

00576

87
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ASPECTOS DE SEGURIDAD Y PROTECCION
RADIOLOGICA EN LA DESCONTAMINACION DE LA
PLANTA DE BENEFICIO DE URANIO EN CIUDAD
ALDAMA Y EN EL ALMACENAMIENTO DE SUS
RESIDUOS EN PEÑA BLANCA, CHIHUAHUA,
MEXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS NUCLEARES

P R E S E N T A :

IQI. MARCO ANTONIO RUIZ CRISTOBAL

ASESOR DE TESIS: DR. JUAN MANUEL NAVARRETE TEJERO.



MEXICO, D. F.

NOVIEMBRE DE 1998.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1294 66



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

8
7

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA
DIRECCIÓN

ING. LEOPOLDO SILVA GUTIÉRREZ
Director General de la Administración Escolar
Presente.

AT'N: Lic. Antonio Díaz García
Jefe de la Unidad de Registro e Información

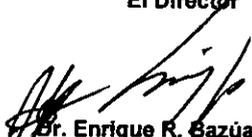
Me es grato informarle que el alumno **IQ. ANTONIO RUIZ CRISTOBAL** presentará próximamente su examen para obtener el grado de Maestría en Ciencias Nucleares ante el siguiente jurado:

Presidente:	Dr. Rafael Martínez Lugo
Primer Vocal	Dr. Luis C. Longoria Gándara (ININ)
Secretario:	M. en C. Luis Cabrera Mosqueda
Primer Suplente:	M. en C. Raúl Ortiz Magaña (CNSNS)
Segundo Suplente:	M. en C. Gustavo Molina (ININ)

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarte un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., 5 de enero de 1998.

El Director


Dr. Enrique R. Bazúa Rueda

C.c.p. Integrantes del Jurado
C.c.p. Coordinador de Área
C.c.p. Departamento de Control Escolar
C.c.p. Interesado
CAPMDCQ*ggm.

DEDICATORIA

A MIS PADRES, POR SU EJEMPLO Y DEDICACIÓN

A MIS HERMANOS, PORQUE SIGAN SUPERÁNDOSE

A MI HIJO, CON TODO MI CARÍÑO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al jurado que revisó esta tesis por sus valiosas aportaciones, así como a mi director de tesis Dr. Juan Manuel Navarrete Tejero.

Mi profundo agradecimiento a todos los trabajadores con los cuales compartí esta experiencia y en especial al Físico Arturo Angeles Carranza.

**ASPECTOS DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN LA
DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE URANIO EN CIUDAD
ALDAMA Y EN EL ALMACENAMIENTO DE SUS RESIDUOS, EN PEÑA BLANCA,
CHIHUAHUA, MÉXICO.**

- 1. INTRODUCCIÓN**
 - 1.1 ANTECEDENTES
 - 1.2 OBJETIVO GENERAL
 - 1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO
 - 1.4 JUSTIFICACIÓN RADIOLÓGICA DE LA DESCONTAMINACIÓN
 - 1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL URANIO
- 2. METODOLOGÍA PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO**
 - 2.1 NORMATIVIDAD APLICABLE
 - 2.2 MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN UTILIZADOS
 - 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE DETECCIÓN UTILIZADO
 - 2.4 MÉTODO DE MEDICIÓN DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL FIJA
 - 2.5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL TRANSFERIBLE
 - 2.6 MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE Ra-226 EN SUELO
 - 2.7 CORRELACIÓN ENTRE CONCENTRACIÓN (Bq/Kg) Y CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL (cpm)
 - 2.8 MÉTODO DE MEDICIÓN DE RAPIDEZ DE EXPOSICIÓN
 - 2.9 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE UNA CAPA HEMIRREDUCTORA
- 3. RESULTADOS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA**
 - 3.1 CONDICIONES RADIOLÓGICAS ANTES DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO
 - 3.2 CONDICIONES RADIOLÓGICAS DESPUÉS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO
 - 3.3 DETERMINACIÓN DE LA MIGRACIÓN DEL Ra-226 EN ESTRATOS SUBYACENTES EN LA PRESA DE ESTÉRILES (JAL)
 - 3.4 CANTIDAD DE DESECHOS RADIOLÓGICOS GENERADOS
 - 3.5 MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA APLICADAS
 - 3.6 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS INDIVIDUAL Y COLECTIVA DE LOS TRABAJADORES
- 4. CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA LA SELECCIÓN DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES**
 - 4.1 CRITERIOS GENERALES DE SEGURIDAD
 - 4.2 ANÁLISIS DEL SITIO EN LAS INMEDIACIONES DE CIUDAD ALDAMA
 - 4.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE UN NUEVO SITIO
- 5. DISEÑO DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES**
 - 5.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO
 - 5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES
 - 5.3 PREPARACIÓN DEL TERRENO
 - 5.4 PREPARACIÓN DE LA CAMA INFERIOR
 - 5.5 CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DEL REPOSITORIO
 - 5.6 ACOMODO DE LOS ESTÉRILES
 - 5.7 COLOCACIÓN DE LA CUBIERTA
 - 5.8 ZONA DE AMORTIGUAMIENTO
 - 5.9 IMPACTO AMBIENTAL
 - 5.10 ANÁLISIS DE ACCIDENTES

6. CONCLUSIONES

7. REFERENCIAS

8. FIGURAS

- 1 DIAGRAMA DE PROCESO DEL BENEFICIO DE URANIO
- 2 CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE ALDAMA CHIHUAHUA
- 3 GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN EN ENERGÍA
- 4 GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN EN FWHM
- 5 GRÁFICA QUE MUESTRA EL ÁREA NETA
- 6 GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA
- 7 DOBLETE DEL FOTOPICO DE 185.7 keV DEL U-235 CON EL FOTOPICO DEL Ra-226 EN 186 keV
- 8 DOBLETE DE FOTOPICO DEL U-235 EN 143 keV CON EL FOTOPICO DEL Ra-223 EN 144.2 keV
- 9 GRÁFICA QUE CORRELACIONA LA TASA DE CONTEO (en cpm) DE UN DETECTOR HP-260 CONTRA LA CONCENTRACIÓN DE Ra-226 EN Bq/kg
- 10 CONDICIONES RADIOLÓGICAS DE LA ZONA I Y II ANTES DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN
- 11 CONDICIONES RADIOLÓGICAS DE LA ZONA III ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN
- 12 CONDICIONES RADIOLÓGICAS DE LA ZONA I DESPUÉS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN Y ANTES DE LA PUESTA DE LA CAPA HEMIRREDUCTORA
- 13 CONDICIONES RADIOLÓGICAS DE LA ZONA II DESPUÉS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN Y ANTES DE LA PUESTA DE LA CAPA HEMIRREDUCTORA
- 14 MIGRACIÓN DEL Ra-226 EN LA ZONA I
- 15 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DEL REPOSITORIO
- 16 SITIO DONDE SE CONSTRUYÓ EL REPOSITORIO
- 17 PREPARACION DE LA CAMA INFERIOR DE ARCILLA
- 18 TALUDES DE ARCILLA ALREDEDOR DEL REPOSITORIO
- 19 ESQUEMA DEL REPOSITORIO

9 APÉNDICES

- 1 CADENA DE DESINTEGRACIÓN Y PROPIEDADES RADIOLÓGICAS DE LOS DESCENDIENTES DEL URANIO 238
- 2 ALGUNAS CONSIDERACIONES RADIOLÓGICAS DEL RADÓN 222
- 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE DETECCIÓN UTILIZADOS
- 4 MÉTODO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA AUTOABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA DE 186 keV DEL Ra-226 EN EL ESTÉRIL (JAL)
- 5 GRÁFICA PARA OBTENER UNA CAPA HEMIRREDUCTORA

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Entre 1969 y 1971 la Comisión Nacional de Energía Nuclear y la Comisión de Fomento Minero operaron conjuntamente una planta de producción de concentrados de uranio y molibdeno en Villa Aldama, Chihuahua (hoy Ciudad Aldama). La planta tenía una capacidad nominal de 80 toneladas métricas/día de mineral y operaba con un proceso alcalino convencional con carbonato y bicarbonato de sodio como lixiviantes. El mineral provenía de la Sierra de Gómez. Durante los dos años de operación se produjeron unas 45 toneladas de concentrados de uranio y aproximadamente 35,000 toneladas de estériles de uranio (jal). Estos últimos se almacenaron en una presa a 120 m al poniente de la planta. La planta y la presa se ubican en las estribaciones de una colina con una pendiente de sur a norte [1].

Alrededor de los estériles de uranio (jal) se construyeron dos diques de contención (aproximadamente paralelos) en forma de un arco doble que limita los bordes poniente y norte de la presa, habiendo un espacio libre de unos 30 metros entre ambos arcos. Dada la pendiente del terreno no fue necesario construir bordes al sur y al oriente. La presa de estériles original no tenía ninguna membrana de protección en la parte inferior ni una cubierta en la parte superior.

1.2 OBJETIVO GENERAL.

Debido a la cercanía de la población con respecto a lo que fue la planta de beneficio y sobre todo a la presa de estériles, el objetivo de este trabajo tuvo dos vertientes principales; Por una parte, el ejecutar los trabajos de descontaminación radiológica de la planta de beneficio de uranio, según la normativa establecida por el órgano regulador en materia de seguridad radiológica y protección radiológica para la población y los trabajadores; Y por otra parte, determinar el sitio donde se pudieran almacenar los desechos radiactivos generados por la descontaminación radiológica y movilización de los estériles, para su almacenamiento definitivo, en beneficio de la población actual y el de las futuras generaciones, dado los radionúclidos que se encuentran en dicho material.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO.

Como primer objetivo y antes de proceder a la descontaminación de la planta de beneficio de uranio, se evaluó el sitio más adecuado técnica y económicamente para almacenar los desechos generados por esta actividad, para lo cual se realizaron estudios de demografía, uso del suelo y agua, meteorología, hidrología, geología, sismología y ecología.

El sitio seleccionado fue en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua, lugar donde se localiza una de las zonas uraníferas, y la más importante del país, además que se pretendía en la década de los 80's construir una planta de beneficio de uranio en dicho lugar. Una vez determinado el sitio para el almacenamiento de los residuos, se tendría que acondicionar el terreno para recibirlos, por lo que el diseño y sobre todo el acomodo de los estériles sería determinante, para asegurar que el material almacenado permaneciera por algunos cientos de años, sin necesidad de darle mantenimiento con frecuencia, y ser considerado como un repositorio definitivo cerca de la superficie.

Otro objetivo específico, fue el conocer las condiciones radiológicas de la planta de beneficio, antes y después de la descontaminación, con la finalidad de determinar si dicho lugar pudiera ser considerado para utilizarse de manera irrestricta, cumpliendo con la normativa en materia de seguridad y protección radiológica. Para poder definirlo se tuvo que realizar mediciones de niveles de radiación en mR/h, cuantificar los niveles de contaminación superficial de equipo de proceso en Bq/100cm² y cuantificar los niveles de concentración de actividad por kilogramo de suelo contaminado en Bq/kg.

También se consideró realizar mediciones indirectas que permitieran medir en campo de forma operativa, las concentraciones de Ra-226 en los puntos medidos, para lo cual se realizó una correlación de mediciones entre la concentración de actividad de Ra-226 en suelo en Bq/kg contra las mediciones de contaminación superficial de esas mismas muestras en cpm.

Conocer estas mediciones nos permitieron determinar las dosis individuales y las dosis colectivas de los trabajadores por las actividades de; Descontaminación de la planta de beneficio; Traslado de los desechos generados (incluidos los jales); Y acomodo de los desechos en el sitio de almacenamiento.

Otra de los objetivos fue el cuantificar, ubicar y conocer el nivel de radiación y contaminación de los desechos generados por la actividad de descontaminación de la planta.

Un objetivo más de este trabajo fue el determinar la migración del Ra-226 una vez alcanzado el nivel del terreno natural donde se alojó el jal en la planta de beneficio de Ciudad Aldama (presa de jales), y de esta manera determinar la velocidad de migración hacia mantos freáticos en los 25 años que estuvieron a la intemperie sin ninguna protección interna ni externa.

1.4 JUSTIFICACIÓN RADIOLÓGICA DE LA DESCONTAMINACIÓN

-PROCESO DE DESINTEGRACIÓN DEL URANIO NATURAL

La substancia radiactiva de emisión natural la cual fue descubierta por Becquerel en 1896 fue una mezcla de varios isótopos que posteriormente se encontró que estaban relacionados unos con otros. Ellos eran miembros de una serie larga de isótopos de varios elementos, todos los cuales eran radiactivos excepto el último. El uranio, el más abundante de los elementos radiactivos en la mezcla, consiste de tres diferentes isótopos: Alrededor de 99.3% de uranio-238; Alrededor de 0.7% de uranio-235; y trazas de alrededor de 0.005% de uranio-234. El uranio-238 y el uranio-234 pertenecen a una misma familia, la serie del uranio, mientras que el uranio-235 es el primer miembro de otra familia, llamada la serie del actinio. El más abundante de los radisótopos de emisión natural, es el torio-232, el cual es el primer miembro de otra larga cadena de sucesivos radisótopos, llamada la serie del torio. Estas series radiactivas tienen varias características comunes. Primera, que el primer miembro de cada serie es de vida muy larga, con vidas medias que pueden ser medidos en unidades de tiempos geológicos. La segunda característica común de las tres series de emisión natural, es que cada uno tiene un miembro gaseoso, además de ser radiactivo en cada caso es diferente isótopo del elemento radón. En la serie del uranio el gas es Rn-222 y es llamado radón. En el caso de la serie del torio el gas es Rn-220 y es llamado torón. La serie del actinio el gas es Rn-219 y es llamado actinón. La tercera característica común entre las tres series radiactivas naturales es que el producto final en cada caso es plomo. En el caso de la serie del uranio el isótopo final es estable, siendo Pb-206, en la serie del torio el isótopo es estable y es Pb-208, y en la serie del actinio el isótopo final es estable y es Pb-207[2].

Otra serie de emisión natural fue la del Neptunio-237 la cual se considera que ha desaparecido completamente ya que su vida media es muy corta comparada con la creencia de la formación de la tierra.

En el apéndice 1 se muestra la cadena de decaimiento del uranio natural así como, las propiedades de cada uno de los radisótopos, donde se desprende que desde el punto de vista de protección radiológica los radisótopos más importantes son el Ra-226 y el Rn-222 [3]. En el caso del Ra-226, este por ser un emisor alfa, tener una vida media de 1600 años, alojarse en los huesos y ser el más radiotóxico de los hijos del uranio. En el caso del Rn-222, por ser un emisor alfa, ser gaseoso y decaer a hijos sólidos que pueden ser alojados en el epitelio pulmonar.

-DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE Ra-226 Y Rn-222 EN LOS ESTÉRILES DE URANIO.

La relación entre el U-238 y el Ra-226 en una muestra de uranio natural se puede determinar de la siguiente manera:

Puesto que la vida media del padre (U-238) es mucho mayor que la del hijo (Ra-226), existe el equilibrio secular, por lo que la actividad del padre (A_1) es igual a la del hijo (A_2) en el equilibrio, esto es:

$$A_1 = A_2 \quad \text{ó}$$

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad \text{ó}$$

$$N_1/N_2 = T_1/T_2 = 4.51 \times 10^9 \text{a} / 1620 \text{a} = 2.8 \times 10^6$$

donde:

$$N_1 = \text{número de átomos de } {}^{238}\text{U}$$

$$N_2 = \text{número de átomos de } {}^{226}\text{Ra}$$

$$T_1 = \text{vida media del } {}^{238}\text{U}$$

$$T_2 = \text{vida media del } {}^{226}\text{Ra}$$

Por lo que se concluye que en el uranio natural una parte de radio está presente por cada 3 millones de partes de uranio.

Al realizar el balance metalúrgico de las 32,137.589 toneladas de mineral Molibdeno-Uranífero del tipo "Alcalino" que se procesaron, con una ley en promedio de 0.2% como U_3O_8 (2000 ppm), esto implicaría que se podrían obtener 64.27 toneladas de uranio natural en dicho mineral. El rendimiento promedio del proceso de beneficio fue del 70% [1], con lo cual se pudo obtener 45 ton de concentrados de uranio. Las 64.27 ton de U_3O_8 procesadas generó 21.42 g de Ra-226 presentes en todo el volumen de estériles obtenidos por el proceso del beneficio del mineral. Esto representaría una concentración teórica de 24, 660 Bq/kg de Ra-226 en los estériles, tan solo por la cantidad de mineral de uranio procesado.

Por otro lado, la relación entre el Ra-226 y el Rn-222 en una muestra de estériles se puede determinar de la misma manera anterior:

Puesto que la vida media del padre (Ra-226) es mucho mayor que la del hijo (Rn-222), existe el equilibrio secular, por lo que la actividad del padre (A_1) es igual a la del hijo (A_2) en el equilibrio, esto es:

$$A_1 = A_2 \quad \text{ó}$$

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad \text{ó}$$

$$N_1/N_2 = T_1/T_2 = 1620 \text{ a}/0.01041 \text{ a} = 155.62 \times 10^3$$

donde:

N_1 = número de átomos de ^{226}Ra

N_2 = número de átomos de ^{222}Rn

T_1 = vida media del ^{226}Ra

T_2 = vida media del ^{222}Rn

Por esta razón en los estériles una parte de Rn-222 está presente por cada 155 mil partes de Ra-226. Dado que se generaron 21.42 g de Ra-226 se infiere que se generaron 0.14 mg de Rn-222, distribuidos en todo el volumen de los estériles.

Por otro lado, los productos hijos del Rn-222 (Po-218; Pb-214; Bi-214; Po-214) son de muy corta vida media en comparación con el padre radón. Si se comienza con radón puro, el equilibrio se logra en cerca de 4 horas, después de lo cual habrá cantidades iguales de radón y sus hijas. En el caso de los estériles por encontrarse éstos sin ninguna capa externa que pueda retener el radón, el equilibrio solo se presenta por abajo de una capa suficientemente gruesa como para poder retener el radón y poder cuantificar a su progenie. Esta situación aunada a que se encontraban a la intemperie, hacía que el radón no fuera un riesgo radiológico de consideración.

En el apéndice 2 se dan algunas características radiológicas del radón 222 y la explicación de las unidades para su medición.

-JUSTIFICACIÓN DE LA DESCONTAMINACIÓN DE LO QUE FUE LA PLANTA DE BENEFICIO DE URANIO.

El riesgo principal en lo que fue la planta de beneficio, fue la presencia de los residuos generados por el beneficio del mineral de uranio. Los residuos no eran otra cosa que los radisótopos productos de la desintegración del uranio, donde se encontraba el Ra-226 mismo que tiene una vida media de 1600 años y es de una radiotoxicidad muy alta. Dichos residuos se encontraban a la intemperie, lo cual provocó una dispersión del residuo dentro del mismo sitio de la planta como hacia el exterior. Los residuos (estériles de uranio) y pilas de mineral de uranio, permanecieron sin capas de protección inferior y superior durante 25 años. Al dispersarse el material

y por lixiviación natural se contaminó el terreno y en consecuencia se generó más residuo.

Por otro lado, la zona urbana de la Ciudad de Aldama se encontraba a 200 metros del sitio donde estaban los residuos, lo cual podría provocar exposiciones externas e internas a la población por dicho material. Asimismo, por no existir una capa de protección en la parte inferior donde permanecieron los residuos, pudo haber provocado filtraciones del material hacia mantos freáticos, con la posibilidad de contaminación del agua subterránea. Cabe hacer mención que existen pozos de agua potable muy cerca del sitio de lo que fue la planta de beneficio.

Todo esto, justificaba la descontaminación de la planta para evitar un riesgo innecesario a la población actual y futura de Ciudad Aldama, Chihuahua.

1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL URANIO [1]

La planta de beneficio de Villa Aldama, Chihuahua, procesó durante dos años a partir de Junio de 1969, 32,137.589 toneladas de mineral Molibdeno-Uranífero del tipo "Alcalino". El mineral se encontraba en rocas calizas principalmente y por esto, su tratamiento era del tipo "alcalino" o sea que se usaba carbonato y bicarbonato de sodio como reactivos para disolver Uranio y Molibdeno.

La localización de la planta en ese entonces, se hizo en Villa Aldama, por encontrarse aproximadamente a la mitad del camino entre Sierra de Gómez y Sierra de Peña Blanca, que eran los lugares de donde se estaba alimentando a la planta, además de otras facilidades como el suministro de agua, energía eléctrica, materiales y reactivos, mano de obra, etc.

Para su operación, la Planta se dividía en cuatro secciones que fueron: 1- Trituración. 2- Molienda y Clasificación. 3- Lixiviación y lavado a contracorriente, y 4- Precipitación, filtración, secado (de Molibdeno) y envase. El diagrama de flujo se presenta en la **figura 1**, así como su equipo principal.

A continuación se hace una descripción del funcionamiento de las secciones mencionadas:

• TRITURACIÓN.

El mineral se transportaba de las minas en camiones de 10 toneladas de capacidad, se pesaban en la báscula a la entrada de la planta, donde se tomaba una muestra para determinar la humedad y de ahí se llevaba a las tolvas de gruesos (dos), donde por medio de una parrilla se admitía el mineral menor a siete pulgadas. El mineral que pasaba a la parrilla era dosificado a una banda, por medio de un alimentador, que transportaba el mineral a una quebradora primaria de quijadas de 8" x 10" para dejarlo a un

tamaño menor de 2". La descarga de la quebradora era tomada por otra banda que se encargaba de transportar el material a una criba vibratoria donde se separaba y aquel menor de 5/8" era enviado por otra banda a las tolvas de finos. El rechazo de la criba era enviado a una quebradora secundaria de 18" y la descarga de ésta se unía con la descarga de la quebradora primaria (en circuito cerrado con la criba vibratoria).

Esta sección trabajaba a razón de 120 toneladas de mineral por turno, almacenándose el mineral menor a 5/8" en las tolvas de finos.

• MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

De las tolvas de finos, por medio de un alimentador vibratorio y una banda se dosificaba al molino de bolas de 5'x 5' recibiendo el mineral a menos de 5/8" y derramando el clasificador de rastrillos donde se controlaba el derrame al 80% a 65 mallas, retornando el resto al molino. El derrame del clasificador al tamaño antes mencionado, se enviaba al espaciador primario para control de dilución.

La alimentación al molino era a razón de 1 kg/s, (pesada en la banda por 10 segundos y cada hora para control). La densidad de pulpa en el molino era de 1750 a 1850 g/l (70 a 75% de sólidos). La densidad al derrame del clasificador era de 1325 a 1383 g/l (40 a 45% de sólidos).

Generalmente con el fin de subir la concentración de uranio y molibdeno en el circuito, así como de iniciar la dilución, se agregaba solución con reactivos en el molino y clasificador, en lugar de agua.

• LIXIVIACIÓN Y LAVADO A CONTRA CORRIENTE

La pulpa que derramaba el clasificador al tamaño y densidad especificados anteriormente, se enviaba al espaciador primario, donde se subía la densidad de la pulpa, alimentando a los lixivadores a razón de 1550 a 1700 g/l (60 a 70% de sólidos). En los lixivadores, según la densidad, se le dejaba de 16 a 24 horas como tiempo de residencia a un régimen de agitación lenta (para conservar la densidad únicamente). En esta parte se añadían los reactivos y se conservaba la concentración de éstos en 35 a 50 g/l de carbonato de sodio y 20 a 30 g/l de bicarbonato de sodio, dependiendo del mineral. La temperatura en los lixivadores se conservaba entre 80 y 90 grados Celsius por medio del vapor suministrado por la caldera a los serpentines de los lixivadores. De los lixivadores pasaba la pulpa a cinco espesadores para efectuarse cinco pasos de lavado a contracorriente por decantación. Para lavar se usaba agua limpia que se alimentaba en el quinto paso de lavado a razón de 87 a 130 m³/día (siempre guardando la proporción de uno de pulpa por dos de agua). El sólido lavado que salía del quinto espesador se enviaba a la presa de jal y la solución que derramaba del primer espesador pasaba por su clasificación por filtros de

arena con ayuda filtro (tierras diatomeas). Para ayudar a la sedimentación se usaba regularmente COMPLEX-50 o SEPARAN-MG 200.

La solución filtrada conteniendo uranio y molibdeno disueltos a concentraciones de 1.5 a 3.0 g/l para uranio y 5 a 10 g/l para molibdeno, se enviaba a precipitación o a almacenamiento según la disponibilidad del equipo o su concentración.

- **PRECIPITACIÓN, FILTRACIÓN SECADO (DE MOLIBDENO) Y ENVASE.**

La solución rica en uranio y molibdeno se enviaba al precipitador 1, donde se agregaba sosa en escamas para precipitar a temperatura ambiente el uranio, como diuranato de sodio ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$). Se dejaba asentar y se filtraba en un filtro prensa. El uranio que se quedaba en el filtro se almacenaba húmedo (50 % de humedad). La solución estéril en uranio y aún rica en molibdeno se pasaba al precipitador 2 donde se agregaba cloruro de calcio para precipitar los carbonatos procurando no precipitar el molibdeno. Después de la precipitación de carbonatos se dejaba asentar y posteriormente se filtraba. Los carbonatos se quedaban en el filtro y se enviaban a la presa de jales. La solución estéril primeramente en uranio y luego en carbonatos se pasaba al precipitador 3 donde se seguía agregando cloruro de calcio para precipitar el molibdeno como molibdato de calcio, el cual era el producto principal ya que el uranio se obtenía como subproducto. Después de precipitar el molibdeno se dejaba asentar, se filtraba, se secaba y se envasaba como molibdato de calcio en tambores de 200 l para su venta.

2 METODOLOGÍA PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO

2.1 NORMATIVIDAD APLICABLE [2,4,5,6]

La normativa que se aplicó para la determinación de los niveles de contaminación aceptables de superficies son los que ha establecido la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) los cuales están basados en las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). De manera general, dicha normativa establece los criterios que a continuación se describen a fin de garantizar que éstas no representen un riesgo indebido a la población y al ambiente, desde el punto de vista radiológico.

CRITERIO 1.

La concentración promedio de Ra-226 en un área de 100 m² de terreno, no debe exceder el nivel de fondo por mas de [2]:

a)	185 Bq/kg promediados en los primeros 15 cm de suelo bajo la superficie y
b)	555 Bq/kg promediado en capas de 15 cm de espesor por debajo de los primeros 15 cm bajo la superficie.

CRITERIO 2.

Para el caso de construcciones ocupadas o habitables debe cumplirse lo siguiente :

a)	La concentración promedio anual de los productos de decaimiento del Radón-222, de vida media corta (incluyendo el fondo) no excedan de 0.02 Working Level (WL) [2].
b)	El nivel de fondo debe disminuirse hasta donde razonablemente sea posible, pero en ningún momento excederá el nivel de fondo por mas de 20 microroentgen por hora [2].

CRITERIO 3.

Para que las instalaciones, los equipos o cualquier otro aditamento pueda ser liberado para uso irrestricto deben cumplirse los siguientes requerimientos:

Debe realizarse un esfuerzo razonable para eliminar la contaminación residual y no rebasar los niveles especificados en la tabla 1.

TABLA 1

NIVELES ACEPTABLES DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL [7]			
NÚCLIDO	PROMEDIO	MÁXIMO	REMOVIBLE
U-nat, U-235, U-238 y productos de decaimiento	83.3 Bq/100 cm ² (5000 dpm/100 cm ²)	250 Bq/100 cm ² (15000 dpm/100 cm ²)	16.6 Bq/100 cm ² (1000 dpm/100 cm ²)

CRITERIO 4

El límite de dosis equivalente efectivo anual para el POE es de 50 mSv. Además el límite de dosis equivalente anual para los distintos órganos y tejidos de los trabajadores es de 500 mSv, excepto para el caso del cristalino, el cual es de 150 mSv [4,5].

CRITERIO 5

El límite de dosis equivalente efectivo anual para los individuos del público es de 5 mSv. El límite de dosis equivalente anual para los distintos órganos y tejidos de dichas personas es de 50 mSv. Estos límites han de aplicarse al grupo crítico de la población [4,5].

CRITERIO 6

El límite anual de incorporación para el POE para zonas controladas y con el fin de dar cumplimiento a la aplicación del sistema de limitación de dosis, se ha establecido para el caso del Ra-226 de 7×10^4 Bq y de 2×10^4 Bq por vía oral y por inhalación respectivamente [6,8,9].

2.2 METODOS DE DESCONTAMINACIÓN UTILIZADOS.

La planta de beneficio de uranio comprende, desde el punto de vista radiológico, tres zonas. La zona I, que comprende la presa de estériles de uranio (jales); la zona II, comprende el patio del mineral y accesos al edificio de la nave de tratamiento; y la zona III, comprende la sección de trituración, la nave de proceso, el taller y el laboratorio. En el **figura 2** se distinguen dichas zonas.

En cuanto a la zona I, el método de descontaminación consistió en retirar los estériles, mediante trascavo y el uso de camiones. Esto debido a que en esta zona existía un montículo de estériles de uranio sin ninguna capa protectora encima de ésta, por lo que el material se dispersó vía aérea y pluvial, incluso trascendiendo los límites del predio, además, por no existir una capa protectora compactada de material impermeable o de poca permeabilidad como base de contención de contaminantes, se consideró una lixiviación natural en dicha zona, por lo que se tomó en cuenta que dicho terreno se contaminó y en consecuencia se procedió a determinar las toneladas que se deberían movilizar. Por otro lado y debido a que en esta zona el terreno presentaba una pendiente de sur a norte con lo cual se encontraron tres diferentes presas escalonadas, con una superficie total de 47,250 m², las cuales estaban divididas por bordes de contención que en algunos casos éstos fueron hechos de los mismos estériles cubiertos con tierra del lugar, y en consecuencia los volúmenes de material contaminado se incrementaron. La cantidad de tierra contaminada y los estériles fueron movilizadas hacia el repositorio para el almacenamiento de estériles de uranio ubicado en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua. La cantidad total de desechos removidos de esta zona representó 64,909.962 Ton en las dos etapas del proceso de descontaminación.

En cuanto a la zona II, el proceso de descontaminación fue esencialmente el mismo que en la zona I, aunque es de destacarse que los accesos a la nave de proceso este y oeste presentaban niveles de radiación ligeramente altos

con respecto al fondo natural (debido a mineral de uranio disperso). La cantidad de mineral y tierra contaminada representó alrededor de 1,734.655 ton, las cuales fueron trasladadas a la zona de amortiguamiento del almacenamiento de estériles de uranio en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua.

La zona III, la cual comprendía la nave de proceso, laboratorio y taller se les dio un tratamiento de remoción del mineral, estériles y de concentrados de uranio. Posteriormente se procedió a descontaminar con hidroláser (agua a presión) el equipo de proceso, paredes y pisos. En algunos casos se utilizó además de agua, petróleo ó una mezcla de ácidos ($H_2SO_4 + HCl$ al 20% en volumen). En los sitios donde persistían niveles altos de contaminación se procedió a la remoción de contaminación con cepillado mecánico, lo que representó que en algunos casos se cumplieran los niveles de contaminación aceptables en equipo de proceso y en otros no. Los niveles de contaminación alcanzados de los equipos y superficies se especifican en la sección 4.2. Por otro lado el equipo y material que no pudieron ser descontaminado hasta niveles aceptables representó alrededor de 30 ton, los cuales se trasladaron y confinaron en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua.

2.3 CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE DETECCIÓN UTILIZADO

Para la determinación de la contaminación de equipo, pisos, paredes y terreno se utilizó un Geiger Muller tipo HP-260, asociado a una electrónica ESP-1. La ventana de detección del HP-260 es de 16 cm^2 con una densidad másica de 1.8 mg/cm^2 , la cual permite ver radiación beta+gamma. La eficiencia del detector se consideró del 36 %, con una geometría 2 II para una fuente de calibración de Cs-137, cuya energía de 662 keV se puede considerar promedio para la cadena de radionúclidos hijos del Uranio 238.

Para la detección de la radiación gamma se empleó una electrónica ESP-1 con sonda de detección SPA-3 el cual es un centellador.

Para la determinación de rapidez de exposición se utilizó el equipo ESP-1 con sonda HP-270, el cual es del tipo Geiger Muller.

Para la determinación de la concentración de Ra-226 en suelo se empleó la técnica de espectrometría gamma. Para lo cual se utilizó un detector de Germanio Hiperpuro, con un intervalo de energías de 45 a 2000 keV.

En el apéndice 3 se da mas información sobre las características de estos equipos.

2.4 MÉTODO DE MEDICIÓN DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL FIJA

Este caso comprende la nave de proceso, el equipo, el laboratorio, el taller y el terreno, la determinación de la contaminación se realizó por el método directo. Para la medición se colocó el detector a un centímetro por arriba de la superficie a medir, abarcando una superficie de 100 cm² (10 x 10 cm) y tomando la lectura promedio.

La determinación de los niveles de contaminación en congruencia con las unidades para establecer los niveles aceptables de contaminación esta expresado en dpm/100 cm² y se relacionan con la siguiente expresión:

$$\text{ACTIVSUP} = (\text{CPMnetas} / \text{Eficiencia} * Y) 6.25$$

donde:

ACTIVSUP =	Actividad Superficial (dpm/100 cm ²)
CPMnetas =	Cuentas por minuto menos el fondo que registra el detector.
Eficiencia =	Eficiencia del 36%.
Y =	1 (Rendimiento)
6.25 =	100/16 = Número de veces por cada 100 cm ² .

2.5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL TRANSFERIBLE

En este caso se determinó el nivel de contaminación transferible mediante papel absorbente, el cual se frotó en una área de 100 cm² sobre la superficie a evaluar y colocándolo cerca del detector, en un ambiente de bajo fondo (con el objeto de no realizar una lectura errónea), la relación que expresa este nivel de contaminación transferible es mediante la siguiente ecuación:

$$\text{ACTIVSUP} = (\text{CPMnetas} / \text{Eficiencia} * Y * E_f * A_f) 100$$

Donde:

ACTIVSUP =	Actividad Superficial (dpm/100 cm ²)
CPMnetas =	Cuentas por minuto menos el fondo que registra el detector.
Eficiencia =	Eficiencia del 36%.
Y =	1 (Rendimiento)
E_f =	Eficiencia de impregnación de contaminación. (Para evaluarlo como contaminación en el frotis se toma a E _f = 0.1)
A_f =	Area de frotamiento (100 cm ²).

2.6 MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE Ra-226 EN SUELO

La metodología seguida para la determinación de contaminación en suelo para la zona I y II básicamente fue el análisis de tierra en función de la concentración del Ra-226; mediante la técnica de espectrometría gamma dado que el Ra-226 emite radiación gamma de 186 keV [10].

a) Sistema de Espectrometría Gamma.

El sistema utilizado fue un detector de Germanio Hiperpuro (HPGe) marca Ortec modelo GEM-25185P con un cristal de 56.9 mm de diámetro y longitud de 56.5 mm. Voltaje de operación recomendado + 3500 V, con un intervalo de energías de 45 a 2000 keV y las siguientes especificaciones de funcionamiento:

Resolución Full Width at Half Maximum (FWHM) en 1.33 MeV ; 1.85 keV.

Razón pico Compton: 50:1

Eficiencia relativa: 25 %

Resolución: (FWHM) en 0.122 MeV; 0.85 keV.

- Preamplificador marca Ortec integrado al detector.
- Fuente de alto voltaje marca Ortec, modelo 659, con intervalo de voltaje de hasta 5000 V.
- Amplificador lineal marca Ortec modelo 673.
- Multicanal marca Ortec modelo 919, operado con programa Maestro II.

b) Calibración del sistema.

Dado que se pretende conocer la cantidad de Ra-226 presente en las muestras de estériles de uranio y de tierra contaminada, el sistema de espectrometría gamma deberá calibrarse para conocer la relación que hay entre el número de canal en un multicanal y la energía, es decir que el sistema este calibrado en energía. Con esto se conoce el fotopico involucrado y en consecuencia el radionúclido. Por otro lado, también es necesario conocer el FWHM para saber si hay interferencias de fotopicos con energías muy próximas al del Ra-226 y finalmente se debe conocer la eficiencia para determinar la actividad o concentración de actividad del o los radionúclidos involucrados. En la calibración en eficiencia se consideró una geometría "marinelli" cuya fuente de calibración contenía los siguientes radionúclidos:

BARIO-133		EUROPIO-152	
Energía (keV)	% de Emisión	Energía (keV)	% de Emisión
80.997	32.973	121.8	28.4
276.4	6.9	244.7	7.5
356	60.5	344.3	26.6
383.85	8.6697	778.9	13
-----	-----	964	14.6
-	-----	1408	21
-----	-----		

La actividad de dichas fuentes fueron de 0.27 μCi y 0.2 μCi para el Ba y el Eu respectivamente. La función de calibración en energía es la siguiente y la gráfica de la función se ilustra en la figura 3:

$$\text{ENERGÍA (keV)} = -0.6518 + 0.25 \cdot \text{canal} - 1.709\text{E-}8 \cdot \text{canal}^2 \quad \text{b.1}$$

La calibración en FWHM para cada fotopico se realizó contando las mismas fuentes antes mencionadas, la cual es dependiente de la energía, siendo más ancho conforme aumenta ésta, los valores intermedios se pueden interpolar o se hace un ajuste con el conjunto de pares de datos (canal y FWHM). La función que se obtuvo es la siguiente:

$$\text{FWHM(Canal)} = 3.4238 + 1.1046\text{E-}03 \cdot \text{Canal} + 6.7710\text{E-}9 \cdot \text{Canal}^2 \quad \text{b.2}$$

Esta función se ajusta con la función de b.1 y se obtiene el FWHM en keV. La gráfica se ilustra en la figura 4.

La calibración en Eficiencia se hace realizando un conteo análogo al descrito anteriormente de manera que cada fotopico tenga por lo menos 10,000 cuentas de área neta (para tener una buena estadística), la cual se calcula de manera siguiente:

Se obtienen las cuentas totales de un fotopico, sumando las de cada canal, esto es:

$$C_t = \sum_{i=n}^m C_i$$

Después se calculan las cuentas de fondo (C_{fc}) para cada canal, sumando las cuentas de tres canales desde n-3 hasta n-1 antes del comienzo del fotopico y las de los tres siguientes después del fotopico desde m+1 hasta m+3; se obtiene el promedio de cuentas

por canal dividiendo entre el número de canales considerados, esto es:

$$C_{fc} = \frac{\sum_{i=n-3}^{n-1} C_i + \sum_{i=m+1}^{m+3} C_i}{6}$$

El número de canales que conforman el fotopico es:

$$N_{cf} = m - n + 1$$

Este se multiplica por las cuentas de fondo promedio por canal para obtener las cuentas de fondo total:

$$C_f = C_{fc} \times N_{cf}$$

Que al restarse de las cuentas totales del fotopico se obtiene el área neta o cuentas netas:

$$C_n = C_t - C_f$$

Esto se puede observar de manera gráfica en la figura 5.

Obtenidas las cuentas netas de cada fotopico de cierta energía (E_n), se dividen por el tiempo parámetro de conteo para obtener las cuentas por segundo y dividir estas entre las gamas/segundo (γ/s) para obtener la eficiencia para cada energía.

Nuestro sistema, igual que para la calibración en energía y FWHM se calibró con el estándar de Ba-133 y Eu-152 y se obtuvieron las dos funciones de calibración en eficiencia, para energías menores a 165 keV:

$$\ln Ef = -37.52 + 13.796 \cdot \ln En - 1.38 \cdot \ln En^2 \quad \text{b.3}$$

y para energías mayores a 165 keV:

$$\ln Ef = -1.832 + 0.1492 \cdot \ln En - 7.5E-02 \cdot \ln En^2 \quad \text{b.4}$$

La gráfica de estas funciones se muestra en la figura 6.

c) Análisis del espectro y caracterización del Ra-226.

Las características del Ra-226 se muestran en el siguiente cuadro:

Ra-226 Vida media 1600 años.			
Emisión alfa		Emisión gamma	
Energía (MeV)	Rendimiento (%)	Energía (MeV)	Rendimiento (%)
4.6	6	0.186	3.28
4.78	95	--	--

Las características del U-235 se muestran en el siguiente cuadro:

U-235 Vida media 7.1 E+06 años.			
Emisión alfa		Emisión gamma	
Energía (MeV)	Rendimiento (%)	Energía (MeV)	Rendimiento (%)
4.37	6	0.143	11
4.4	57	0.1857	54
4.58	8	0.1634	5

Como se puede observar de los dos cuadros anteriores, la emisión de radiación gamma con energía de 185.7 keV del U-235 llega a sobreponerse con la energía de 186 keV del Ra-226, formando un doblete en el fotopico de esta última energía, como se muestra en la **figura 7**.

Por lo que para poder cuantificar el fotopico del Ra-226 habrá que

restarle el fotopico del U-235, el cual se cuantifica con otro de sus fotopicos, como el de 143 keV de mayor emisión, lo que implicaba otra sobreposición con el Ra-223, como se muestra en la **figura 8**.

Procediéndose a evaluar el fotopico de menor abundancia del U-235 cuya energía es de 163.4 keV, el cual no presenta interferencia o sobreposición con otro fotopico.

d) Cálculo de Actividad de Ra-226.

Debido a que el Ra-226 decae por emisión alfa y emite una radiación gamma con energía de emisión de 186 keV (con un porcentaje de emisión del 3.28 %, las demás no son apreciables por su muy pequeño porcentaje de emisión < 0.1 %) se traslapa con la energía de 185.7 keV del U-235, presente en las muestras, por lo que para calcular la actividad del Ra-226 es necesario quitar la componente del U-235 en el fotopico doble. Como el U-235 cuenta con otras líneas de energía que no tienen interferencia, el cálculo de las cuentas netas en la energía de 185.7 keV del U-235 se determina con la parte proporcional de emisión, las cuales posteriormente se restan a las cuentas netas del fotopico en 186 keV y de esta forma se conocen las cuentas netas del fotopico del Ra-226 en la energía de 186 keV.

Para realizar lo anterior, se empleó el fotopico de 163.4 keV del U-235 el cual no presenta interferencia ya que el de 143 keV aunque de mayor porcentaje de emisión, tiene una interferencia con el fotopico de 144 keV del Ra-223 presente en las muestras.

El cálculo se hizo de la siguiente manera:

Para calcular la actividad del U-235, se usa el fotopico de 163 keV

$$Ac_{U-235} = \frac{Cn_{U-235_{163keV}}}{Ef_{163keV} Y_{U-235_{163keV}} Tc} \quad d.1$$

con Ac =actividad; Cn =cuentas netas; Tc =tiempo de conteo; Y =porcentaje de emisión en gammas/desintegración, Ef = Eficiencia de detección en esa energía.

Análogamente para 185.7 keV:

$$Ac_{U-235} = \frac{Cn_{U-235,185.7\text{keV}}}{Ef_{185.7\text{keV}} Y_{U-235,185.7\text{keV}} Tc} \quad d.2$$

como la actividad es independiente del fotopico empleado, igualando el lado derecho de d.1 y d.2, y despejando las cuentas netas para 185.7 keV se tiene:

$$Cn_{U-235,185.7\text{keV}} = \frac{Cn_{163\text{keV}} Ef_{185.7\text{keV}} Y_{U-235,185.7\text{keV}}}{Ef_{163\text{keV}} Y_{U-235,163\text{keV}}} \quad d.3$$

Empleando la expresión para la propagación de incertidumbres, en el caso de un producto y/o cociente: sea $f(x,y,z)=xy/z$:

$$\sigma f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2} \quad d.4$$

Donde: σ_x ; σ_y ; σ_z son las incertidumbres en las variables x, y, z, y sabiendo que:

$$f = Cn_{U-235,185.7\text{keV}} \quad d.5$$

Combinando las ecuaciones d.3 y d.5 en d.4 y debido a que los porcentajes de emisión tienen una incertidumbre muy pequeña reportada en la literatura, se consideran como una constante y la incertidumbre asociada es la siguiente:

$$\sigma Cn_{U-235,185.7\text{keV}} = \frac{Y_{U-235,185.7\text{keV}}}{Y_{U-235,163\text{keV}}} \sigma \left(\frac{Cn_{163\text{keV}} Ef_{185.7\text{keV}}}{Ef_{163\text{keV}}} \right) \quad d.6$$

llamando k a:

$$k = \frac{Y_{U^{235} 185.7 \text{ keV}}}{Y_{U^{235} 163 \text{ keV}}} = cte \quad d.7$$

Y

$$\sigma \left(\frac{Cn_{163 \text{ keV}} Ef_{185.7 \text{ keV}}}{Ef_{163 \text{ keV}}} \right) \sqrt{\left(\frac{\sigma Cn_{163}}{Cn_{163}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{163}}{Ef_{163}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{185.7}}{Ef_{185.7}} \right)^2} \quad d.8$$

Finalmente el área neta para el Radio (186 keV) es igual a la diferencia entre las cuentas netas en el fotopico de 186 keV menos las cuentas netas del fotopico de 185.7 keV.

$$Cn_{Ra-226} = Cn_{186 \text{ keV}} - Cn_{U-235, 185.7 \text{ keV}} \quad d.9$$

donde la incertidumbre asociada de acuerdo a la expresión para la incertidumbre de una suma o diferencia:

$$\sigma Cn_{Ra-226} = \sqrt{(\sigma Cn_{186 \text{ keV}})^2 + (\sigma Cn_{U-235, 185.7 \text{ keV}})^2} \quad d.10$$

Y la concentración de actividad para Ra-226 en Bq/Kg:

$$Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq / kg) = \frac{Cn_{Ra-226}}{Tc \cdot Y_{Ra-226} \cdot Ef_{186 \text{ keV}} \cdot peso(kg)} \quad d.11$$

Y su incertidumbre asociada:

$$\sigma Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq / kg) = \sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Tc \cdot Y_{Ra-226} \cdot Ef_{186 \text{ keV}} \cdot peso(kg)} \quad d.12$$

$$\sigma Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq / kg) = \frac{1}{Tc \cdot Y_{Ra-226} \cdot Ef_{186 \text{ keV}} \cdot peso(kg)} \sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186 \text{ keV}}} \quad d.13$$

Y

$$\sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186kev}} = \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186kev}} \sqrt{\left(\frac{\sigma Cn_{Ra-226}}{Cn_{Ra-226}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{186kevs}}{Ef_{186kevs}}\right)^2} \quad d.14$$

Usando los valores de la eficiencia y porcentajes de emisión de las energías involucradas (U-235: 163 y 185.7 keV y para el Ra-226: 186 keV), de la ecuación de calibración en eficiencia para geometría marinelli (ecuación b.3 y b.4) se tienen las siguientes eficiencias:

Eficiencia en geometría marinelli para 163 keV	Ef= 0.0471
Eficiencia en geometría marinelli para 186 keV	Ef= 0.045
Porcentaje de emisión para U-235 en 163 keV	Y= 5%
Porcentaje de emisión para U-235 en 185.7 keV	Y= 54%
Porcentaje de emisión de Ra-226 en 186 keV	Y= 3.28%

Aplicando la ecuación d.3 se obtienen las cuentas netas del

$$U-235_{185.7} = Cn_{U-235(185.7 \text{ keV})}$$

Y para obtener las cuentas netas del el Ra-226 se calcula como la diferencia entre las cuentas netas del fotopico 186 keV menos las cuentas netas del U-235 (185.7 keV):

$$Cn_{Ra-226} = Cn_{186} - Cn_{U-235(185.7 \text{ keV})}$$

Aplicando la ecuación d.11 se obtiene la concentración de actividad del Ra-226 en Bq/Kg, que es la medición que nos interesa.

- e) Cuantificación de la autoabsorción de la radiación gamma del Ra-226

En el apéndice 3 se menciona el procedimiento seguido para comprobar que la autoabsorción de la radiación gamma de 186 keV del Ra-226 no es significativa para el cálculo de la actividad del Ra-226 en las muestras de los estériles.

- f) Muestreo y Preparación .

El método de muestreo consistió en tomar 10 muestras de un kilogramo en un área de 100 m², mezclarlas homogéneamente y tomar de esta mezcla un kilogramo para su análisis, y reportarlo conforme la normativa.

Para la determinación de las concentraciones de Ra-226 de los

estériles y de suelo se tomaron muestras de las zonas I y II antes y después del proceso de remoción del material, para lo cual se realizó una malla de 10 x 10 m en dichas zonas. Las muestras fueron tomadas donde se registraban niveles de radiación con el detector HP-260. Se tomaban alrededor de 10 muestras por malla y se mezclaban para hacerla representativa de dicha malla. Las muestras tomadas y analizadas eran de aproximadamente 1000 g, las que eran depositadas en bolsas de plástico previamente rotuladas, donde se indicaban las coordenadas del punto de muestreo así como la fecha del muestreo. Posteriormente se enviaban al laboratorio para eliminar la humedad, ser tamizadas y determinar el peso de la muestra, mismas que eran colocadas en otra bolsa de plástico y ser puestas en un "marinelli" para su evaluación.

2.7 CORRELACION ENTRE CONCENTRACIÓN (Bq/kg) Y CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL (cpm)

Con el objeto de realizar mediciones indirectas de concentración en campo y de una manera operativa, se realizó una comparación gráfica entre la concentración de Ra-226, en Bq/kg, de muestras medidas por espectrometría gamma contra las mediciones, en cpm, de esas mismas muestras con un detector HP-260 teniendo un área de detección de 16 cm².

El método seguido para tal comparación consistió en tomar como referencia las muestras analizadas por espectrometría gamma para conocer la concentración de Ra-226 y dado que estas muestras se encontraban en marinelli, se median con el detector HP-260 en cuentas por minuto (cpm). Este detector estaba asociado a un monitor ESP-1.

Esta situación facilitó la medición en campo puesto que de una manera gruesa se conocía la concentración de Ra-226, en función de las cpm que registraba el detector HP-260.

La función de la gráfica se definió tomando como variable independiente (X) a la tasa de conteo en cpm y como variable dependiente a la concentración de Ra-226 (Bq/Kg), obteniéndose la siguiente función:

$$\text{Conc}_{\text{Ra-226}} (\text{Bq/Kg}) = 24.4 (X) - 2196 \pm 13\%$$

Que es la relación entre la concentración de Ra-226 vs tasa de conteo en cpm (X). La gráfica que muestra esta función es la **figura 9**.

2.8 MÉTODO DE MEDICIÓN DE RAPIDEZ DE EXPOSICIÓN.

Básicamente la rapidez de exposición se determinó tanto para las zonas I y II a 1m de la superficie y a contacto de la misma, promediadas en superficies de 10 x 10 m. En algunos casos se determinaron los niveles de exposición máximos a contacto y a 1 m, como se reportan en el capítulo 3.

Para el caso de la zona III la medición se realizó a contacto y a 1 metro en áreas de un m². Reportándose los niveles máximos encontrados en los equipos, como se indican en el capítulo 3.

Todas estas mediciones fueron realizadas con un monitor ESP-1 con sonda HP-270 y ventana abierta.

2.9 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE UNA CAPA HEMIRREDUCTORA.

Una capa hemirreductora (CHR) reduce a la mitad los niveles de radiación de un haz colimado. La determinación de una CHR de aluvión de una fuente extendida se considerará sobre estimada ya que el caso extremo es para un haz colimado. Para la determinación de dicha CHR de aluvión se consideró al Bismuto 214 como el contribuyente con mayor energía dentro de la cadena del Uranio natural. Este emite dos radiaciones gamma; una de 1.12 MeV con 17% y la otra con 1.764 con 17 % de emisión. Debido a que el material de aluvión que se utilizaría para la reducción de los niveles de exposición tiene una densidad de 1.5 g/cm³, se empleó la gráfica del Radiological Health Handbook, Edición 1970, pág. 163 [3], para la determinación de la capa hemirreductora de un haz colimado, obteniéndose mediante interpolación, en base a densidad, que eran necesarios 10.5 cm de aluvión para tal fin. En el apéndice 5 se muestra dicha gráfica.

3. RESULTADOS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA

3.1 CONDICIONES RADIOLÓGICAS ANTES DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO.

3.1.1 Condiciones radiológicas de la zona I (Presa de jal)

Las condiciones radiológicas de la zona I antes de proceder a la descontaminación se indican en la **figura 10**. Donde se destacan los siguientes niveles de radiación en los estériles medidos con un detector HP-270:

Nivel de fondo natural promedio:	0.03 MR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	1.2 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.7 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	1 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	1.03mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	2 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.3 mR/h

Las concentraciones de contaminación superficial típicas de Ra-226 en Bq/kg fueron las siguientes:

Concentración natural promedio del sitio:	40 ±10%
Concentración máxima encontrada:	28,958 ± 24%
Concentración mínima:	569.39 ± 18%
Concentración promedio en todo el volumen del jal:	10,000.00 ± 21%

El proceso de beneficio del uranio representó una producción de alrededor de 35,000 ton de estériles. Los cuales estuvieron en la zona I por más de 25 años sin ninguna capa protectora sobre ellos. Esto generó una dispersión vía aérea y por precipitación pluvial hacia la parte NE de la planta y fuera de la propiedad. Para conocer el alcance de dicha dispersión se tomaron muestras aleatorias en esa dirección, encontrándose niveles de concentración superficial de hasta 12,700 Bq/kg a una distancia de 60 m fuera de la propiedad y en dicha dirección.

3.1.2 Condiciones radiológicas de la zona II (zona de minerales).

Las condiciones radiológicas en la zona II antes del proceso de descontaminación y que se indican en la **figura 10** fueron las siguientes :

Fondo natural promedio a 1 m:	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	12 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	1.5 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.8 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.2 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	3 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.3 mR/h

La concentración de contaminación superficial de Ra-226 en Bq/kg fueron las siguientes:

Concentración máxima encontrada:	34,557.5 ± 23%
Concentración mínima:	433.2 ± 18%
Concentración promedio:	4,300 ± 20%

3.1.3 Condiciones radiológicas de la zona III (planta de tratamiento, laboratorio y taller).

Las condiciones radiológicas en la zona III se indican en la **figura 11** donde destacan los siguientes :

Nivel de exposición máximo a contacto:	4 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	2 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.3 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.08 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.2 mR/h
Nivel de exposición de fondo natural :	0.03 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto :	0.4 mR/h

Los niveles de contaminación superficial encontrados en los equipos de la planta de tratamiento, medidos con un detector de ventana delgada (HP-260) fueron los siguientes :

Nivel de fondo promedio :	100-120 cpm
Nivel de contaminación máximo a contacto:	100,000 cpm (1,734,027.7dpm/100cm ²)
Nivel de contaminación mínimo a contacto:	500 cpm (6,597.2 dpm/100 cm ²)
Nivel de contaminación promedio a contacto:	2000 cpm (32,638.8 dpm/100 cm ²)
Nivel de contaminación promedio removible:	1000 cpm (24,444.4 dpm/100 cm ²)

3.2 **CONDICIONES RADIOLÓGICAS DESPUÉS DEL PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO.**

3.2.1 Condiciones radiológicas de la zona I (presa de jal).

Las condiciones radiológicas de la zona I después del proceso de descontaminación radiológica y antes de la puesta de aluvión (como capa protectora) se destacan los siguientes niveles de radiación en dicha zona:

Nivel de fondo natural promedio :	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	0.3 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.14 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.03 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.03 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	0.1 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.08 mR/h

Los niveles de radiación de la zona I después del proceso de descontaminación y después de la cubierta de aluvión de 15 cm como capa hemirreductora, se obtuvieron los siguientes niveles de radiación:

Nivel de fondo natural promedio :	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	0.1 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.08 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.03 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.03 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	0.05 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.05 mR/h

Como se puede observar el nivel de radiación promedio a contacto después de la cubierta de aluvión en esta zona, representó una disminución del nivel de radiación sin capa hemirreductora, a la mitad, por lo que el criterio 2b del capítulo 2 si se alcanzó.

En cuanto a la concentración de Ra-226 en Bq/kg para los primeros 15 cm después de la descontaminación y antes de capa hemirreductora de aluvión, se puede considerar que no se cumplió con el criterio 1 del capítulo 2. Esto se muestra con los valores de la **figura 12** que están en cuentas por minuto (cpm), y los cuales se deben de relacionar con la función de la figura 9, para obtener la concentración en Bq/kg. Dado que quedó contaminación residual en forma puntual, se puede concluir que esta zona deberá de considerarse de uso restringido.

3.2.2 Condiciones radiológicas de la zona II (minerales).

Las condiciones radiológicas en la zona II después del proceso de descontaminación y antes de la cubierta de aluvión, se destacan los siguientes :

Nivel de fondo natural promedio:	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	1 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.2 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.04 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.03 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	0.2 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.1 mR/h

Las condiciones radiológicas en la zona II (minerales) después del proceso de descontaminación y después de la cubierta de aluición (15 cm), se destacan los siguientes :

Nivel de fondo natural promedio :	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	0.1 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.08 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.05 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.04 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	0.1 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m	0.06 mR/h

Como se puede observar el nivel de radiación promedio a contacto después de la capa hemirreductora de aluición de 15 cm, los niveles de radiación se redujeron a la mitad pero no se alcanzó el criterio 2b del capítulo 2. En esta situación la contribución de la concentración del Ra-226 también está presente, por lo que el uso de dicha zona debe considerarse de uso restringido.

En cuanto a la contaminación de Ra-226 esta zona, después de las limpias y antes de la cubierta de aluición se indican en la **figura 13**, donde se dan valores en cuentas por minuto (cpm) las que se deben de relacionar con la función de la figura 9, para obtener la concentración en Bq/kg. Dado que quedó contaminación residual en forma puntual, se puede concluir que esta zona deberá de considerarse de uso restringido.

3.2.3 Condiciones radiológicas de la zona III (planta de tratamiento, laboratorio y taller).

Las condiciones radiológicas en la zona III después del proceso de descontaminación, destacan los siguientes:

Nivel de fondo natural promedio:	0.03 mR/h
Nivel de exposición máximo a contacto:	0.2 mR/h
Nivel de exposición máximo a 1 m:	0.1 mR/h
Nivel de exposición mínimo a contacto:	0.04 mR/h
Nivel de exposición mínimo a 1 m:	0.03 mR/h
Nivel de exposición promedio a contacto:	0.05 mR/h
Nivel de exposición promedio a 1 m:	0.04mR/h

Los niveles de contaminación después de la descontaminación de los equipos de la planta de tratamiento medidos con un detector HP-260 son los siguientes:

Nivel de fondo :	100-120 cpm
Nivel de contaminación máximo a contacto:	50,000 cpm (865,972.22 dpm/100 cm ²)
Nivel de contaminación mínimo a contacto:	300 cpm (3,125 dpm/100 cm ²)
Nivel de contaminación promedio a contacto:	400 cpm (4,861 dpm/100 cm ²)
Nivel de contaminación promedio removible:	170 cpm (833.33 dpm/100 cm ²)

En la figura 11 se indican los niveles de contaminación alcanzados después de la descontaminación de los equipos. Los mostrados con ≤ 400 cpm son considerados que cumplieron con el criterio 3. Tabla 1 del capítulo 2, para la contaminación promedio. Los equipos que superaron a las 400 cpm de contaminación promedio fueron desmantelados y considerados como objeto contaminado en la superficie.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA MIGRACIÓN DEL Ra-226 EN ESTRATOS SUBYACENTES EN LA PRESA DE ESTÉRILES (JAL)

Después de realizar el retiro de los estériles y en los lugares donde se pudo llegar al nivel del terreno natural, se hicieron catas con el fin de determinar la migración del Ra-226. Para lo cual se tomaron muestras a diferentes profundidades para determinar las concentraciones de Ra-226.

En la **figura 14** se indican las concentraciones de Ra-226 a diferentes profundidades y para las diferentes catas indicadas en la figura 2. Por los resultados encontrados, se concluye que la migración es muy pequeña, encontrándose valores cercanos a la concentración del fondo natural del lugar, a los 50 cm por debajo de donde permanecieron los estériles.

Este hallazgo puede extrapolarse al comportamiento del Ra-226 que se esperaba en el repositorio de Peña Blanca, donde adicionalmente se esperaba una menor migración debido a las camas de arcilla que en forma de pirámide truncada se le ha puesto al depósito.

3.4 CANTIDAD DE DESECHOS RADIOLÓGICOS GENERADOS.

3.4.1 En la zona I (presa de estériles de uranio).

En esta zona se depositaban los residuos que quedaban después de recuperar el molibdeno y el uranio del mineral. Debido a que la separación del uranio consistía principalmente de un proceso alcalino, prácticamente toda la descendencia del uranio se encontraba en los residuos (estériles). El de mayor riesgo radiológico lo constituía el Ra-226 por su toxicidad muy alta, debido a lo cual se tomó a éste como referencia para su determinación como desecho radiactivo. Por tal motivo se procedió a retirar los estériles de esta zona y ubicarlos en un lugar alejado de núcleos de población. La cantidad de desechos removidos en las dos etapas del proceso de descontaminación de esta zona, representó 64,909.962 Ton. totales. Estos desechos se depositaron en el repositorio cerca de la superficie que se construyó en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua.

Si consideramos que en el balance metalúrgico del mineral de uranio, se generaron 21.42 g de Ra-226 y la cantidad de desechos removidos totales de esta zona, esto nos representaría una concentración teórica de 12,209.8 Bq/kg.

3.4.2 En la zona II (área de minerales).

En esta zona se encontraban a la intemperie los minerales que serían procesados para obtener los concentrados de uranio natural. Para proceder a la descontaminación de esta zona se procedió a levantar los montones de mineral allí tirados, asimismo, se levantó el mineral disperso debido al movimiento del mismo hacia los diferentes accesos de la planta cuando ésta operaba. La cantidad de mineral y limpias de esta zona producto de las limpias de los diferentes accesos a la nave de proceso y de la descontaminación de dicha nave, representó 1,734.655 ton. Mismos que fueron depositados en la zona de amortiguamiento en el repositorio de estériles de uranio en Peña Blanca Chihuahua.

3.4.3 En la zona III (área de nave de proceso).

Los equipos que no pudieron alcanzar los niveles aceptables de contaminación, incluso después de haberlos tratado químicamente (con ácido) y mecánicamente (con cepillado de cerdas de acero) se muestran en la figura 11, siendo los siguientes:

1.	Clasificador de rastrillos.
2.	Lixiviador 1.
3.	Lixiviador 2.
4.	Precipitador de uranio.
5.	2 Prensas filtro, uno de 32 marcos y el otro de 10.
6.	Marcos de los filtros prensa (los cuales se encontraban en el Taller).
7.	Tanque No. 3 de solución rica en uranio.
8.	Tubería que conduce la solución rica en uranio.
9.	Tubería que conduce los estériles a la zona de los mismos.

Esto representó que dichos equipos se tuvieron que desmantelar lo cual generó una cantidad de 30 ton., mismos que se enviaron y depositaron en un socavón de la mina Las Margaritas, en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua. Este socavón posteriormente fue sellado con mampostería.

La chatarra que se encontraba en el ala poniente del laboratorio y el cual no presentaba contaminación radiactiva, fue removida hacia la zona de amortiguamiento del repositorio de los estériles de uranio en Peña Blanca, mas que nada para evitar un problema de tipo social.

En el lado sur del laboratorio, se encontraban muestras de mineral que se encontraban en bolsas de plástico y de papel, así como los núcleos de barrenos y ayuda filtro contaminado. Estos se enviaron a la zona de minerales de la zona de amortiguamiento del repositorio de estériles de uranio en Peña Blanca. El volumen que representó estos desechos fue de aproximadamente 250 m³. También se recuperaron 32 tambos de 200 l c/u, presumiblemente con concentrados de uranio en forma de polvo amarillo, mismos que se enviaron al ININ para su gestión como desechos radiactivos. Por otro lado, también se recuperó una fuente de Cs-137 que se encontraba en un cuarto anexo al laboratorio, cuya actividad radiactiva no se indicaba, pero que tenían a contacto del contenedor 5 mR/h. Dicha fuente se trasladó al ININ para su gestión.

En el área del taller del lado poniente se encontraba una plataforma de concreto, encima de la cual se encontraba sin ninguna protección ayuda filtro contaminado con concentrados de uranio en forma de polvo amarillo, mismo que se envió posteriormente al repositorio de estériles de uranio en Peña Blanca. Asimismo, la plataforma de concreto (con un área de 10 x 10 m) se levantó y se trasladó a la zona de amortiguamiento en Peña Blanca. Dentro del edificio del taller se encontraron marcos del filtro prensa contaminados los cuales se trasladaron al socavón de la mina las Margaritas, como anteriormente se mencionó.

En conclusión tanto la nave de proceso como el laboratorio y el taller quedaron radiológicamente limpios, por lo que las construcciones pueden ser utilizadas de manera irrestricta.

3.5 MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA APLICADAS

3.5.1 Protección Radiológica Externa.

El personal que laboró en la descontaminación, traslado y almacenamiento de estériles de uranio, estaba expuesto a niveles de radiación externa, por lo que a dicho personal se le consideró como trabajador ocupacionalmente expuesto (POE). Con el fin de reducir la frecuencia de los efectos estocásticos, dado los niveles de radiación en promedio que se encontraron en la planta de beneficio de uranio, y por el tiempo que duraron las actividades antes mencionadas, el personal no recibió una dosis individual superior al criterio 4 del capítulo 2. Asimismo, tampoco recibió una dosis superior al límite de dosis para el público, indicado en el criterio 5 del mismo capítulo antes señalado.

Las medidas de protección radiológicas prescritas para la manipulación, transporte y almacenamiento de material contaminado fueron: vestir un sobretodo, zapatos de trabajo, guantes de hule o carnaza, cubrebocas y escafandra. A ningún trabajador se le permitía trabajar sin estas medidas de protección.

3.5.2 Protección Radiológica Interna.

Como se mencionó en el inciso anterior, dado los niveles de radiación que se encontraron en la planta de beneficio, el objetivo de la protección radiológica es reducir la frecuencia de los efectos estocásticos, limitando la dosis que por incorporación al cuerpo humano se pudiera presentar. De los radisótopos que

contienen los estériles, el Ra-226 tiene importancia radiológica por su vida media y su radiotoxicidad. Debido a esto se procuró que su incorporación al organismo humano se limitara. Para lo cual se prescribió que los trabajadores portaran cubrebocas y guantes. No se prescribió otro tipo de protección respiratoria más eficiente, debido a: que las condiciones climáticas del lugar eran extremas y su uso era poco operativo; y, debido a que se laboró prácticamente a la intemperie, la vigilancia de la dosis interna del personal no se consideró necesaria, ya que las dosis esperadas por incorporación serían muy bajas, si consideramos que el Límite Anual de Incorporación (LAI) para el Ra-226 vía ingestión es de 70,000 Bq y de 20,000 Bq por vía inhalación y si se tiene en promedio una concentración de Ra-226 de 10,000 Bq/kg en el jal, se tendrían que ingerir 7 kg o inhalar 2 kg de estériles para alcanzar el LAI. Por lo que se consideró altamente improbable que esto ocurriera para poder prescribir otro tipo de protección respiratoria, o dosimetría en vivo del personal.

3.6 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS INDIVIDUAL Y DOSIS COLECTIVA DE LOS TRABAJADORES

Para la determinación de la dosis individual por exposición externa se consideraron tres grupos de trabajo:

3.6.1 Grupo de trabajo que realizó la descontaminación de la nave de proceso, laboratorio y taller.

En este grupo laboraron 13 personas por espacio de 10 semanas. Si consideramos de manera conservadora que en promedio se trabajó en un ambiente de 0.2 mR/h, durante 8 horas diarias y durante 6 días a la semana, la dosis efectiva individual fue de 0.96 mSv en este periodo. La dosimetría individual resultó ligeramente menor en un 20%.

Por lo tanto de manera conservadora la dosis colectiva para este grupo fue de 12.5 mSv-persona.

3.6.2 Grupo de trabajo que transportó el mineral y los estériles de uranio (jal).

En este grupo se tuvo mucha fluctuación de personal pero en promedio se puede considerar que fue de 35 personas. Debido a las diferentes capacidades de los camiones, para unos era más fácil realizar mas transporte que otros, por lo que la persona que realizó mas transportes fue de 260. Si consideramos que en la cabina se tenía una rapidez de exposición promedio de 0.1 mR/h, con un tiempo por transporte de 2 h, entonces la persona que

realizó mas transportes recibió una dosis de 0.52 mSv en un periodo de 29 semanas (7 meses) que duró el movimiento de los estériles en las dos etapas de la descontaminación de la planta.

Si consideramos, 2000 viajes de transporte (para las dos etapas del movimiento de los estériles y mineral), la dosis colectiva para este grupo alcanzó 4 mSv-persona.

- 3.6.3 Grupo de trabajo que se encontraba trabajando en el acomodo de los estériles de uranio en el repositorio en la Sierra de Peña Blanca.

Este grupo trabajó con 10 personas (para las dos etapas de acomodo de los estériles). Si tomamos como nivel de exposición promedio de 0.2 mR/h por 8 horas de trabajo diario durante 29 semanas (7 meses) que duró el acomodo de los estériles y mineral, representó una dosis individual de 2.78 mSv.

Por lo tanto, la dosis colectiva para este grupo fue de 27.8 mSv-persona.

- 3.6.4 En conclusión, la dosis colectiva por la descontaminación de la planta de beneficio de uranio de Ciudad Aldama, Chihuahua y el acomodo de los estériles de uranio en el repositorio de Peña Blanca, representó 44.3 mSv-persona.

4. CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA LA SELECCIÓN DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES.

4.1 CRITERIOS GENERALES DE SEGURIDAD

Para seleccionar el sitio donde se habrían de colocar los estériles de uranio y para establecer las especificaciones técnicas del apilamiento se siguieron los criterios siguientes [11]:

- 4.1.1 Los estériles de uranio y sus contaminantes asociados deben ser contenidos de modo que permanezcan aislados del ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor tecnología disponible, con apoyo en las características del sitio.
- 4.1.2 Los estériles deben ser dispuestos de tal manera que no se requiera mantenimiento activo para preservar la eficacia de la contención.
- 4.1.3 La actividad económica en el sitio debe ser mínima en un tiempo previsible.

- 4.1.4 El sitio debe ser seco, tanto por lo que se refiere a precipitación pluvial como a acumulación de agua en mantos freáticos, ya que el agua es un medio de transporte de los radisótopos al medio ambiente humano, a través de cadenas tróficas.
- 4.1.5 La actividad volcánica y sísmica debe ser baja, con el fin de evitar fracturamientos, deslices de tierra y exposición de los jales. Toda la zona norte del país cumple este criterio.
- 4.1.6 El sitio no debe estar en el curso de corrientes superficiales de agua porque pueden erosionar la cubierta protectora. La erosión por viento debe minimizarse con una cubierta de plantas en el sitio.

4.2 ANÁLISIS DEL SITIO EN LAS INMEDIACIONES DE CIUDAD ALDAMA.

En un principio se consideró la posibilidad de inmovilizar los estériles en su sitio original a un costado de la planta de beneficio, protegiéndolos con membranas impermeables abajo y arriba. Esta posibilidad se descartó debido a las razones siguientes:

- La Planta de Beneficio y la presa de jales original se encuentran a unos cuantos cientos de metros de las construcciones habitadas más cercanas.
- La presa de jal original se encuentra sobre un acuífero del que se extrae agua para la ciudad. No se ha determinado con precisión la profundidad a la que se encuentra el acuífero pero, a juzgar por los datos de los pozos de agua en las cercanías, debe encontrarse entre 20 y 30 metros por debajo de la presa original.
- La presa de jales original se encuentra en las estribaciones de un cerro que constituye una cuenca de captación de agua de lluvia. Esta agua tiende a escurrir hacia la presa aunque podría desviarse mediante obras adecuadas.
- Los bordos de la presa original son de material de relleno y no están estabilizados, por lo que tendrían que ser reforzados o substituidos por otros de un diseño y construcción adecuados.

Dado el peso de las razones aludidas se decidió reubicar los estériles en un lugar mas apropiado, lejos de los centros de población actuales y previsibles, donde puedan permanecer por tiempo indefinido.

4.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE UN NUEVO SITIO

- 4.1.4 El sitio debe ser seco, tanto por lo que se refiere a precipitación pluvial como a acumulación de agua en mantos freáticos, ya que el agua es un medio de transporte de los radisótopos al medio ambiente humano, a través de cadenas tróficas.
- 4.1.5 La actividad volcánica y sísmica debe ser baja, con el fin de evitar fracturamientos, deslices de tierra y exposición de los jales. Toda la zona norte del país cumple este criterio.
- 4.1.6 El sitio no debe estar en el curso de corrientes superficiales de agua porque pueden erosionar la cubierta protectora. La erosión por viento debe minimizarse con una cubierta de plantas en el sitio.

4.2 ANÁLISIS DEL SITIO EN LAS INMEDIACIONES DE CIUDAD ALDAMA.

En un principio se consideró la posibilidad de inmovilizar los estériles en su sitio original a un costado de la planta de beneficio, protegiéndolos con membranas impermeables abajo y arriba. Esta posibilidad se descartó debido a las razones siguientes:

- La Planta de Beneficio y la presa de jales original se encuentran a unos cuantos cientos de metros de las construcciones habitadas más cercanas.
- La presa de jal original se encuentra sobre un acuífero del que se extrae agua para la ciudad. No se ha determinado con precisión la profundidad a la que se encuentra el acuífero pero, a juzgar por los datos de los pozos de agua en las cercanías, debe encontrarse entre 20 y 30 metros por debajo de la presa original.
- La presa de jales original se encuentra en las estribaciones de un cerro que constituye una cuenca de captación de agua de lluvia. Esta agua tiende a escurrir hacia la presa aunque podría desviarse mediante obras adecuadas.
- Los bordos de la presa original son de material de relleno y no están estabilizados, por lo que tendrían que ser reforzados o substituidos por otros de un diseño y construcción adecuados.

Dado el peso de las razones aludidas se decidió reubicar los estériles en un lugar mas apropiado, lejos de los centros de población actuales y previsibles, donde puedan permanecer por tiempo indefinido.

4.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE UN NUEVO SITIO

Habiendo decidido que los jales no deberían permanecer en su sitio original se procedió a buscar un nuevo sitio con las características siguientes [11,12]:

- El sitio debe encontrarse lejos de los centros de población existentes y previsible, en una zona de baja densidad demográfica.
- No obstante, el sitio debe encontrarse a una distancia de la Planta de Benéfico que permita el traslado de los jales a un costo razonable.
- Dado que la región que rodea Ciudad Aldama es una zona uranífera, sería conveniente colocar los jales en una mina de uranio o cerca de una mina o un yacimiento de uranio ya que de esta manera el impacto ambiental que podría causar la presencia del jal, por encima del fondo natural, sería mínimo o nulo.
- El sitio debe estar en una zona con un régimen de lluvia bajo y en una zona donde el nivel freático se encuentre a una profundidad tal que haga poco probable su posible contaminación por los radionúclidos contenidos en el jal.
- Finalmente, el sitio debe ser de tal naturaleza que se requiera un mínimo de obras de ingeniería para prepararlo para recibir el jal.

Se consideró en consecuencia la sierra de Peña Blanca donde se ubican las minas de El Nopal I, Las Margaritas, Puerto III y otras. En la **figura 15** se indica la localización del sitio del repositorio en Chihuahua.

Las características del sitio elegido se indican en el informe "Caracterización y evaluación del sitio para el depósito de jales del beneficio de uranio en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua" elaborada por la compañía CUMULUS S.A. de C.V [13], donde se manifiestan las fallas naturales, las características que contribuirán a la inmovilización y aislamiento del material radiactivo. En dicho estudio se consideran la siguiente información relevante:

- Demografía y uso del suelo y agua.
- Meteorología.
- Sismología.
- Ecología.
- Hidrología.
- Geología.

5. DISEÑO DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES [14,15,16,17,18,19,20]

5.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

Se tomó como base para el diseño del apilamiento de los estériles de

uranio los criterios generales siguientes:

- El sitio y el apilamiento de los estériles deben ser estables física y químicamente, de tal manera que no requiera mantenimiento activo, de modo que permanezcan aislados del ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor tecnología disponible.
- El apilamiento debe permitir el control de la migración de los elementos tóxicos y radiactivos de los estériles hacia el ambiente.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES [13]

Los estériles que se encontraban a un lado de la Planta de Beneficio de Ciudad Aldama son los residuos de un proceso químico agresivo. El proceso que usaba la Planta de Beneficio consistía en una molienda a 60 mallas, una lixiviación con carbonato y bicarbonato de sodio a 80°C durante 24 horas, precipitación con hidróxido de sodio, filtración (en filtros prensa), secado y envasado. Ya que la alimentación de la planta sufrió variaciones importantes durante su operación, el jal también tienen una composición química variable.

Las muestras de estériles que han sido analizadas en el laboratorio indican un contenido de 300 g de U_3O_8 por kilogramo y 10 000 Bq de Ra-226 por kilogramo, en promedio. Como era de esperarse, tanto el uranio como el radio se encuentran en forma prácticamente insoluble. Se hizo una prueba de lixiviación del jal con agua natural (agua de la llave) a 60°C durante 50 horas. La prueba se hizo con una pulpa con una relación de sólido a líquido de 1:1, manteniendo la pulpa en suspensión total durante la prueba. El líquido resultante (una vez filtrado) contenía 2 Bq/l de actividad alfa.

Los jales de Ciudad Aldama son un material sumamente fino. El 50% del material pasa la malla 200. Su mismo grado de finura permite compactarlo bien, y el jal compactado a 95% de la prueba Procter standard tiene una filtración hidráulica de 7.2×10^{-6} cm/seg [13].

5.3 PREPARACIÓN DEL TERRENO

Después de realizar el desmonte de una ladera (figura 16) para la construcción de la plataforma que albergaría a los estériles de uranio, se construyó una pendiente en el terreno que fue de 7% en la dirección E-O y de 5% en la dirección N-S, por lo que se prepararon dos terrazas para reducir la pendiente a un valor entre 0.5 y 2%. La plataforma del terreno ocupó una superficie aproximada de 200 x 200 m. A lo largo del eje (N-S) se formó una doble pendiente en la forma de una V asimétrica, para que formara un canal para captar y conducir al exterior de la pila cualquier agua que lograra infiltrarse. Una vez afinado el terreno se procedió a

humedecerlo y compactarlo hasta un 90%, según la prueba Procter standard.

5.4 PREPARACIÓN DE LA CAMA INFERIOR.

Sobre el terreno preparado se colocaron dos camas de arcilla compactada con un espesor de 15 cm cada una, de tal forma que quedaran cruzadas, posteriormente se compactó cada una de las camas hasta 90% de la prueba Procter standard (figura 17).

5.5 CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DEL REPOSITORIO

Se contrató a dos empresas externas para que llevara el control de calidad en lo relativo a capacidad de carga del suelo, grado de compactación de la cama inferior de arcilla, de los estériles mismos y de la cubierta superior de arcilla.

Para la primera etapa se contrató a la empresa Laboratorios de la Construcción, S.A. (LACOSA), aplicando métodos normalizados de la American Society for Testing and Materials (ASTM), comúnmente usados en la construcción de terraplenes para carreteras.

Para la segunda etapa se contrató a la empresa CONSUCO, S.A. de C.V., la cual aplicó las mismas técnicas.

5.6 ACOMODO DE LOS ESTÉRILES

Los estériles de uranio se trasladaron desde la Planta de Beneficio de Ciudad Aldama hasta el sitio seleccionado en la Sierra de Peña Blanca de acuerdo con lo establecido en el Procedimiento respectivo.

Los estériles se colocaron sobre la cama inferior de arcilla descrita en el inciso 5.4. Los estériles se acomodaron de manera que se formara una pirámide truncada en una superficie de 100 x 100 m. Los taludes de arcilla que se formaron alrededor de la plataforma fue de 2 m de ancho la cual formaba el perímetro del apilamiento con una pendiente de 1:1.5, que es inferior al ángulo de reposo natural de los estériles secos. Los estériles se fueron apilando y compactando al 90% de prueba Procter standard. En La figura 18 se muestra los taludes de arcilla en la periferia de la plataforma a manera que se formara una pirámide truncada.

5.7 COLOCACIÓN DE LA CUBIERTA

La pila de estériles se protegió contra la lluvia, la erosión y la posible intrusión de animales pequeños mediante una cubierta de dos capas. La primera capa, fue de la misma arcilla usada en la cama intermedia e

inferior y de un espesor similar. La segunda capa consistió de material aluvial de 40 cm de espesor, adecuado para impedir la intrusión de animales pequeños. Esta última capa se estabilizó contra la erosión plantando en su superficie especies vegetales de raíces cortas propias de la región. El esquema del repositorio se muestra en la **Figura 19**, donde se indican los volúmenes almacenados en las dos etapas del proceso de almacenamiento.

5.8 ZONA DE AMORTIGUAMIENTO.

Se creó una zona de amortiguamiento alrededor del repositorio donde se depositaron los estériles, incluyendo el apilamiento de mineral de uranio que se encontraban en dicho lugar.

La zona de amortiguamiento fue cercada, con objeto de impedir el acceso de personas no autorizadas y de animales grandes ya sea silvestres o domésticos y de esta manera reducir el riesgo de desgarres en el repositorio.

La zona de amortiguamiento esta debidamente señalizada con letreros indicando la presencia de material radiactivo y prohibiendo el acceso de personal no autorizado.

5.9 IMPACTO AMBIENTAL [21]

5.9.1 Flora y Fauna de la Región.

Los muestreos de vegetación y el examen de las fotografías aéreas tomadas para la caracterización del sitio revelaron que la cubierta vegetal del área es pobre y se reduce a medida que la pendiente aumenta. Las áreas con pendientes menores de 10% muestran una cubierta vegetal de 29.9%, mientras que la cubierta vegetal de las áreas con pendientes de 10 a 30% y mayores de 30% es de 16.7% y 7.7%, respectivamente. Estas cubiertas vegetales son muy bajas, ya que las medidas de la cubierta vegetal herbácea en áreas más secas del desierto de Chihuahua, como las Montañas Franklin de El Paso, Texas, alcanzan valores mayores del 30%.

Aunque la cubierta vegetal de las áreas de pendientes más suaves es de 29.9%, estas áreas están tan sobrepastoreadas que las plantas herbáceas han sido prácticamente eliminadas y solamente quedan plantas leñosas, principalmente mesquite (*Prosopis glandulosa* var. *Glandulosa*) y especies de los géneros *Acacia*, *Opuntia* y otras especies de matorrales comúnmente encontrados en la región. El mayor sobrepastoreo ocurre cerca de las fuentes de agua y los lugares donde el ganado puede

encontrar sombra. Algunas de las áreas más planas están siendo invadidas por la gobernadora (Larrea tridentata).

En el desierto de Chihuahua se localizan los matorrales de gobernadora (Larrea divaricata), magueyales (Agave asperrima) y nopaleras (Opuntia) acompañados de cactáceas y arbustos pequeños, así como, huizachillos (Acacia), mezquite (Prosopis glandulosa) y sangregada (Jatropha dioica), se pueden considerar como bioindicadores de la flora de esta región.

Existe una gran variedad de insectos, aves, reptiles y mamíferos que habitan en esta región desértica de Chihuahua, de los cuales la rata canguro (Dipodomys merriami), camaleones (Phrynosoma comutum) y ratones (Peromyscus) se pueden considerar dentro de la fauna de la región como bioindicadores radioecológicos.

Los bioindicadores que se describieron nos indicarán los cambios de concentración del radionúclido de interés (Ra-226) en los alrededores de la zona, lo cual permitirá establecer el grado de migración del radionúclido que puede fugar de la instalación, y con esto definir las medidas correctivas correspondientes.

El impacto a la flora y fauna será prácticamente inexistente debido a las barreras de seguridad que se han puesto para confinar los estériles de uranio, además de que el sitio es de manera natural una zona uranífera, por lo que la exposición radiológica del fondo del sitio no se vio incrementado.

5.9.2 Rutas de exposición al Hombre.

Debido a que la zona es semidesértica, por lo cual no se cuenta con cultivos agrícolas y es escasa en pastizales para la ganadería, la ruta más probable de exposición hacia el hombre sería por la vía de infiltración hacia los acuíferos, aunque esta es muy improbable por su profundidad y los sellos naturales de los estratos subyacentes, por lo que se concluye que el impacto del depósito de los estériles al ambiente de la región es prácticamente despreciable.

Otra ruta de exposición al hombre es la exposición a los descendientes del Rn-222. Para evitar esta exposición se puso una cubierta superior de arcilla y aluvión, con el fin de reducir el flujo de este gas al ambiente. El Rn-222 tiene una vida media de 3.8 días y la dosis que causan sus descendientes al epitelio pulmonar es debida a que son emisores alfa. La exposición inadvertida por personas extrañas en el apilamiento del jal descubierto es menor a 1 mR/h, por lo que se proveyó de la

cubierta superior (arcilla y aluvión) con el fin de evitar la dispersión de los estériles y retardar la migración del Rn-222 al ambiente. Esta ruta de exposición no se considera importante, ya que como se ha discutido en el párrafo anterior, el sitio esta en una zona remota y no se espera desarrollo económico o habitacional futuros. La exposición en aire mencionada es menor a la exposición medida en minerales de alta ley de uranio, como los encontrados en la zona, que son decenas de veces superiores.

5.9.3 Programa de Monitoreo Ambiental.

Antes de que se colocaran los estériles en el sitio se tomaron muestras de aire, suelo, plantas y agua y se hicieron medidas radiométricas a efecto de establecer una base de comparación para los estudios ulteriores.

En la referencia [19] se describe el programa rutinario de vigilancia radiológica para el repositorio de los estériles, así como los datos base de comparación para dicho programa. Esto permitirá que se detecte la posible migración del Ra-226 a mantos freáticos, a cuencas, y la posibilidad de identificar una fractura en el repositorio. De aquí la importancia de realizar periódicamente la vigilancia ambiental de dicho sitio.

5.10 ANÁLISIS DE ACCIDENTES

Dado que la instalación será una instalación inactiva y que no se realizará en ella ninguna operación, los únicos accidentes previsibles son:

5.10.1 Derrumbe de un talud, debido a un exceso de humedad o debido a un sismo, y

5.10.2 Pérdida de integridad de la cubierta debido a la erosión por el agua.

El primer tipo de accidente es poco probable porque la zona es muy seca, con lluvias escasas y un régimen de evapotranspiración muy elevado y porque los estudios sismológicos han establecido que la zona es de muy baja sismicidad [19]. Además, los taludes tienen una pendiente de 1:1.5, que es menor al ángulo de reposo natural de los jales secos no compactados. De hecho los jales se humedecieron ligeramente durante su acomodo y se compactaron a 90% de la prueba Procter standard.

Suponiendo que se presente un sismo y que se fracture el repositorio, la

fuga de material radiactivo sería por el agrietamiento del talud, lo cual implica que los contaminantes tendrían que atravesar el talud de arcilla y el de aluvión, que representan un espesor de 2.5 m en total. El impacto al ambiente sería mínimo ya que estaría localizado y mediante inspección visual se alertaría de esta situación para su mitigación en los primeros años de operación.

El segundo tipo de accidente es poco probable porque la cubierta protectora tiene una capa superior de 70 cm de arcilla y de material aluvial estabilizado por vegetación propia del sitio.

Además, se realizó un canal aguas arriba con el objeto de que las bajadas de agua se canalizaran hacia los lados de la zona de amortiguamiento, protegiendo el repositorio.

6. CONCLUSIONES.

- a) El predio que comprende lo que fue la planta de beneficio de uranio y a la cual se le realizó la descontaminación, hasta llegar a los niveles mencionados en el capítulo 4, se puede considerar que de manera general no se alcanzaron los criterios establecidos por la CNSNS para considerar de uso irrestricto dicho predio, aunque los niveles de radiación externa, una vez que se cubrieron la zona I y II con aluvión inerte, no representan niveles que pongan en peligro la salud humana por esta vía. Por tal motivo, lo que fue la presa de jal (zona I) y lo que fue la zona de minerales (zona II) pueden ser utilizado como parque recreativo o como estacionamiento, ya que el nivel máximo de rapidez de exposición que se puede encontrar es de 0.1 mR/h, lo cual representaría (suponiendo una permanencia de 8 h a la semana, en el punto máximo) una dosis de 0.008 mSv/semana o 0.4 mSv al año, adicional al fondo natural, estimada en 2.6 mSv/año, resultando en 15.4% mas dosis de fondo al año. Lo que es importante señalar, es que no se debe permitir ningún tipo de construcción en la zona I y II que pudiera aflorar la contaminación residual que allí permanece.
- b) Es importante tomar en cuenta el estudio que se desarrollo para determinar la migración del Ra-226 hacia mantos freáticos. Dicho estudio permitió encontrar que en un lapso de 25 años el Ra-226 tan solo migró 50 cm por debajo de donde permanecieron los estériles (sin ninguna capa de retención de la migración a estratos subyacentes), o tuvo una velocidad de migración de 20 mm/año, lo que indica que es improbable que el Ra-226 llegara al nivel freático del lugar. Sin embargo por filosofía de seguridad se recomienda se efectúen análisis de muestras de agua potable de los pozos más cercanos a lo que fue la planta de beneficio de uranio, en Aldama, dos veces al año, durante un período de 20 a 25 años, con objeto de asegurar que al haber sido retirados los estériles de uranio no exista ya migración de Ra-226 mas allá de los primeros 100 cm bajo la superficie donde permaneció dicho material. Esto se puede

fuga de material radiactivo sería por el agrietamiento del talud, lo cual implica que los contaminantes tendrían que atravesar el talud de arcilla y el de aluvi6n, que representan un espesor de 2.5 m en total. El impacto al ambiente sería m6nimo ya que estar6a localizado y mediante inspecci6n visual se alertar6a de esta situaci6n para su mitigaci6n en los primeros a6os de operaci6n.

El segundo tipo de accidente es poco probable porque la cubierta protectora tiene una capa superior de 70 cm de arcilla y de material aluvial estabilizado por vegetaci6n propia del sitio.

Adem6s, se realiz6 un canal aguas arriba con el objeto de que las bajadas de agua se canalizaran hacia los lados de la zona de amortiguamiento, protegiendo el repositorio.

6. CONCLUSIONES.

- a) El predio que comprende lo que fue la planta de beneficio de uranio y a la cual se le realiz6 la descontaminaci6n, hasta llegar a los niveles mencionados en el cap6tulo 4, se puede considerar que de manera general no se alcanzaron los criterios establecidos por la CNSNS para considerar de uso irrestricto dicho predio, aunque los niveles de radiaci6n externa, una vez que se cubrieron la zona I y II con aluvi6n inerte, no representan niveles que pongan en peligro la salud humana por esta v6a. Por tal motivo, lo que fue la presa de jal (zona I) y lo que fue la zona de minerales (zona II) pueden ser utilizado como parque recreativo o como estacionamiento, ya que el nivel m6ximo de rapidez de exposici6n que se puede encontrar es de 0.1 mR/h, lo cual representar6a (suponiendo una permanencia de 8 h a la semana, en el punto m6ximo) una dosis de 0.008 mSv/semana o 0.4 mSv al a6o, adicional al fondo natural, estimada en 2.6 mSv/a6o, resultando en 15.4% mas dosis de fondo al a6o. Lo que es importante se6alar, es que no se debe permitir ning6n tipo de construcci6n en la zona I y II que pudiera aflorar la contaminaci6n residual que all6 permanece.
- b) Es importante tomar en cuenta el estudio que se desarrollo para determinar la migraci6n del Ra-226 hacia mantos fre6ticos. Dicho estudio permiti6 encontrar que en un lapso de 25 a6os el Ra-226 tan solo migr6 50 cm por debajo de donde permanecieron los est6riles (sin ninguna capa de retenci6n de la migraci6n a estratos subyacentes), o tuvo una velocidad de migraci6n de 20 mm/a6o, lo que indica que es improbable que el Ra-226 llegara al nivel fre6tico del lugar. Sin embargo por filosof6a de seguridad se recomienda se efect6en an6lisis de muestras de agua potable de los pozos m6s cercanos a lo que fue la planta de beneficio de uranio, en Aldama, dos veces al a6o, durante un per6odo de 20 a 25 a6os, con objeto de asegurar que al haber sido retirados los est6riles de uranio no exista ya migraci6n de Ra-226 mas all6 de los primeros 100 cm bajo la superficie donde permaneci6 dicho material. Esto se puede

comprobar mediante la elaboración de catas en el lugar y el análisis correspondiente de migración, al final de dicho período.

- c) Como referencia se puede considerar como no aceptable el consumo de agua potable con concentraciones mayores a 0.1 Bq/l de emisores alfa total [24].
- d) Con respecto a lo que son las construcciones y los equipos de proceso de lo que fue la planta de beneficio, pueden utilizarse de uso irrestricto, ya que presenta como área general un nivel de radiación promedio a 1 m de la superficie de 0.04 mR/h, cumpliendo con el criterio 2b recomendado por la CNSNS.
- e) Por lo que hace al control del sitio del repositorio en Peña Blanca, debe considerarse un compromiso con la persona física, moral o gubernamental que tenga a cargo dicho lugar, para que, de manera periódica se hagan evaluaciones de muestras ambientales (sobre todo la migración de Ra-226 a mantos freáticos o a cuencas) alrededor de la zona de amortiguamiento, ya que esto permitirá detectar de manera oportuna una posible dispersión (ya sea por fractura o migración) del material confinado y tomar las acciones correctivas necesarias. Las evaluaciones se sugiere sean efectuadas por lo menos una vez cada dos años.
- f) Es importante considerar que el confinamiento de los estériles de uranio tiene como objetivo la protección del hombre y del ambiente. Una selección adecuada del sitio y un buen diseño que proporcionen las barreras naturales y de ingeniería, garantizarán en el corto y mediano plazo la no dispersión del material confinado, y que de producirse fugas a largo plazo su magnitud sea tal que el material radiactivo no alcance concentraciones de riesgo en la cadena alimenticia del hombre y en el ambiente.
- g) El traslado de los estériles de uranio cumplió su objetivo con seguridad para los trabajadores y público, ya que las dosis estimadas para el personal que transportó y acomodó los estériles de uranio no pasaron el límite de dosis efectiva para el público, asimismo, se cuenta con la garantía de que todo el material que se transportó llegó al repositorio y que no se presentó incidente alguno que pudiera haber dispersado el material durante el trayecto. Esto se pudo comprobar, ya que antes de realizar el transporte del material, se analizó en varios puntos del trayecto la concentración de Ra-226, con los cuales se compararon las mediciones al final de dicha actividad, según se reporta en la referencia [19].
- h) Por otro lado, de los tres grupos de trabajo mencionados en el capítulo 3.6, el grupo de trabajadores que se encontró trabajando en el acomodo

de los estériles en el repositorio fue el que recibió una mayor dosis individual por exposición externa, recibiendo aproximadamente 2.8 mSv en el período de 29 semanas, lo cual representó que al final de ese año este grupo de trabajadores (10), recibió el doble de la dosis por fondo natural. Con respecto a las dosis por incorporación, estas no pudieron ser cuantificadas ya que se esperaban cantidades de tierra ingerida o inhalada menores a los Límites Anuales de Incorporación (LAI) para el Ra-226, siendo estas de 7 y 2 kg respectivamente (considerando un promedio de 10,000 Bq/kg de Ra-226 en el estéril y un LAI de 7×10^4 Bq/año por vía ingestión y de 2×10^4 Bq/año por vía inhalación), situación muy improbable de alcanzar.

- i) Cabe hacer notar que según el balance metalúrgico, se debieron generar aproximadamente 35,000 ton de estériles, pero al final del proceso de descontaminación de la presa de estériles, se generó aproximadamente 65,000 ton. Esto representó un incremento del 86% en la cantidad que se tuvo que remover del sitio. Esto nos debe hacer reflexionar para que en lo sucesivo, este tipo de plantas cuente con una gestión de sus desechos de acuerdo a la normativa y para no erogar esfuerzo y dinero adicionales.

7. REFERENCIAS

[1] D. Peña Javier, Blanco P. Benjamín, "Análisis de la operación de la planta alcalina de Villa Aldama, Chihuahua (1969 – 1971)", INEN, abril de 1977

[2] Bernard Shleien, "The Health Physics and Radiological Health Handbook", Scinta, inc 1992

[3] US Department of Health Education and Welfare "Radiological Health Handbook", enero 1970

[4] CNSNS, "Reglamento General de Seguridad Radiológica", diario oficial de la federación, noviembre de 1989

[5] OIEA, "Normas Básicas de Seguridad en Materia de Protección Radiológica", colección seguridad No. 9, viena, 1982

[6] OIEA, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the safety of Radiation Sources", Safety series No.115, viena, 1996

[7] NOM-008-NUCL-1994 "Límites de Contaminación Superficial con Material Radiactivo", CNSNS, marzo 1996

[8] NOM-005-NUCL-1994, " Límites Anuales de Incorporación (LAI) y Concentraciones Derivadas en Aire (CDA) de Radionúclidos para el personal Ocupacionalmente Expuesto", CNSNS, febrero 1996

de los estériles en el repositorio fue el que recibió una mayor dosis individual por exposición externa, recibiendo aproximadamente 2.8 mSv en el período de 29 semanas, lo cual representó que al final de ese año este grupo de trabajadores (10), recibió el doble de la dosis por fondo natural. Con respecto a las dosis por incorporación, estas no pudieron ser cuantificadas ya que se esperaban cantidades de tierra ingerida o inhalada menores a los Límites Anuales de Incorporación (LAI) para el Ra-226, siendo estas de 7 y 2 kg respectivamente (considerando un promedio de 10,000 Bq/kg de Ra-226 en el estéril y un LAI de 7×10^4 Bq/año por vía ingestión y de 2×10^4 Bq/año por vía inhalación), situación muy improbable de alcanzar.

- i) Cabe hacer notar que según el balance metalúrgico, se debieron generar aproximadamente 35,000 ton de estériles, pero al final del proceso de descontaminación de la presa de estériles, se generó aproximadamente 65,000 ton. Esto representó un incremento del 86% en la cantidad que se tuvo que remover del sitio. Esto nos debe hacer reflexionar para que en lo sucesivo, este tipo de plantas cuente con una gestión de sus desechos de acuerdo a la normativa y para no erogar esfuerzo y dinero adicionales.

7. REFERENCIAS

- [1] D. Peña Javier, Blanco P. Benjamín, "Análisis de la operación de la planta alcalina de Villa Aldama, Chihuahua (1969 – 1971)", INEN, abril de 1977
- [2] Bernard Shleien, "The Health Physics and Radiological Health Handbook", Scinta, inc 1992
- [3] US Department of Health Education and Welfare "Radiological Health Handbook", enero 1970
- [4] CNSNS, "Reglamento General de Seguridad Radiológica", diario oficial de la federación, noviembre de 1989
- [5] OIEA, "Normas Básicas de Seguridad en Materia de Protección Radiológica", colección seguridad No. 9, viena, 1982
- [6] OIEA, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the safety of Radiation Sources", Safety series No.115, viena, 1996
- [7] NOM-008-NUCL-1994 "Límites de Contaminación Superficial con Material Radiactivo", CNSNS, marzo 1996
- [8] NOM-005-NUCL-1994, " Límites Anuales de Incorporación (LAI) y Concentraciones Derivadas en Aire (CDA) de Radionúclidos para el personal Ocupacionalmente Expuesto", CNSNS, febrero 1996

- [9] NOM-006-NUCL-1994 "Criterios para la Aplicación de los Límites Anuales de Incorporación para Grupos Críticos de la Población", CNSNS, febrero de 1996
- [10] ANGELES C. ARTURO "Caracterización de Radio 226 en estériles de uranio por espectrometría gamma". Tesis de la Facultad de Ciencias, UNAM, 1996.
- [11] NOM-022/1-NUCL-1996, "Requerimientos para una Instalación para Almacenamiento Definitivo de Desechos Radiactivos de Nivel Bajo Cerca de la Superficie. Parte 1 Sitio", CNSNS, septiembre de 1997
- [12] NOM-004-NUCL-1994, Clasificación de los Desechos Radiactivos" CNSNS, marzo 1996
- [13] Fideicomiso de Fomento Minero. "Informe de Seguridad y Protección Radiológica de la Descontaminación Radiológica de la Planta de Beneficio de Uranio en Ciudad Aldama, Chihuahua, México." Mayo de 1997.
- [14] NOM-022/2-NUCL-1996, "Requerimientos para una Instalación para Almacenamiento Definitivo de Desechos Radiactivos de Nivel Bajo Cerca de la Superficie. Parte 2 Diseño", CNSNS, septiembre de 1997
- [15] NOM-022/3-NUCL-1996, "Requerimientos para una Instalación para Almacenamiento Definitivo de Desechos Radiactivos de Nivel Bajo Cerca de la Superficie. Parte 3 Operación y Clausura", CNSNS, septiembre de 1997
- [16] OIEA, "Current practices and options for confinement of uranium mill tailings", Technical Reports Series 209, Viena, Austria, Septiembre de 1981, p. 20
- [17] FRY, R.M., "Criteria for the long-term management of uranium mill tailings", Organismo Internacional de Energía Atómica, STI/PUB/622, Viena, Austria, Noviembre de 1992, p. 80
- [18] BOYD, J.M., CARTER, T.G., KNAPP, R.A., CULVER, K.B., "Hydrogeological investigations and evaluation of the Stanleigh mine tailings impoundment site", en Management of Wastes from Uranium Mining and Milling, Organismo Internacional de Energía Atómica, STI/PUB/622, Viena, Austria, Noviembre de 1992, p. 141-156.
- [19] Fideicomiso de Fomento Minero. "Informe Final de Seguridad del Transporte y Almacenamiento de Estériles de Uranio Ubicado en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua". Abril de 1997.

[20] OIEA, "Current practices for the Management and Confinement of Uranium Mill Tailings", Technical Reports Series, No. 335, Viena, junio 1992.

[21] Instituto de Ecología. Laboratorio del Desierto UNESCO, Chihuahua.

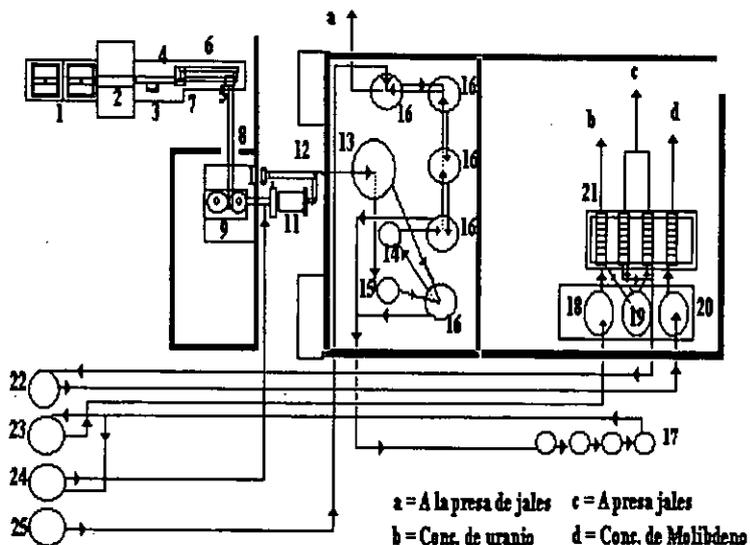
[22] Robley D. Evans "Engineers' Guide to the Elementary Behavior of Radon Daughters", Health Physics pergamon Press 1969. Vol. 17, pp 229-252.

[23] Eberline "Export Catalog" Eberline Instrument Corporation, santa Fe, New México.

[24] NOM – 127-SSAI – 1994 "Agua para uso y consumo humano" DOF, jueves 18 de enero de 1996.

8. FIGURAS

FIGURA 1
DIAGRAMA DE PROCESO DEL
BENEFICIO DE URANIO.



NOMENCLATURA:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1. Tolvas de gruesos. | 13. Asentador General |
| 2. Banda de gruesos de 18". | 14. Lixiviador V=21.5 m ³ |
| 3. Quebradora primaria de 8 x 10". | 15. Lixiviador V=58.1 m ³ |
| 4. Banda de 16". | 16. Especador lavados contracorriente 18 x 8". |
| 5. Criba de 6 x 3". | 17. Filtros de arena. |
| 6. Banda de retorno de 16". | 18. Precipitador de uranio. |
| 7. Quebradora secundaria. | 19. Precipitador |
| 8. Banda de finos de 18". | 20. Precipitador |
| 9. Tolvas de finos. | 21. Filtros prensa. |
| 10. Banda de alimentación 16". | 22. Tanque solución rica en molibdeno. |
| 11. Molino de bolas de 5 x 5". | 23. Tanque solución rica en uranio. |
| 12. Clasificador de rastrillos 28". | 24. Tanque solución semirrica en uranio y molibdeno. |
| | 25. Tanque de agua. |

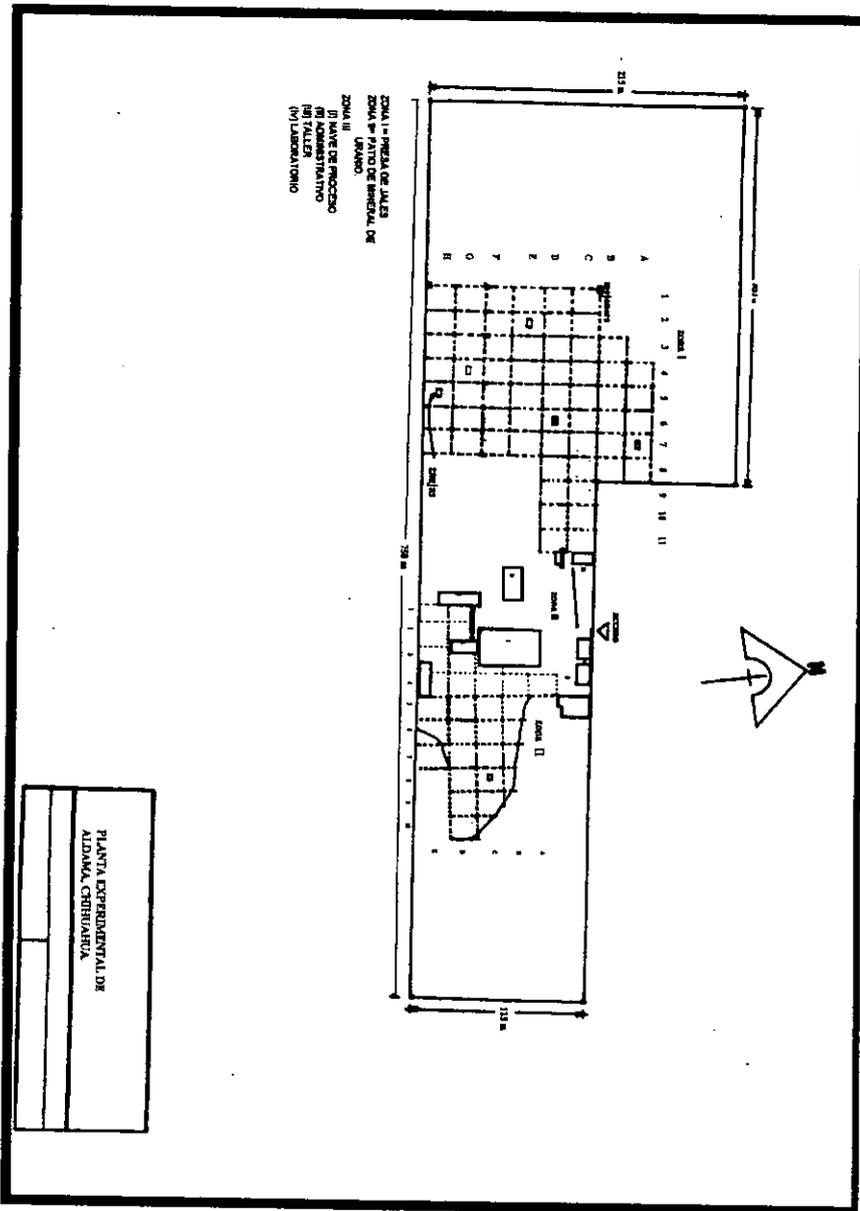


FIGURA 2
CLASIFICACION DE LAS ZONAS PARA LA DESCONTAMINACIÓN
DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE ALDAMA, CHIHUAHUA.

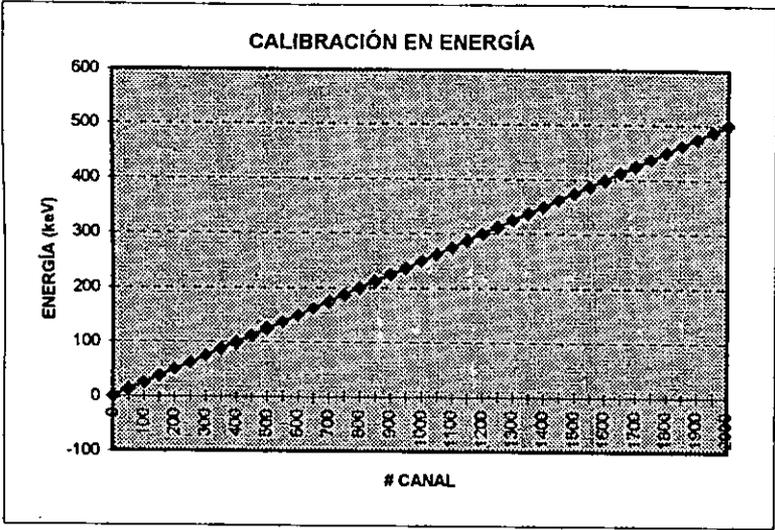


Figura 3
Gráfica de la función de calibración en energía

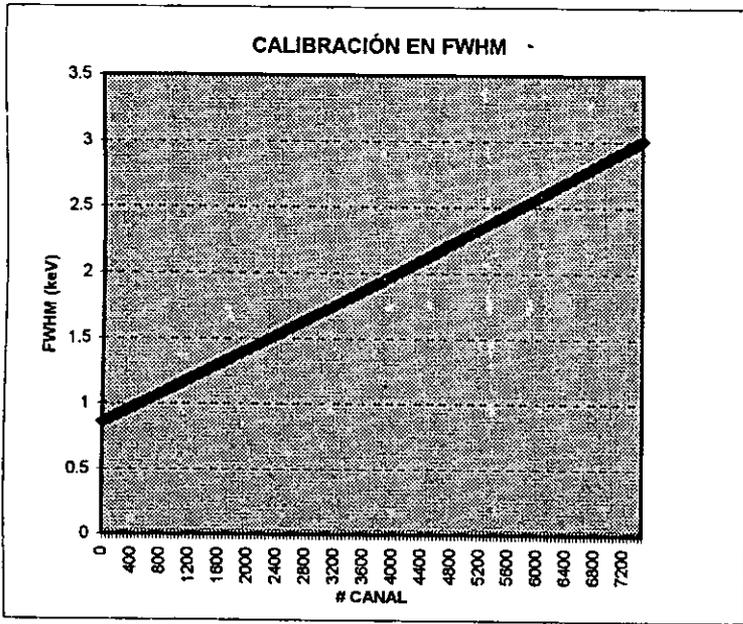


Figura 4
Gráfica de la función de calibración en FWHM

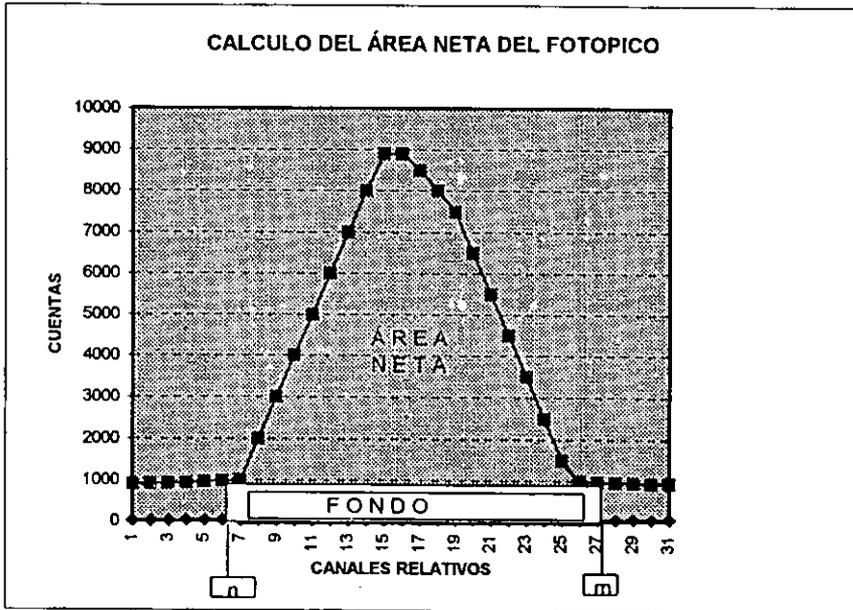


Figura 5
Gráfica que muestra el área neta

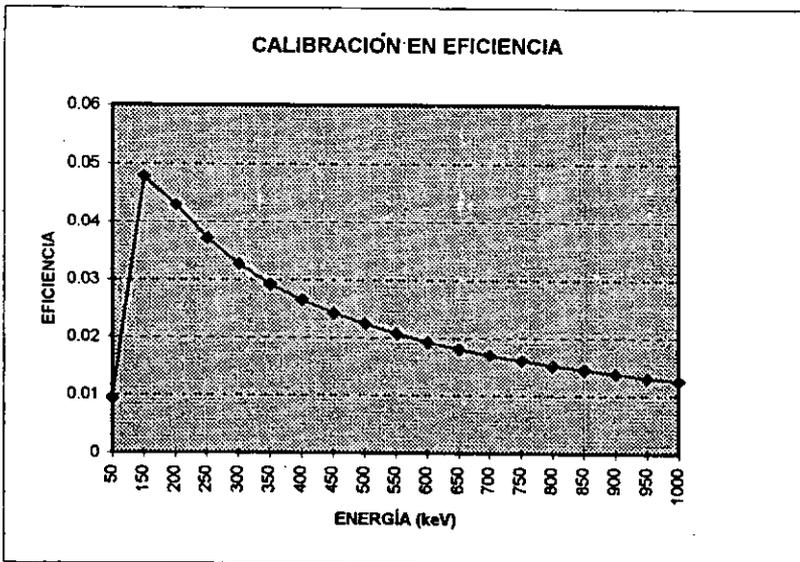


Figura 6
Gráfica de la función de calibración en eficiencia

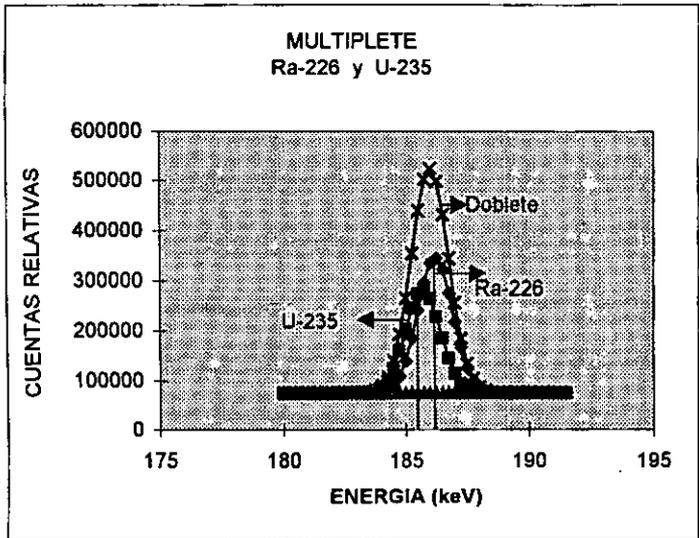


Figura 7
Doblete del fotopico de 185.7 keV del U-235 con el fotopico del Ra-226 en 186 keV.

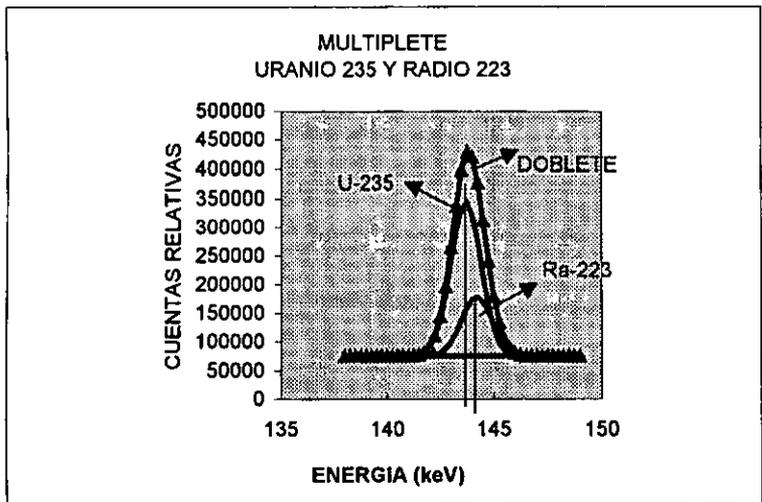


Figura 8
Doblete del fotopico del U-235 en 143 keV con el fotopico del Ra-223 en 144.2 keV.

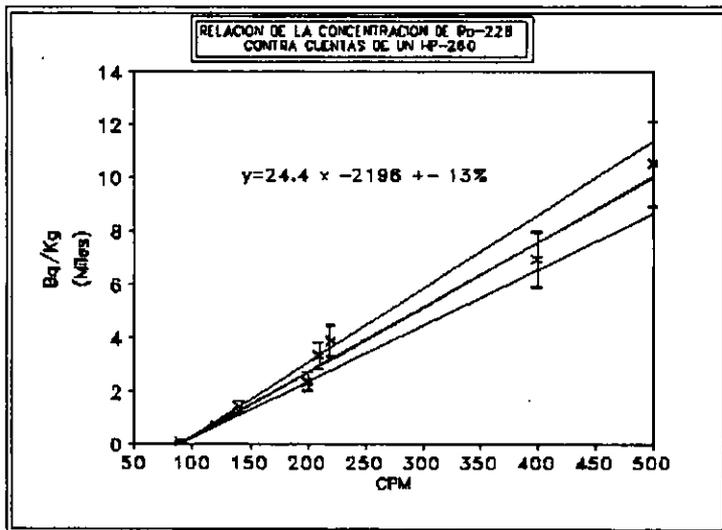


Figura 9

Gráfica que correlaciona la tasa de conteo en cpm de un detector HP-260 contra la concentración de Ra-226 en Bq/kg.

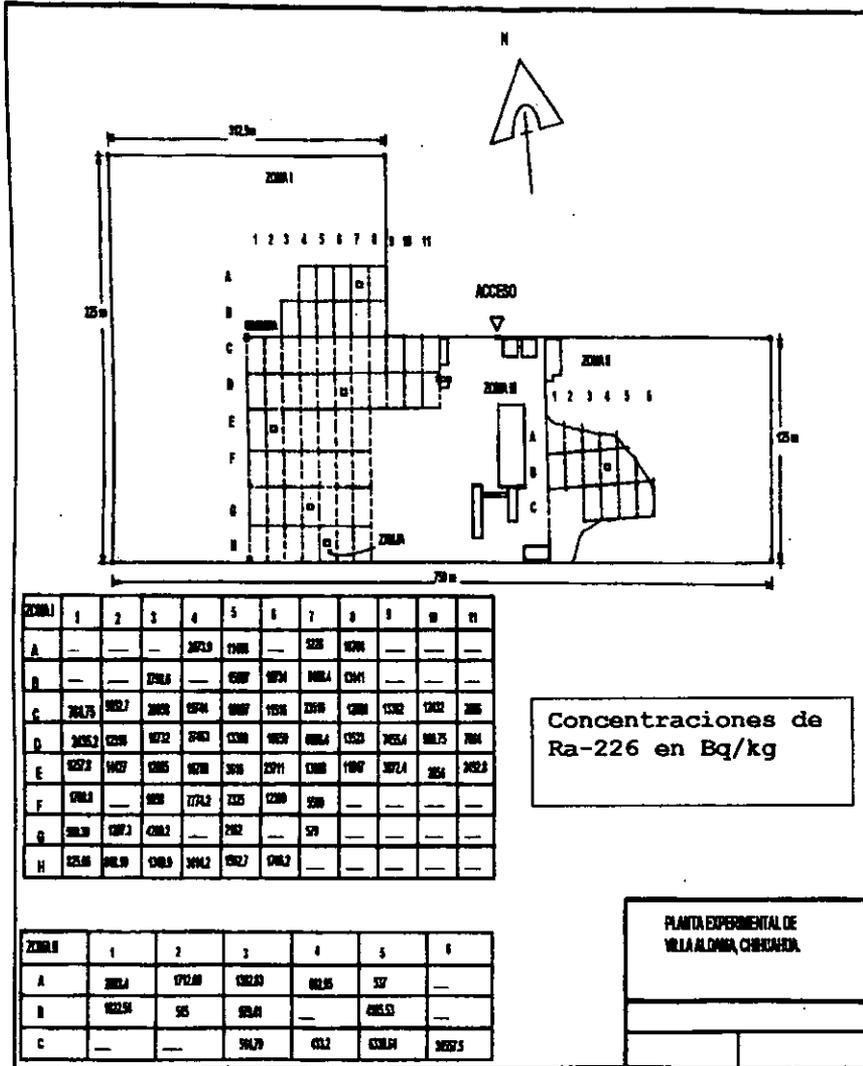
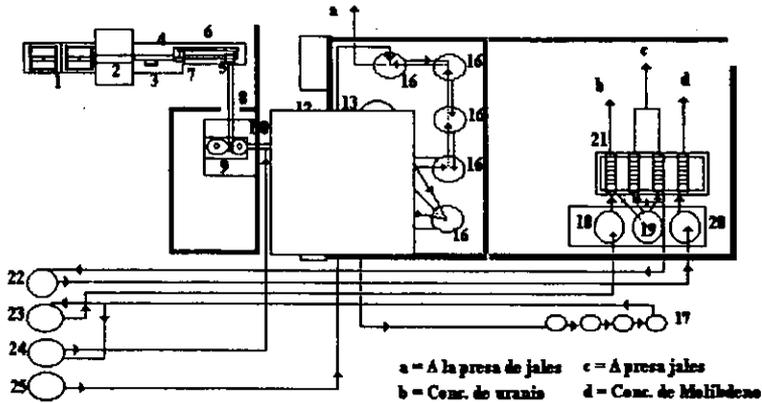


FIGURA 10
CONDICIONES RADIOLÓGICAS DE LA ZONA I Y II ANTES DEL
PROCESO DE DESCONTAMINACIÓN.

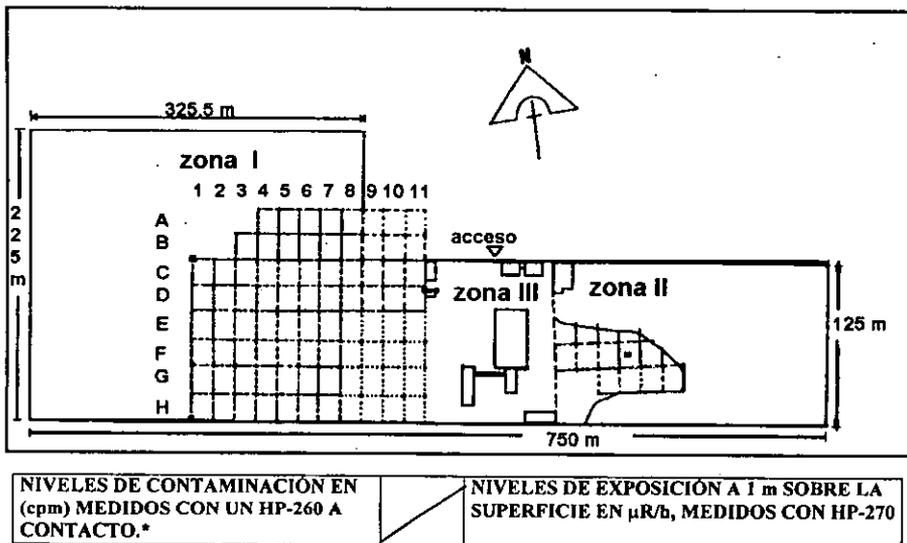
FIGURA 11
CONDICIONES RADIOLOGICAS DE LA ZONA III ANTES
Y DESPUES DEL PROCESO DE DESCONTAMINACION



NOMENCLATURA:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Telvas de gruesas. | 13. Asecador General. |
| 2. Banda de gruesas de 18". | 14. Lixiviador V=21.5 m ³ . |
| 3. Quebradora primaria de 8 x 10". | 15. Lixiviador V=50.1 m ³ . |
| 4. Banda de 16". | 16. Espesador lavados contracorriente 18 x 8". |
| 5. Criba de 6 x 3". | 17. Filtros de arena. |
| 6. Banda de retorno de 16". | 18. Precipitador de uranio. |
| 7. Quebradora secundaria. | 19. Precipitador. |
| 8. Banda de finos de 18". | 20. Precipitador. |
| 9. Telvas de finos. | 21. Filtros prensa. |
| 10. Banda de alimentación 16". | 22. Tanque solución rica en molibdeno. |
| 11. Molino de bolas de 5 x 5". | 23. Tanque solución rica en uranio. |
| 12. Clasificador de rastrillos 28". | 24. Tanque solución semirica en uranio y molibdeno. |
| | 25. Tanque de agua. |

EQUIPO	ANTES	DESPUES	EQUIPO	ANTES	DESPUES
1	1000	≤ 400	13	1500	≤ 400
2	1000	≤ 400	14	100,000	50,000
3	1000	≤ 400	15	14,000	14,000
4	1000	≤ 400	16	1500	≤ 400
5	500	≤ 400	17	120-2000	≤ 400
6	500	≤ 400	18	2000	1500
7	500	≤ 400	19	500	≤ 400
8	2000	≤ 400	20	2000	≤ 200
9	300	≤ 300	21	5000	1500
10	1000	≤ 400	22	400	≤ 400
11	300	≤ 300	23	1000	≤ 800
12	7000	1500	24	500	≤ 400
			25	120	≤ 120

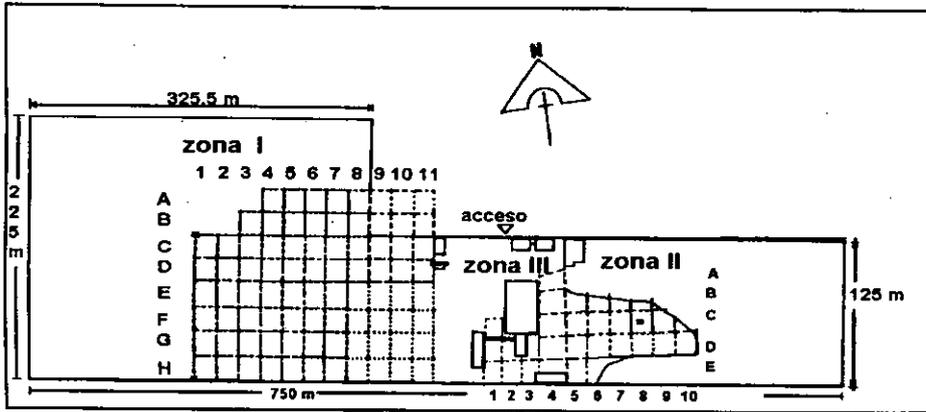


* Los valores de las cpm pueden ser correlacionados con la función de la figura 9 para obtener de manera aproximada la concentración de Ra-226 en Bq/kg.

Zona I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	---	---	---	160/30	160/30	160/30	200/40	200/40	120/30	120/30	120/30
B	---	---	260/45	200/40	160/30	160/30	200/40	200/40	120/30	120/30	120/30
C	120/30	200/40	400/80	400/80	400/80	300/50	300/50	120/30	100/30	100/30	100/30
D	120/30	400/80	300/50	300/40	300/50	200/40	200/40	140/30	140/30	120/30	120/30
E	120/30	140/30	140/30	140/30	140/30	140/30	140/30	140/30	120/30	120/30	120/30
F	120/30	120/30	140/30	140/30	140/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30
G	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30
H	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30	120/30

FIGURA 12

Condiciones radiológicas de la ZONA I después del proceso de descontaminación y antes de la puesta de la capa hemirreductora.



Niveles de contaminación en (cpm) medidos con un HP-260 a contacto.

Niveles de exposición a 1 m sobre la superficie en $\mu\text{R/h}$, medidos con un HP-270.

ZONA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	-----	-----	-----	200/40	-----	-----	-----	-----	-----	-----
A	-----	-----	-----	200/40	300/50	300/40	-----	-----	-----	-----
B	-----	-----	-----	200/40	300/50	300/40	-----	-----	-----	-----
C	300/40	-----	-----	300/80	400/80	300/80	800/200	800/200	800/200	-----
D	300/40	300/80	400/80	400/90	400/90	400/90	600/120	800/200	800/200	800/200
E	300/40	300/80	400/80	400/90	400/90	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 13

Condiciones radiológicas de la zona II después del proceso de descontaminación y antes de la puesta de la capa hemirreductora.

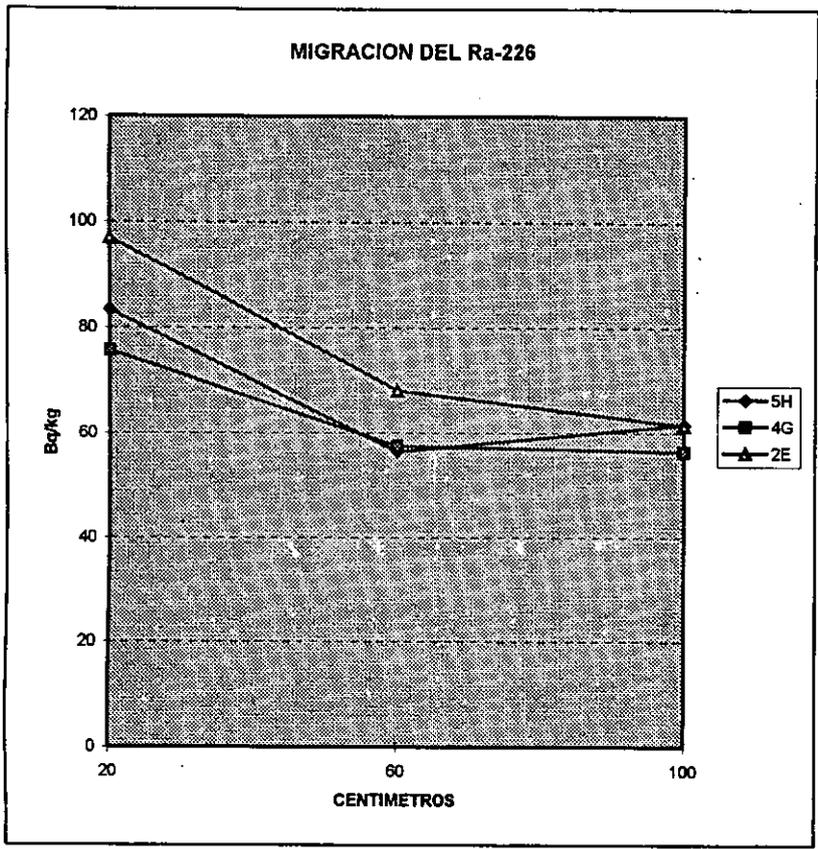


Figura 14
Migración del Ra-226 en la zona I

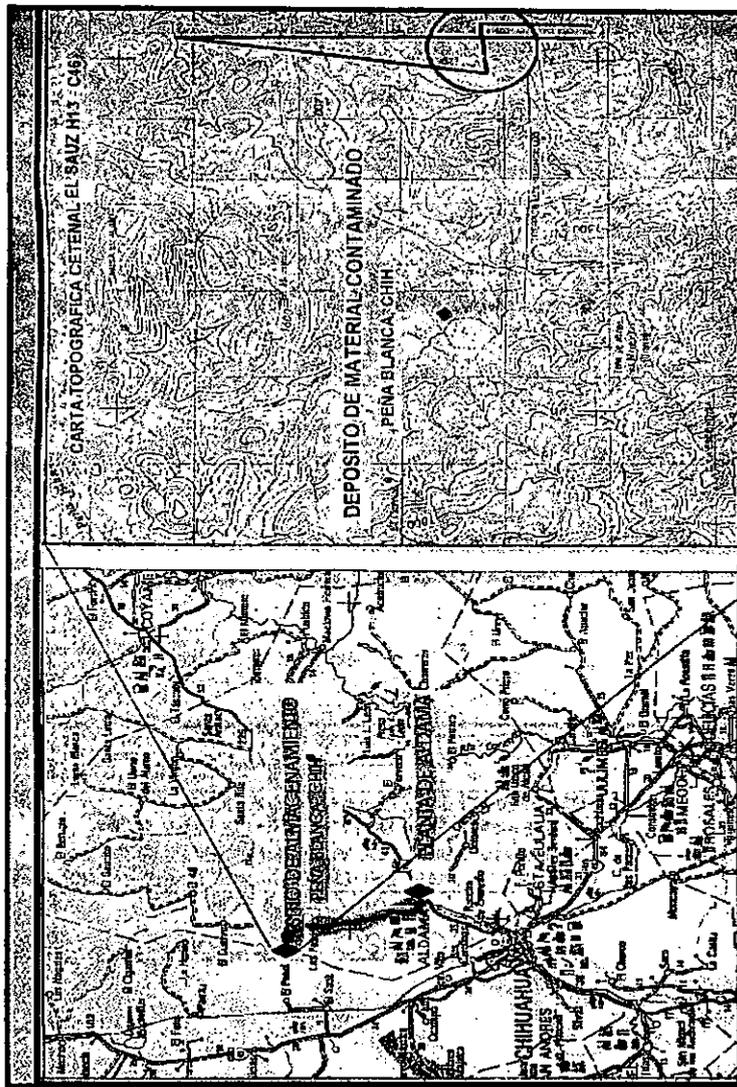


Figura 15
LOCALIZACIÓN DEL SITIO DEL REPOSITORIO



FIGURA 16
SITIO DONDE SE CONSTRUYÓ EL REPOSITORIO



FIGURA 17

PREPARACIÓN DE LA CAMA INFERIOR DE ARCILLA

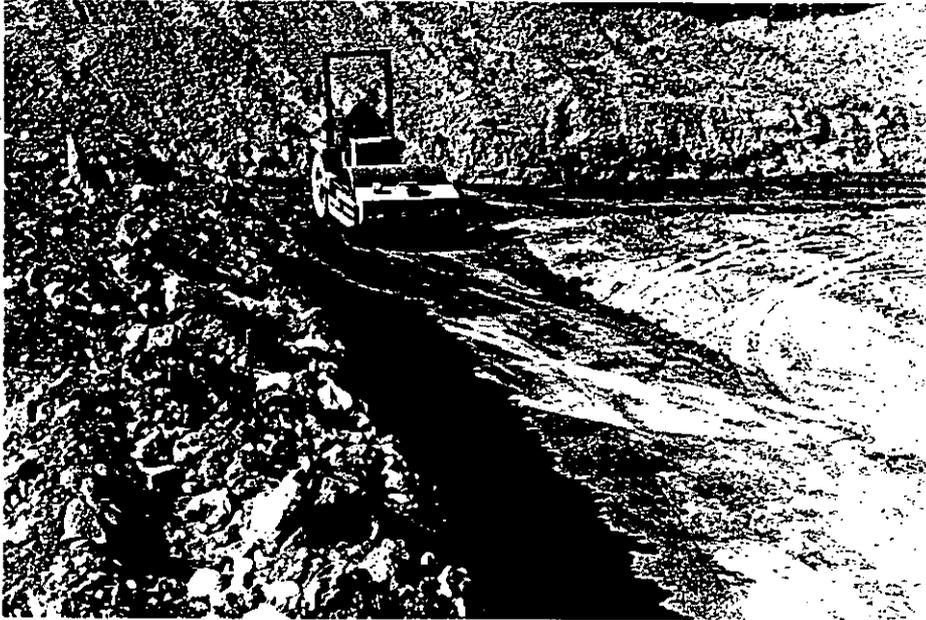


FIGURA 18
TALUDES DE ARCILLA ALREDEDOR DEL REPOSITORIO

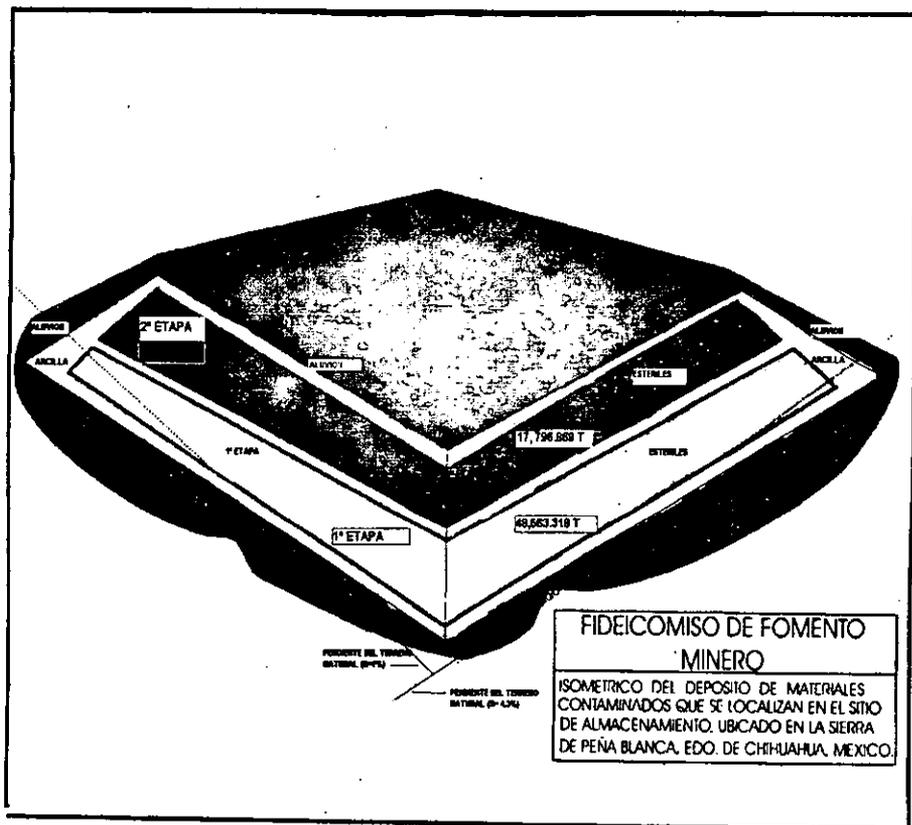


FIGURA 19
ESQUEMA DEL REPOSITORIO

APÉNDICE 1

**Cadena de desintegración y propiedades radiológicas de los descendientes del Uranio-238
Serie del Uranio (4n + 2)**

Núcleo	Nombre Histórico	Vida media Radiológica	Mayor emisión en energía (MeV) e intensidad					
			α		β		γ	
²³⁸ U ₉₂	Uranio I	4.51 x 10 ⁹ a	4.15 4.20	(25%) (75%)	---		---	
²³⁴ Th ₉₀	Uranio X ₁	24.1d	---		0.103 0.193	(21%) (79%)	0.063cT 0.093c	(3.5%) (4%)
²³⁴ Pa ₉₁	Uranio X ₂	1.17m	---		2.29	(98%)	0.765 1.001	(0.30%) (0.60%)
²³⁴ Pa ₉₁	Uranio Z	6.75h	---		0.53 1.13	(66%) (13%)	0.100 0.70 0.90	(50%) (24%) (70%)
²³⁴ U ₉₂	Uranio II	2.47x10 ⁵ a	4.72 4.77	(28%) (72%)	---		0.053	(0.2%)
²³⁰ Th ₉₀	Ionio	8.0 x 10 ⁴ a	4.62 4.68	(24%) (76%)	---		0.068 0.142	(0.6%) (0.07%)
²²⁶ Ra ₈₈	Radio	1602 a	4.60 4.78	(6%) (95%)	---		0.186	(4%)
²²² Rn ₈₆	Emanación Radón (Rn)	3.823d	5.49	(100%)	---		0.510	(0.07%)
²¹⁸ Po ₈₄	Radio A	3.05m	6.00	(-100%)	0.33	(-0.019%)	---	
²¹⁴ Pb ₈₂	Radio B	26.8m	---		0.65 0.71 0.98	(50%) (40%) (6%)	0.295 0.352	(19%) (36%)
²¹⁸ At ₈₅	Astatino	~2s	6.65 6.70	(6%) (94%)	---		(-0.1%)	---
²¹⁴ Bi ₈₃	Radio C	19.7m	5.45 5.51	(0.012%) (0.008%)	1.0 1.51 3.26	(23%) (40%) (19%)	0.609 1.120 1.764	(47%) (17%) (17%)
²¹⁴ Po ₈₄	Radio C'	164.s	7.69	(100%)	---		0.799	(0.014%)
²¹⁰ Tl ₈₁	Radio C''	1.3m	---		1.3 1.9 2.3	(25%) (56%) (19%)	0.296 0.795 1.31	(80%) (100%) (21%)
²¹⁰ Pb ₈₂	Radio D	21 a	3.72		0.016 0.061	(85%) (15%)	0.047	(4%)
²¹⁰ Bi ₈₃	Radio E	5.01d	4.65 4.69	(.00007%) (.00005%)	1.161	(-100%)	---	
²¹⁰ Po ₈₄	Radio F	138.4d	5.305	(100%)	---		0.803	(0.0011%)
²⁰⁶ Tl ₈₁	Radio E''	4.19m	---		1.571	(100%)	---	
²⁰⁶ Pb ₈₂	Radio G	Estable	---		---		---	

APÉNDICE 2

ALGUNAS CONSIDERACIONES RADIOLÓGICAS DEL RADÓN 222 [22]

El radón es el único elemento en la serie de decaimiento del uranio que es un gas. Por lo que para medirlo se ha definido a la unidad de Working Level (WL), la cual fue propuesta en 1957 y se define como una combinación de los productos del radón de vida media corta en un litro de aire, que puede resultar en la emisión de 1.3×10^5 MeV de energía alfa, no reconociendo la concentración de radón en el aire propiamente dicho. El WL considera tan solo la radiación alfa de los hijos del radón, porque los rayos beta y gamma emitidos por el plomo-214, Bismuto - 214, tienen una contribución despreciable a la dosis de radiación en el pulmón, la cual es debida fundamentalmente a los rayos alfa del Polonio-218 y Polonio - 214.

La unidad del WL reconoce que la radiación de exposición por el aire con el radón en los pulmones es predominantemente a los productos de decaimiento de vida media corta del radón, los cuales son retenidos por el pulmón, no así el radón.

De los productos del radón de vida media corta, una fracción (típicamente 20-45%) de todos ellos serán inhalados y retenidos en el pulmón.

El valor de 1.3×10^5 MeV, es obtenida de la energía alfa total depositada por los productos de decaimiento de vida media corta del radón, los cuales se encuentran en equilibrio con 100 pCi de radón. Por lo que un WL son 100 pCi de radón en un litro en equilibrio con sus productos de decaimiento.

Como el radón se diluye en la atmósfera, los valores típicos de concentración al aire libre se encuentran entre 0.1 a 1 pCi por litro de aire.

APÉNDICE 3
CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE DETECCIÓN UTILIZADOS.

EQUIPO: DESCRIPCIÓN GENERAL

ESP-1 El Eberline Smart Portable (ESP-1) es un instrumento de medición y está diseñado para usarse con un geiger muller, centellador y detectores proporcionales, es capaz de medir radiación alfa, beta, gamma y neutrones. El ESP-1 puede funcionar en modo de rapidez de exposición o en modo integrador en unidades acorde al tipo de medición. Los detectores recomendados con el uso del ESP-1 son: HP-260, HP-270, SPA-3 y otros. Cuenta este instrumento con controles internos para ajustar el voltaje de operación y el voltaje del detector a usar, también cuenta con controles externos para ajustar el tipo de detector, cambio de parámetros de calibración y cambio de unidades, etc

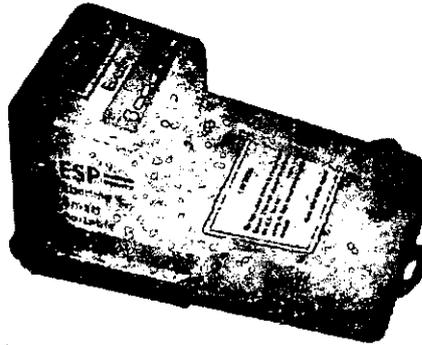
ESPECIFICACIONES:

Dimensiones: 12.7 x 12.7 x 26 cm

Peso: 1.75 kg

DETECTORES RECOMENDADOS PARA EL USO DEL ESP-1

MODELO	TIPO DE MEDICIÓN	RANGO ÚTIL
HP-270	Exposición o rapidez de exposición	Fondo - 3000 mR/h
HP-260	Contaminación beta + gamma	Fondo - 100,000 c/s
SPA-3	Alta sensibilidad para gammas	Fondo - 50,000 c/s



HP-260

DESCRIPCIÓN GENERAL

Este modelo portátil contiene un detector sensitivo para radiación beta, es del tipo "panque" con una ventana de mica delgada. Este detector tiene una sensibilidad a radiación beta de hasta 40 keV y de mas de 3 MeV para radiación alfa. Esta diseñado para mediciones de contaminación superficial.

ESPECIFICACIONES

Voltaje de operación: 900 ± 50 V

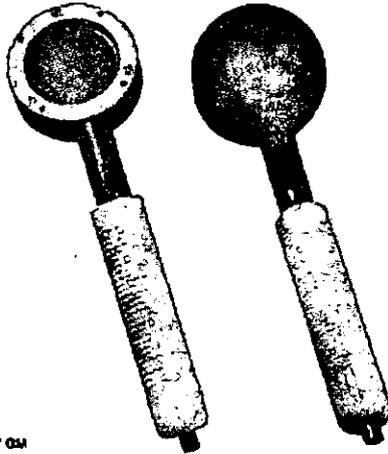
Tiempo muerto: 50 µs, máximo

Espesor de la mica: 1.4 a 2 mg/cm²

Tamaño de la mica: 15.5 cm²

Tamaño: 25.4 x 7 x 6.4 cm

Peso: 0.57 kg



1" 031

HP-270

DESCRIPCIÓN GENERAL

El HP-270 es un detector Geiger Muller con un compensador de energía y blindaje para radiación beta. El compensador de energía permite medir exposiciones desde el fondo hasta 200 mR/h

ESPECIFICACIONES

Voltaje de operación: 900 ± 50 V

Tiempo muerto: 100 μ s, máximo

Tamaño: 3.5 X 15.2 cm

Peso: 142 g



Model HP-270

SPA-3**DESCRIPCIÓN GENERAL**

Este modelo es un centellador para radiación gamma, resistente e impermeable de sensibilidad alta para pulsos altos

ESPECIFICACIONES

Cristal: NaI (TI) de 5.1 x 5.1 cm

Tubo fotomultiplicador: 2" de diámetro y 10 dinodos

Voltaje de operación: variable y hasta 1600 V

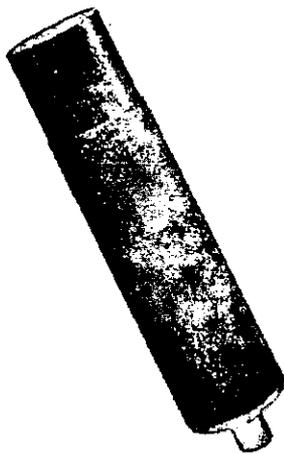
Sensitividad: 1200 K cpm por mR/h con Cs-137

Material de la pared: aluminio

Espesor de la pared: 0.16 cm en el cristal

Tamaño: 6.7 x 28.3 cm

Peso: 1.5 kg



APÉNDICE 4

MÉTODO EXPERIMENTAL DE DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA AUTOABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA DE 186 keV DEL Ra-226 EN EL ESTÉRIL.

Para comprobar que la autoabsorción de la radiación gamma de 186 keV del Ra-226 no es significativa en la cuantificación de la actividad de las muestras medidas en el jal, se realizó el experimento siguiente:

- a) Se utilizó el mismo sistema de espectrometría gamma donde se midieron las muestras de jal, conservando la misma geometría en este experimento.
- b) Se utilizó una fuente patrón de Ra-226 con una actividad de $0.999 \mu\text{Ci}$, en forma de disco con un diámetro de 2.3 cm y fecha de calibración del 6 de enero de 1986.
- c) Dicha fuente se colocó dentro del blindaje del detector y pegado en la parte interna.
- d) Se dejó contar por espacio de 300 s, obteniéndose un conteo neto de 11,760 cuentas ± 221 .
- e) Con la fuente en la misma posición se puso un marinelli con tierra del suelo del lugar de la ciudad de Aldama, Chihuahua, (sin contaminación por Ra-226) y se contó la atenuación que pudo haber tenido la fuente colocada en la parte interna del blindaje del sistema de detección. Se obtuvo 8,645 cuentas netas ± 169 , en el mismo tiempo de conteo.
- f) También se puso a contar un marinelli con agua (sin contaminación por Ra-226) para observar el efecto de la atenuación en este medio, obteniéndose una lectura de $8,790 \pm 184$ cuentas netas, la cual es muy similar a la de la muestra de suelo de la Ciudad de Aldama:
- g) Debido a que la fuente patrón de Ba-133 y Eu-152 las que se encontraban en una geometría marinelli en agua y que las muestras de jal que se contaron tienen una densidad igual al de la tierra de Aldama, se concluye que la relación de atenuación del marinelli con agua a marinelli con tierra de Aldama es de 0.0165 ó de 1.65%, por lo que no es significativa la corrección por atenuación del mismo jal para el cálculo de la concentración de actividad en las muestras analizadas.

APÉNDICE 5

GRÁFICA PARA OBTENER UNA CAPA HEMIRREDUCTORA

