



***INMOVILIZACION DE RESIDUOS RADIATIVOS  
CON CEMENTO PORTLAND***

***ESPECIALIZACIÓN EN RADIOQUÍMICA Y APLICACIONES  
NUCLEARES***

**Alumna: Ing. Silvina Gladys Marabini**

**Director: Mag. Lic. Esteban Alejandro Arva**

**Abril 2023**



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## *Agradecimientos*

Al Departamento Operación de Instalaciones, del Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos.

A la Sra. Laura Avaca, a la Ing. Vanina D'Annunzio y al Mg Lic. Alejandro Arva.

A la Ing. Myriam Lavalle y al Tec. Quim. Walter Di Paola.

# INDICE

INDICE .....	ii
INDICE DE FIGURAS .....	v
INDICE DE TABLAS.....	vii
INDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS .....	viii
RESUMEN .....	1
CAPITULO 1 .....	2
1. Introducción.....	2
2. Antecedentes.....	4
3. Objetivos.....	6
CAPITULO 2 .....	7
1. Marco legal y regulatorio .....	7
2. Residuos radiactivos gestionados en el AGE.....	9
2.1. Clasificación .....	9
2.2. Características.....	11
2.2.1. Residuos radiactivos líquidos acuosos .....	11
a) Residuos alcalinos, con Aluminio.....	12
b) Residuos alcalinos, sin Aluminio.....	15
c) Residuos ácidos, con Aluminio.....	17
d) Residuos ácidos, sin Aluminio.....	17
2.2.2. Residuos líquidos orgánicos .....	21
2.2.3. Residuos sólidos húmedos .....	23
2.3. Relevancia en el inventario de la PEMB .....	25
3. Cemento Portland.....	30
3.1. Generalidades.....	30

3.2.	Desarrollo de formulaciones.....	33
3.2.1.	Materiales y equipos.....	33
3.2.2.	Ensayos y valores de referencia.....	39
3.3.3.	Experiencia en la puesta en marcha de la PPCC.....	40
4.	Inmovilización de residuos con Cemento Portland.....	42
4.1.	Residuos líquidos acuosos.....	42
a)	Residuos alcalinos, con Aluminio.....	43
b)	Residuos alcalinos, sin Aluminio.....	47
c)	Residuos ácidos, con Aluminio.....	50
d)	Residuos ácidos, sin Aluminio.....	53
4.2.	Residuos líquidos orgánicos.....	55
4.3	Residuos sólidos húmedos.....	57
5.	Evaluación de resultados.....	62
	CONCLUSIONES.....	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	70
	ANEXOS.....	73
	Anexo 1 - Residuos radiactivos almacenados en el AGE - Principales instalaciones generadoras y clases de residuos	
	Anexo 2 - Residuos radiactivos sólidos compactables – Características	
	Anexo 3 - Requerimientos de aceptación de repositorios cercanos a la superficie y de residuos inmovilizados en Cemento Portland	
	A) España – Repositorio “El Cabril” – Clasificación y criterios de aceptación de residuos inmovilizados en Cemento Portland	
	B) Federación Rusa – Criterios de aceptación de residuos inmovilizados en cemento	
	C) Estados Unidos de Norteamérica – Clasificación y criterios generales de aceptación para repositorios cercanos a la superficie	

Anexo 4 - Radioisótopos presentes en los residuos radiactivos - Modos de desintegración, constantes gamma y valores de dispensa

Anexo 5 - Radioisótopos presentes en residuos radiactivos - Valores de e(50), ALI y DAC

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los residuos radiactivos, de acuerdo a los procedimientos operativos del AGE .....	9
Figura 2: Recipientes utilizados para el almacenamiento de los residuos radiactivos líquidos en el AGE .....	12
Figura 3: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos básicos, con Aluminio .....	14
Figura 4: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos básicos, sin Aluminio .....	16
Figura 5: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos, con Aluminio .....	17
Figura 6: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos, sin Aluminio .....	19
Figura 7: Inventario de residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE (Kg) – Principales Instalaciones generadoras .....	20
Figura 8: Inventario de residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE (Bq) – Principales Instalaciones generadoras.....	20
Figura 9: Evolución de la tasa de ingreso anual al AGE, de residuos radiactivos líquidos acuosos y orgánicos .....	21
Figura 10: Características de los residuos radiactivos líquidos orgánicos.....	22
Figura 11: Evolución temporal de la tasa de ingreso anual al AGE, de los residuos radiactivos sólidos húmedos .....	23
Figura 12: Características de los residuos radiactivos sólidos húmedos .....	24
Figura 13: Mezcladora y molde para preparar probetas para ensayo de resistencia a la flexión y compresión, de acuerdo a IRAM 1622 .....	34
Figura 14: Prensa para ensayo de resistencia a la flexión y compresión, de acuerdo a IRAM 1622.....	35
Figura 15: Equipo para determinación de tiempo de fraguado, por método Vicat..	35

Figura 16: Mezcladora escala 20 litros y paletas mezcladoras .....	36
Figura 17: Mezcladoras <i>in drum</i> , escala 200 litros, Beba Mischtechnik.....	36
Figura 18: Unidad para transferir resinas, desde tambores de almacenamiento de 400 l, a tambores de 200 l.....	37
Figura 19: Dispositivo para registrar la temperatura durante el fraguado – Escala 20 litros .....	38
Figura 20: Dispositivo para registrar la temperatura durante el fraguado – Escala 200 litros.....	38
Figura 21: Inmovilización con Cemento Portland de residuos simulados de la PPR, etapa de disolución .....	45
Figura 22: Ensayo de caída de resinas inmovilizadas en Cemento Portland .....	59

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Inventario de la PEMB (masa, cantidad de bultos y actividad) .....	25
Tabla 2: Órdenes de magnitud de los principales radioisótopos del inventario de la PEMB .....	26
Tabla 3: Radioisótopos del inventario de la PEMB, ordenados en orden decreciente de actividad y clasificados por residuo y generador.....	27
Tabla 4: Características de los equipos mezcladores para elaborar pastas de Cemento Portland .....	37
Tabla 5: Desarrollo de formulaciones para la inmovilización de residuos radiactivos – Escalas, ensayos y valores de aceptación .....	39
Tabla 6: Grado de avance en el desarrollo de formulaciones .....	40
Tabla 7: Resumen de las características de los residuos radiactivos líquidos acuosos, almacenados en la PEMB .....	42
Tabla 8: Inmovilización en Cemento Portland de residuos alcalinos, con Aluminio – Valores anteriores y posteriores al procesamiento .....	46
Tabla 9: Inmovilización en Cemento Portland de residuos básicos, sin Aluminio - Valores anteriores y posteriores al procesamiento .....	49
Tabla 10: Inmovilización en Cemento Portland de residuos ácidos , con Aluminio - Valores anteriores y posteriores al procesamiento .....	52
Tabla 11: Inmovilización en Cemento Portland de residuos ácidos, sin Aluminio - Valores anteriores y posteriores al procesamiento .....	54
Tabla 12: Inmovilización en Cemento Portland de residuos radiactivos sólidos húmedos / Resinas RA3 – Valores anteriores y posteriores al procesamiento .....	60
Tabla 13: Características actuales y posteriores a la inmovilización en Cemento Portland, de los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos almacenados en la PEMB .....	64
Tabla 14: Costos de materia prima asociados a la inmovilización de residuos con Cemento Portland .....	66

## INDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AGE: *Área de Gestión Ezeiza*

ALI: *Límite Anual de Incorporación*

ARN: *Autoridad Regulatoria Nuclear*

CAC: *Centro Atómico Constituyentes*

CAE: *Centro Atómico Ezeiza*

CNAI: *Central Nuclear Atucha I*

CNAII: *Central Nuclear Atucha II*

CNEA: *Comision Nacional de Energía Atómica*

CPC: *Cemento Portland Compuesto*

CPF: *Cemento Portland con Filler Calcareo*

DAIFRR: *Depósito para el Almacenamiento Interino de Fuentes y Residuos Radiactivos*

DAP: *Depósito de Almacenamiento Prolongado*

ECRI: *(Planta de fabricación de) Elementos Combustibles de Reactores de Investigación*

LFR: *Laboratorio Facilidad Radioquímica*

LTA: *Laboratorio Triple Altura*

LUE: *Laboratorio Uranio Enriquecido*

PEMB: *Playa de Estiba y Maniobra de Bultos*

PFPU: *Planta de Fabricación de Polvos de Uranio*

PNGRR: *Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos*

PPCA: *Planta Piloto de Combustibles Avanzados*

PPCC: *Planta Piloto de Cementado y Compactado*

PPR: *Planta de Producción de Radioisótopos por Fisión (Mo 99)*

STORER: *Sistema de Trazabilidad en la Operación con Residuos Radiactivos*

## RESUMEN

Los residuos radiactivos son materiales para los cuales no se prevé ningún uso a futuro, que contienen radioisótopos, con valores de actividad tales, que exceden los valores autorizados, establecidos por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), para su dispersión en el ambiente o gestión por dispensa. La inmovilización de los residuos radiactivos, es una parte de la gestión de los mismos. En la inmovilización se modifican las características de los residuos, para reducir la posibilidad de dispersión o migración en el ambiente, de los radioisótopos presentes en ellos. El Cemento Portland es una matriz utilizada desde los comienzos de la actividad nuclear, para inmovilizar residuos radiactivos.

En el Centro Atómico Ezeiza (CAE), en instalaciones operadas por el Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (PNGRR), se almacenan residuos radiactivos líquidos y sólidos. En los últimos diez años, en el PNGRR, se desarrollaron formulaciones específicas, para inmovilizar en Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos y parte de los residuos radiactivos sólidos húmedos almacenados.

En el presente trabajo, se analizaron las consecuencias de la utilización de las formulaciones mencionadas, para inmovilizar los residuos citados. Se concluyó que el 99 % de la actividad - asociada al inventario de radioisótopos- y el 76 % de la masa, de los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos almacenados, puede ser inmovilizada en Cemento Portland con las formulaciones existentes, cumpliendo con estándares de calidad internacionales. Se estimó que el volumen de los bultos resultantes, incrementaría en menos del 20 %, el actual volumen de bultos con residuos, almacenados por el PNGRR en el CAE. Los costos de materia prima asociados al procesamiento de residuos por esta vía, se calcularon en 0,4 a 1,5 dólares / kg de residuo a inmovilizar.

## CAPITULO 1

### 1. Introducción

Todas las actividades que desarrollamos los seres humanos, producen un impacto en el entorno. Uno de ellos, es la generación de residuos. La preocupación de una sociedad sobre cómo y dónde deja los materiales que descarta, crece conforme se incrementa en ella, la noción del daño que la eliminación no controlada de los materiales desechados, puede ocasionar a los individuos que la componen. Con la intención de poner distancia entre los individuos de una comunidad y los materiales que estos descartan, a lo largo de la historia se realizaron fundamentalmente tres prácticas:

- depositar residuos sólidos lejos de las zonas residenciales,
- realizar vertidos de residuos líquidos y sólidos a cursos o espejos de agua y
- liberar residuos gaseosos hacia la atmósfera.

En forma paralela - y solamente cuando resultó económicamente rentable – también se recuperaron y reaprovecharon parte de los materiales descartados.

Todos los materiales desechados, vuelven a formar parte del entorno habitado por los seres humanos, en algún momento. De la evaluación de las características de los materiales descartados, de cómo se reincorporan a nuestro hábitat y de cómo esto último puede perjudicarnos, surgen las alternativas de gestión que minimizan los impactos negativos de esa reincorporación, tanto para los seres humanos como para el ambiente.

En la República Argentina, los residuos radiactivos se definen como aquellos materiales – para los que no se prevé ningún uso a futuro – en los cuales el contenido de radioisótopos, supera el valor que la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), establece como máximo para proceder a la dispersión en el ambiente o a la solicitud de dispensa. Los residuos radiactivos pueden ser sólidos, líquidos o gases. Excepto en algunos accidentes ó incidentes, todo residuo radiactivo se genera en una instalación y en una práctica regulada y fiscalizada por la ARN.

El riesgo que presentan los residuos radiactivos, para la salud de los seres humanos, es función de las características de las radiaciones que emiten los radioisótopos que forman parte del residuo. La gestión de los residuos radiactivos, se basa en detener o atenuar las radiaciones que emiten los radioisótopos presentes en los residuos radiactivos y – en forma simultánea – reducir la cantidad de esos radioisótopos que se dispersan en el ambiente. Los residuos radiactivos, son entonces aislados (se mantienen en instalaciones de acceso restringido y controlado) y confinados (se procesan<sup>1</sup> y disponen en condiciones que no favorecen la liberación de radioisótopos al entorno). El aislamiento y el confinamiento de los residuos radiactivos, se mantiene hasta tanto el regulador evalúe que interrumpir estas medidas, no implica riesgo radiológico inaceptable.

La inmovilización de los residuos radiactivos, es una parte de la gestión de los residuos radiactivos. La inmovilización tiene por objetivo modificar las características de los residuos, para reducir la posibilidad de migración o dispersión de los radioisótopos presentes en los residuos, durante la manipulación, el transporte, el almacenamiento y la disposición [1].

Una forma de inmovilizar residuos radiactivos – principalmente residuos radiactivos líquidos y residuos radiactivos sólidos granulados - es incorporarlos en matrices de Cemento Portland, bitumen o polímeros sintéticos. Cuando la condición de inmovilización debe mantenerse por un periodo de tiempo más prolongado, la inmovilización se realiza en matrices vítreas [2].

---

<sup>1</sup> Procesamiento: operaciones que se realizan para modificar las características de un bulto con residuos radiactivos [1]

## **2. Antecedentes**

La inmovilización de residuos radiactivos utilizando Cemento Portland, es una práctica utilizada desde los comienzos de la actividad nuclear. En los Estados Unidos de América [2], en la Federación Rusa [3], en el Reino Unido de Gran Bretaña, en Francia [4], España y Suecia [5], entre otros países, se utiliza Cemento Portland para inmovilizar residuos radiactivos, generados dentro y fuera del ciclo del combustible nuclear.

En la República Argentina, la Central Nuclear Atucha I (CNAI), cuenta con una instalación para inmovilización de residuos radiactivos líquidos en Cemento Portland [6], actualmente no operativa. En dicha instalación, se inmovilizaron concentrados de evaporador y sedimentos, generados en la Central, desde 1980 hasta 2006. La Central Nuclear Atucha II (CNAII), cuenta con una planta donde se prevé inmovilizar en Cemento Portland residuos radiactivos líquidos y resinas de intercambio iónico agotadas [7]. En el Centro Atómico Ezeiza (CAE), en la Planta Piloto de Cementado y Compactado (PPCC) del Área de Gestión Ezeiza (AGE), entre 2016 y 2017 se inmovilizaron en Cemento Portland, residuos radiactivos líquidos generados en el CAE [8].

Inmovilizar residuos radiactivos en Cemento Portland, requiere desarrollar formulaciones que contemplen en forma conjunta:

- las características físicas y químicas de los residuos radiactivos,
- los requerimientos operativos de las instalaciones de procesamiento y
- los requerimientos de aceptación de las instalaciones de almacenamiento y/o disposición.

Las últimas formulaciones utilizadas en CNAI y las utilizadas en la PPCC, fueron desarrolladas en la Comisión Nacional de Energía Atómica, por el Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (PNGRR - CNEA). En el desarrollo de las mismas, se contemplaron los tres aspectos mencionados anteriormente. Dichos desarrollos se tienen en cuenta en el presente trabajo, para evaluar la viabilidad de inmovilizar en Cemento Portland, la totalidad de los residuos radiactivos líquidos y sólidos granulados, almacenados en el AGE.

El AGE es el sector del CAE donde se ubican - entre otras instalaciones- la PPCC y dos instalaciones destinadas al almacenamiento de residuos radiactivos. Los residuos radiactivos se ubican en los almacenamientos, hasta tanto se cuente con una instalación en la cual disponerlos (repositorio). Los residuos ubicados en los almacenamientos del AGE, son sólidos y líquidos. De acuerdo al consenso internacional actual, la cantidad de líquidos que ingresa a los repositorios, formando parte de los residuos radiactivos, debe reducirse al menor contenido posible. Por lo tanto, los residuos radiactivos líquidos actualmente almacenados en el AGE, deberían ser incorporados en una matriz sólida, previamente a su disposición.

La normativa vigente en la República Argentina, establece como *Requisito específico para las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos*, que “..los residuos radiactivos deben estar inmovilizados y el embalaje debe ser física y químicamente estable, resistente al deterioro y con el blindaje adecuado [9]..”. Como se mencionó anteriormente, inmovilizar – en este contexto - significa modificar las características de los residuos, con el objetivo de disminuir la posibilidad de migración o dispersión de radioisótopos. Por lo tanto, si los resultados de las evaluaciones de seguridad de los almacenamientos o repositorios así lo requirieran, también podría ser necesaria la inmovilización de los residuos radiactivos sólidos, especialmente cuando estos son sólidos granulados [10].

### **3. Objetivos**

El presente trabajo, analiza la viabilidad de utilizar Cemento Portland para inmovilizar los residuos radiactivos líquidos y sólidos granulados, que actualmente se gestionan en el AGE. Para esto, y de acuerdo con lo mencionado hasta aquí, se procederá a:

- Analizar las características radiológicas, químicas y físicas de los residuos radiactivos líquidos y sólidos granulados, gestionados en el AGE
- Evaluar la relevancia de estas dos clases de residuos, en los inventarios de los almacenamientos del AGE
- Asociar a cada residuo una formulación para su inmovilización con Cemento Portland, justificando su elección.
- Calcular el volumen de residuo inmovilizado resultante en cada caso
- Evaluar si el residuo inmovilizado cumpliría con requerimientos de calidad internacionales, referidos a concentraciones máximas de radioisótopos aceptadas en repositorios, resistencia a la compresión y lixiviación.
- Establecer un orden de prioridad para la inmovilización, que maximice la reducción del riesgo radiológico en los almacenamientos
- Justificar los casos donde la utilización de Cemento Portland, como opción de inmovilización, no se considere viable.

Está fuera del alcance del presente trabajo, evaluar la viabilidad de inmovilizar en Cemento Portland residuos radiactivos sólidos, que no sean granulados. Se considera que los radioisótopos presentes en residuos líquidos o granulados, podrían dispersarse (o migrar) en el ambiente, con mayor facilidad que los radioisótopos presentes en otros residuos radiactivos gestionados en el AGE.

## CAPITULO 2

### 1. Marco legal y regulatorio

La CNEA – a través del PNGRR - es la autoridad de aplicación de la Ley 25.018 / 98 - Régimen de Gestión de Residuos Radiactivos. En esta ley, se establecen los instrumentos básicos para que la gestión de los residuos radiactivos, se realice garantizando la protección del ambiente y la salud pública [11]. La gestión de residuos radiactivos, es el conjunto de actividades que se realizan para aislar los residuos radiactivos de la biósfera, durante el tiempo que el regulador evalúe necesario. Transcurrido ese intervalo de tiempo, y como consecuencia de la desintegración radiactiva, la actividad en los residuos se habrá reducido hasta valores tales, que el ingreso de los radioisótopos a la biosfera, no implicará riesgos radiológicos inaceptables.

De acuerdo a la Ley 25.018 / 98, el PNGRR debe – entre otras actividades - proyectar, construir y operar las instalaciones que se requieran para la gestión de los residuos radiactivos, generados por la actividad nuclear estatal o privada. El propósito de dichas instalaciones puede ser el procesamiento, el almacenamiento o la disposición de los residuos radiactivos.

En el marco de este contexto, el PNGRR opera actualmente en el CAE, las siguientes tres instalaciones, dedicadas al almacenamiento de residuos radiactivos:

- DAIFRR (Depósito para el Almacenamiento Interino de Fuentes y Residuos Radiactivos): Almacenamiento de residuos radiactivos sólidos y fuentes selladas en desuso, ubicado en el AGE.
- PEMB (Playa de Estiba y Maniobras de Bultos): Almacenamiento de residuos radiactivos sólidos y líquidos, ubicado en el AGE.
- DAP (Depósito de Almacenamiento Prolongado): Almacenamiento de residuos radiactivos sólidos, acondicionados en tambores de 200 litros y sobre embalados, ubicado en el CAE.

Como también lo establece la Ley 25.018/98, *“En todas las actividades de gestión de residuos radioactivos, la CNEA deberá cumplir con las normas*

*regulatorias referidas a la seguridad radiológica y nuclear, de protección física y ambiental y de salvaguardias internacionales que establezca la Autoridad Regulatoria Nuclear y con todas aquellas regulaciones nacionales, provinciales y de la ciudad de Buenos Aires, que correspondan.”*

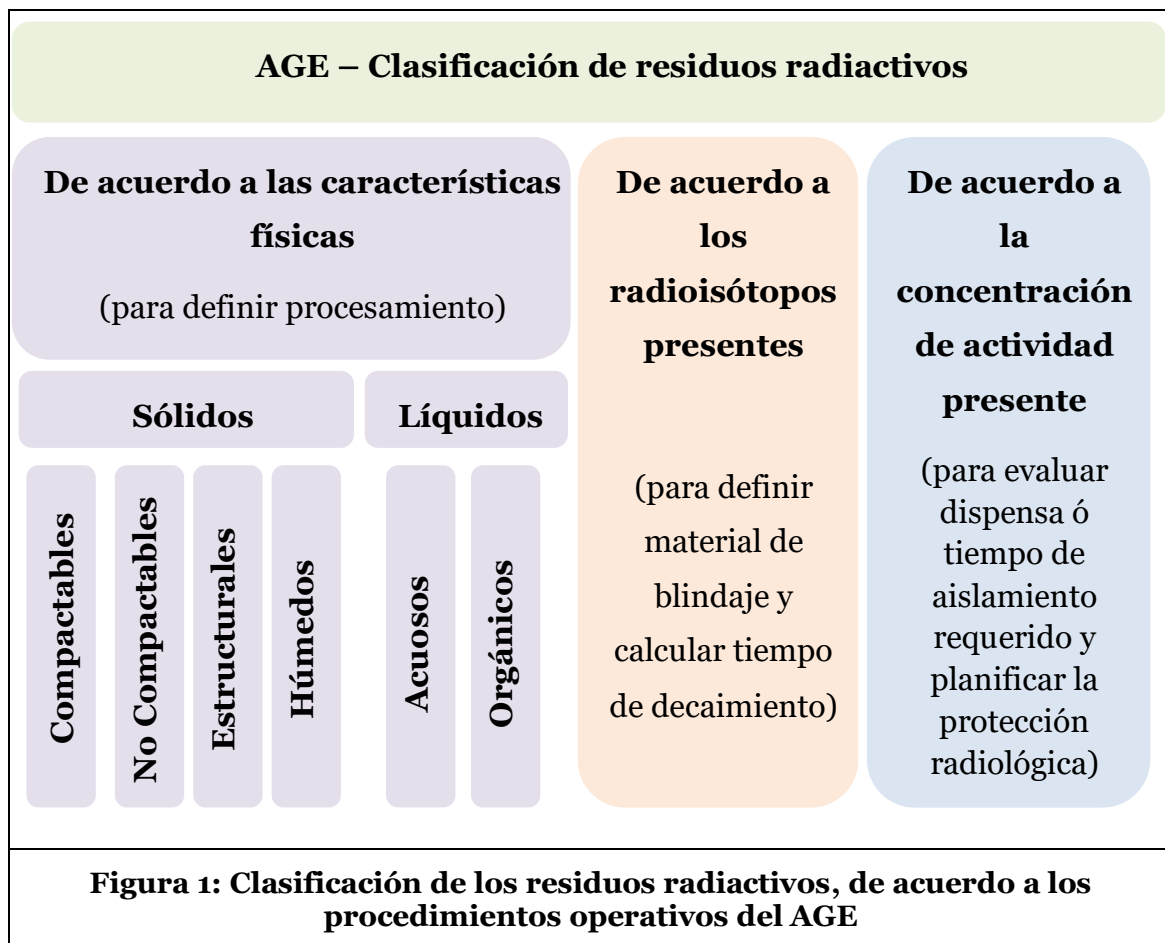
Dentro de estas normas regulatorias, la Norma AR 10.12.1. –Gestión de Residuos Radiactivos, Rev. 3, establece que, en los almacenamientos “*Los residuos radiactivos deben estar inmovilizados y el embalaje debe ser física y químicamente estable, resistente al deterioro y con el blindaje adecuado*” [9]. Como se mencionó en el Capítulo anterior, la inmovilización es el procesamiento que tiene por objetivo reducir la posibilidad de migración o dispersión de los radioisótopos durante la manipulación, el transporte, el almacenamiento y la disposición de los residuos radiactivos [1]. La inmovilización contribuye entonces, a reducir las exposiciones potenciales que puedan tener lugar en instalaciones de almacenamiento. Dichas exposiciones se estiman en las evaluaciones de seguridad que las instalaciones realizan, en cumplimiento de la citada Norma.

En este contexto, en el presente trabajo, se evalúa la viabilidad, los beneficios y las desventajas, de inmovilizar con Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos y sólidos granulados almacenados en el AGE.

## 2. Residuos radiactivos gestionados en el AGE

### 2.1. Clasificación

Los residuos radiactivos se clasifican con el objetivo de minimizar los costos asociados a la gestión, maximizando la seguridad radiológica en cada una de las etapas. En los Procedimientos Operativos del AGE, los residuos radiactivos se clasifican teniendo en cuenta sus características físicas, químicas y radiológicas. La **Figura 1** resume esta clasificación [12].



La clasificación de residuos descrita en la **Figura 1**, se utiliza para segregar los residuos radiactivos en origen y para establecer los requerimientos de aceptación de los mismos al AGE (contenedores a utilizar, caracterización requerida al generador, condiciones de humedad, etc.). En el marco de la clasificación citada, en el presente trabajo solo se evaluarán los residuos radiactivos líquidos (acuosos y orgánicos) y los residuos radiactivos sólidos húmedos (sólidos granulados: barros, sedimentos y resinas de intercambio iónico).

Actualmente, las principales instalaciones generadoras de residuos radiactivos a gestionar en el AGE, se ubican en el CAE y en el Centro Atómico Constituyentes (CAC). En la **Figura A**, del **Anexo 1**, se muestra un esquema de las principales instalaciones generadoras en los últimos 10 años, su interrelación y los residuos radiactivos que generan, de acuerdo a la clasificación de la **Figura 1**.

La diversidad de procesos y prácticas llevadas a cabo en las instalaciones generadoras de residuos radiactivos, conduce a la generación de residuos líquidos y sólidos granulados, de diferentes características, físicas, químicas y radiológicas. De acuerdo a la experiencia adquirida en el PNGRR, las características de los residuos radiactivos, que interfieren negativamente en el desarrollo de formulaciones para inmovilizarlos en Cemento Portland, son:

- La presencia de Aluminio: concentraciones mayores a las 400 ppm, en residuos alcalinos<sup>2</sup>, reducen el tiempo e incrementan la temperatura de fraguado. Los productos resultantes, tienen pobres características mecánicas (son friables).
- La acidez: concentraciones de protones mayores a 1N, descomponen el Cemento Portland, no permitiendo su posterior fraguado.

Por lo tanto, en la descripción de las características de los residuos radiactivos que se realiza a continuación, la clasificación utilizada actualmente en el AGE, se amplía, para contemplar la presencia o ausencia de Aluminio en los residuos, en concentraciones superiores a las 400 ppm.

Los datos que se mencionan en los siguientes párrafos, referidos a las características radiológicas de los residuos radiactivos, las tasas de ingreso anual al AGE e inventarios en los almacenamientos, se extrajeron de la base de datos de residuos radiactivos STORER del PNGRR. Las características físicas y químicas, se obtuvieron de comunicaciones de los generadores al PNGRR.

---

<sup>2</sup> Cuando se realizan mezclas de Cemento Portland CPF y residuos simulados, en una relación 0,5 % m/m residuo / cemento, en ensayos a escala 2 litros, el tiempo de fraguado es inferior a 4 h y la temperatura de fraguado supera los 60°C. Los residuo simulados son soluciones acuosas con concentraciones de Aluminio 0,3 y 3,3 % m/m y 3 M NaOH (11% m/m, densidad = 1,1 Kg /l).

## **2.2. Características**

### **2.2.1. Residuos radiactivos líquidos acuosos**

Los residuos radiactivos líquidos acuosos, constituyen el segundo tipo de residuo radiactivo con mayor tasa de ingreso anual al AGE, en masa y actividad de radioisótopos. El primer lugar, lo ocupan los residuos radiactivos sólidos compactables (Ver **Anexo 2**). En los últimos 20 años, el promedio de ingreso anual al AGE de residuos radiactivos líquidos, fue de 1,1 toneladas /año. En el período 2014 a 2019, el promedio de generación anual de residuos compactados en el AGE, fue de 2,6 toneladas /año.

Dos de los tres residuos radiactivos con mayores concentraciones de radioisótopos, que rutinariamente se reciben en el AGE, son residuos radiactivos líquidos acuosos. Uno de ellos es, además, el residuo radiactivo líquido de mayor tasa de generación anual.

Los residuos radiactivos líquidos se trasladan desde las instalaciones generadoras al AGE, en recipientes de acero inoxidable de 200 y 50 litros. Cuando la tasa de equivalente de dosis ambiental, medida en contacto con los recipientes, supera los 2 mSv/h, se utiliza un tambor de 400 litros con recubrimiento interno de 2,5 cm de Plomo como sobre envase (Ver **Figura 2**).

Como se mencionó en **2.1.**, la presencia de Aluminio y la acidez / alcalinidad de los residuos líquidos, pueden interferir en el diseño de formulaciones para inmovilizar los residuos en Cemento Portland. Por esta razón, en el análisis que se realiza a continuación, los residuos radiactivos líquidos acuosos se subclasifican teniendo en cuenta estas características.

		
<p>Tambor de 200 litros de acero inoxidable, con dos bocas. Tapas con cierre a rosca.</p> <p>Diámetro: 60 cm          Altura: 87cm.          Peso: 20 Kg</p>	<p>Tambor de 200 litros de acero inoxidable con dos bocas, con sobre envase de tambor de 400 litros, con recubrimiento interno de 2,5 cm de Plomo. Cierre con tapa ajustada mediante 8 pernos.</p> <p>Diámetro: 88 cm          Altura: 100 cm          Peso: 1.000 Kg</p>	<p>Recipiente de acero inoxidable de 50 litros (Garrafa). Tapa con cierre a rosca.</p> <p>Diámetro: 42 cm          Altura: 64cm          Peso: 22 Kg  <i>Nota: el recipiente en uso, carece de los tubos pescante y de venteo.</i></p>
<p align="center"><b>Figura 2: Recipientes utilizados para el almacenamiento de los residuos radiactivos líquidos en el AGE</b></p>		

### a) Residuos alcalinos, con Aluminio

Los residuos radiactivos líquidos alcalinos, con concentraciones de Aluminio superiores a las 400 ppm, proceden de la Planta de Producción de Mo 99 por fisión (PPR). Se generan al disolver las plaquitas irradiadas (Ver Figura B – Anexo 1) y constituyen el residuo líquido de:

- mayor tasa de ingreso anual al AGE,
- mayor aporte al inventario de la PEMB y
- mayor concentración de actividad de radioisótopos emisores beta / gamma, al momento de ingresar al AGE.

Las características que presenta actualmente este residuo, se mencionan en la **Figura 3**. Como se describe en el **Anexo 1 – Figura B**, el proceso actual utiliza plaquitas de U 235 20 % m/m. Anteriormente, el Mo 99 se obtenía irradiando plaquitas construidas con U 235 90%. El residuo de la disolución de plaquitas (Ver **Anexo 1 – Figura B**) con U 235 90 %, presenta una concentración de Aluminio de 0,3 % m/m a 1 % m/m [13, 14]. El residuo de la disolución de plaquitas con U 235 20 %, presenta concentraciones de Aluminio en el rango 1,6 a 3,3 % m/m [13, 15]. En el AGE (específicamente, en la PEMB), se almacenan los residuos generados en ambas condiciones de producción.

La base de datos STORER registra un total de 18,2 toneladas de residuos generados en la PPR, actualmente almacenados en la PEMB del AGE. Dicha base de datos, no identifica los residuos resultantes de utilizar uno u otro blanco, ni segrega los residuos generados en las dos etapas del proceso (disolución y purificación, Ver **Anexo 1 – Figura B**). En el presente trabajo, para distribuir las 18,2 toneladas de residuos procedentes de la PPR, en los 3 residuos posibles<sup>3</sup>, se consideró que:

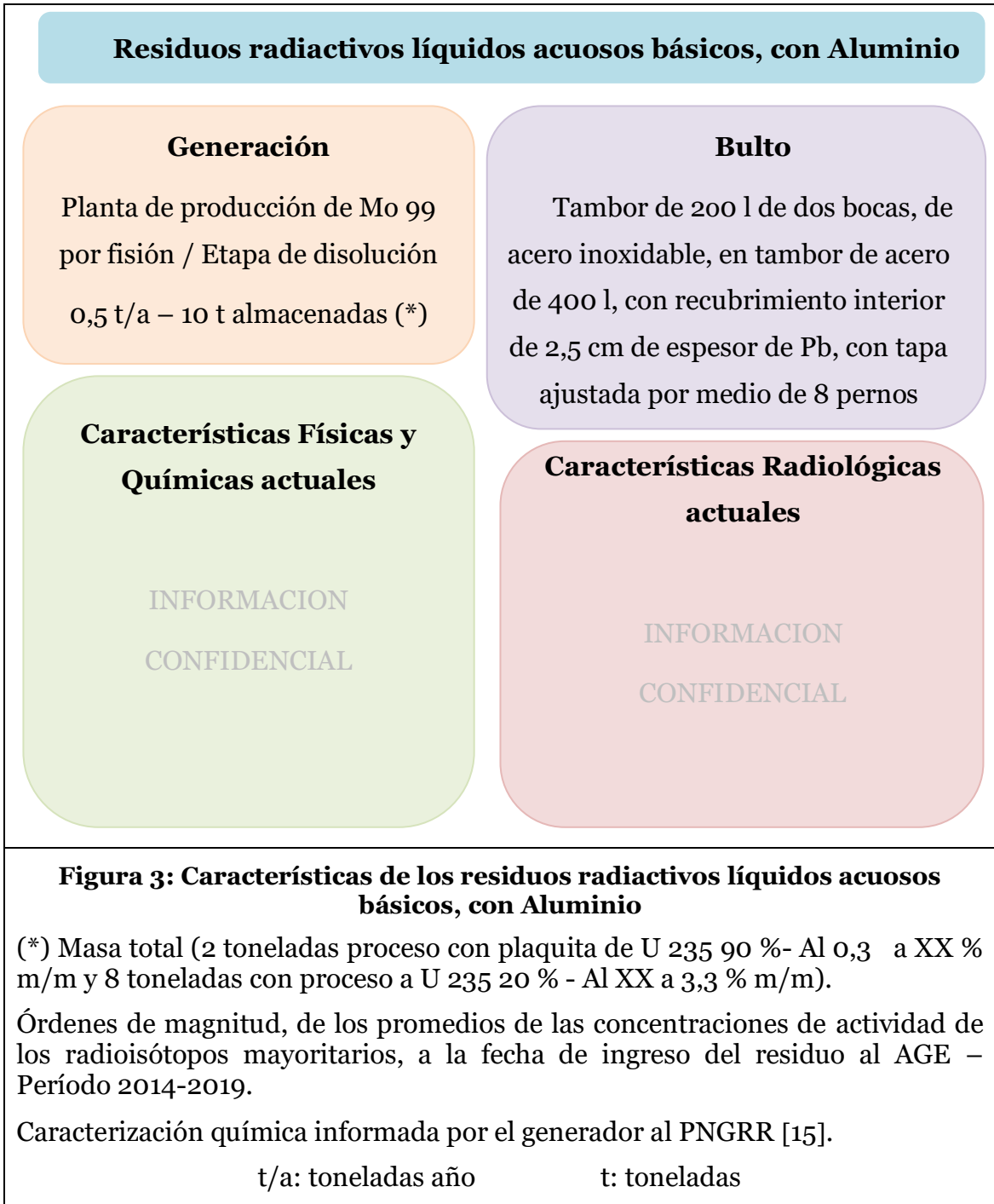
- Los residuos líquidos ingresados anteriormente a 2002, son residuos resultantes del proceso que utilizaba U 235 90% m/m.
- La proporción de (residuo resultante de la etapa de disolución / residuo resultante de la etapa de purificación)<sup>4</sup>, no varió cuando se modificó la concentración de Uranio 235 en las plaquitas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el volumen actual de residuos radiactivos líquidos alcalinos con Aluminio almacenados en la PEMB (AGE), se estimó en 10 toneladas. La mayor parte (8 toneladas), correspondería a residuos con las características mencionadas en la **Figura 3** y 2 toneladas, se habrían generado con el proceso utilizado hasta 2002.

---

<sup>3</sup> Residuos alcalinos con 0,3 a XX % m/m Al - Residuos alcalinos con XX a 3,3 % m/m Al – Residuos alcalinos, con concentración de Al inferior a 400 ppm

<sup>4</sup> Tasa de generación anual residuo de disolución / Tasa de generación de residuo de purificación = XX [15].



## **b) Residuos alcalinos, sin Aluminio**

Los residuos radiactivos líquidos acuosos alcalinos, sin Aluminio<sup>5</sup>, constituyen el segundo residuo radiactivo líquido con mayor tasa de ingreso anual al AGE. Actualmente, se generan en dos instalaciones, ambas ubicadas en el CAE: la PPR (en la etapa de purificación de la solución resultante de disolver las plaquitas irradiadas – **Ver Anexo 1 – Figura B**) y la Planta de Producción de I 131. Las características de ambos residuos se presentan en la **Figura 4**.

Las 8 toneladas de residuos de este tipo, generadas en la PPR, mencionadas en la **Figura 4**, corresponden a los dos procesos de producción de Mo 99 (con plaquitas de U 235 90 y 20 % m/m). No se cuenta con datos que confirmen que las características químicas del residuo generado en la etapa de purificación, se modificaron con el cambio de concentración de U 235 en las plaquitas. Las características químicas citadas en la **Figura 4**, son las informadas por el generador al PNGRR, referida a los residuos actuales [15].

Respecto de los residuos radiactivos líquidos generados por la producción de I 131, se destaca que en el AGE se almacenan los residuos resultantes de dos procesos de obtención diferentes (**Ver Anexo 1 – Figura B**). Hasta 2005, al AGE ingresaron residuos radiactivos líquidos generados en la producción de I 131, por irradiación de Teluro. En total, estos residuos suman 950 Kg. La caracterización de estos residuos está pendiente de verificación. De acuerdo a la información registrada en el STORER, podría solicitarse la descarga o dispensa condicional de los mismos. Las características de los residuos radiactivos líquidos generados en la producción de I 131, mencionadas en la **Figura 4**, se refieren al actual proceso de producción de I 131 (por fisión de U 235).

---

<sup>5</sup>Residuos radiactivos líquidos acuosos con concentraciones de Aluminio inferiores a 400 ppm.

## Residuos radiactivos líquidos acuosos básicos, sin Aluminio

### Generación

Planta de producción de Mo 99  
por fisión / Etapa de purificación

0,4 t / año– 8,2 t

### Generación

Planta de producción de I 131 por  
fisión

### Bulto

Tambor de 200 l de acero  
inoxidable, con dos bocas, con  
cierre de tapas con rosca

### Bulto

Recipiente de 50 l, de acero  
inoxidable, con una sola tapa, de  
cierre a rosca

### Características Físicas y Químicas actuales

INFORMACION  
CONFIDENCIAL

### Características Físicas y Químicas actuales

INFORMACION CONFIDENCIAL

### Características Radiológicas actuales

INFORMACION CONFIDENCIAL

### Características Radiológicas actuales

INFORMACION  
CONFIDENCIAL

**Figura 4: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos básicos, sin Aluminio**

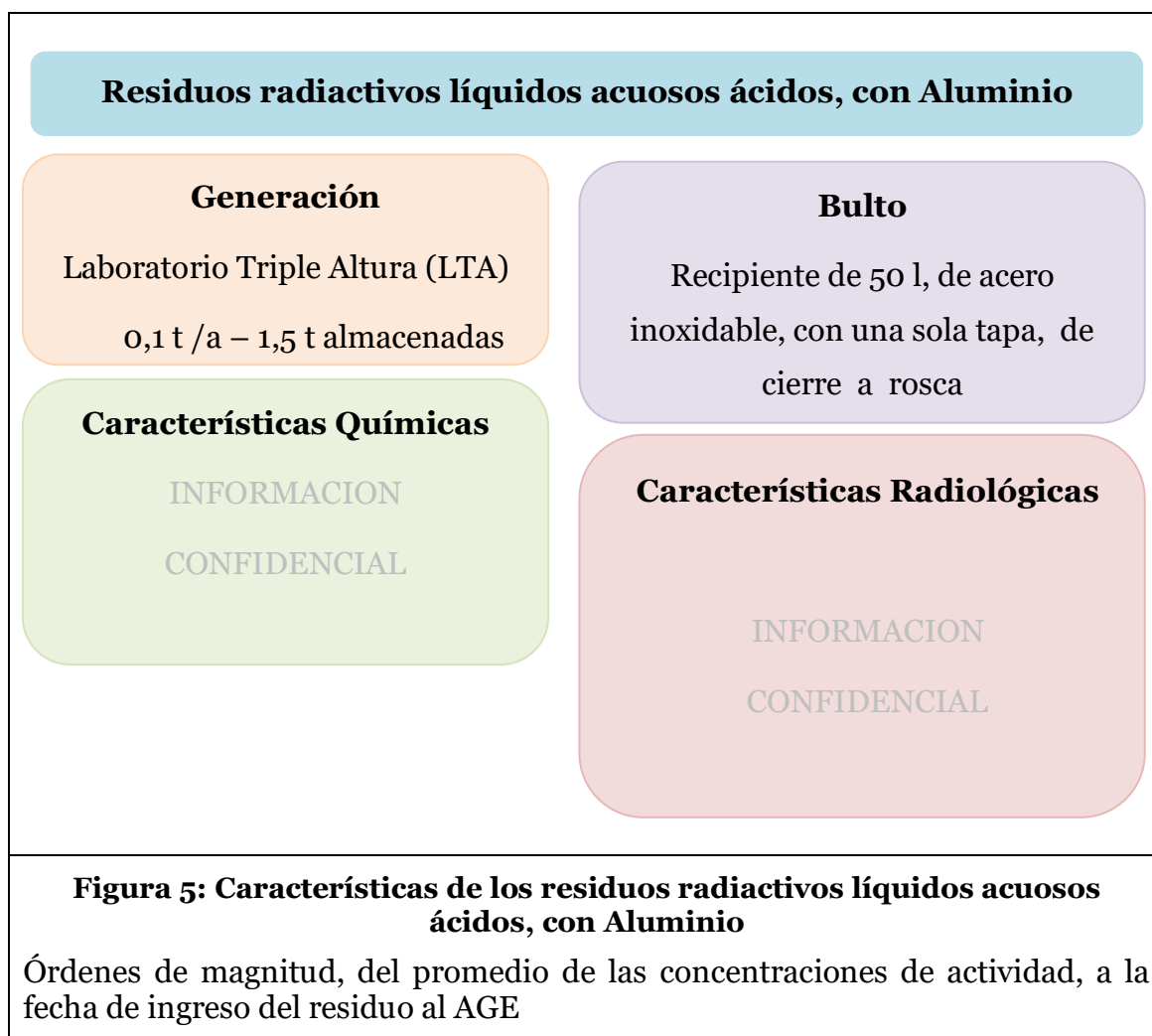
Órdenes de magnitud, de los promedios de las concentraciones de actividad de los radioisótopos mayoritarios, a la fecha de ingreso del residuo al AGE – Período 2014-2019(PPR) y desde 2005 , para residuos generados en la producción de I 131

t/a: toneladas año

t: toneladas

### c) Residuos ácidos, con Aluminio

A este grupo corresponde el tercer residuo radiactivo líquido, de mayor tasa de ingreso anual al AGE. Este residuo se genera en el Laboratorio Triple Altura (LTA - CAE), en la recuperación de Uranio (U 235 20 % m/m) de las placas de elementos combustibles fuera de especificación. En la **Figura 5**, se detallan las características de este residuo.



### d) Residuos ácidos, sin Aluminio

Se incluyeron en este grupo, aquellos residuos radiactivos líquidos, para los cuales no se cuenta con información de caracterización referida a su contenido de Aluminio. Algunos de ellos, son informados como residuos ácidos por los generadores (Ej. los residuos generados en el Laboratorio de Uranio

Enriquecido – LUE, en la Facilidad Alfa y en el Laboratorio Facilidad Radioquímica - LFR). Parte de estos residuos fueron parcialmente caracterizados, durante la puesta en marcha de la PPCC (Ej. residuos generados en los Laboratorios de la ARN). Se encuentra pendiente la caracterización de los restantes residuos, para confirmar lo supuesto en este trabajo. Los residuos radiactivos líquidos ácidos sin Aluminio, suman un total de 6,5 toneladas y se almacenan en la PEMB.

A este grupo corresponde el segundo residuo radiactivo líquido de mayor concentración de actividad de radioisótopos emisores beta / gamma que se gestiona en el AGE. Este residuo se genera en el LFR, en la recuperación de Uranio, retenido en filtros de líquidos, utilizados en el proceso de producción de Mo 99 y I 131 (Ver **Anexo 1**).

La **Figura 6**, resume las características de algunos de los residuos asumidos en este trabajo como residuos ácidos, con concentraciones de Aluminio inferiores a 400 ppm. La tasa de generación del resto de los residuos de este tipo, es inferior a la de los residuos descritos en esta figura.

Como se verá más adelante, considerar como residuos radiactivos líquidos ácidos, al resto de los residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en la PEMB, es la opción más desfavorable<sup>6</sup> para evaluar la viabilidad de la inmovilización con Cemento Portland.

Como puede apreciarse en las **Figuras 7 y 8**, la contribución de la mayor parte de los residuos ácidos y sin Aluminio al inventario de la PEMB, es inferior al aporte que realizan los residuos generados en la PPR y en el LFR.

---

<sup>6</sup>La inmovilización con Cemento Portland de residuos radiactivos ácidos, requiere de mayor número de etapas, además de generar un mayor incremento en el volumen de residuos a almacenar, respecto de la inmovilización de los residuos alcalinos sin aluminio.

## Residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos, sin Aluminio

### Generación

Laboratorio Uranio Enriquecido (LUE) y Facilidad Alfa, con U  
0,05 y 0,08 t / año – 1 t almacenadas de c/u

### Generación

Laboratorio Facilidad Radioquímica (LFR)  
<0,05 t / año – 0,15 t almacenadas

### Bulto

Recipiente de acero inoxidable, de 50 l, con una tapa, de cierre a rosca

### Bulto

Recipiente de 50 l, de acero inoxidable, de una sola tapa, en sobre envase de 400 litros con blindaje de 2,5 cm de Plomo, con tapa ajustada con 8 pernos

### Características Físicas y Químicas

INFORMACION CONFIDENCIAL

### Características Físicas y Químicas

INFORMACION  
CONFIDENCIAL

### Características Radiológicas

INFORMACION  
CONFIDENCIAL

### Características Radiológicas

INFORMACION  
CONFIDENCIAL

**Figura 6: Características de los residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos, sin Aluminio**

Órdenes de magnitud, del promedio de las concentraciones de actividad de los radioisótopos mayoritarios, a la fecha de ingreso del residuo al AGE

*INFORMACIÓN  
CONFIDENCIAL*

**Figura 7: Inventario de residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE (Kg) – Principales Instalaciones generadoras**

Nota 1: Inventario correspondiente al 99,8 % de la masa total de residuos radiactivos líquidos acuosos, almacenada hasta 1/8/2022 en el AGE.

Nota 2: La cantidad de residuos generados en la producción de I 131, contempla los residuos generados con el actual proceso de producción (por fisión de U 235) y los residuos resultantes del proceso de producción por irradiación de Teluro

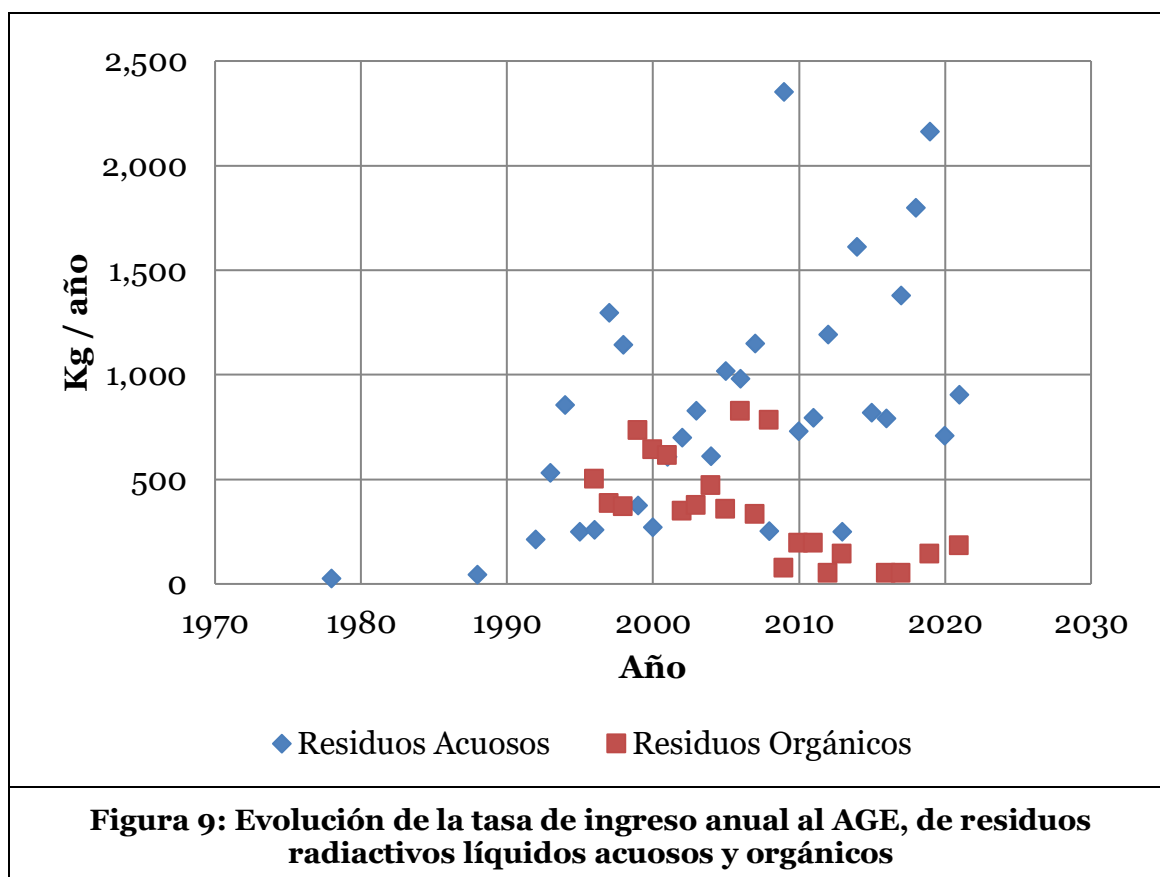
*INFORMACIÓN  
CONFIDENCIAL*

**Figura 8: Inventario de residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE (Bq) – Principales Instalaciones generadoras**

Nota: Actividad correspondiente al 99,9 % de la actividad asociada a los residuos radiactivos líquidos acuosos, almacenados hasta 1/8/2022 en el AGE.

### 2.2.2. Residuos líquidos orgánicos

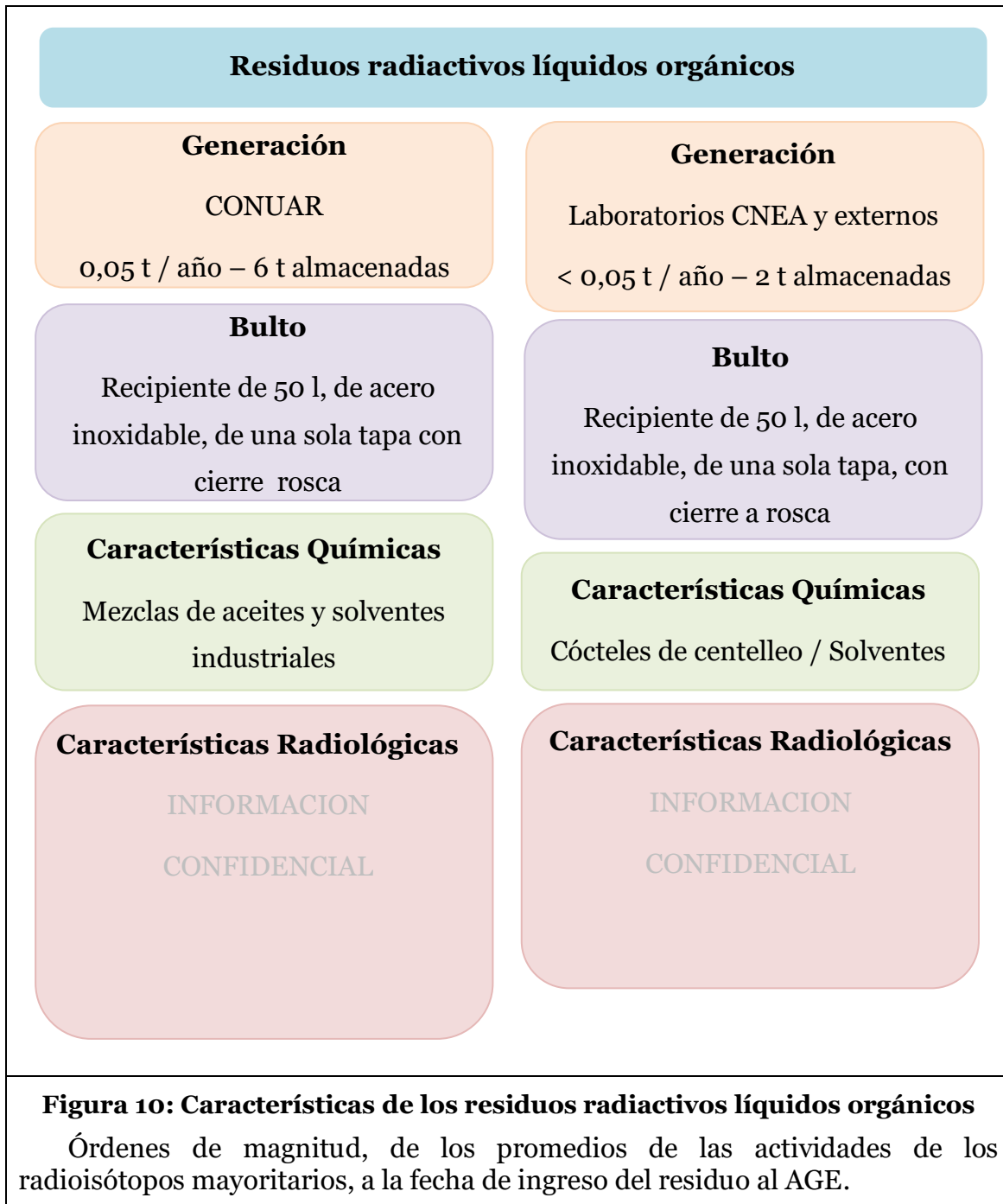
La tasa de ingreso anual y el volumen almacenado de residuos radiactivos líquidos orgánicos, son menores que las correspondientes a residuos líquidos acuosos. Como muestra la **Figura 9**, el ingreso de residuos radiactivos líquidos orgánicos al AGE, ha disminuido considerablemente en los últimos 10 años.



Los residuos orgánicos, se almacenan en contenedores de 50 litros de acero inoxidable, con tapa a rosca.

El promedio de ingreso anual de residuos radiactivos líquidos orgánicos al AGE, en los últimos 10 años, fue inferior a los 100 Kg /año. El 80 % de la masa de residuos radiactivos líquidos orgánicos que ingresó al AGE en los últimos 10 años, se generó en CONUAR.

Las características de los residuos radiactivos líquidos orgánicos almacenados en la PEMB del AGE, se mencionan en la **Figura 10**.

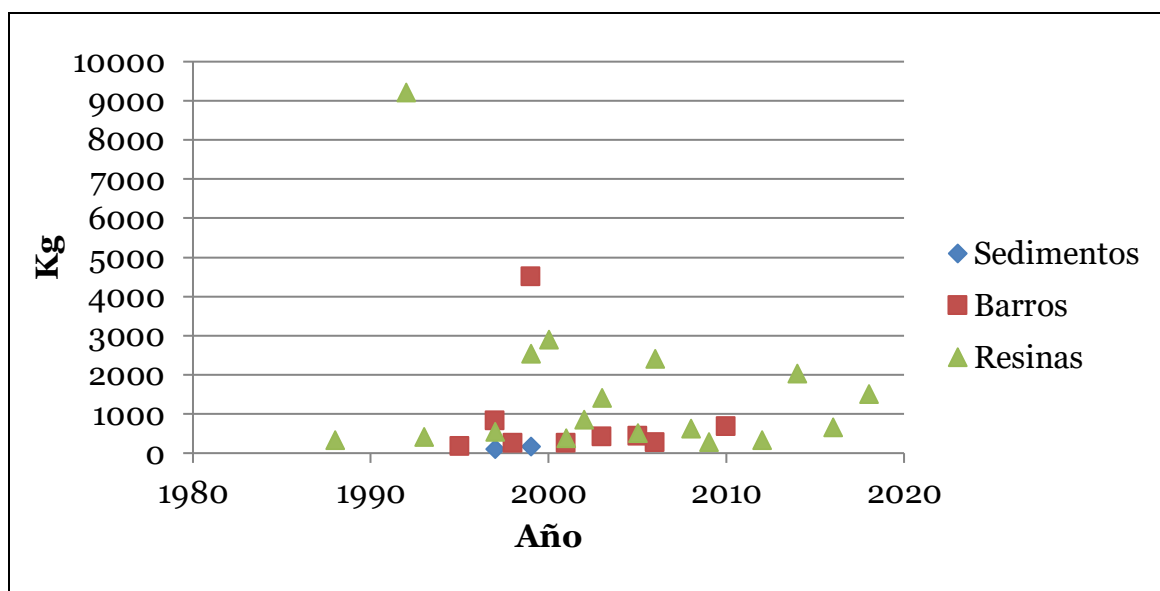


### 2.2.3. Residuos sólidos húmedos

Los residuos radiactivos sólidos húmedos (resinas, barros y sedimentos), se encuentran en tercer lugar decreciente, de tasa de ingreso anual al AGE, luego de los residuos compactables y de los residuos líquidos acuosos.

Los residuos radiactivos sólidos húmedos, son sólidos granulados, que fueron trasvasados a los recipientes en los cuales actualmente están almacenados en el AGE, suspendidos en agua. Alcanzado un dado nivel de llenado de los recipientes, el generador procedió a eliminar el agua sobrenadante, entregando los sólidos resultantes al PNGRR.

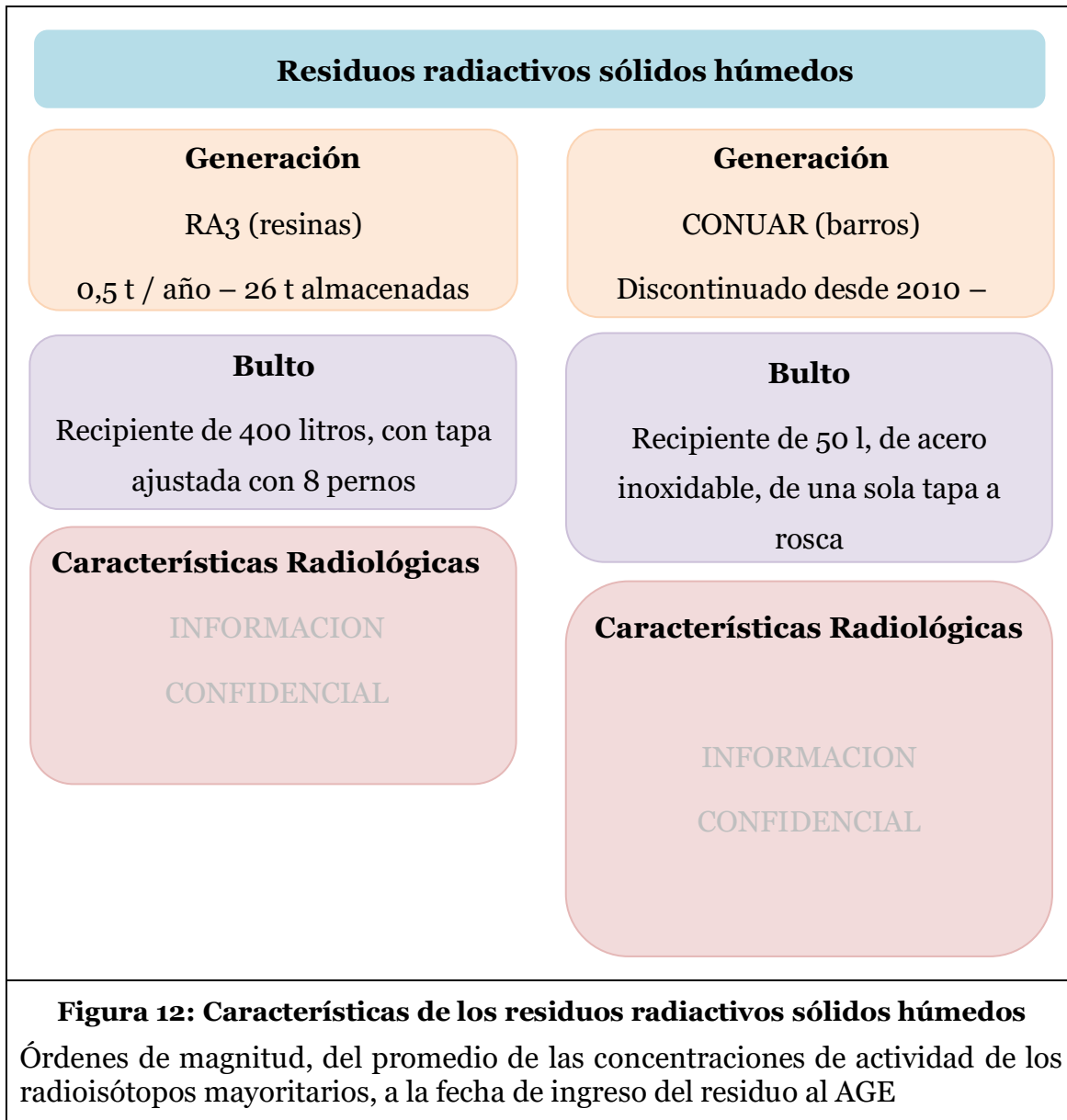
Como se muestra en la **Figura 11**, desde 2010, solo se registra el ingreso de resinas de intercambio iónico agotadas<sup>7</sup> del RA3, como residuo radiactivo sólido húmedo.



**Figura 11: Evolución temporal de la tasa de ingreso anual al AGE, de los residuos radiactivos sólidos húmedos**

Las características radiológicas de los residuos radiactivos sólidos húmedos, se describen en la **Figura 12**.

<sup>7</sup> Las resinas son gránulos de polímero orgánico (di vinil benceno estireno), de aproximadamente 1 mm de diámetro, que se utilizan para reducir la contaminación del agua del RA3.



### 2.3. Relevancia en el inventario de la PEMB

Los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos, gestionados por el PNGRR en el CAE y descritos en el ítem anterior, se almacenan en la PEMB. La PEMB, es uno de los dos almacenamientos de residuos radiactivos ubicados en el AGE. Además de residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos, en la PEMB se almacenan residuos sólidos, principalmente residuos radiactivos sólidos estructurales (filtros y prefiltros de ventilación) y sólidos compactables y no compactables históricos<sup>8</sup>. El inventario de la PEMB, se muestra en la **Tabla 1**.

<b>Residuos</b>	<b>Bultos</b>	<b>Masa (t)</b>	<b>Actividad (Bq)</b>
<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>			
Tabla 1: Inventario de la PEMB (masa, cantidad de bultos y actividad)			

---

<sup>8</sup> Residuos históricos: residuos radiactivos que fueron acondicionados utilizando criterios que no se encuadran en el marco regulatorio vigente, razón por la cual deben ser re evaluados[8].

Los radioisótopos de mayor aporte al inventario radiológico de la PEMB, se citan en la **Tabla 2**. Las características de estos radioisótopos y los correspondientes valores de constantes utilizadas en radioprotección (constante gamma y coeficiente de dosis e(50)), se describen en los **Anexos 4 y 5**.

La contribución de los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos, descritos en el **ítem 2.2.**, al inventario radiológico de la PEMB, se detalla en la **Tabla 3**.

<b>Radioisótopo</b>	<b>Actividad (Bq)</b>	<b>Radioisótopo</b>	<b>Actividad (Bq)</b>
<b>Cs 137</b>	<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>	<b>Eu 155</b>	<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>
<b>C 14</b>		<b>Ru 106 / Rh 106</b>	
<b>Sr 90 / Y 90</b>		<b>Ce 144 / Pr 144</b>	
<b>Co 60</b>		<b>H 3</b>	
<b>Sb 125</b>		<b>Ra 226</b>	
		<b>U 234, U 238</b>	
		<b>Cs 134</b>	

Tabla 2: Órdenes de magnitud de los principales radioisótopos del inventario de la PEMB

Radioisótopos que aportan más del 99 % de la actividad total (XXX Bq, al 1/8/2022) de la PEMB

Radioisótopo	Residuo Radiactivo	Generador	Cantidad	Aporte al inventario radiológico de la PEMB
Cs 137	Líquidos acuosos básicos	Mo 99	INFORMACIÓN CONFIDENCIAL	94 %
C 14	Sólidos no compactables	Hospitales		> 99 %
Sr 90 / Y 90	Líquidos acuosos ácidos	LFR		77 %
	Líquidos básicos Mo 99 (Ya citados)			23 %
Co 60	Sólidos húmedos - Resinas	RA3		10 %
Sb 125	Líquidos básicos Mo 99 (Ya citados)			15 %
XX	Sólidos no compactables	Facilidad Alfa	INFORMACIÓN CONFIDENCIAL	> 99 %
XX	Líquidos acuosos ácidos	Facilidad Alfa		74 %
Eu 155	Líquidos ácidos LFR (Ya citados)			100 %
Ce 144 / Pr 144	Líquidos ácidos LFR (Ya citados)			83 %
	Líquidos básicos Mo 99 (Ya citados)			17 %
Ru106 / Rh106	Líquidos básicos Mo 99 (Ya citados)			70 %
	Líquidos ácidos LFR (Ya citados)			17 %
<b>Tabla 3: Radioisótopos del inventario de la PEMB, ordenados en orden decreciente de actividad y clasificados por residuo y generador.</b>				

Radioisótopo	Residuo Radiactivo	Generador	Cantidad	Aporte al inventario radiológico de la PEMB
H 3	Líquidos orgánicos	Universidades	INFORMACIÓN CONFIDENCIAL	32 %
Ra 226	Sólidos no compactables	Centros médicos		100%
U total	Sólidos Húmedos - Barros	CONUAR		28 %
	Líquidos acuosos	PPCA		20 %
	Líquidos acuosos	Facilidad Alfa		13 %
	Líquidos orgánicos	CONUAR		2 %
Cs 134	Líquidos básicos Mo 99 (Ya citados)			62 %
<b>Tabla 3 (Cont.): Radioisótopos del inventario de la PEMB, ordenados en orden decreciente de actividad y clasificados por residuo y generador</b>				

De la evaluación de la información presentada en las **Tablas 1, 2 y 3**, se concluye que la mayor parte de la actividad almacenada en la PEMB, se encuentra en los residuos radiactivos líquidos. En particular, la actividad se concentra en tres residuos radiactivos líquidos acuosos (Ver **Anexo 1**):

- Los residuos generados en la disolución de plaquitas irradiadas en la PPR: son los residuos radiactivos líquidos acuosos básicos con Aluminio

y la mayor parte de los residuos radiactivos líquidos básicos, sin Aluminio.

- El residuo generado en la recuperación de Uranio en el LFR: es uno de los residuos radiactivos líquido acuosos ácidos, sin Aluminio.
- El residuo generado en prácticas pasadas en la Facilidad Alfa: en el presente trabajo, se lo considera un residuo radiactivo líquido acuoso ácido, sin Aluminio <sup>9</sup>.

Los residuos radiactivos generados en la PPR - etapa de disolución - y en el LFR son, además, los residuos más concentrados en actividad de radioisótopos emisores beta gamma, que se gestionan en el AGE.

Por lo tanto los tres residuos mencionados, son residuos:

- de fácil<sup>10</sup> dispersión,
- con la mayor participación en el inventario radiológico de la PEMB (Ver **Figura 8** y **Tabla 3**),
- con las concentraciones de actividad más altas (ver **Figuras 3** y **6**) y
- que contienen dos de los radioisótopos de mayor e(50) del inventario de la PEMB (xx y xx, Ver **Anexo 5**).

Debido a las características mencionadas, la inmovilización de estos tres residuos, adquiere relevancia respecto de la inmovilización de otros residuos radiactivos.

---

<sup>9</sup> No se cuenta con información referida a la caracterización química de este residuo. Se lo considera un residuo radiactivo líquido acuoso ácido sin Aluminio, por ser la alternativa menos favorable para la evaluación de viabilidad. Como se verá en el ítem 4.1.d), es la alternativa que implica mayor incremento de volumen, en la inmovilización con Cemento Portland

<sup>10</sup> Dado que se trata de líquidos, algunos de ellos ácidos, almacenados en contenedores metálicos, por períodos prolongados de tiempo (hasta 25 años).

### **3. Cemento Portland**

#### **3.1. Generalidades**

El Cemento Portland es un sólido granulado fino, con partículas de tamaño de 10 a 0,5 micrones, formado mayoritariamente por Silicatos de Calcio y – en menor proporción – Aluminatos de Calcio. El granulado de Cemento Portland, al dispersarse en agua, forma una pasta. Esta pasta - constituida por los productos de la reacción de los componentes del Cemento Portland con el agua – endurecerá (fraguará) a temperatura ambiente. La maleabilidad y capacidad aglutinante de la pasta en estado fresco, la resistencia mecánica del sólido resultante y la capacidad de fraguar en presencia de agua, hicieron del Cemento Portland el cemento más utilizado en la construcción.

El Cemento Portland se obtiene al moler y calentar hasta fusión parcial, calizas y arcillas. El Clinker Portland resultante, se muele con el agregado de yeso, para posteriormente mezclarlo con otros materiales molidos. De acuerdo a estos últimos materiales y a su proporción en el producto a comercializar, la Norma IRAM 50.001 de la República Argentina, determina seis clases de Cemento Portland de uso general. Los dos tipos de Cemento Portland actualmente más abundantes en el mercado argentino, son el CPC (Cemento Portland Compuesto) y el CPF (Cemento Portland con Filler Calcáreo).

La pasta de cemento y agua en estado fresco (fluido), acepta el agregado de sólidos granulados. Cuando el agregado es arena, la mezcla resultante se denomina mortero. Para denominar de acuerdo a la Norma IRAM 50.001 cada tipo de cemento, se preparan probetas de morteros normalizados, para determinar en ellas la resistencia a la flexión y a la compresión. Con los resultados de estos ensayos, realizados de acuerdo a la Norma IRAM 1622, se califican los cementos. En los cementos CPC 40 y CPF 40 – los cementos de mayor disponibilidad comercial actual local - la resistencia a la compresión de los citados morteros, es de 40 MPa (a los 28 días, curado bajo agua).

En el sector nuclear, el Cemento Portland se utiliza como matriz para inmovilizar residuos radiactivos, dado que:

- Reacciona con agua (por ejemplo, la presente en los residuos radiactivos mencionados **2.2.1.**), formando pastas que posteriormente endurecen

(fraguan), dando origen a bloques monolíticos. La posibilidad de dispersión / migración de radioisótopos de estos bloques, es menor que en los líquidos.

- Permite incluir en las citadas pastas, sólidos granulados (como las resinas de intercambio iónico que componen parte de los residuos radiactivos sólidos húmedos, descritos **2.2.3**). En los bloques resultantes, la posibilidad de dispersión de radioisótopos, es menor que en los sólidos granulados.
- Es económico y tiene amplia disponibilidad comercial.
- Las instalaciones de procesamiento, son las instalaciones para inmovilización de residuos radiactivos más sencillas de operar y mantener<sup>11</sup>.

Las principales limitaciones del uso del Cemento Portland en la inmovilización de residuos radiactivos, son la durabilidad y el incremento de volumen en los residuos a almacenar. El Cemento Portland **no** se utiliza para acondicionar residuos radiactivos, donde se requiera inmovilizar radioisótopos, por períodos de tiempo del orden de los miles de años. Los residuos radiactivos inmovilizados en Cemento Portland, ocupan un volumen entre 2 a 4 veces mayor, que el residuo sin inmovilizar.

Los componentes y las proporciones en una formulación para inmovilizar residuos radiactivos con Cemento Portland, deben satisfacer tanto los requerimientos operativos de la planta de procesamiento, como los requerimientos de calidad del producto final de las instalaciones de almacenamiento y disposición. Entre los primeros, se encuentra el tiempo de fraguado y la adherencia a las partes fijas o móviles de los equipos de mezclado. Entre los segundos, se encuentran la resistencia a la compresión, lixiviación de radioisótopos y contenido máximo de actividad por radioisótopo (Ver **Anexo 3**). Los motivos de estos requerimientos son los siguientes.

---

<sup>11</sup> Respecto de las instalaciones requeridas para inmovilizar residuos radiactivos empleando otras matrices, tales como el bitumen, los polímeros o el vidrio.

Se requiere de un tiempo de fraguado suficientemente largo, para poder realizar el vertido de la pasta o para retirar los mezcladores del recipiente de mezclado y suficientemente reducido, para permitir retirar de la instalación de procesamiento, lo antes posible, los bultos con residuos en estado sólido.

La mezcla de los componentes de una formulación para la inmovilización de residuos radiactivos en Cemento Portland, se realiza en equipos especialmente diseñados a tal efecto. Estos equipos constan de un recipiente fijo (Ej. Tambor) y elementos / paletas mezcladores (ver **Figuras 16, 19 y 20**). El movimiento de los mezcladores produce la dispersión del Cemento Portland en el agua y la homogenización de la pasta resultante, con el resto de los componentes de la formulación. En la inmovilización de residuos radiactivos, uno de los componentes es el residuo radiactivo. Por lo tanto la pasta adherida a los mezcladores, puede significar un aporte relevante en la dosis por exposición externa, que reciben los operadores de una planta de procesamiento de residuos radiactivos. Estas situaciones se subsanan descartando ó lavando los mezcladores y /o interponiendo blindajes entre los equipos mezcladores y los operadores. Todas estas situaciones, incrementan los costos de procesamiento, además de agregar la generación residuos secundarios (agua de lavado, partes del equipo de mezclado).

La resistencia a la compresión del residuo inmovilizado, es una medida de las fuerzas de cohesión presentes en el mismo. Estas fuerzas impedirán que el residuo se disperse en caso de carga (Ej. se disgregue al ser apilado en los almacenamientos o debido a la cubierta de los repositorios) ó impacto<sup>12</sup> (Ej. caída durante el transporte o en el almacenamiento).

La lixiviación es una medida de la resistencia que opone la matriz a la migración de radioisótopos, en caso de interacción con agua, fundamentalmente en escenarios de inundación de los almacenamientos e inundación o migración normal en repositorios [9].

---

<sup>12</sup> Considerando que ha ocurrido – anterior o simultáneamente - una falla en la capacidad de contención de los recipientes en los cuales se ubicaron los residuos radiactivos.

Las concentraciones máximas que los repositorios o almacenamientos admiten para los diferentes residuos, se establecen en función de las evaluaciones de seguridad de dichas instalaciones. Es decir, en la estimación de las dosis que recibirían los trabajadores y el público, como consecuencia de la presencia de residuos radiactivos en dichas instalaciones.

### **3.2. Desarrollo de formulaciones**

#### **3.2.1. Materiales y equipos**

Las formulaciones analizadas en el presente trabajo, se desarrollaron en el PNGRR entre 2011 y 2015 [13,16,17, 18]. Parte de estas formulaciones, se utilizaron en la inmovilización de algunos de los residuos radiactivos descritos en **2.2.1**, en la PPCC, en la etapa de puesta en marcha, entre 2016 y 2017.

Los materiales utilizados en las diferentes etapas, fueron los siguientes:

- Cemento Portland CPC 40 – Loma Negra o Avellaneda
- Cemento Portland CPF 40 – Loma Negra o Avellaneda
- Vermiculita Expandida Mediano F 1 - Aislater
- Bentonita – Castiglioni, Pes y Cía
- Ácido Nítrico 63 % m/m - Grado técnico
- Hidróxido de Sodio en perlas – Grado técnico
- Retardador de fraguado Protex Ret – Protex

A lo largo del desarrollo de las formulaciones, se utilizaron los siguientes equipos:

- Mezcladora, moldes y prensa para ensayo de resistencia a la compresión y flexión, de acuerdo a IRAM 1622<sup>13</sup> - Cosacov (Ver **Figuras 13 y 14**)
- Vicat automático (equipo para medir tiempo inicial y final de

---

<sup>13</sup> Finalizado el mezclado, se procede a llenar dos moldes de 3 probetas cada uno (40 mm x 40 mm x 160 mm, cada probeta). Las probetas se desmoldan transcurridas 24 horas de finalizado el mezclado. Se sumergen en agua durante 30 y 60 días. Transcurrido este tiempo, se retiran 3 probetas y se determina en las mismas, resistencia a flexión y compresión.

fraguado<sup>14</sup>, ver **Figura 15**)

- Mezcladora para ensayos a escala 20 litros (perforadora de banco adaptada, ver **Figura 16**)
- Mezcladora *in drum*:
- Beba Mischtechnik (Ver **Figura 17**)
- Mesa dosificadora de resinas (Ver **Figura 18**)



Molde de 3 probetas, de 40 mm x 40 mm x 160 mm c/u, con pasta en estado fluido

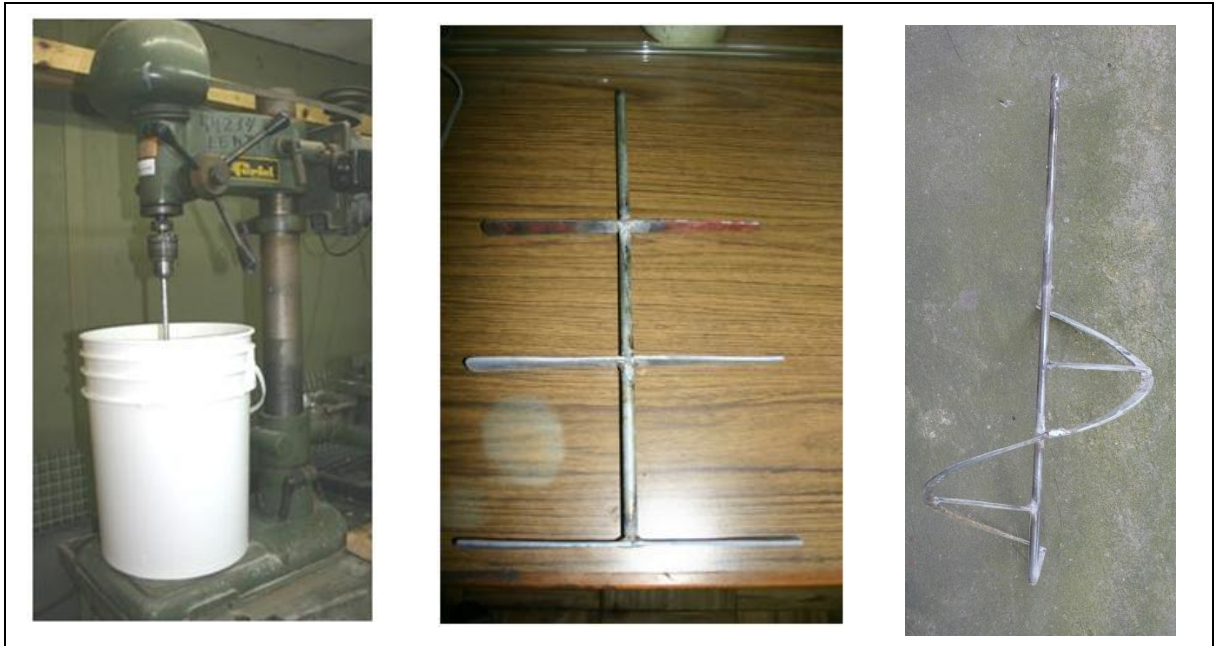
**Figura 13: Mezcladora y molde para preparar probetas para ensayo de resistencia a la flexión y compresión, de acuerdo a IRAM 1622**

---

<sup>14</sup> El tiempo de fraguado se determina por medio de la resistencia que opone el producto a la penetración de una aguja de 1 mm<sup>2</sup> de sección, con una carga de 300 gramos. Para esto, finalizado el mezclado, se vierte la pasta en moldes tronco cónicos (40 mm de altura, 60 mm y 70 mm de diámetro interno superior e inferior respectivamente). Se ubica el molde en el equipo (Figura 18), el cual descarga, limpia y eleva la aguja, luego de lo cual gira el molde que contiene la muestra. Esto se realiza en forma automática, a intervalos de tiempo preestablecidos por el operador. En el desarrollo de formulaciones citado, se consideró que el tiempo de inicio de fraguado, es el intervalo de tiempo que transcurre desde la finalización del mezclado hasta la primera determinación, en la cual la aguja no desciende el total del recorrido posible. Se consideró tiempo final de fraguado, el tiempo transcurrido desde que finaliza el mezclado, hasta que no es posible el ingreso de la aguja en el producto.



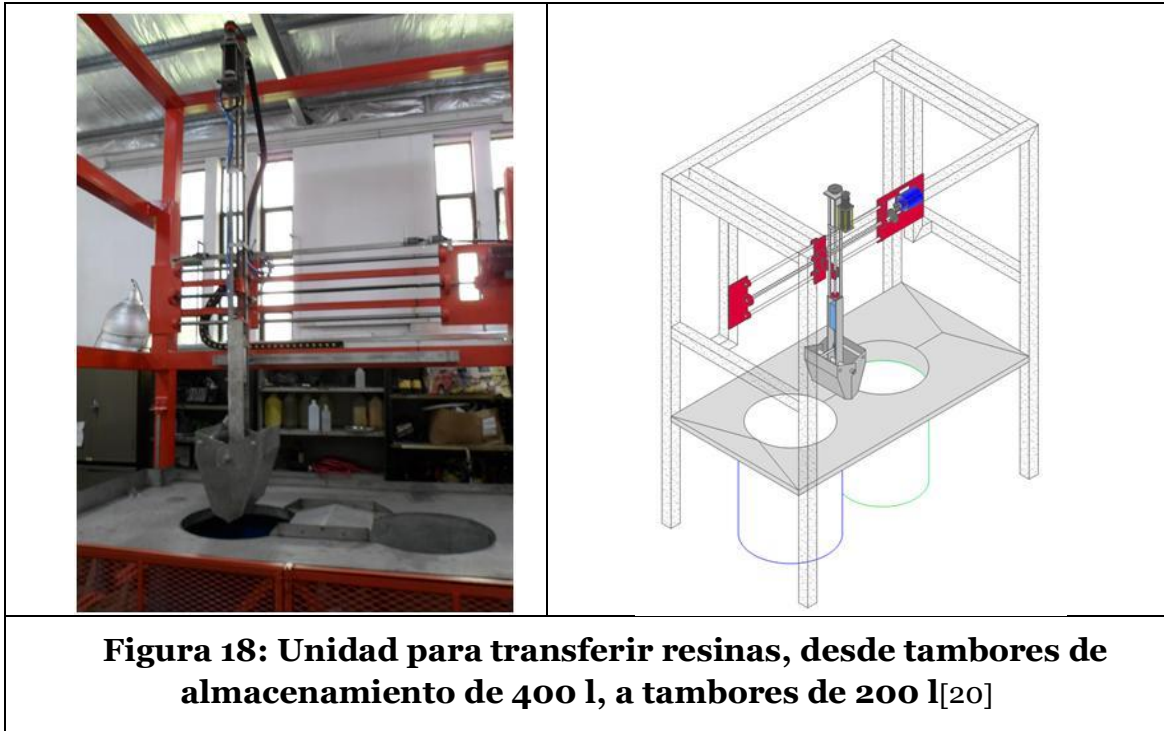
Equipo Vicat automático y preparación de una probeta para ensayo



**Figura 16: Mezcladora escala 20 litros y paletas mezcladoras**



**Figura 17: Mezcladoras *in drum*, escala 200 litros, Beba Mischtechnik**



**Figura 18: Unidad para transferir resinas, desde tambores de almacenamiento de 400 l, a tambores de 200 l[20]**

Las características de los equipos mezcladores utilizados, se citan en la **Tabla 4.**

	<b>Volumen del recipiente mezclador</b>	<b>Movimiento rotatorio de mezcladores</b>	<b>Movimiento planetario de los mezcladores</b>
<b>De acuerdo IRAM 1622</b>	5 litros	140 +- 5 rpm (min) 285 +- 10 rpm (max.)	62 +- 5 rpm (min) 125 +-10 rpm (max)
<b>BEBA</b>	200 litros (tambor)	104 rpm (min) 208 rpm (max)	6 rpm
<b>Desarrolladas en PNGRR</b>	20 litros (tambor)	100 rpm	NO
	200 litros (tambor)	2 rpm	NO

Tabla 4: Características de los equipos mezcladores para elaborar pastas de Cemento Portland

En los ensayos, se diseñaron y construyeron dispositivos para evaluar la evolución de la temperatura en el producto, desde la finalización del mezclado hasta logrado el equilibrio con la temperatura ambiente. Estas evaluaciones se realizaron a escala 20 y 200 litros (Ver **Figura 19** y **Figura 20**). El objetivo de realizar estas determinaciones, es conocer la temperatura máxima alcanzada durante el fraguado, que podría afectar negativamente la calidad del producto (al evaporarse parte del agua de mezclado, resultando productos agrietados o friables) y las dosis durante la operación (al formarse aerosoles o vapores que contengan radioisótopos).



**Figura 19: Dispositivo para registrar la temperatura durante el fraguado – Escala 20 litros**[21]



**Figura 20: Dispositivo para registrar la temperatura durante el fraguado – Escala 200 litros**[21]

### 3.2.2. Ensayos y valores de referencia

Durante el desarrollo de las formulaciones que se citarán a continuación, se realizaron ensayos a escala 0,2 litros, 2 litros, 20 litros y 200 litros<sup>15</sup>. Se utilizaron residuos simulados, es decir, soluciones a las que no se les agregaron radioisótopos. En cada escala, se tomó una formulación de bibliografía y se realizaron ensayos en escala creciente de volumen. En cada incremento de escala, se realizaron los ensayos mencionados en la **Tabla 5**, realizándose las correcciones de formulación y/o tiempos u orden de mezclado, que se consideraron necesarias. Los ensayos realizados y los valores de aceptación / rechazo para los resultados de los mismos, se corresponden con requerimientos operativos de la PPCC y requerimientos de aceptación de repositorios o residuos inmovilizados en Cemento Portland (Ver **Anexo 3**).

Ensayo	Volumen (l)			
	0,2	2	20	200
<b>Mezclado y adherencia</b> (homogeneidad en < 5 min, < 1% adherido a mezclador)	✓	✓	✓	✓
<b>Tiempo de fraguado (Vicat)</b> > a 4 horas, < 24 horas	✓	✓	✓	✓
<b>Temperatura máxima durante el fraguado</b> < 60°C	✓	✓	✓	✓
<b>Ausencia de grietas en el residuo inmovilizado</b>	✓	✓	✓	✓
<b>Homogeneidad en el residuo inmovilizado</b>	✓	✓	✓	
<b>Resistencia mecánica (IRAM 1622) &gt; 10MPa (compresión)</b>		✓	✓	✓
<b>Ensayo de caída desde 5 m</b> < 1 % material disgregado			✓	

Tabla 5: Desarrollo de formulaciones para la inmovilización de residuos radiactivos – Escalas, ensayos y valores de aceptación

<sup>15</sup>Volumen de pasta (0,2 y 2 litros) o del recipiente mezclador (20 y 200 litros)

El valor de aceptación del resultado del ensayo de resistencia a la compresión, se tomó del repositorio de El Cabril - España (Ver **Anexo 3**), junto con los requerimientos de homogeneidad y ausencia de grietas. El resto de las condiciones, son condiciones consideradas necesarias para la operación de la PPCC o los almacenamientos.

El grado de avance en el desarrollo de las diferentes formulaciones necesarias, se muestra en la **Tabla 6**.

Residuos		Escala				
		0,2 litros	2 litros	20 litros	200 litros	200 litros (PPCC)
Básicos, con Aluminio	0,3 % m/m Al	✓	✓	✓	✓	
	3,3 % m/m Al	✓	✓	✓		
Básicos, sin Aluminio	PPR	✓	✓			
	I 131	✓	✓			✓
Ácidos, con Aluminio		✓	✓	✓		✓
Ácidos, sin Aluminio		✓	✓			✓ (**)
Orgánicos (*)		✓	✓	✓		
Resinas		✓	✓	✓	✓	

Tabla 6: Grado de avance en el desarrollo de formulaciones  
 (\*) emulsiones de cocteles de centelleo (\*\*) residuos LFR y ARN

### 3.3.3. Experiencia en la puesta en marcha de la PPCC

Parte de las formulaciones desarrolladas con residuos simulados, se utilizaron para inmovilizar residuos radiactivos durante la puesta en marcha de la PPCC. De acuerdo a la experiencia adquirida en esa oportunidad, la cantidad máxima de Cemento Portland admitida por tambor, es de 200 Kg. Los tiempos de mezclado óptimos – una vez agregados todos los componentes – se encuentran en el rango de 3 a 5 minutos, a velocidad baja (104 rpm, con mezcladora BEBA).

La mezcladora de la PPCC (BEBA Mischtechnik – Ver **Figura 17** y **Tabla 4**), permite utilizar dos velocidades de giro de los mezcladores. Sin embargo, se desestima la posibilidad de utilizar la velocidad más alta (208 rpm), dado que de esta manera se incorpora más aire a la mezcla y se ensucia más el cabezal mezclador. El aire incorporado a la mezcla, se traduce en mezclas de menor densidad y en la formación de espuma en la superficie.

Durante la puesta en marcha de la PPCC, solo se tomaron muestras para evaluar lixiviación. No se realizaron el resto de los ensayos descritos en la **Tabla 5** (Vicat, resistencia mecánica). El ensayo de lixiviación, en el contexto internacional, solo es requerido en residuos con concentraciones de actividad 10 o más veces mayores, a las resultantes en los residuos inmovilizados en la PPCC (Ver **Anexo 3**). A pesar de esto, el ensayo de lixiviación se realizó con el objetivo de evaluar las formulaciones utilizadas y adquirir experiencia en la realización de este ensayo. La metodología empleada, fue la utilizada por ENRESA en El Cabril [19], adaptada a probetas de 4 cm de diámetro y 4 cm de altura<sup>16</sup>. Los resultados obtenidos en residuos inmovilizados procedentes de tres generadores (LTA, ARN y Planta de producción de I 131), cumplieron con los valores de aceptación establecidos en los requerimientos de aceptación de El Cabril.

---

<sup>16</sup> El ensayo de lixiviación realizado en la PPCC, es un ensayo de lixiviación estático, que utiliza agua desmineralizada. Comprende siete períodos de inmersión consecutivos de XX días de duración cada uno de ellos (XX días en total). El volumen de lixivante utilizado en cada etapa fue de 800 cm<sup>3</sup>, manteniendo más de 1 cm de lixivante en todas las caras de la probeta.

## 4. Inmovilización de residuos con Cemento Portland

### 4.1. Residuos líquidos acuosos

Como se mencionó en el punto **2.1**, los residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE, no presentan una única composición química y radiológica. Como se mencionó en **3.1**, estas características deben ser tenidas en cuenta en el desarrollo de formulaciones que permitan su inmovilización en Cemento Portland. Establecidos los requisitos de proceso y calidad de producto (Ver **Tabla 5**), y para minimizar el número de formulaciones necesarias, los residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en el AGE, se agruparon en cuatro categorías (Ver **2.2.1.**). La **Tabla 7**, resume las características de cada una de estas categorías.

Residuo Radiactivo	Líquido acuoso			
	Alcalino		Ácido	
	Con Aluminio	Sin Aluminio	Con Aluminio	Sin Aluminio
<b>Generación anual (t/a)</b>	0,5	0,45	0,1	0,18
<b>Almacenado (t)</b>	10	8,5	1,5	6,5
<b>Generadores</b>	PPR (disolución)	PPR (purificación) I 131	LTA	LFR, Facilidad alfa, LUE, PPCA...
<b>Comentarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;generación anual</li> <li>• &gt;cantidad almacenada</li> <li>• 2º mayor concentración de actividad <math>\beta</math> / <math>\gamma</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PPR: 2º mayor generación anual y cantidad almacenada</li> </ul>	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LFR: mayor concentración de actividad <math>\beta</math> / <math>\gamma</math></li> </ul>
Tabla 7: Resumen de las características de los residuos radiactivos líquidos acuosos, almacenados en la PEMB				

Las formulaciones que permiten inmovilizar con Cemento Portland los residuos de cada una de las categorías mencionadas en la **Tabla 7**, se describen y evalúan a continuación.

### **a) Residuos alcalinos, con Aluminio**

Estos residuos se generan en la PPR, en la etapa de disolución de plaquitas irradiadas, durante el proceso de producción de Mo 99 (Ver **Anexo 1**). En función de los desarrollos realizados en el PNGRR y la experiencia operativa adquirida durante la puesta en marcha de la PPCC, la formulación que permitiría inmovilizar estos residuos, se compone de:

- 3 % m/m vermiculita
- 17 % m/m residuo (concentración de Aluminio: 0,3 ó 3,3 % m/m)
- 57 % m/m cemento (preferentemente CPC 40)
- 3 % m/m bentonita (mezclada con el cemento)
- 20 % m/m agua

La formulación se evaluó realizando ensayos a escala 0,2, 2, 20 litros (para residuos de 0,3 y 3,3 % Al m/m) y 200 litros (para residuos 0,3 % Al m/m). En todos los casos, con residuos simulados no radiactivos.

A escala real (200 litros), la formulación citada se evaluó:

- con residuos simulados con concentración 0,3 % m/m de Aluminio y CPF 40<sup>17</sup> mezclado con bentonita<sup>18</sup>,
- utilizando un tambor de 200 l como recipiente mezclador y
- realizando la mezcla con la mezcladora BEBA Mischtechnik.

La cantidad total de componentes utilizada en el ensayo, fue de 350 Kg. El orden en el cual fueron agregados al tambor de 200 litros, fue el siguiente:

- Se colocó la vermiculita en el tambor.
- Se volcó el residuo líquido simulado sobre la vermiculita.
- Sobre esto, se agregó la totalidad del Cemento Portland.

---

<sup>17</sup> El ensayo a escala 200 litros con residuos simulados no radiactivos, se realizó con CPF 40, para evaluar la peor condición de proceso (el CPF 40 presentó mayor calor de hidratación que el CPC 40, en ensayos a escala 2 y 20 litros)

<sup>18</sup> El agregado de bentonita, se realizó para aumentar la viscosidad de la pasta en estado fresco, evitando que se produzca la segregación de la vermiculita durante el fraguado (ocurre solo en las escalas 20 y 200 litros), sin incrementar la cantidad de pasta que resulta adherida a los mezcladores, al final del mezclado.

- Finalmente, se agregó el agua en tres alícuotas iguales. El mezclado comenzó luego del agregado del primer tercio de la cantidad total de agua de la formulación.

Una vez finalizado el mezclado, la cantidad de pasta adherida a los mezcladores, fue inferior al 1% del total de la mezcla (Ver **Figura 21**). Esto resulta fundamental para la reutilización de los mezcladores y para reducir la dosis por exposición externa durante la operación y las tareas de mantenimiento.

Los valores obtenidos en ensayos de resistencia a la compresión según IRAM 1622 superaron los 10 MPa (para probetas con 30 días de curado y para probetas con 30 días de inmersión en agua, luego del curado). No se observó líquido sobrenadante o fisuras en la superficie del sólido. La temperatura no se elevó por encima de los 60°C, en ningún punto del tambor. El nivel de llenado fue de aproximadamente el 90 % del volumen del tambor. La densidad del producto cementado, fue de aproximadamente 1,8 Kg / dm<sup>3</sup>. El fraguado ocurrió transcurridas más de 4 horas y menos de 24 horas, desde el inicio de mezclado.

Utilizando la formulación y las condiciones de llenado mencionadas, se obtendrían concentraciones de actividad<sup>19</sup> en los residuos inmovilizados, que cumplirían con los requerimientos de aceptación de:

- bultos Nivel 2 de El Cabril (Repositorio de España) y
- bultos Clase B, de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica referida a repositorios cercanos a la superficie (Ver **Anexo 3**).

Los requerimientos de aceptación mencionados en el **Anexo 3**, son orientativos. La instalación que reciba los residuos radiactivos inmovilizados en Cemento Portland en la República Argentina, deberá establecer sus propios requerimientos de aceptación.

---

<sup>19</sup> Evaluadas con la información presentada en la **Figura 3**.



**Figura 21: Inmovilización con Cemento Portland de residuos simulados de la PPR, etapa de disolución**

Ensayo 200 litros: vista de mezcladores y recipiente, al final del mezclado

Considerando que:

- la calidad del producto cementado con la formulación mencionada, satisface los requerimientos de calidad que se establezcan oportunamente,
- el mezclado se realiza en tambores de 200 l, similares a los que se utilizan para prensar residuos compactables, como el utilizado en el ensayo descrito y
- que no se requiera el uso de blindajes para los tambores de 200 litros con residuos inmovilizados en Cemento Portland,

el volumen y la masa de los residuos radiactivos a almacenar (o disponer), se modificaría como se muestra en la **Tabla 8**.

	<b>Residuos radiactivos líquidos alcalinos, con Aluminio (PPR - etapa de disolución )</b>	
	Sin inmovilizar	Inmovilizados en Cemento Portland
<b>Peso residuo radiactivo</b>	10 t	59 t
<b>Peso del bulto (contenedor + residuo) (*)</b>	~ 1 t (140 Kg de residuo radiactivo líquido * + 800 Kg de contenedores y blindaje )	400 Kg (50 Kg de contenedor + 350 Kg residuo cementado: 60 Kg de residuo + 11 Kg de vermiculita + 200 Kg cemento + 70 Kg agua+ 9 Kg bentonita)
<b>Cantidad bultos</b>	71	167
<b>Peso bultos</b>	71 t	67 t
<b>Volumen bultos</b>	28 m <sup>3</sup>	33 m <sup>3</sup>
<b>Generación anual máxima</b>	3 tambores de 400 litros /año	9 tambores 200 litros /año (**)

Tabla 8: Inmovilización en Cemento Portland de residuos alcalinos, con Aluminio–  
Valores anteriores y posteriores al procesamiento

(\*) Valor promedio, calculado con datos cargados en el STORER

(\*\*) Considerando tasa de generación de 0,5 t/a (Ver **Figura 3**)

A partir de los ensayos realizados en el PNGRR con residuos simulados, se concluye que el cementado directo de los residuos generados en la PPR/etapa de disolución, no cumple con los requerimientos de tiempo de fraguado y temperatura máxima de fraguado (Ver **Tabla 5**). Las pastas resultantes de mezclar los residuos simulados con cemento, sin otro agregado, endurecieron en menos de una hora y la temperatura se elevó por encima de los 60 °C, en mezclas realizadas a escala 0,2 l. El agregado de un retardador de fraguado, salva estos obstáculos, pero las pastas resultantes son más viscosas y presentan mayor adherencia a los mezcladores. Esto implicaría el descarte de los

mezcladores en cada mezclado, para no incrementar las dosis por exposición externa ni dificultar el mezclado. Esto incrementaría los costos de operación. Por esta razón, en el presente trabajo se desestimaron las formulaciones de cementado directo o con agregado de retardadores de fraguado, para inmovilizar residuos radiactivos básicos, con Aluminio.

Se desestima además, la opción de diluir el residuo hasta que el tiempo de fraguado se extienda a más de 4 horas. Se descarta esta posibilidad, dado que esta condición se lograría diluyendo el residuo 0,3 % m/m en Aluminio, 7 veces en agua (una parte de residuo con seis partes de agua). Se pasaría entonces de 10 toneladas de residuos radiactivos líquidos a 70 toneladas de residuo diluido<sup>20</sup>. Cementando el residuo diluido con una relación<sup>21</sup> residuo / cemento = 0,5, a razón de 350 Kg de pasta (cemento + residuo diluido) por tambor de 200 litros, se obtendrían 400 tambores con residuos cementados. Más del doble, de los que se obtendrían con la formulación propuesta al inicio de este apartado.

## **b) Residuos alcalinos, sin Aluminio**

A este grupo pertenecen los residuos radiactivos generados en el proceso de producción de Mo 99, en la PPR, en la etapa de purificación (ver **Anexo 1**). Este residuo, es el tercer residuo líquido en orden decreciente de concentración de actividad y el segundo residuo radiactivo líquido con mayor tasa de generación anual. No se cuenta con registros que indiquen que la composición química del residuo de purificación, se haya modificado desde el inicio de operación de la PPR.

De acuerdo a los ensayos realizados en el PNGRR - hasta escala 2 litros - este residuo puede inmovilizarse en cemento, sin necesidad de neutralizarlo, adsorberlo o utilizar aditivos. La formulación propuesta se compone de:

---

<sup>20</sup> Opción de mínima, dado que se estima que la mayor parte de los residuos alcalinos con Aluminio almacenados en el AGE (8 de las 10 toneladas almacenadas), tiene una concentración de Aluminio superior a 0,3 % m/m, por lo que sería necesaria una dilución mayor.

<sup>21</sup> Proporción utilizada en la NORMA IRAM 1622

- 33 % m/m residuo
- 67 % m/m cemento (preferentemente, CPC 40)

Dicha formulación ha cumplido con los requerimientos de tiempo y temperatura de fraguado, porcentaje de mezcla adherida a los mezcladores y resistencia mecánica. Esta última no ha disminuido transcurridos 10 años a partir del mezclado de los componentes, como originalmente se había planteado podría ocurrir, de no usarse cementos especiales (cementos ARS: Altamente Resistentes a los Sulfatos). Restan por realizar mezclas a escala 20 y 200 litros, para confirmar que se mantienen las características deseadas para el proceso y el producto final, en estas escalas.

Los residuos generados actualmente<sup>22</sup> en la Planta de Producción de I 131, también son residuos radiactivos líquidos alcalinos, con menos de 400 ppm de Aluminio. En la puesta en marcha de la PPCC, se inmovilizaron<sup>23</sup> 140 Kg de este último residuo, sin registrarse inconvenientes operativos ni defectos de calidad en el producto final (ensayo de lixiviación).

Al adoptar la mencionada formulación, para inmovilizar los residuos radiactivos líquidos generados en la PPR en la etapa de purificación y los residuos actualmente generados en la Planta de Producción de I 131, resultarían las modificaciones de masa y cantidad de bultos, que se detallan en la **Tabla 9**.

---

<sup>22</sup> Ver punto 2.2. b)

<sup>23</sup> Para cumplir con los procedimientos operativos de la PPCC, durante la puesta en marcha, el residuo alcalino, sin Aluminio, generado en la Planta de Producción de I 131 por fisión, fue neutralizado con solución de Ácido Nítrico, previamente a su inmovilización en Cemento Portland.

	<b>Residuos radiactivos líquidos acuosos alcalinos (etapa de purificación de PPR y de producción de I 131)</b>	
	Sin inmovilizar	Inmovilizados en Cemento Portland
<b>Peso residuo radiactivo</b>	8,2 t (PPR) 0,3 t ( I 131)	24,6 t 0,9 t
<b>Peso del bulto (contenedor + residuo) (*)</b>	200 Kg (50 Kg contenedor + 140 Kg residuo radiactivo líquido ) 60 Kg (20 Kg contenedor + 40 Kg residuo)	350 Kg (50 Kg contenedor + 300 Kg residuo cementado: 100 Kg residuo + 200 Kg cemento)
<b>Cantidad bultos</b>	59 8	82 3
<b>Peso bultos</b>	11,8 + 0,48 = 12,28 t	28,70 + 1,05 = 29,75t
<b>Volumen bultos</b>	11,8 + 0,4 = 12,2 m <sup>3</sup>	16,4 + 0,6 = 17 m <sup>3</sup>
<b>Generación anual máxima</b>	2 tambores de 200 litros /año 1 garrafa 50 litros / año	4 tambores 200 litros /año 1 tambor 200 litros / año (**)

Tabla 9: Inmovilización en Cemento Portland de residuos básicos, sin Aluminio - Valores anteriores y posteriores al procesamiento

(\*) Valor promedio, calculado con datos cargados en el STORER

(\*\*) Considerando tasa de generación de 0,4 y 0,05 t/a (Ver **Figura 4**)

Utilizando la formulación mencionada y considerando 300 kg de mezcla por tambor de 200 litros (100 Kg residuos + 200 Kg de cemento), los residuos inmovilizados resultantes en ambos casos<sup>24</sup>, cumplirían con los requerimientos de máximos de concentraciones de actividad de:

<sup>24</sup> Residuos de PPR / etapa de disolución y residuos actuales de la Planta de Producción de I 131.

- los residuos cementados homogéneos Nivel 1 de El Cabril,
- lo requerido a los residuos cementados en la Federación Rusa y
- los residuos Clase A, de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica, referida a repositorios cercanos a la superficie.

### c) **Residuos ácidos, con Aluminio**

Los residuos radiactivos líquidos ácidos con Aluminio, se generan en la recuperación de Uranio de placas<sup>25</sup> fuera de especificación, en el LTA. En los últimos 10 años, el LTA fue el segundo generador de residuos radiactivos líquidos, luego de la PPR. El promedio de ingreso anual al AGE de residuos líquidos generados en el LTA, es de 100 Kg al año.

De acuerdo a la experiencia con residuos simulados en el PNGRR, los residuos del LTA deben ser neutralizados previamente a ser mezclados con Cemento Portland. De lo contrario, los ácidos modifican los componentes del Cemento Portland y las pastas resultantes no solidifican. Logrado el fraguado en el rango de tiempo requerido por proceso (Ver **Tabla 5**) con la neutralización del residuo, la principal dificultad encontrada en el desarrollo de una formulación para inmovilizar residuos ácidos con Aluminio en solución, es la elevada viscosidad y adherencia que presentan las pastas resultantes. Esta dificultad se superó con el agregado de un superfluidificante (un aditivo comercial para pastas de cemento, que también cumple con el propósito de retardar el tiempo de fraguado).

La formulación, que cumple con los requerimientos operativos y de calidad de producto descritos en **Tabla 5**, es la siguiente:

- 26 % m/m residuo
- 30 % m/m neutralizante (solución de Hidróxido de Sodio)
- 42 % m/m cemento (preferentemente CPC 40<sup>26</sup>)
- 2 % m/m retardador de fraguado / superfluidificante (Protex Ret)

---

<sup>25</sup> Placas de elementos combustibles MTR, producidos en ECRI (Planta de fabricación de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación – CAC)

<sup>26</sup> Ver Nota al pie 17

Como puede observarse, la cantidad de Aluminio –y probablemente de sílice – en el residuo incrementan la relación agua /cemento a más del doble de la proporción habitual en pastas normalizadas (de 0,5 a 1,6). Se considera que esto se debe a la reducción de la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, debido a la formación de geles durante la neutralización,

Durante la puesta en marcha de la PPCC, se inmovilizaron 190 Kg de residuo radiactivo líquido ácido con esta formulación, distribuidos en 3 tambores de 200 litros. Previendo la mayor viscosidad y adherencia de la pasta obtenida con esta formulación, se reemplazaron los mezcladores originales de la BEBA, por una paleta construida en el AGE. Se estima que, una vez preparados los tres tambores con residuos inmovilizados, quedaron adheridos a la paleta entre 5 Kg y 7 Kg de mezcla. Por tratarse de residuos que contienen radioisótopos de Uranio (y su progenie), no se detectó un incremento en las dosis por exposición externa durante la práctica. Una vez generados los tres tambores con residuos inmovilizados con esta formulación, la paleta fue descartada. El material adherido a la paleta, dificultaba el mezclado y no pudo ser retirado por vibración. Las proporciones de kilos Aluminio y gramos de Uranio por cada 100 Kg de cemento, en los 3 tambores elaborados durante la puesta en marcha de la PPCC con la formulación propuesta, estuvieron en los rangos de 1,2 a 1,8 y 5 a 11, respectivamente.

Durante la puesta en marcha de la PPCC, se tomaron muestras para evaluar la lixiviación de radioisótopos, en los residuos generados en el LTA, inmovilizados en Cemento Portland. La metodología de ensayo utilizada, fue la empleada por ENRESA, para verificar lo establecido en los criterios de aceptación de residuos a El Cabril. En los ensayos con residuos inmovilizados del LTA, se cumplió con los requisitos descriptos en el **Anexo 3**.

Al inmovilizar con Cemento Portland los residuos del LTA, con la formulación citada, la cantidad de residuos a almacenar, se modificaría como se describe en la **Tabla 10**.

	<b>Residuos radiactivos líquidos ácidos, con Aluminio (generados en el LTA)</b>	
	Sin inmovilizar	Inmovilizados en Cemento Portland
<b>Peso residuo radiactivo</b>	1,5 t	6 t
<b>Peso del bulto (contenedor + residuo) (*)</b>	80 Kg (20 Kg de contenedor + 60 Kg de residuo radiactivo líquido)	350 Kg (50 Kg de contenedor + 300 Kg residuo cementado: 78 Kg de residuo + 90 Kg neutralizante + 126 Kg cemento + 6 Kg de retardador de fraguado)
<b>Cantidad bultos</b>	25	19
<b>Peso bultos</b>	2 t	7 t
<b>Volumen bultos</b>	1,25 m <sup>3</sup>	4 m <sup>3</sup>
<b>Generación anual máxima</b>	100 litros / año (2 garrafas /año)	2 tambores de 200 litros / año (**)

Tabla 10: Inmovilización en Cemento Portland de residuos ácidos , con Aluminio - Valores anteriores y posteriores al procesamiento

(\*) Valor promedio, calculado con datos cargados en el STORER

(\*\*) Considerando tasa de generación de 0,1 t/a (Ver **Figura 5**)

Utilizando la formulación mencionada, considerando 300 kg de mezcla por tambor de 200 litros y con las concentraciones de actividad de descritas en la **Figura 5**, los residuos del LTA inmovilizados en Cemento Portland, cumplirían con los máximos de concentraciones de actividad de:

- los residuos cementados homogéneos Nivel 1 de El Cabril,

- lo requerido a los residuos cementados en la Federación Rusa y
- los residuos Clase A de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica, referida a repositorios cercanos a la superficie.

Se destaca que la cantidad de retardador de fraguado / superfluidificante utilizada, aunque 6 veces mayor a la cantidad recomendada por el proveedor (0,7 % del peso de cemento), cumple con los requerimientos de aceptación de bultos de este tipo a El Cabril. El retardador de fraguado es un líquido orgánico. La cantidad máxima de líquidos orgánicos en residuos homogéneos inmovilizados en Cemento Portland, establecida en los criterios de aceptación de El Cabril, es de 3 % v/v (6 litros en 200 litros).

#### **d) Residuos ácidos, sin Aluminio**

Como se mencionó anteriormente, la experiencia adquirida en el desarrollo de formulaciones para inmovilizar residuos radiactivos, indica que los residuos ácidos deben ser neutralizados previamente a mezclarse con Cemento Portland. La neutralización puede realizarse empleando otro residuo radiactivo (como se hizo con residuos simulados, en la etapa de desarrollo) o soluciones de Hidróxido de Sodio de la concentración requerida (como ocurrió durante la puesta en marcha de la PPCC).

Los principales generadores de esta categoría de residuos líquidos acuosos, identificados en el presente trabajo, son el LFR, la Facilidad Alfa, el LUE y los laboratorios de la ARN.

La formulación propuesta para inmovilizar estos residuos, se compone de:

- 17 % m/m residuo
- 16 % m/m neutralizante (solución de hidróxido de sodio)
- 67 % m/m cemento (preferentemente CPC 40<sup>27</sup>)

Asumiendo que las restantes 6,5 toneladas de residuos radiactivos líquidos acuosos almacenados en la PEMB, son residuos ácidos sin Aluminio (tienen

---

<sup>27</sup> Ver Nota 17

concentraciones menores a 400 pm), al inmovilizarlos con Cemento Portland resultarían las condiciones detalladas en la **Tabla 11**.

	<b>Residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos (de LFR, Facilidad Alfa, LUE, Laboratorios....)</b>	
	Sin inmovilizar	Inmovilizados en Cemento Portland
<b>Peso residuo radiactivo</b>	0,15 t (LFR) 6,35 t (Otros)	1 + 38 = 39 t
<b>Peso del bulto (contenedor + residuo) (*)</b>	73 Kg (20 Kg contenedor + 53 Kg residuo)	350 Kg (50 Kg contenedor + 300 Kg residuo cementado: 51 kg residuo+ 49 Kg solución neutralizante + 200 Kg cemento)
<b>Cantidad bultos</b>	3 + 120 = 123	3 + 125 = 128
<b>Peso bultos</b>	0,2 + 8,8= 9 t	1+ 44 = 45 t
<b>Volumen bultos</b>	0,15 + 6 = 6,15 m <sup>3</sup>	1 + 25 = 26 m <sup>3</sup>
<b>Generación anual máxima</b>	4 garrafas de 50 litros / año	1+ 3 = 4 tambores 200 litros /año (**)

Tabla 11:Inmovilización en Cemento Portland de residuos ácidos, sin Aluminio- Valores anteriores y posteriores al procesamiento

(\*) Valor promedio, calculado con datos cargados en el STORER

(\*\*) Considerando tasa de generación de 0,18 t/a (Ver **Figura 6**)

Los residuos generados en el LFR y los residuos con Plutonio generados en la Facilidad Alfa hasta 1992, inmovilizados con la formulación citada, cumplirían con los requerimientos de aceptación de:

- los residuos cementados homogéneos Nivel 2 de El Cabril y
- los residuos Clase B de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica referida a repositorios cercanos a la superficie.

El resto de los residuos – asumidos como residuos radiactivos líquidos ácidos en este apartado – cumplirían con los requerimientos de máxima concentración de actividad en residuos inmovilizados en Cemento Portland, establecidos para:

- los residuos cementados homogéneos Nivel 1 de El Cabril,
- lo requerido a los residuos cementados en la Federación Rusa y
- los residuos Clase A de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica, referida a repositorios cercanos a la superficie.

Con la mencionada formulación, en la puesta en marcha de la PPCC se inmovilizaron 150 litros de residuos generados en el LFR y en laboratorios de ARN. Los residuos se neutralizaron con soluciones de Hidróxido de Sodio, en una relación residuo neutralizado / Cemento Portland en el rango 0,5 a 0,6, a razón de 300 Kg de residuo inmovilizado por tambor de 200 litros. El ensayo de lixiviación en los residuos inmovilizados de ARN, cumplió el requerimiento de aceptación establecido en El Cabril, para residuos de mayor concentración de actividad.

#### **4.2. Residuos líquidos orgánicos**

Los residuos radiactivos líquidos orgánicos almacenados en la PEMB pueden subdividirse en dos categorías:

- Los residuos generados en CONUAR (emulsiones de aceites y solventes industriales, con Uranio natural o levemente enriquecido).
- Los residuos generados en laboratorios internos y externos a CNEA (solventes y emulsiones de cócteles de centelleo, con H3, xx, xx, Cs 137 y C 14).

Hasta el presente, en el PNGRR no se han realizado ensayos referidos a la posibilidad de inmovilizar en Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos orgánicos generados en CONUAR. La experiencia adquirida en el PNGRR[17], referida al desarrollo de formulaciones para inmovilizar emulsiones de cócteles de centelleo, indica que es posible incorporar hasta un 8 % m /m de estos residuos en Cemento Portland. En los desarrollos - realizados hasta escala

20 litros - este valor solo puede lograrse mezclando los residuos orgánicos, con los actuales residuos radiactivos líquidos alcalinos con Aluminio, generados en la etapa de disolución en la PPR.

A las limitaciones físicas que presenta la inmovilización de residuos líquidos orgánicos en Cemento Portland– los líquidos orgánicos recubren los granos de Cemento Portland, impidiendo la reacción de los mismos con agua y por lo tanto el fraguado - se suman las limitaciones referidas a la durabilidad de los productos resultantes. Es decir, mantener las características mecánicas y de retención de radioisótopos durante el periodo de confinamiento requerido. Por esta razón, a pesar de ser muy reducida la cantidad de líquidos orgánicos que es posible incorporar a una matriz de Cemento Portland (8 % m/m, comparada con 17 a 33 % m/m de los residuos acuosos), podría ser disminuida hasta un valor aún menor, por los requerimientos de aceptación de un repositorio. El Cabril, por ejemplo, solo acepta un contenido máximo de 3 % v/v de líquidos orgánicos en los residuos homogéneos inmovilizados en Cemento Portland.

Asumiendo que los residuos orgánicos generados en CONUAR, puedan inmovilizarse con la misma formulación que los cocteles de centelleo, la inmovilización de las **8 toneladas de residuos orgánicos** almacenados en la PEMB, generaría 334 tambores de 200 litros con 300 kg de residuo inmovilizado<sup>28</sup> cada uno.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, en el presente trabajo se desestima la posibilidad de inmovilizar en Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos orgánicos gestionados en el AGE, dado que:

- la proporción de residuo orgánico en la formulación desarrollada en el PNGRR, es la más baja de las analizadas hasta el momento
- la formulación requiere mezclar los residuos orgánicos, con uno de los residuos más concentrados en radioisótopos emisores beta gamma que se gestionan en el AGE (los residuos de la etapa de disolución, de la PPR)<sup>29</sup>.

---

<sup>28</sup> Formulación: 8 % residuo radiactivo líquido orgánico – 38 % residuos actual PPR / etapa disolución – 54 % Cemento Portland CPC 40

<sup>29</sup> El residuo orgánico, hace las veces de retardador de fraguado. Al ser un

- de acuerdo al antecedente de El Cabril, la evaluación de seguridad de un repositorio, puede considerar excesiva la proporción de residuo líquido orgánico en el residuo inmovilizado y, por lo tanto, no permitir su ingreso.
- los residuos radiactivos líquidos orgánicos, contienen menos del 1 % de la actividad almacenada en la PEMB (Ver **Tabla 1**). Los radioisótopos presentes en los residuos radiactivos líquidos orgánicos, que mayor aporte realizan al inventario de la PEMB, son: H3, U 238, y U 234 (Ver **Tabla 3**). El tritio es un emisor beta puro y tiene uno de los coeficientes de dosis (e(50)) más bajos del inventario (Ver **Anexo 5**).

### 4.3 Residuos sólidos húmedos

Como se mencionó en **2.2.3**, los residuos radiactivos sólidos húmedos son sólidos granulados que, por haber sido transferidos suspendidos en agua a los contenedores donde se encuentran, conservan durante el almacenamiento, una parte de la misma. En los Procedimientos Operativos del AGE, se clasifica a los residuos radiactivos sólidos húmedos, en resinas de intercambio iónico, barros y sedimentos.

En el PNGRR, se desarrolló una formulación para inmovilizar resinas de intercambio iónico, considerando las condiciones de operación de la planta de procesamiento de residuos de CNAII[18]. Dicha formulación se compone de:

- 11 % m/m residuo (resina deshidratada a 70 °C hasta peso constante )
- 4 % m/m agua de re hidratación de la resina (mezclada con la resina deshidratada)
- 51 % m/m cemento (CPC 40)

---

residuo, no puede asumirse composición constante para el residuo. Por lo tanto, los riesgos de fraguado rápido durante el proceso, serían mayores respecto de cuando se utiliza un retardador de fraguado comercial. Es decir, se incrementaría la posibilidad de tener que realizar intervenciones durante el proceso (Ej. porque el fraguado inicia durante el mezclado). Estas intervenciones, incrementarían las dosis que reciben los trabajadores, como consecuencia de la operación de la planta de procesamiento de residuos radiactivos.

- 34 % m/m agua de amasado (para mezclar con el cemento)

Con estas proporciones y orden de agregado, se realizaron ensayos hasta escala 20 litros.

Los ensayos a escala 200 litros, se realizaron con resinas, escurridas (NO secadas a 70°C, hasta peso constante), empleando un dosificador y una mezcladora desarrolladas en el AGE (Ver **Figura 18**). Las resinas escurridas, contienen 60 % agua y 40 % resina seca (secadas a 70°C, hasta masa constante).

En los ensayos a escala 200 litros, se evaluaron tres formas diferentes de mezclado, en tambores de 200 litros:

- a) Cemento + Agua + Resina - Mezclado
- b) Cemento + Agua – Mezclado  
Pasta de cemento + Resina – Mezclado
- c) Resina + Pasta de cemento (preparada en mezcladora de trompo comercial) – Mezclado

En todos los casos, se realizaron mezclas de 300 kg, que ocuparon el 80 % del volumen útil del tambor. La resistencia a la compresión de la pasta preparada de acuerdo a **c**), luego de 30 días de inmersión en agua, fue de 4 MPa. A pesar de ser un valor inferior a los 10 MPa, fijado como objetivo (Ver **Tabla 5**), en los ensayos de caída desde 4 m, se dispersó menos del 1 % del producto (Ver **Figura 22**). Este último resultado, se obtuvo en los tres residuos inmovilizados.



**Figura 22: Ensayo de caída de resinas immobilizadas en Cemento Portland**

Se destaca que, de requerirse de valores de resistencia a la compresión mayores a 4 MPa, esto podría lograrse aumentando la velocidad de giro del mezclador (Ver **Tabla 4**). Es decir, mejorando la dispersión del Cemento Portland en el agua.

El resultado de inmovilizar las resinas gestionadas en el AGE, modificaría el volumen y masa a almacenar, de acuerdo a lo descrito en la **Tabla 12**.

	<b>Residuos radiactivos sólidos húmedos – Resinas RA3</b>	
	Sin inmovilizar	Inmovilizados en Cemento Portland
<b>Peso residuo radiactivo</b>	26 t	173t
<b>Peso del bulto (contenedor + residuo) (*)</b>	430 Kg (330Kg de residuo radiactivo* + 100 Kg contenedor)	350 Kg (50 Kg de contenedor + 300 Kg residuo cementado: 45Kg de residuo + 150 Kg cemento +105 Kg agua)
<b>Cantidad bultos</b>	79	578
<b>Peso bultos</b>	34 t	202t
<b>Volumen bultos</b>	32 m <sup>3</sup>	116m <sup>3</sup>
<b>Generación anual máxima</b>	2 tambores 400 litros /año	11 tambores 200 litros /año (**)

Tabla 12: Inmovilización en Cemento Portland de residuos radiactivos sólidos húmedos / Resinas RA3 – Valores anteriores y posteriores al procesamiento

(\*) Valor promedio, calculado con datos cargados en el STORER

(\*\*) Considerando tasa de generación de 0,5 t/a (Ver **Figura 12**)

Las resinas generadas por el RA3 como residuo radiactivo sólido húmedo, inmovilizadas con la formulación mencionada, cumplirían con los máximos de concentraciones de actividad establecidos para:

- los residuos cementados homogéneos Nivel 1 de El Cabril,
- lo requerido a los residuos cementados en la Federación Rusa y
- los residuos Clase A de la normativa de Estados Unidos de Norteamérica, referida a repositorios cercanos a la superficie.

Las resinas descartadas en el RA3, contienen el 1 % de la actividad almacenada en la PEMB. Los principales radioisótopos que aportan actualmente al inventario de la PEMB, son el Co 60 y el Cs 137. Los valores de

constante gamma y los coeficientes de dosis de estos dos radioisótopos, se encuentran entre los cinco valores más altos asociados al inventario de emisores beta gamma de la PEMB (Ver **Anexo 5**). Por esta razón, en el presente trabajo, se continuará con la evaluación de la inmovilización en Cemento Portland de resinas, a pesar del incremento de volumen que esto significa.

No se cuenta con formulaciones para inmovilizar los barros y sedimentos actualmente almacenados en la PEMB (8,3 toneladas, en total), por lo que no serán analizados en el presente trabajo.

## 5. Evaluación de resultados

En el apartado anterior se describieron las formulaciones disponibles en el PNGRR, para inmovilizar parte de los residuos radiactivos almacenados por el PNGRR en el CAE. Dichas formulaciones cumplirían con requerimientos de calidad internacionales, además de satisfacer lo requerido para las condiciones de proceso locales. Se analizará a continuación la contribución que tendría la inmovilización en la reducción del riesgo radiológico de la PEMB y la relevancia que tendría el incremento de volumen de los residuos a almacenar, en el contexto nacional actual. Para esto, en la **Tabla 13** se ordenaron los residuos radiactivos analizados, por generador y en orden decreciente de su aporte al inventario de la PTAMB (Ver **Figura 8** y **Tabla 3**). Se reúnen además, los valores estimados de volumen y peso de bultos con residuos inmovilizados en Cemento Portland (Ver **Tablas 8, 9, 10, 11 y 12**). Se agregaron a la **Tabla 13**:

- Los residuos para los cuales no se cuenta aún con una formulación para su inmovilización en Cemento Portland (barros y sedimentos).
- Los residuos para los cuales esta opción se desestimó en el presente trabajo (residuos radiactivos líquidos orgánicos).

De la evaluación de los datos volcados en la **Tabla 13**, resulta que:

- Con las formulaciones disponibles, podría ser inmovilizado más del 99 % de la actividad almacenada en la PEMB, asociada a residuos líquidos y sólidos húmedos. Estos dos residuos contienen el 77 % del inventario radiológico de la PEMB.
- Al inmovilizar en Cemento Portland, la masa y el volumen de los bultos a almacenar, se incrementaría en factores de 2,7 y 2,5 respectivamente (Valor del conjunto).
- La tasa de generación anual de tambores con residuos inmovilizados en Cemento Portland, sería inferior a la tasa de generación de tambores con residuos compactados (40 tambores /año, valor promedio – Ver **Anexo 2**).
- Los residuos donde se produce el mayor incremento de volumen y masa de residuo a almacenar, son las resinas, y los residuos radiactivos líquidos acuosos ácidos, sin Aluminio.

- La inmovilización en Cemento Portland, generaría **196 m<sup>3</sup>** de bultos con residuos inmovilizados (**977 tambores** de 200 litros).

Actualmente, en el CAE, el PNGRR almacena **1.118 m<sup>3</sup> de residuos radiactivos**[8]. En el resto de las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos en la República Argentina, no operadas por el PNGRR, se almacenan **4.390 m<sup>3</sup> de residuos radiactivos**. Por lo tanto, el volumen resultante de inmovilizar en Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos acuosos y las resinas agotadas almacenadas en la PEMB, representa menos del 20 % del volumen de residuos actualmente almacenados en el CAE y menos del 5 % del volumen almacenado en el resto del país (excluidos los residuos de minería del Uranio).

Los costos de materia prima asociados a la inmovilización de los residuos mencionados, con Cemento Portland, utilizando las formulaciones detalladas y en las condiciones descriptas, se muestran en la **Tabla 14**.

PEMB - Residuos líquidos y sólidos húmedos	Generador	Actividad (10 GBq)	Residuo sin inmovilizar			Residuo inmovilizado en Cemento Portland			
			Masa residuo (t)	Peso bulto (t)	Volumen bulto (m3)	Peso bulto (t)	Volumen bulto (m3)	Bultos 200 litros	Bultos / año
Líquidos acuosos, alcalinos, con Aluminio	Mo 99	<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>	10	71	28	67	33	167	9
Líquidos acuosos, alcalinos, sin Aluminio			8,2	11,8	11,8	28,7	16,4	82	4
Líquidos acuosos, ácidos, sin Aluminio	LFR		0,15	0,2	0,15	1	1	3	2
Resinas	RA3		26	34	32	202	116	578	11
Líquidos acuosos, ácidos, sin Aluminio	LUE, Facilidad Alfa, otros		6,35	8,8	6	44	25	125	3

**Tabla 13: Características actuales y posteriores a la inmovilización en Cemento Portland, de los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos almacenados en la PEMB**

PEMB - Residuos líquidos y sólidos húmedos	Generador	Actividad (10 GBq)	Residuo sin inmovilizar			Residuo inmovilizado en Cemento Portland			
			Masa residuo (t)	Peso bulto (t)	Volumen residuo (m3)	Peso bulto (t)	Volumen bulto (m3)	Bultos 200 litros	Bultos / año
Barros	CONUAR	INFORMACIÓN CONFIDENCIAL	8						
Líquidos Orgánicos	CONUAR y Laboratorios		8						
Sedimentos	Dioxitek / PPR		0,3						
Líquidos acuosos, ácidos, con Aluminio	LTA		1,5	<b>2</b>	<b>1,25</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	19	2
Líquidos acuosos, básicos, sin Aluminio	I 131		0,3	<b>0,48</b>	<b>0,4</b>	<b>1,05</b>	<b>0,6</b>	3	1
<b>Suma</b>			<b>69</b>	<b>128</b>	<b>80</b>	<b>351</b>	<b>196</b>	<b>977</b>	<b>32</b>

**Tabla 13 (Cont.): Características actuales y posteriores a la inmovilización en Cemento Portland, de los residuos radiactivos líquidos y sólidos húmedos almacenados en la PEMB(Continuación)**

Componente	Costo por Kg (dólares /Kg) (*)	Costo de materia prima, por tambor de residuo inmovilizado (dólares)				
		Residuos PPR, disolución	Residuos PPR, purificación + I 131	LTA	Residuos LFR, Facilidad Alfa, ....	Resinas RA3
<b>Cemento</b>	0,21	42	42	26	42	32
<b>Vermiculita</b>	3,16	32				
<b>Bentonita</b>	0,53	5				
<b>Retardador de fraguado</b>	3,16			16		
<b>Solución NaOH (3 M ~ 11% m/m)</b>	0,64			57	32	
<b>Total tambor 200 litros inmovilizado (dólares)</b>		79	42	99	74	32
<b>Dólares / kg residuo a inmovilizar</b>		1,32	0,42	1,24	1,48	0,63
<b>Tasa generación anual de residuo (Kg /a)</b>		500	400	100	180	500
<b>Dólares / año</b>		658	168	124	266	316
<b>Residuos almacenados hasta 2022 (Kg)</b>		10.000	8.500	1.500	6.500	26.000
<b>Costo de inmovilización del total almacenado (dólares)</b>		13.158	3.579	1.860	9.620	16.421

Tabla 14: Costos de materia prima asociados a la inmovilización de residuos con Cemento Portland

(\*) Precios minoristas – Cotizaciones al 14/12/ 2022

## CONCLUSIONES

Las resinas de intercambio iónico agotadas descartadas por el RA3 y los residuos radiactivos líquidos acuosos, actualmente almacenados en la PEMB, pueden ser inmovilizados con Cemento Portland, utilizando las formulaciones desarrolladas en el PNGRR. Los residuos mencionados, contienen el 77 % del inventario radiológico y el 47 % de la masa de residuos almacenada en la PEMB. Estos dos residuos, contienen además, los radioisótopos de mayor constante gamma o e(50)del inventario de la PEMB.

Las formulaciones citadas en el presente trabajo, permitirían obtener residuos inmovilizados, que cumplen con los máximos de concentración de actividad aceptados en el repositorio de El Cabril (España) y los requerimientos generales, de repositorios cercanos a la superficie de Estados Unidos de Norteamérica. El 80 % de la masa de bultos con residuos inmovilizados, cumpliría con los valores máximos de concentración de actividad, requeridos para residuos inmovilizados en Cemento Portland en la Federación Rusa. La excepción a esto último, serían los productos resultantes de la inmovilización en Cemento Portland, de los residuos generados en la PPR (etapa de disolución), de los residuos generados en el LFR y de los residuos con xx (residuos generados en la Facilidad Alfa, con anterioridad a 1992).

Los residuos generados en la PPR/etapa de disolución y los residuos generados en el LFR, inmovilizados en Cemento Portland con la formulación presentada, serían Bultos Nivel 2, de acuerdo a la clasificación de El Cabril (España). Los requerimientos de calidad del residuo inmovilizado, solicitados a Bultos Nivel 2, han sido parcialmente evaluados en las formulaciones propuestas. No se han realizado ensayos de resistencia a la tracción indirecta, de resistencia a los ciclos térmicos y lixiviación. Los restantes residuos inmovilizados - el 80 % de la masa de bultos con residuos inmovilizados en Cemento Portland - serían bultos Nivel 1, de acuerdo a la clasificación de El Cabril (España). Las formulaciones evaluadas en el presente trabajo para estos residuos, cumplirían con los requisitos de calidad solicitados por El Cabril (Resistencia a la compresión mayor 3 MPa). Todos los residuos inmovilizados

cumplirían con los requerimientos generales de calidad, solicitados en repositorios cercanos a la superficie, en Estados Unidos de Norteamérica.

En algunos residuos, resta completar el esquema de evaluación de las formulaciones propuestas para su inmovilización en Cemento Portland, en las escalas de 20 y 200 litros. Para la realización de los ensayos a escala 200 litros, se sugiere utilizar la mezcladora desarrollada en el PNGRR, modificando su diseño. Teniendo en cuenta la experiencia adquirida durante la puesta en marcha de la PPCC con la mezcladora BEBA Mischtechnik, incrementando la velocidad de giro de la paleta, se mejoraría la dispersión del Cemento Portland en el agua.

Al inmovilizar en Cemento Portland los residuos radiactivos líquidos acuosos y las resinas almacenadas en la PEMB, el volumen y la masa de bultos de residuos radiactivos a almacenar, se triplicaría. El volumen resultante – 196 m<sup>3</sup> – es menos del 20 % del volumen actual de residuos - sólidos y líquidos - almacenados por el PNGRR en el CAE (1.118 m<sup>3</sup>). Los 196 m<sup>3</sup> de bultos con residuos radiactivos inmovilizados en Cemento Portland, serían menos del 5 % del volumen de residuos actualmente almacenados en el resto del país (4.390 m<sup>3</sup>, no incluidos los residuos radiactivos generados en la minería del Uranio y los residuos radiactivos almacenados por el PNGRR, antes mencionados).

Con respecto a las necesidades operativas y de almacenamiento, la generación anual de tambores de 200 litros con residuos inmovilizados en Cemento Portland, sería de 32 tambores /año (valor máximo). Considerando que el valor promedio de generación de tambores con residuos prensados durante 2014 -2019 en el AGE, fue de 40 tambores /año, la mayor demanda de espacio de almacenamiento en el AGE, continuaría siendo para los tambores con residuos prensados.

Los costos de los materiales necesarios para proceder a la inmovilización en Cemento Portland de los residuos radiactivos líquidos acuosos y las resinas almacenadas en la PEMB, se ubican en el rango de 0,4 a 1,5 dólares / Kg de residuo a inmovilizar.

Se encuentra pendiente, la evaluación de la tecnología con la cual procesar los barros, los residuos radiactivos líquidos orgánicos y los sedimentos.

En conjunto, estos tres residuos constituyen el 15 % de la masa y menos del 1 % de la actividad asociada a los residuos almacenados en la PEMB. Los radioisótopos mayoritarios en estos tres residuos, son Tritio y los isótopos naturales del Uranio. La formulación propuesta para la inmovilización de residuos líquidos orgánicos fue desestimada por el riesgo de fraguado rápido, asociado a la inmovilización conjunta de los residuos orgánicos con uno de los residuos de mayor concentración de actividad de radioisótopos emisores beta gamma (residuo de PPR, etapa de disolución). De ocurrir el inicio de fraguado durante el tiempo asignado al mezclado, se incrementarían las dosis durante la etapa de operación de la planta de procesamiento de residuos, al ser necesarias tareas de reacondicionamiento (o desmantelamiento) del cabezal mezclador. No se cuenta con desarrollos referidos a la inmovilización de barros y sedimentos.

Por lo anteriormente mencionado, se considera que la inmovilización con Cemento Portland es una alternativa tecnológica y económicamente viable, para mejorar la seguridad radiológica en la PEMB, cumplir con la normativa vigente y no legar a generaciones futuras, el acondicionamiento de los residuos radiactivos, previendo su futura disposición en un repositorio cercano a la superficie.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

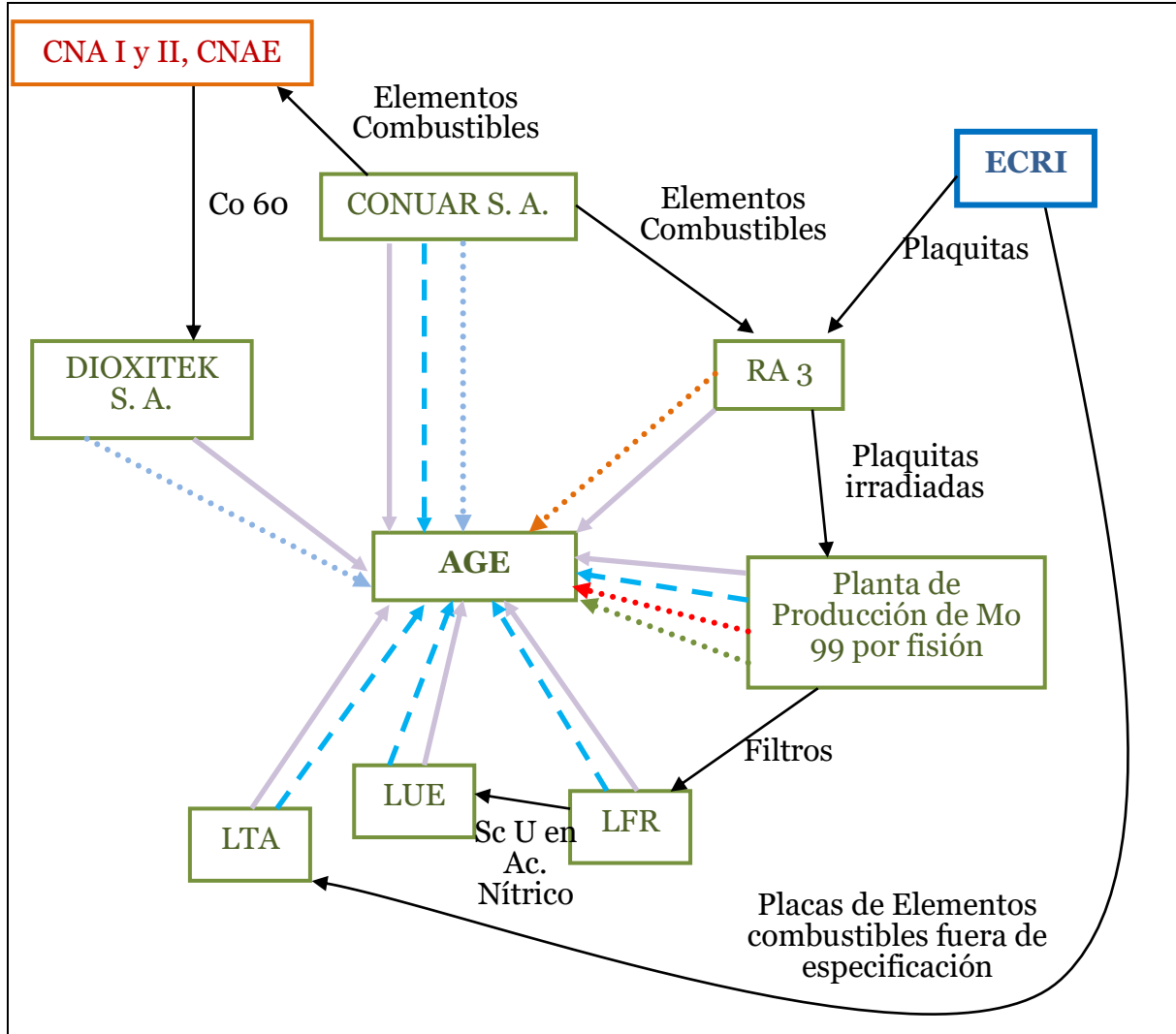
- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica. (2007). *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA – Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica.*
- [2] United States of America - Department of Energy. (2020). *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, National Report for the Seventh Review Meeting.* United States of America..
- [3] Ojovan, M., & Lee, W. (2005). *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation.* Elsevier
- [4] República francesa. (2020). *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, National Report for the Seventh Review Meeting.*
- [5] Riggare, P., & Johansson, C. (2001). *Low and intermediate level waste in SFR-1 - Reference Waste Inventory - R-01-03.*Suecia.
- [6] República Argentina. (2003). *Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos – Primer informe nacional.*
- [7] República Argentina. (2014). *Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos – Quinto informe nacional.*
- [8] República Argentina. (2020). *Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos – Séptimo informe nacional.*
- [9] Autoridad Regulatoria Nuclear. (2016). *Gestión de residuos radiactivos, AR 10.12.1., Rev.3.*República Argentina.
- [10] Autoridad Regulatoria Nuclear. (2014). *Almacenamiento de residuos radiactivos, Guía AR 13, Rev.0.,* República Argentina.

- [11] República Argentina . (1998). Ley N° 25.018 - Régimen de gestión de residuos radiactivos.
- [12] PNGRR - CNEA. (2012). *Minimización y segregación de los residuos radiactivos en el ámbito de su generación -PO-SNA\_PNGRRC-006 019-R – Rev. 3.* República Argentina.
- [13] D’Annunzio, V. (2013). *Tratamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos líquidos, Informe de beca A1-P* . República Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [14] Devida, C., Bouza, E., & Gil, D. (s.f.). *Caracterización de residuos líquidos radiactivos provenientes de la producción de Mo 99 por fisión.* Recuperado el 4 de Julio de 2022, de <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1999/PDF/CG05AJ.PDF>
- [15] Gerencia Producción de Radioisótopos - CNEA. (2017). *Respuesta a Requerimiento PNGRR / PR / Octubre 2017.* Ezeiza.
- [16] A. Arva, S. Marabini, J. L. Varani. (2011). Immobilization of Mo99 Production Process Simulated Non-radioactive Liquid Waste by Cementation, Materials Research Society (MRS) Meeting. Buenos Aires, Argentina.
- [17] D’Annunzio, V. (2014). *Tratamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos líquidos , Informe de beca A1-P.* Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [18] D’Annunzio, V. (2015). *Tratamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos líquidos, Informe de beca A1-P* .República Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [19] Carpentiero, R., Vienvenu, P., & de la Huebra, A. (2004). *Leaching methods for conditioned radioactive waste.*Madrid: CIEMAT.
- [20] Rosales, N., Morales, P., & Contino, G. (2016). *Sistema remoto de transferencia de resinas activas.* Reunión de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (AATN). Buenos Aires, Argentina
- [21] D'Annunzio, V., Marabini, S., Arva, A. (2016). *Cementado de residuos radiactivos líquidos.* Revista CNEA , pg 15-22.

- [22] ENRESA El Cabril (2007), *Requerimientos de Aceptacion de Bultos primarios*, Capacitaciones al Personal del PNGRR 2009-2016
- [23] United States of America, Nuclear Regulatory Commission. (s.f.). *NRC*. Recuperado el 1 de Agosto de 2020, de <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part61/part61.0055.html>
- [24] United States of América, Nuclear Regulatory Commission. (s.f.). *NRC*. Recuperado el 1 de Agosto de 2022, de <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part061/part061-0056.html>
- [25] Laboratoire National Henri Becquerel. (s.f.). *lnhb*. Recuperado el 15 de Agosto de 2022, de <http://www.lnhb.fr/Laraweb/index.php>
- [26] Martin, J. (2006). *Physics for radiation protection*. Weinheim: Wiley – VcH
- [27] Autoridad Regulatoria Nuclear. (2011). *Niveles Genéricos de dispensa - Guia AR 8, Rev o*. República Argentina: Autoridad Regulatoria Nuclear.
- [28] International Commission on Radiological Protection. (17 de Marzo de 2020). ICRP's Data Viewer.

## **ANEXOS**

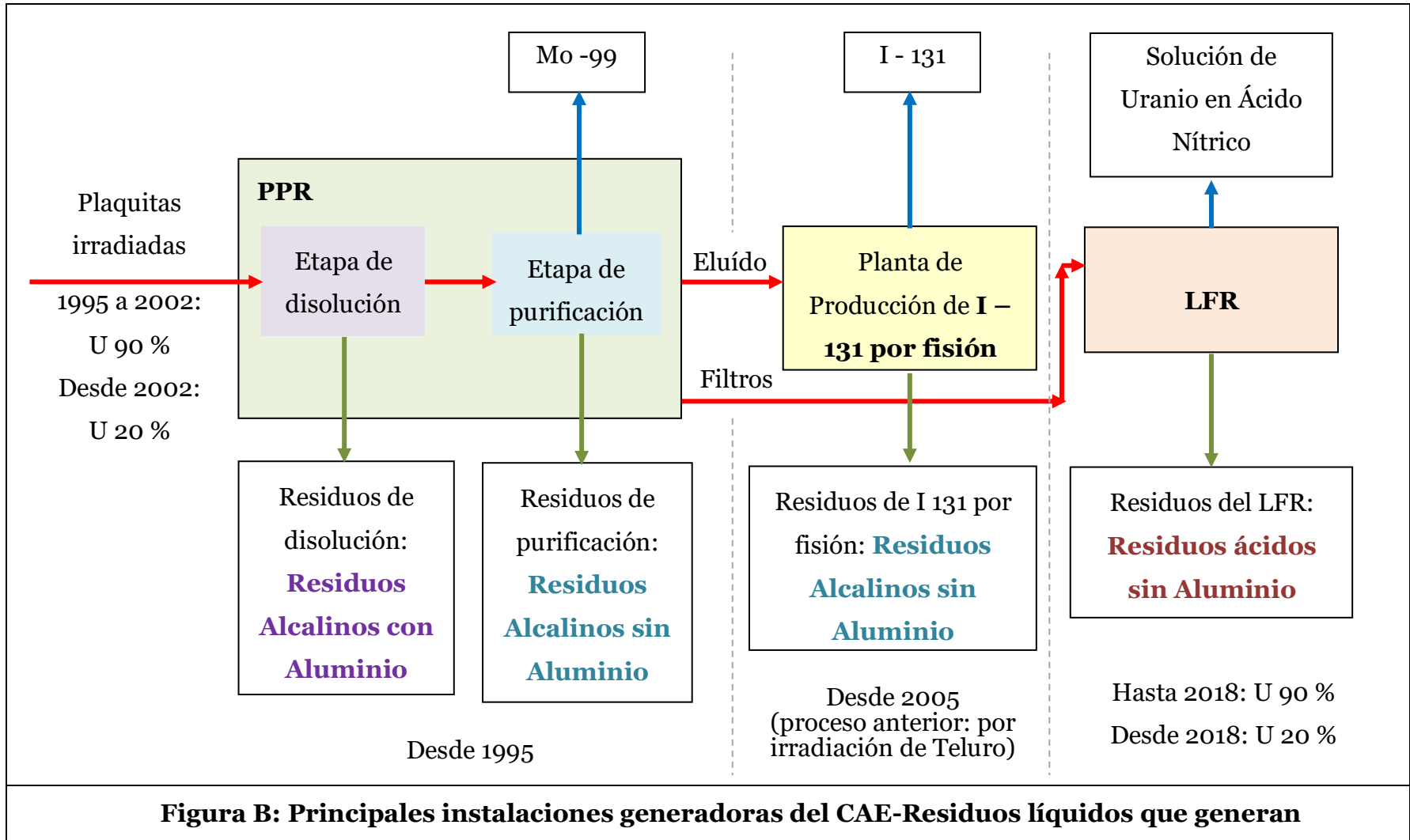
**Anexo 1 - Residuos radiactivos almacenados en el AGE -  
Principales instalaciones generadoras y clases de residuos**



**Figura A: Principales instalaciones generadoras de residuos:  
interrelación y residuos que generan**

**REFERENCIAS:**

	Residuos Radiactivos Sólidos Compactables		Residuos Radiactivos Sólidos No Compactables - Generados en Celda
	Residuos Radiactivos Sólidos Húmedos - Resinas		Residuos Radiactivos Líquidos
	Residuos Radiactivos Sólidos Estructurales - Filtros y Prefiltros de ventilación		



**Figura B: Principales instalaciones generadoras del CAE-Residuos líquidos que generan**

## **Anexo 2 - Residuos radiactivos sólidos compactables – Características**

El mayor aporte al volumen de los residuos radiactivos que anualmente se reciben en el AGE, corresponde a los residuos sólidos compactables. En el AGE, se reciben 2.600 Kg / año (promedio 2014-2019) de residuos radiactivos sólidos para prensar. Estos residuos están compuestos principalmente por guantes descartables, papeles, barbijos, cofias, trapos, cubre zapatos y mamelucos descartables, contenidos en bolsas de polietileno transparente de 200 micrones de espesor, de 20 ó 200 litros.

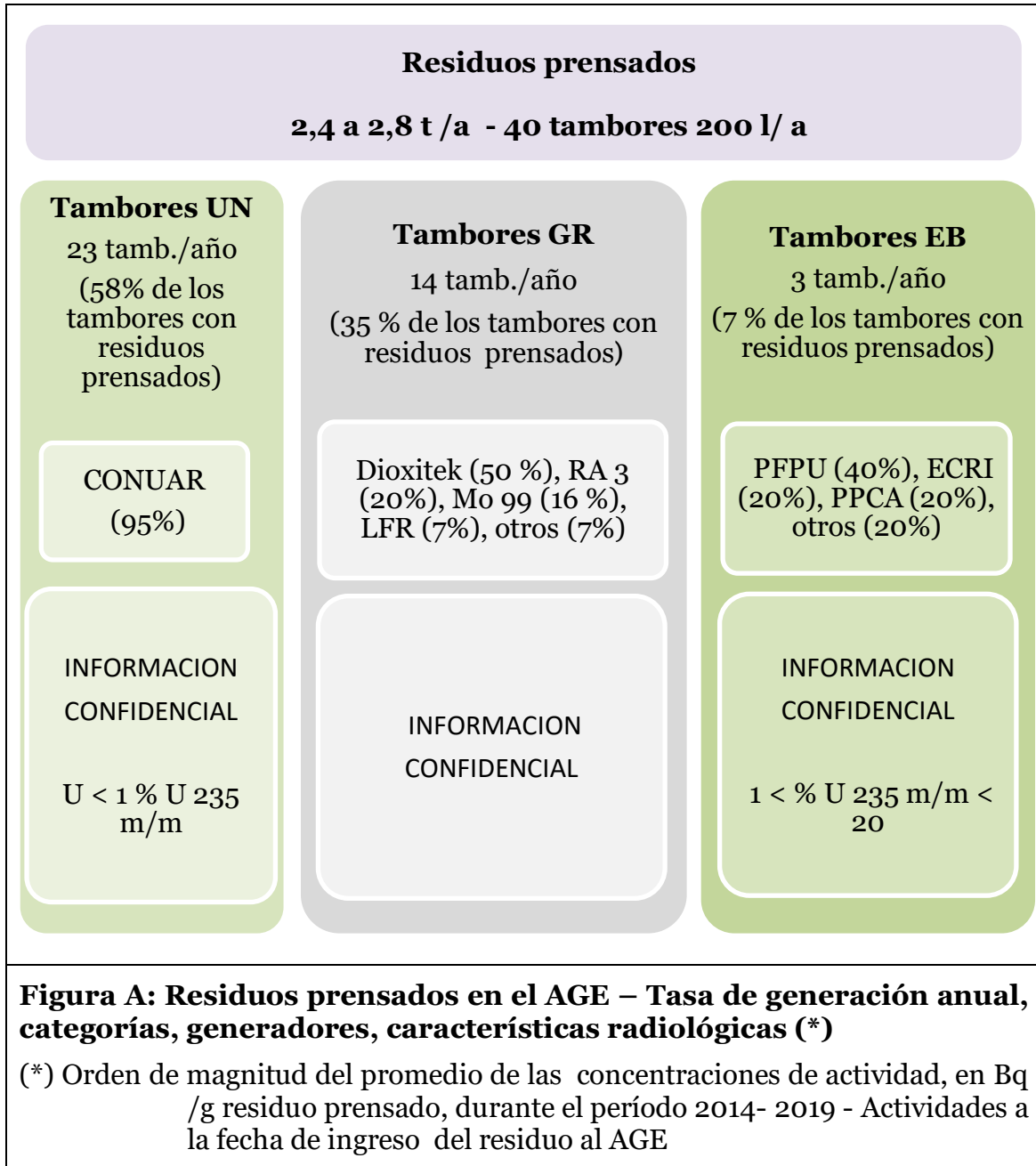
Una vez en el AGE, los residuos compactables se colocan en tambores de acero al carbono de 200 litros y se llevan a la PPCC, compactándolos en una prensa de eje vertical, que ejerce una presión del orden del Kg/cm<sup>2</sup> sobre ellos. La reducción de volumen que se logra, es – en promedio – del 50 %.

La segregación de los residuos sólidos compactables en las instalaciones generadoras y su posterior prensado, disminuye los costos de gestión, al reducir el espacio de almacenamiento necesario, sin agregar costos de construcción, mantenimiento y operación, de instalaciones más sofisticadas para el procesamiento de residuos radiactivos (Ej incineradores).

El promedio de tambores con residuos prensados generados anualmente, en el período 2014 -2019, fue de 40 tambores / año. Cada uno de estos tambores, contiene entre 50 y 70 Kg de residuos radiactivos. Los tambores con residuos prensados se identifican por color (negro o verde) y código específico (EB, UN y GR), de acuerdo a sus características radiológicas. En todos ellos, la tapa se ajusta al cuerpo, mediante zuncho ajustado con perno. El valor promedio de las características de cada uno de los tres tipos de tambores con residuos prensados, se presentan en la **Figura A**. Los tambores con residuos prensados, se almacenan en el DAIFRR.

Como puede observarse en la **Figura A**, el 58 % de los tambores con residuos prensados, producidos en el AGE, contiene residuos con Uranio con menos de 1 % de U 235 (Tambores UN – Color verde). El 95% de estos bultos se generó con residuos procedentes de CONUAR. De acuerdo a la información que

el generador remite al PNGRR, las actividades de U 234 y U 238 más frecuentes resultantes en los Tambores UN, son del orden de XX Bq/tambor y del orden de XX Bq/tambor, para U 235.



El 35 % de los tambores con residuos prensados entre 2014 y 2019, contiene productos de activación ó fisión, emisores gamma. Se denominan Tambores GR, son de color negro y contienen en su mayoría Co 60 (XX Bq/

tambor <sup>30</sup> –valor más frecuente), Cs 137 (XX Bq/ tambor – valor más frecuente) y/ó Ce/Pr 144 (XX Bq/ tambor –valor más frecuente). En estos residuos, los generadores informan además Sr/Y 90, Eu 152 y Am 241, en concentraciones menores y menos frecuentes. Los principales generadores de residuos acondicionados en tambores GR, entre 2014 y 2019, fueron DIOXITEK (CAE), el reactor RA3 y la planta de producción de Mo-99.

Los restantes tambores con residuos prensados, contienen Uranio con enriquecimiento en U 235 superior al 1%. Estos residuos se producen en su mayoría en instalaciones del CAC (PFPU, ECRI, Facilidad Alfa,) y en menor cantidad, en el LUE (CAE). Contienen U 234 (XX Bq/ tambor, orden de magnitud del promedio de concentraciones de actividad), U 235 y U 238 (XX y XX Bq/ tambor, respectivamente). Estos tambores son de color verde y se corresponden con la identificación EB.

---

<sup>30</sup>Actividad a la fecha de generación del residuo.

**Anexo 3 - Requerimientos de aceptación de repositorios  
cercaos a la superficie y de residuos inmovilizados en Cemento  
Portland**

**A) España – Repositorio “El Cabril” – Clasificación y criterios  
de aceptación de residuos inmovilizados en Cemento Portland**

Isótopo	Bultos Nivel 2	Bultos Nivel 1 (*)
	Actividad (Bq / tambor)	Actividad (Bq / tambor)
H 3	<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>	
C 14		
Ni 59		
Ni 63		
Co 60		
Sr 90		
Nb 94		
Tc 99		
I 129		
Cs 137		
Alfa total (a 300 años)		
Beta gamma total		

**Tabla A: Máxima actividad permitida, para residuos radiactivos inmovilizados con cemento Portland, en tambores de 200 litros, homogéneos [22]**

(\*) No se incluyeron los radioisótopos que no tienen un límite superior para bultos Nivel 2

<b>Ensayo</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>		
Resistencia a la compresión	> 3 MPa	> 10 MPa		
Resistencia a la compresión post inmersión (7 días en agua)	> 2,2 MPa	> 3 MPa		
Resistencia a la tracción indirecta	---	> 1 MPa		
Resistencia a la compresión post 5 ciclos térmicos entre 5 y -20°C y 5 ciclos térmicos entre 5 y 40°C	---	> 80 % m/m del valor de resistencia a la compresión		
Velocidad de Lixiviación Media Acumulada (a > 365 días, considerando solo los datos obtenidos durante la fase estacionaria del ensayo)	---	Radioisótopos	Concentración de actividad (MBq/Kg)	Límite (cm / día)
		Beta Gamma (excepto H3)	<i>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</i>	
		Beta Gamma (excepto H3)		
		Alfa		
		H 3		
<b>Tabla B: Ensayos y valores exigidos en residuos radiactivos inmovilizados con Cemento Portland, en tambores de 200 litros, homogéneos[22]</b>				

**B) Federación Rusa – Criterios de aceptación de residuos inmovilizados en cemento**

<b>Radioisótopos</b>	<b>Restricción (Bq/Kg residuo inmovilizado)</b>
Beta / Gamma total	< 3,7 E+07
Alfa total (a 300 años)	< 3,7 E +04

**Tabla A: Criterios de aceptación de residuos radiactivos cementados / Restricciones a las concentraciones de actividad[3]**

<b>Ensayo</b>	<b>Restricción</b>
Tasa de lixiviación para Sr 90 y Cs 137	< 1 E-03 g / (cm <sup>2</sup> día)
Resistencia a la compresión	> 5 MPa
Resistencia a la compresión: - post irradiación (1 MGy) - post 30 ciclos térmicos (-40°C a 40°C) - post inmersión (90 días en agua)	> 5 MPa

**Tabla B: Criterios de aceptación de residuos radiactivos cementados / Ensayos y valores exigidos[3]**

**C) Estados Unidos de Norteamérica – Clasificación y criterios generales de aceptación para repositorios cercanos a la superficie**

<b>Clase A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No contienen radioisótopos de la <b>Tabla B</b> ni de la <b>Tabla C</b></li> <li>- Contienen solo radioisótopos de la <b>Tabla B</b>, en cantidades inferiores al 10 % de las concentraciones mencionadas.</li> <li>- No contienen radioisótopos de la <b>Tabla B</b> y las concentraciones de los radioisótopos de la <b>Tabla C</b>, son inferiores a los valores de la <b>Columna 1</b></li> </ul>
<b>Clase B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No contienen radioisótopos de la <b>Tabla B</b> y las concentraciones de los radioisótopos de la <b>Tabla C</b>, son superiores a los valores de la <b>Columna 1</b> e inferiores a los valores de la <b>Columna 2</b></li> </ul>
<b>Clase C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contienen solo radioisótopos de la <b>Tabla B</b>, en cantidades superiores al 10 % de las concentraciones mencionadas, sin superarlas.</li> <li>- No contienen radioisótopos de la <b>Tabla B</b> y las concentraciones de los radioisótopos de la <b>Tabla C</b>, son superiores a los valores de la <b>Columna 2</b>, sin superar los valores de la <b>Columna 3</b></li> </ul>
<p><b>Tabla A: Clasificación de residuos radiactivos, a ser dispuestos en repositorios cercanos a la superficie[23]</b></p>	

<b>Radioisótopo</b>	<b>Concentración</b>
C-14	2,96E+05 Bq / ml
C-14 en metal activado	2,96E+06 Bq / ml
Ni-59 en metal activado	3,03E+07 Bq / ml
Nb-94 en metal activado	7,40E+03 Bq / ml
Tc-99	1,11E+05 Bq / ml
I-129	2,96E+03 Bq / ml
Radioisótopos emisores alfa, transuránidos, con períodos de semi desintegración mayor a 5 años.	3,70E+03 Bq / g
Pu-241	1,30E+05 Bq / g
Cm-242	7,40E+05 Bq / g
<b>Tabla B: Concentraciones de actividad de radioisótopos de período de semi desintegración largo<sup>[23]</sup></b>	

<b>Radioisótopo</b>	<b>Concentración Bq/ml</b>		
	<b>Col. 1</b>	<b>Col. 2</b>	<b>Col. 3</b>
Radioisótopos de periodo de semi desintegración menor a 5 años	2,59E+07	(1)	(1)
H-3	1,48E+06	(1)	(1)
Co-60	2,59E+07	(1)	(1)
Ni-63	1,30E+05	2,59E+06	2,59E+07
Ni-63 en metal activado	1,30E+06	2,59E+07	2,59E+08
Sr-90	1,48E+03	5,55E+06	2,59E+08
Cs-137	3,70E+04	1,63E+06	1,70E+08

**Tabla C: Concentraciones de actividad de radioisótopos de período de semi desintegración largo[23]**

(1) No se establece un límite para estos radioisótopos, en la Clase B o C.

<p><b>Clase A</b></p>	<p>No utilizar cajas de cartón como contenedores</p> <p>Los líquidos deben estar solidificados o embalados con el doble de material absorbente, del requerido para absorber la totalidad del residuo.</p> <p>Menos del 1 % del volumen del residuo debe ser líquido libre.</p> <p>El residuo no debe detonar o descomponerse ocasionando una explosión, en contacto con agua ó en las condiciones de temperatura y presión previstas en la gestión.</p> <p>El residuo no debe generar vapores, gases o humos tóxicos en las condiciones previstas en la gestión.</p> <p>El residuo no puede ser pirofórico.</p> <p>Los contenedores con residuos gaseosos, no deben superar – a 20 °C – 1,5 atm, con un máximo de 3,7 E12 Bq/ contenedor.</p> <p>Los residuos radiactivos que además puedan clasificarse como peligrosos, una vez decaídos, deberán evaluarse como tales en forma simultánea.</p>
<p><b>Clase B o C</b></p>	<p>Los bultos de residuos deben ser estructuralmente estables (deben mantener su forma y dimensiones, en las condiciones construcción y carga de la cobertura y las condiciones físicas, químicas y microbiológicas del repositorio).</p> <p>Los residuos deben presentar la menor cantidad de líquidos corrosivos posible, siempre en cantidades inferiores al 0,5 % del volumen</p> <p>Los espacios huecos en el bulto, deben reducirse al mínimo posible.</p>
<p><b>Tabla D: Requerimientos de calidad mínimos, para residuos radiactivos a ser dispuestos en instalaciones cercanas a la superficie[24]</b></p>	

**Anexo 4 - Radioisótopos presentes en los residuos radiactivos - Modos de desintegración, constantes gamma y valores de dispensa**

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Constante Gamma[26](R m<sup>2</sup>/ h Ci)</b>	<b>Emisiones Beta [25]</b>	<b>Actividad específica (Bq/g)</b>	<b>Alcance máx. en aire, de partículas β[26](m)</b>	<b>Nivel de dispensa [27](Bq/g)</b>
<b>H 3</b>	12,3 años	No gamma	19 keV (100 %)	3,58E+14	0,2	100
<b>C 14</b>	5.700 años	No gamma	157 keV (100 %)	1,65E+11	0,5	1
<b>Co 60</b>	5,3 años	1,37	317 keV (> 99 %)	4,10E+13	1,0	0,1
<b>Sr 90</b>	28,8 años	No gamma	546 keV (100 %)	5,10E+12	2,0	1
<b>Y 90</b>	2,7 días (*)	Desestimado (ε< 0,01 %)	2.279 keV (> 99 %)	2,00E+16	10,0	--
<b>Nb 95</b>	35,0 días (*)	0,48	160 keV (> 99 %)	1,50E+15	0,5	1
<b>Zr 95</b>	64,0 días	0,465	368 keV (55 %) 401 keV (44 %)	7,94E+14	2,0	1
<b>Rh 106</b>	30 segundos (*)	0,138	3.546 keV (79 %)	1,31E+20	11,0	--
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE – Períodos de semi desintegración, constantes gamma, modos de decaimiento y valores de dispensa</b>						

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Constante Gamma[26] (R m<sup>2</sup>/ h Ci)</b>	<b>Emisiones Beta [25]</b>	<b>Actividad específica (Bq/g)</b>	<b>Alcance máx. en aire, de partículas β[26] (m)</b>	<b>Nivel de dispensa [27] (Bq/g)</b>
<b>Ru 106</b>	371,5 días	No gamma	39 keV (100 %)	1,22E+14	2,0	0,1
<b>Sb 125</b>	2,8 años	0,38	303 keV (40 %) 130 keV (18 %) 621 keV (13 %)	3,80E+13	2,0	0,1
<b>Cs 134</b>	2,1 años	0,999	658 keV (70 %) 89 keV (27 %)	4,80E+13	2,0	0,1
<b>Cs 137</b>	30,1 años	0,319	514 keV (94,4 %)	3,21E+12	2,0	0,1
<b>Ce 144</b>	284,9 días	0,023	319 keV (77 %)	1,20E+14	1,0	10
<b>Pr 144</b>	17 min (*)	0,017	2.997 keV (> 97 %)	2,80E+18	11,0	--
<b>Eu 154</b>	8,6 años	0,756	571 keV (36 %) 249 keV (28 %)	1,00E+13	2,0	0,1
<b>Eu 155</b>	4,8 años	0,067	147 keV (46 %) 165 keV (26 %)	1,80E+13	0,5	1
<b>Th 234</b>	24 días (*)	0,004	198 keV (78 %)	8,60E+14	0,5	(*)
<b>Pa 234 m</b>	1 minuto (*)	Desestimado (ε< 0,01 %)	2.269 keV (98%)	2,60E+19	10,0	(*)

**Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE –  
Períodos de semi desintegración, constantes gamma, modos de decaimiento y valores de dispensa (Cont.)**

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Constante Gamma[26] (R m<sup>2</sup>/ h Ci)</b>	<b>Emisiones Alfa [25]</b>	<b>Actividad específica (Bq/g)</b>	<b>Nivel de dispensa [27] (Bq/g)</b>
<b>U 234</b>	245.500 años	Desestimado ( $\epsilon < 1\%$ )	4.858 keV (71 %) 4.804 keV (28 %)	2,30E+08	(*)
<b>U 235</b>	704.000.000 años	0,081	4.398 keV (57 %) 4.366 keV (19 %)	8,00E+04	1
<b>U 236</b>	23.430.000 años	Desestimado ( $\epsilon < 1\%$ )	4.494 keV (74 %) 4.445 keV (26 %)	2,40E+06	10
<b>U238</b>	4.468.000.000 años	Desestimado ( $\epsilon < 1\%$ )	4.198keV (78 %) 4.151 keV (22 %)	1,20E+04	1
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE</b> <b>Períodos de semi desintegración, constantes gamma y modos de decaimiento</b> (*) Producto de decaimiento de otro radioisótopos presente; en equilibrio transitorio, secular o no en equilibrio					

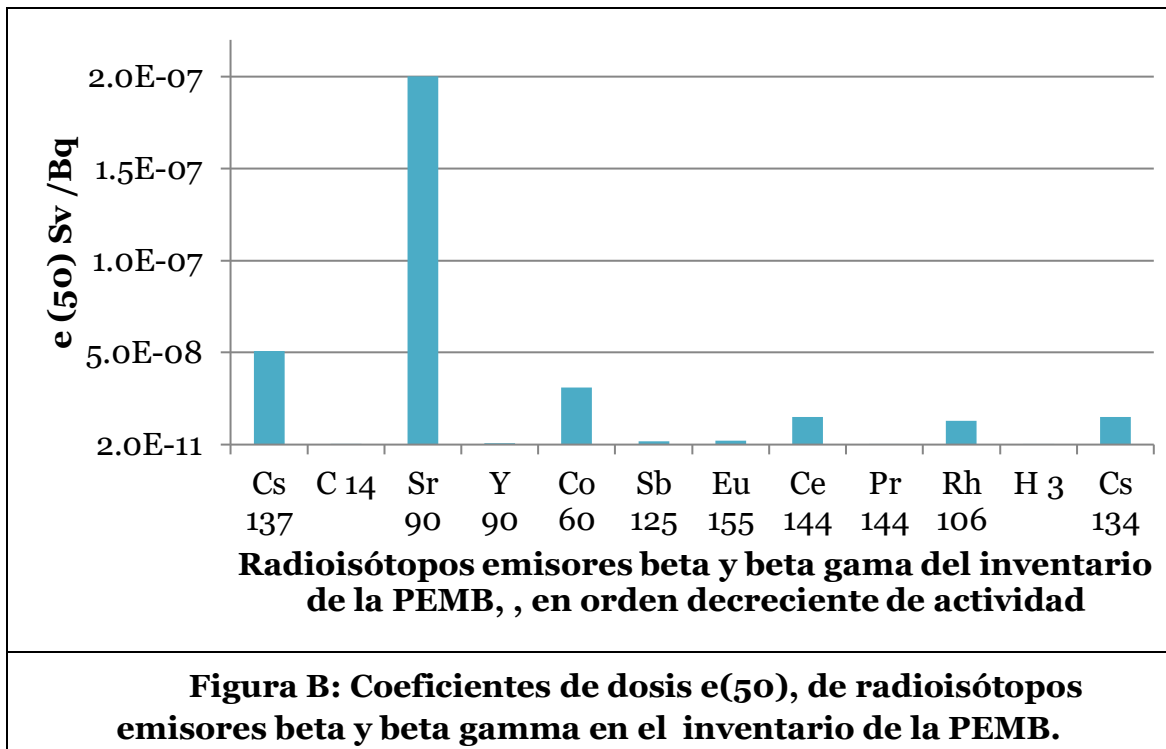
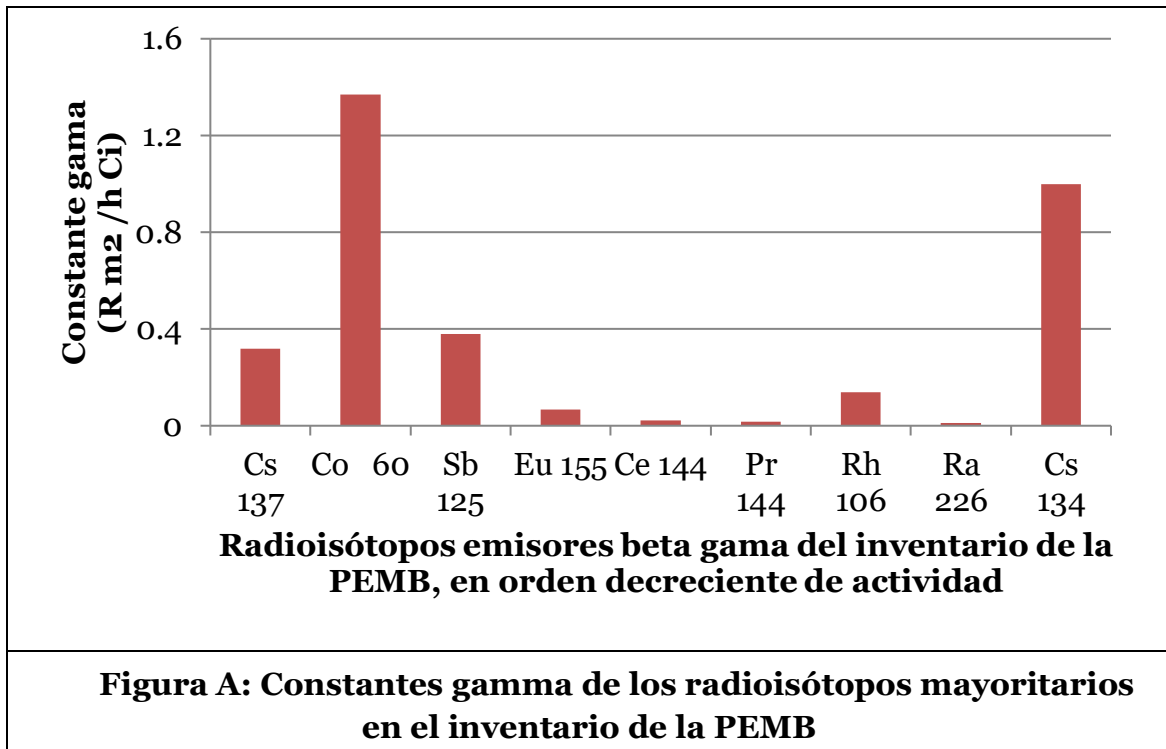
**Anexo 5 - Radioisótopos presentes en residuos radiactivos - Valores de e(50), ALI y DAC**

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración[ 25]</b>	<b>Coefficiente de dosis efectiva comprometida integrada en 50 años e(50) [28] (Sv/Bq)</b>	<b>ALI (Bq)</b>	<b>DAC (Bq/ m3)</b>	
<b>H 3</b>	12,3 años	Inhalación - Aerosol de compuestos orgánicos biogénicos, fA=0,99, 5 µm	3,50E-11	5,71E+08	238.095
<b>C 14</b>	5.700 años	Inhalación - Aerosol Tipo M - Todos los compuestos no especificados, fA=0,2, 5 µm	5,80E-10	3,45E+07	14.368
<b>Co 60</b>	5,3 años	Inhalación - Aerosol Tipo S – Óxido de Co, FAP, PSI, fA=1E-3, 5 µm	3,10E-08	6,45E+05	269
<b>Sr 90</b>	28,8 años	Inhalación - Aerosol Tipo S, FAP, PSL, fA=2,5E-3, 5 µm	2,00E-07	1,00E+05	42
<b>Y 90</b>	2,7 días (*)	Inhalación - Aerosol Tipo S, FAP, fA=1E-6, 5 µm	7,30E-10	2,74E+07	11.416
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE – Períodos de semi desintegración, e(50), ALI y DAC</b>					

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Coefficiente de dosis efectiva comprometida integrada en 50 años e(50) [28] (Sv/Bq)</b>	<b>ALI (Bq)</b>	<b>DAC (Bq/ m3)</b>	
<b>Nb 95</b>	35,0 días (*)	Inhalación - Aerosol Tipo M – Oxalato y todos los compuestos no especificados, fA=2E-3, 5 µm	6,90E-10	2,90E+07	12.077
<b>Zr 95</b>	64,0 días	Inhalación - Aerosol Tipo M – Oxalato y todos los compuestos no especificados, fA=4E-4, 5 µm	1,90E-09	1,05E+07	4.386
<b>Rh 106</b>	30 segundos (*)	Inhalación - Aerosol Tipo M – Citrato y todas las formas no especificadas, fA=1E-2, 5 µm	1,30E-08	1,54E+06	641
<b>Ru 106</b>	371,5 días				
<b>Sb 125</b>	2,8 años	Inhalación - Aerosol Tipo M – Trióxido y todos los compuestos no especificados, fA=1E-2, 5 µm	1,90E-09	1,05E+07	4.386
<b>Cs 134</b>	2,1 años	Inhalación - Aerosol Tipo S, fA=1E-2, 5 µm	1,50E-08	1,33E+06	556
<b>Cs 137</b>	30,1 años	Inhalación - Aerosol Tipo S, fA=1E-2, 5 µm	5,10E-08	3,92E+05	163
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE – Períodos de semi desintegración, e(50), ALI y DAC (cont.)</b>					

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Coefficiente de dosis efectiva comprometida integrada en 50 años e(50) [28] (Sv/Bq)</b>		<b>ALI (Bq)</b>	<b>DAC (Bq/ m<sup>3</sup>)</b>
<b>Ce 144</b>	284,9 días	Inhalación – Aerosol de compuestos solubles, cloruros y citratos, fA=2,5E-4, 5 µm	1,50E-08	1,33E+06	556
<b>Pr 144</b>	17 min (*)	Inhalación – Aerosol de compuestos solubles, cloruros y citratos, fA=2,5E-4, 5 µm	2,20E-11	9,09E+08	378.788
<b>Eu 154</b>	8,6 años	Inhalación – Aerosol de compuestos solubles, cloruros y citratos, fA=2,5E-4, 5 µm	2,20E-08	9,09E+05	379
<b>Eu 155</b>	4,8 años	Inhalación – Aerosol de compuestos solubles, cloruros y citratos, fA=2,5E-4, 5 µm	2,10E-09	9,52E+06	3.968
<b>Th 234</b>	24 días (*)	Inhalación – Aerosol de compuestos solubles, cloruros, citratos, nitrato, sulfato y fluoruro, fA=5E-5, 5 µm	2,60E-09	7,69E+06	3.205
<b>Pa 234 m</b>	1 minuto (*)				
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE – Períodos de semi desintegración, e(50), ALI y DAC (cont.)</b>					

<b>Radioisótopo</b>	<b>Período de semi desintegración [25]</b>	<b>Coefficiente de dosis efectiva comprometida integrada en 50 años e(50) [28] (Sv/Bq)</b>		<b>ALI (Bq)</b>	<b>DAC (Bq/ m<sup>3</sup>)</b>
<b>U 234</b>	245.500 años	Inhalación - Aerosol Tipo M/S: Octóxido y Dióxido, fA=6E-4, 5 µm	5,50E-06	3,64E+03	2
<b>U 235</b>	704.000.000 años	Inhalación - Aerosol Tipo M/S: Octóxido y Dióxido, fA=6E-4, 5 µm	5,10E-06	3,92E+03	2
<b>U 236</b>	23.430.000 años	Inhalación - Aerosol Tipo M/S: Octóxido y Dióxido, fA=6E-4, 5 µm	5,20E-06	3,85E+03	2
<b>U238</b>	4.468.000.000 años	Inhalación - Aerosol Tipo M/S: Octóxido y Dióxido, fA=6E-4, 5 µm	4,80E-06	4,17E+03	2
<b>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL</b>					
<b>Principales radioisótopos presentes en los residuos radiactivos almacenados en el AGE – Períodos de semi desintegración, e(50), ALI y DAC (cont.)</b>					



INFORMACIÓN  
CONFIDENCIAL

**Figura C: Coeficientes de dosis e(50), de radioisótopos emisores  
alfa en el inventario de la PEMB**