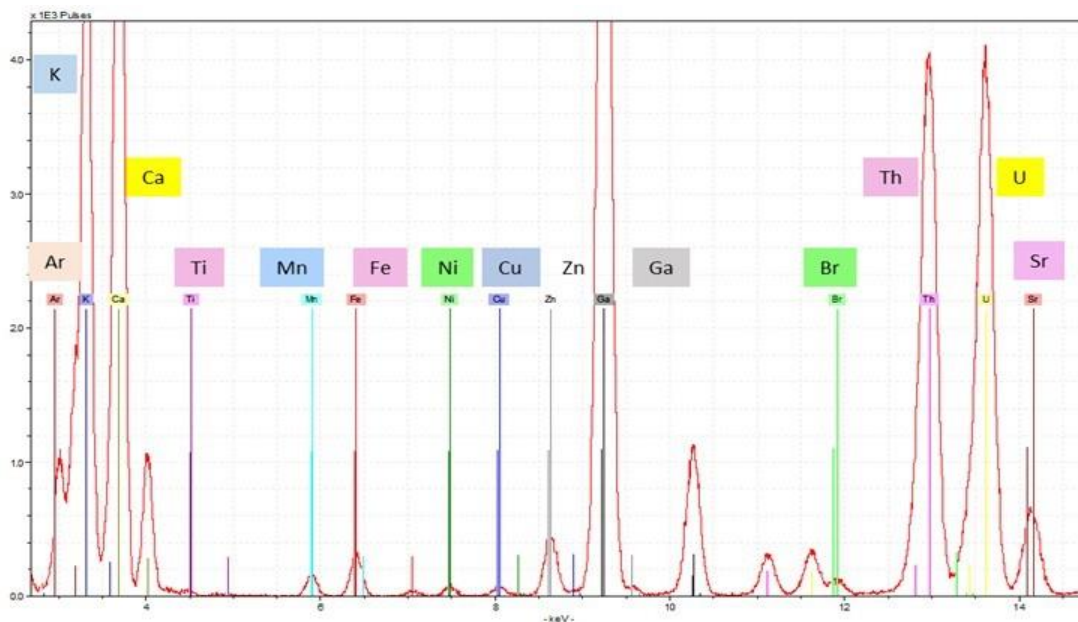
Los trabajos realizados en el prospecto La Coma consistieron en la revisión de la información e integración para su re-interpretación, además de la ubicación física (en campo), de los barrenos realizados por URAMEX. De esta recopilación de datos, mostrados en la parte izquierda de la Figura 6 se estableció un modelo conceptual de las regiones de oxidación y reducción, las cuales tendrán que ser corroboradas con la estrategia de muestreo, para la ubicación probabilística de los *roll-fronts*.



**Figura 6. Interpretación de la mineralización con GT. Porción occidental en el Distrito La Coma**

Se ha iniciado la calibración de los equipos de análisis de trazas de multi elementos en agua, como se muestra el espectro de la Figura 7, obtenidos para una muestra de unos cuantos mililitros de agua de río, a la cual se le diluyeron concentraciones conocidas de estándares de uranio y torio. Los límites de concentración están en el orden de unos cuantos  $\mu\text{g/kg}$ .

Así mismo se tiene contemplado la utilización de otros métodos como el TEM (método Transitorio Electromagnético en Dominio del Tiempo), que es una técnica geofísica para la obtención de la resistividad eléctrica del subsuelo por medio del fenómeno de inducción electromagnética, que se aplica en la exploración del agua subterránea, minerales, ambiental y geotermia. Adicionalmente el SGM ha implementado brigadas multidisciplinaria para realizar hidrogeoquímica y explorar el subsuelo y que junto con el TEM y la metodología de exploración mencionada coadyuvaran a que seamos más efectivos en la búsqueda de depósitos que no se manifiestan superficialmente.



- **Figura 7. Espectro multielemental de agua de río con estándares de Uranio y Torio diluidos.**

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología de exploración propuesta resulta satisfactoria para el entendimiento, de las características y condiciones de los depósitos tipo *roll-front* que se ubican en la porción norte de la Cuenca de Burgos, donde se encuentran el potencial más amplio de recursos uraníferos de México. Esta metodología con algunas variantes también se ha aplicado en la exploración histórica y reciente en yacimientos similares en el sur de Texas; el convenio de colaboración ININ-SGM ha sido una acertada decisión de ambas instituciones que conjuntan esfuerzos para la evaluación probabilística de los *roll-fronts*, uniendo la información y metodología existente del SGM con la moderna infraestructura y conocimientos que en materia de geofísica nuclear el ININ tiene. A pesar de que en México existe un buen potencial de recursos de uranio, su evaluación económica no ha sido completamente evaluada.

#### REFERENCIAS

1. “Ley General de Cambio Climático última reforma”, Diario Oficial de la Federación el 6 de junio (2012).
2. Margaritasita. <https://es.wikipedia.org/wiki/Margaritasita>.
3. “Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear Última reforma”, Diario Oficial de la Federación 09 de febrero (2012).
4. “Ley Minera Última reforma”, Diario Oficial de la Federación, 11 de agosto (2014).
5. “Prospectiva del sector Eléctrico 2013–2027” [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/Prospectiva\\_del\\_Sector\\_El\\_ctrico\\_2013-2027.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62949/Prospectiva_del_Sector_El_ctrico_2013-2027.pdf)
6. “Estrategia Nacional de Energía 2014–2028” <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/214/ENE.pdf>.
7. Sánchez Ramirez David. “Los Depósitos Uraníferos de la Cuenca de Burgos y su correlación con los del sur de Texas”, *Convención Nacional Geológica de la Sociedad Geológica Mexicana*, Ciudad de México (2011).

8. Galloway, W. E., "South Texas Uranium Province, Geologic Perspective", *American Association of Petroleum Geologist. National Convention*. Houston, Texas (1979)
9. Sánchez Ramírez David. "Características generales y métodos de exploración en depósitos de uranio en areniscas tipo roll front en la Cuenca de Burgos, estados de Nuevo León y Tamaulipas". En Congreso Internacional de Geología de la Sociedad Geológica Mexicana, Ciudad de México (2016)
10. Sánchez Ramírez David, José de Jesús Rodríguez Salinas, "Aplicación de la hidrogeoquímica en la exploración en yacimientos de uranio tipo roll-front en areniscas de la Cuenca de Burgos". En: XXXI Convención Internacional de Minería, Acapulco, Guerrero, México (2015).