

# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

### **Aplicación de nanopartículas de $\gamma$ -alúmina como adsorbente de molibdeno-99 para la producción de tecnecio-99 metaestable como radioisótopo de uso médico**

Para obtener el título profesional de Ingeniero químico

Elaborado por

Emily Elena Vivanco Cuba

 [0000-0003-0314-4280](https://orcid.org/0000-0003-0314-4280)

Asesor

MSc. Emilia Gabriela Hermoza Guerra

 [0000-0001-5349-0590](https://orcid.org/0000-0001-5349-0590)

Asesor externo

MSc. Pablo Antonio Mendoza Hidalgo

 [0000-0002-6029-8705](https://orcid.org/0000-0002-6029-8705)

TOMO I DE I

LIMA – PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	Vivanco-Cuba [1]
Referencia/Reference	[1] E. Vivanco-Cuba, "Aplicación de nanopartículas de $\gamma$ -alúmina como adsorbente de molibdeno-99 para la producción de tecnecio-99 metaestable como radioisótopo de uso médico" [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE	

---

---

Citar/How to cite	(Vivanco-Cuba, 2024)
Referencia/Reference	Vivanco-Cuba, E. E. (2024). Aplicación de nanopartículas de $\gamma$ -alúmina como adsorbente de molibdeno-99 para la producción de tecnecio-99 metaestable como radioisótopo de uso médico. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---



## RESUMEN

La crisis global de disponibilidad del Molibdeno-99, precursor del Tecnecio-99 metaestable en medicina nuclear, ocurrida entre 2007 y 2009 debido al cierre de reactores nucleares, generó la suspensión de servicios médicos. Con múltiples reactores programados para cerrar pronto, se propone la producción de  $^{99m}\text{Tc}$  a partir de  $^{99}\text{Mo}$  de activación neutrónica utilizando nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina considerando su potencial para futuras aplicaciones en matrices para generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ .

El objetivo principal es evaluar las propiedades de adsorción del Molibdeno en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina de dos tamaños y analizar el rendimiento de elución del  $^{99m}\text{Tc}$  en condiciones óptimas. Para optimizar la adsorción, se varían parámetros como pH, tamaño de partícula del adsorbente y efecto de aniones sulfato, cloruro, nitrato y acetato.

Los resultados indican que las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina, en condiciones óptimas de pH 4, mejoran hasta diez veces la adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  comparado con la alúmina convencional. Las nanopartículas de 80 nm, con superficie BET de  $186\text{ m}^2/\text{g}$ , muestran mejor rendimiento como matriz por su propiedad hidrofóbica y efectividad en adsorción. En contraste, las nanopartículas de 5 nm, con superficie BET de  $148\text{ m}^2/\text{g}$ , presentan limitaciones por su naturaleza hidrofílica, dificultando la filtración. Los estudios indican que el modelo cinético de pseudo-segundo orden y la isoterma de Freundlich representan mejor el proceso de adsorción. El perfil de avance en columna indica que las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina de 80 nm retienen hasta  $140\text{ mg Mo/g}$  a pH 4. En un potencial generador, podría eluirse hasta  $10\text{ mCi}$  de  $^{99m}\text{Tc}$  tras 24 horas de crecimiento, adecuado para aplicaciones pediátricas. Este trabajo destaca la utilidad de nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina como adsorbentes de  $^{99}\text{Mo}$  de baja actividad específica, clave en medicina nuclear.

Palabras clave: Molibdeno-99, Tecnecio-99 metaestable, adsorción, nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina, generador  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ .

## ABSTRACT

The global crisis in the availability of Molybdenum-99, precursor of Technetium-99 metastable in nuclear medicine, occurred between 2007 and 2009 due to the shutdown of nuclear reactors, led to the suspension of medical services. With multiple reactors scheduled to shut down soon, this study proposes the production of  $^{99m}\text{Tc}$  from neutron-activated  $^{99}\text{Mo}$  using  $\gamma$ -alumina nanoparticles, considering their potential for future applications in  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  generator matrices.

The main objective is to evaluate the adsorption properties of Molybdenum on  $\gamma$ -alumina nanoparticles of two sizes and analyze the elution performance of  $^{99m}\text{Tc}$  under optimal conditions. To optimize adsorption, parameters such as pH, adsorbent particle size, and the effect of sulfate, chloride, nitrate, and acetate anions are varied.

Results indicate that  $\gamma$ -alumina nanoparticles, under optimal pH 4 conditions, improve  $^{99}\text{Mo}$  adsorption up to tenfold compared to conventional alumina. The 80 nm nanoparticles, with a BET surface area of  $186 \text{ m}^2/\text{g}$ , demonstrated better performance as a matrix due to their hydrophobic property and effectiveness in adsorption. In contrast, the 5 nm nanoparticles, with a BET surface area of  $148 \text{ m}^2/\text{g}$ , presented limitations due to their hydrophilic nature, hindering filtration. Studies indicate that the pseudo-second-order kinetic model and the Freundlich isotherm best represent the adsorption process.

The column breakthrough profile indicates that the 80 nm  $\gamma$ -alumina nanoparticles retain up to  $140 \text{ mg Mo/g}$  at pH 4. In a potential generator, up to  $10 \text{ mCi}$  of  $^{99m}\text{Tc}$  could be eluted after 24 hours of growth, suitable for pediatric applications. This work highlights the utility of  $\gamma$ -alumina nanoparticles as adsorbents for low-specific-activity  $^{99}\text{Mo}$ , essential in nuclear medicine.

**Keywords:** Molybdenum-99, metastable Technetium-99, adsorption,  $\gamma$ -alumina nanoparticles,  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  generator.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I PARTE INTRODUCTORIA .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Descripción del problema de investigación .....	2
1.3. Objetivos del estudio .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Antecedentes Internacionales.....	4
1.4.1. Tesis.....	4
1.4.2. Artículos .....	5
CAPÍTULO II MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	14
2.1. Marco teórico.....	14
2.1.1. Producción de <sup>99</sup> Mo .....	14
2.1.2. Mecanismos de obtención de <sup>99m</sup> Tc.....	16
2.1.2.1. Adsorción en columna cromatográfica de alúmina .....	17
2.1.2.1.1. $\gamma$ -Alúmina nanopartícula .....	19

2.1.2.2.	Extracción líquido - líquido .....	19
2.1.2.3.	Sublimación .....	24
2.1.2.4.	Elución de columnas de gel de molibdato de zirconio .....	24
2.1.3.	Actividad radiactiva .....	25
2.1.3.1.	Medición de la radiactividad .....	26
2.1.4.	Capacidad de adsorción.....	29
2.1.4.1.	Cinética de adsorción.....	29
2.1.4.2.	Isotermas de adsorción.....	30
2.1.4.3.	Constantes de distribución Kd.....	30
2.1.4.4.	Rendimiento de elución.....	31
2.1.5.	Control de calidad del pertecnetato de sodio.....	31
2.1.5.1.	Pureza radionucleída .....	31
2.1.5.2.	Pureza radioquímica .....	32
2.1.5.3.	Pureza química .....	32
2.1.6.	Diseño de un generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ .....	33
2.2.	Marco conceptual .....	35
2.2.1.	Radioisótopo .....	35
2.2.2.	Radiofármaco.....	35
2.2.3.	Radiotrazador .....	35
2.2.4.	Período de semidesintegración .....	35
2.2.5.	Decaimiento .....	36
2.2.6.	Tecnecio-99 metaestable.....	37
CAPÍTULO III PARTE EXPERIMENTAL.....		38

3.1.	Estudio del adsorbente .....	38
3.1.1.	Caracterización.....	39
3.1.2.	Estabilidad química.....	40
3.1.3.	Coeficiente de distribución Kd .....	42
3.1.4.	Cinética de adsorción de <sup>99</sup> Mo .....	42
3.1.5.	Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado estacionario ....	43
3.1.6.	Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado dinámico .....	44
3.1.7.	Isoterma de adsorción .....	44
3.1.8.	Efecto del anión del ácido en la adsorción.....	45
3.2.	Producción de <sup>99m</sup> Tc .....	45
3.2.1.	Rendimiento de elución .....	45
3.2.2.	Determinación de eficiencia de filtraciones a través de filtro de membrana 0,22 µm	46
3.2.3.	Controles de la solución de pertecnetato de sodio <sup>99m</sup> Tc .....	47
CAPÍTULO IV RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN .....		52
4.1.	Estudio del adsorbente.....	52
4.1.1.	Caracterización .....	52
4.1.2.	Estabilidad química.....	59
4.1.3.	Coeficiente de distribución Kd.....	60
4.1.4.	Cinética de adsorción de <sup>99</sup> Mo.....	63
4.1.5.	Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado estacionario .....	70
4.1.6.	Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado dinámico .....	72
4.1.7.	Isoterma de adsorción.....	77

4.1.8. Efecto de los aniones del ácido en la adsorción.....	81
4.2. Producción de <sup>99m</sup> Tc.....	82
4.2.1. Rendimiento de elución.....	82
4.2.2. Determinación de eficiencia de filtraciones a través de filtro de membrana 0.22 µm .....	89
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS .....	114
Anexo A: Especificaciones y detalle de resultados de resultados de coeficiente de repartición Kd .....	114
Anexo B: Especificaciones y detalle de resultados de cinética de adsorción de <sup>99</sup> Mo	120
Anexo C: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción de adsorbentes .....	125
Anexo D: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción en estudio dinámico o perfil de avance.....	126
Anexo E: Especificaciones y detalle de resultados de isotermas de adsorción.....	127
Anexo F: Especificaciones y detalle de resultados del efecto de aniones en la adsorción de <sup>99</sup> Mo en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	130
Anexo G: Mediciones y cálculos de la determinación de Aluminio por activación neutrónica .....	132
Anexo H: Imágenes de equipos, instrumentos, materiales y otros utilizados en la parte experimental.....	133
Anexo I: Certificado de análisis de alúmina ácida.....	142

Anexo J: Certificado de análisis de alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm.....	149
Anexo K: Certificado de análisis de alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm.....	151
Anexo L: Ficha de datos de seguridad de alúmina, fabricante US Research Nanomaterials .....	153
Anexo M: Reporte de dosimetría personal .....	165
Anexo N: Cotización de generadores de <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc RADIOFARMA® .....	167
Anexo Ñ: Resultados de medición DLS.....	187

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Decaimiento radiactivo del <math>^{99}\text{Mo}</math> y crecimiento de la actividad del <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> dentro de las 24h después de la elución, calculado por 7 días.</i> .....	18
Figura 2 <i>Diagrama de flujo de producción de <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> en la Planta de Producción de Radiosiótopos del IPEN.</i> .....	21
Figura 3 <i>Diagrama de proceso de fabricación de <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> en la Planta de Producción de Radiosiótopos del IPEN.</i> .....	22
Figura 4 <i>Diagrama de proceso de esterilización de viales con <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> en la Planta de Producción de Radiosiótopos del IPEN</i> .....	23
Figura 5 <i>Esquema del espectrómetro gamma.</i> .....	27
Figura 6 <i>Porta muestra para colocar las fuentes radiactivas a diferentes distancias (5 posiciones) entre la fuente y el detector.</i> .....	28
Figura 7 <i>Componentes de un generador portátil de <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> basado en separación cromatográfica.</i> .....	34
Figura 8 <i>Isoterma de adsorción-desorción de <math>\text{N}_2</math> en alúmina <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-05nm.</i> .....	55
Figura 9 <i>Isoterma de adsorción-desorción de <math>\text{N}_2</math> en alúmina <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80nm.</i> .....	56
Figura 10 <i>Área superficial específica de <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-05nm y <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80nm.</i> .....	56
Figura 11 <i>Volumen de poro en función de la distribución del tamaño de poro en las nanopartículas de alúmina <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-05nm y <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80nm</i> .....	57
Figura 12 <i>Área superficial en función de la distribución del tamaño de poro en las nanopartículas de alúmina <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-05nm y <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80nm</i> .....	58
Figura 13 <i>Determinación del punto de carga cero para A) <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-5 nm B) <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80 nm.</i> ...	59
Figura 14 <i>Coeficiente de distribución <math>K_d</math> del <math>^{99}\text{Mo}</math> en tres alúminas.</i> .....	62
Figura 15 <i>Coeficiente de distribución <math>K_d</math> del <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math> en tres alúminas.</i> .....	62
Figura 16 <i>Cantidad adsorbida de iones de molibdeno (<math>\text{H}_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{4-}</math>, <math>\text{H}[\text{MoO}_4]</math>, <math>\text{H}_2(\text{MoO}_4)_{(\text{ac})}</math> y <math>\text{HMo}_7\text{O}_{24}^{5-}</math>) hasta el tiempo de equilibrio en a) <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-ácida b) <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-05nm c) <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-80nm.</i>	

<i>La concentración inicial de molibdeno fue de 0,1 mg ml<sup>-1</sup> (~1,0 mM), la concentración del adsorbente fue de 10 mg ml<sup>-1</sup>. La adsorción tuvo lugar a pH=4 y T=20 °C.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 17 Cantidad adsorbida de iones de molibdeno (H<sub>2</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub><sup>4-</sup>, H[MoO<sub>4</sub>], H<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>(ac)</sub> y HMo<sub>7</sub>O<sub>24</sub><sup>5-</sup>) hasta el tiempo de equilibrio en a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm. La concentración inicial de molibdeno fue de 1,0mg ml<sup>-1</sup> (~10,0 mM), la concentración del adsorbente fue de 10 mg ml<sup>-1</sup>. La adsorción tuvo lugar a pH 4 y T=20°C.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 18 Especiación de iones de molibdeno como función del pH a una concentración fija de molibdeno de 1,0 mM y temperatura de 20 °C obtenido por CHEAQS software...</i>	<i>69</i>
<i>Figura 19 Especiación de iones de molibdeno como función del pH a una concentración fija de molibdeno de 10,0 mM y temperatura de 20 °C obtenido por CHEAQS software.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 20 Perfil de avance de Mo en una columna con matriz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm al pasar MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 21 Adsorción de polianiones de molibdeno en soluciones tampón de acetato de sodio y nítrico, pH 4 en alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm, 10 g de adsorbente/L .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 22 Isoterma de adsorción de Mo a pH 4 y 20 °C en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm, datos experimentales y modelamiento de Freundlich y Langmuir.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 23 Isoterma de adsorción de Mo a pH 4 y 20 °C en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm, datos experimentales y modelamiento de Freundlich y Langmuir.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 24 Porcentaje (%) de Mo adsorbido en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm a pH 4, conc. inicial C<sub>0</sub>=0,001 y 0,01 gMo/mL y en presencia de diversos aniones .....</i>	<i>82</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Reactores productores de $F^{99}\text{Mo}$ .....	15
Tabla 2 Tecnologías para la producción de $^{99m}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$ .....	17
Tabla 3 Comparación de columnas cromatográficas de alúmina de generadores fabricados a partir de $F^{99}\text{Mo}$ y $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ .....	18
Tabla 4 Algunos isótopos frecuentemente usados en medicina nuclear y radiología	36
Tabla 5 Condiciones de medición de diámetro hidrodinámico de partícula de la alúmina nanopartícula.....	39
Tabla 6 Denominación de las muestras según tipo de alúmina y sustancia de contacto.	41
Tabla 7 Valores de referencia $R_f$ para determinación de la pureza radioquímica del $^{99m}\text{Tc}$ .....	49
Tabla 8 Características de las nanopartículas de $\gamma$ -alúmina .....	52
Tabla 9 Datos del análisis de distribución ponderada de NICOMP (Partícula sólida) usando la técnica de DLS.....	53
Tabla 10 Diámetros hidrodinámicos de las nanopartículas de $\gamma$ -alúmina .....	54
Tabla 11 Características estructurales de los adsorbentes de nanopartículas de alúmina .....	55
Tabla 12 Valores de PZC de la nanopartícula de $\gamma$ -alúmina reportado por diferentes autores .....	59
Tabla 13 Aluminio disuelto por las soluciones químicas en contacto con muestras de alúmina, analizado por absorción atómica .....	60
Tabla 14 Coeficiente de distribución $K_d$ de iones de $^{99}\text{Mo}$ y $^{99m}\text{Tc}$ a diferentes pH .....	61
Tabla 15 Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de $\sim 0,1$ mg Mo/ml en $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ácida con $^{99}\text{Mo}$ como radiotrazador....	63
Tabla 16 Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de $\sim 0,1$ mg Mo/ml en $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm con $^{99}\text{Mo}$ como radiotrazador....	64
Tabla 17 Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una	

concentración inicial de ~0,1 mg Mo/ml en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm con <sup>99</sup> Mo como radiotrazador....	64
Tabla 18 Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~1,0 mg Mo/ml en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm con <sup>99</sup> Mo como radiotrazador....	64
Tabla 19 Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~1,0 mg Mo/ml en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm con <sup>99</sup> Mo como radiotrazador....	65
Tabla 20 Parámetros cinéticos de la adsorción de especies de molibdeno a pH 4 en alúmina.....	68
Tabla 21 Resultados de la prueba de capacidad máxima de adsorción por adsorbente .	71
Tabla 22 Comparación de materiales adsorbentes de alúmina alternativos para la adsorción de molibdeno reportados según estudios estáticos, dinámicos y en generadores de <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc.....	74
Tabla 23 Constantes y coeficientes de correlación de isothermas de molibdeno en alúmina .....	81
Tabla 24 Resultados de pruebas de rendimiento de elución y conformidad según controles de calidad de la solución de pertecnetato de sodio <sup>99m</sup> Tc.....	84
Tabla 25 Parámetros de un generador <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc a partir del ensayo 7 de Rendimiento de elución .....	86
Tabla 26 Concentración de aluminio en muestras de eluido de pertecnetato de sodio Na <sub>2</sub> <sup>99m</sup> TcO <sub>4</sub> con y sin filtración mediante membrana 0.22 μm .....	89

## INTRODUCCIÓN

La utilización del Tecnecio-99 metaestable ( $^{99m}\text{Tc}$ ) en medicina nuclear ha experimentado un crecimiento significativo. La creciente demanda plantea desafíos, especialmente ante la crisis de disponibilidad del precursor Molibdeno-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ).

La producción de  $^{99}\text{Mo}$  por activación neutrónica se presenta como una alternativa al  $^{99}\text{Mo}$  por fisión nuclear, que se enfrenta al agotamiento de reactores de potencia. Esta opción tiene ventajas como menores desechos radiactivos y riesgo de proliferación, sin embargo, este cambio requiere tecnologías de adsorción eficientes, especialmente considerando la baja actividad específica del  $^{99}\text{Mo}$  obtenido por activación neutrónica.

En este contexto, el presente estudio surge en el marco del Proyecto Coordinado de Investigación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), buscando desarrollar alternativas de producción de generadores  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ . El foco está en la evaluación de la nanopartícula de  $\gamma$ -alúmina como adsorbente, considerando su potencial impacto en la construcción de generadores eficientes y en la optimización de los existentes. La investigación se alinea con los esfuerzos del OIEA para fortalecer la capacidad de los Estados Miembros en la producción de  $^{99m}\text{Tc}$  y  $^{99}\text{Mo}$ , contribuyendo así a prevenir futuras escaseces.

# CAPÍTULO I

## PARTE INTRODUCTORIA

### 1.1. Generalidades

El Tecnecio-99 metaestable ( $^{99m}\text{Tc}$ ) es el radionúclido más utilizado en medicina nuclear a nivel mundial llegando a usarse en el 80% de los casi 30 millones de diagnósticos de medicina nuclear (Nuclear Energy Agency, 2010, pág. 114). Según *An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain*, se estima que la demanda aumentará a una tasa anual del 3% al 5% (IAEA Staff Report, 2011).

La producción actual del Molibdeno-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ), precursor del  $^{99m}\text{Tc}$ , se realiza mayormente a través del proceso de fisión nuclear. El  $^{99}\text{Mo}$  de fisión obtenido (F  $^{99}\text{Mo}$ ), luego de una compleja separación radioquímica, se deposita en columna cromatográfica de alúmina blindada por plomo con un sistema de vacío de simple implementación constituyendo el generador  $^{99m}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$  comúnmente conocido.

No obstante, el cierre por tiempo de operación de algunos de los reactores de potencia empleados para tal fin (Pillai y otros, 2012) generaron en el 2007-2009, una crisis de disponibilidad del F  $^{99}\text{Mo}$  que se tradujo en la suspensión de varios de los servicios de medicina nuclear a nivel mundial (IAEA Staff Report, 2011).

Por la alta actividad específica del F  $^{99}\text{Mo}$ , no era necesaria mayor consideración del tipo de adsorbente utilizado, pero la crisis generada implicó un cambio de parecer generando la necesidad de implementar tecnologías alternativas.

Una de estas opciones, es la producción de  $^{99}\text{Mo}$  por activación neutrónica,  $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ , el cual requiere de procedimientos menos complejos, una menor generación de desechos radiactivos, menor riesgo de proliferación, disminución de blindaje, bajo costo de producción y está al alcance de un gran número de instituciones que cuentan con reactores de investigación operativos (Pillai y otros, 2012).

El  $^{98}\text{Mo}$  ( $n,\gamma$ ) $^{99}\text{Mo}$  tiene una actividad específica de hasta 1000 veces menor al del  $^{99}\text{Mo}$  (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016, pág. 25), es por ello que el incremento de la capacidad de adsorción de los adsorbentes usados como matriz en la columna, tiene un gran impacto en la preparación de los generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , ya que permite la reducción del tamaño del generador y, por lo tanto, el costo, pero lo que es más importante, permite el uso de  $^{99}\text{Mo}$  producido por activación neutrónica y, consecuentemente, contribuye a prevenir la escasez futura de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Denkova y otros, 2013).

En su afán por fortalecer la capacidad de los Estados Miembros en la aplicación de rutas alternativas para la producción de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  y  $^{99}\text{Mo}$ , el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha financiado el Proyecto Coordinado de Investigación “Nuevas formas de producir  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  y generadores de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Más allá de la fisión y los métodos de ciclotrón)” código de proyecto F22068 y CRP2140, aprobada el 7 de abril del 2017 y con fecha de culminación en setiembre del 2021, en el que el Perú participó como Estado Miembro con la representación del Instituto Peruano de Energía Nuclear IPEN como el organismo ejecutor. El proyecto mencionado tuvo como objetivos desarrollar nuevas alternativas de producción de generadores que utilicen adsorbentes de alta capacidad para Mo, así como la optimización de los generadores de baja a media actividad específica existentes para su aplicación y distribución nacional (International Atomic Energy Agency, 2017).

## **1.2. Descripción del problema de investigación**

Mayoritariamente, los materiales radiactivos se generan en lugares distintos a los centros de medicina nuclear del país donde van a ser utilizados. En el Perú, la única planta de producción de radioisótopos, se encuentra en Huarangal, Lima, mientras que los centros de medicina nuclear de otros departamentos se encuentran en sus centros regionales.

Debido a los períodos cortos de semidesintegración, el rechazo o demora en el

transporte de radionucleidos tiene un fuerte impacto negativo, afectando la vida de muchas personas. La mayoría de los materiales radiactivos, entre ellos, el  $^{99m}\text{Tc}$  en solución acuosa, enviados cada día a través de las diferentes vías de transporte, terrestre, aéreo y marítimo (Mallaupoma y otros, 2013), se utiliza en los hospitales para el diagnóstico y el tratamiento de varias enfermedades, cualquier retraso o denegación de envío puede hacer perder la posibilidad de aplicación de esos radioisótopos (Mallaupoma y otros, 2009), por ello, nace la importancia de fortalecer la producción de radiofármacos con generadores  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  para su uso en el sector de salud pública, objetivo que es parte del Proyecto Nacional PER6019, aprobado el 1 de enero del 2018.

En el presente trabajo se propone estudiar las propiedades de adsorción del Mo en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina comercial de dos tamaños de partículas y áreas superficiales específicas diferentes, con el fin de explorar su viabilidad como matriz para futuros generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ . Se evalúa la capacidad de retención del molibdeno en la alúmina variando parámetros como el pH, el tamaño de partícula del adsorbente y el efecto de aniones sulfato, cloruro, nitrato, acetato en la adsorción del molibdeno para encontrar las mejores condiciones para la máxima adsorción y rendimiento de elución; posterior a la evaluación se determina la cinética de operación y se construye la isoterma de adsorción. Finalmente, se evalúa el perfil de avance de la adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  en alúmina en una columna, considerando su potencial aplicación en un generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ . El desarrollo de la tesis tuvo lugar en los laboratorios de la Dirección de Investigación y Desarrollo del Instituto Peruano de Energía Nuclear, el Laboratorio de Investigación y Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería y Laboratorio de Nanotecnología e Innovación Tecnológica de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Los resultados de la investigación servirán como un aporte al conocimiento sobre el uso de nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina, con potencial para futuras aplicaciones en generadores  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  o para su posible incorporación en el proceso de producción

actual de  $^{99m}\text{Tc}$  en el Instituto Peruano de Energía Nuclear, basado en la extracción líquida con MEK (metiletilcetona).

### **1.3. Objetivos del estudio**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar la nanopartícula de  $\gamma$ -alúmina comercial como adsorbente del  $^{99}\text{Mo}$  en pruebas por lote y dinámica para determinar su potencial idoneidad como matriz adsorbente en un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ .

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar fisicoquímicamente las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina de diferentes tamaños y evaluar su relación con los resultados de adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  y elución de  $^{99m}\text{Tc}$ .
- Determinar el efecto del pH y de los aniones sulfato, cloruro, nitrato y acetato en la adsorción de  $^{99}\text{Mo}$ , optimizando las condiciones para su adsorción en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina y alúmina ácida activada.
- Estudiar la cinética y las isotermas de adsorción del molibdeno en solución acuosa utilizando nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina
- Determinar el perfil de avance de la adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina en una columna cromatográfica utilizada en la purificación del pertecnetato de sodio por el método de extracción líquida, y evaluar el rendimiento de elución del  $^{99m}\text{Tc}$  en condiciones óptimas, así como realizar test de control de calidad de los eluidos de  $^{99m}\text{Tc}$ .

### **1.4. Antecedentes Internacionales**

#### **1.4.1. Tesis**

##### **1.4.1.1. Control de calidad de generadores de Molibdeno-99/Tecnecio-99m de columna seca (Montero de Espinosa Costa, 1993)**

Esta tesis doctoral tiene por objetivo la evaluación de los parámetros más importantes que definen la calidad de los eluidos de  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  obtenidos de los generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  de producción totalmente española que usan alúmina ácida en su columna matriz.

La autora realizó 60 determinaciones para cada tipo de generador según capacidad de actividad (100 mCi, 200 mCi y 300 mCi). Entre las pruebas realizadas se incluyen: rendimiento de elución, curva de elución, determinación de pH del eluido, determinación de la pureza química, radioquímica y radionucleídica, determinación de marcaje de radiofármacos y distribución biológica, y controles biológicos.

Concluye que el rendimiento de los generadores fue satisfactorio ya que el valor medio del rendimiento de elución fue de 100.5%. La eficiencia de elución fue muy alta ya que con un volumen pequeño de eluyente (<5 ml) se extrajo hasta el 98.61% de la actividad total. Además, los valores de la curva de elución resultaron ser independientes de la actividad del generador, esto indicó que los porcentajes de la curva de elución dependen del tamaño de la columna de alúmina que atraviesa la solución eluyente y no de la actividad contenida en esta, por lo tanto, mientras se mantenga el tamaño de la columna y la cantidad de alúmina contenida en esta, se mantendrán los porcentajes de elución, independientemente de la actividad de  $^{99}\text{Mo}$  cargada en la columna.

El pH del eluido se mantuvo prácticamente constante para cada generador independientemente del volumen dosificado en cada columna, el volumen de solución de lavado, presión o velocidad del lavado. Y, la pureza química, radioquímica y radionucleídica de los generadores se encontraron dentro de las especificaciones de la farmacopea (United States Pharmacopeia USP XXI, 1984, pág. 765).

## **1.4.2. Artículos**

### **1.4.2.1. Development of a $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications (Dash y otros, 2012)**

El objetivo del artículo fue demostrar la exitosa aplicación de la alúmina en su forma de microesferas sintetizada por el proceso de gelificación interna en un generador industrial de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  para la obtención de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  químico, radioquímico y radionucleídicamente puro tanto en medio orgánico (eluido con acetona) como en medio acuoso (eluido con cloruro de sodio 0,9%).

Se sintetizó microesferas de alúmina mesoporosa por el método sol-gel. Esta presenta alta resistencia mecánica y gran área superficial ( $175 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ). Los estudios de relación de distribución  $K_d$  y de capacidad de adsorción estática a diferentes pHs indicaron que la alúmina presenta una mayor capacidad a pH 3 siendo esta de 46 mg/g. También se estudió la capacidad de adsorción en función de la temperatura y se obtuvo que esta es mucho mayor a 25 °C que a temperaturas mayores.

Finalmente, se desarrolló un generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  que utiliza una columna cromatográfica de la alúmina sintetizada, la capacidad de adsorción dinámica a pH 3 fue de 15 mg/g, el rendimiento de elución fue mayor al 80%, la pureza radionucleídica del eluido fue menor al 0,1%  $\text{Ci}^{99}\text{Mo}/\text{Ci}^{99\text{m}}\text{Tc}$ , la pureza radioquímica fue mayor al 99% y presentó una contaminación por presencia de iones de aluminio menor a 0,1 ppm.

#### **1.4.2.2. Preparation of clinical-scale $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ column generator using neutron activated low specific activity $^{99}\text{Mo}$ and nanocrystalline $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ as column matrix (Chakravarty y otros, 2012)**

En este artículo se presentó la problemática de la disponibilidad del  $^{99}\text{Mo}$  de fisión en los últimos años, por ello proponen el estudio de adsorbentes de alta capacidad de adsorción para hacer generadores de columna que usen  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ . Plantearon el uso de adsorbentes basados en nanomateriales para la preparación de un generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  considerando que los óxidos de metal nanocristalinos poseen una capacidad de adsorción mejorada.

Sintetizaron la  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  nanocristalina mediante la reacción mecanoquímica en

estado sólido del nitrato de aluminio con bicarbonato de amonio, la mezcla molida se secó en un horno a 100 °C durante 5 h, seguido de la calcinación a 700 °C durante 2 h. Se realizaron las pruebas de coeficiente de distribución Kd y de capacidad de adsorción estática máxima obteniendo los mejores valores a pH 3.

Las pruebas dinámicas las realizaron en una columna de vidrio de 6 cm x 1 cm (d.i.), una frita G<sub>2</sub> y 5,5 g de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, demostrando su utilidad potencial como un adsorbente viable para la preparación de generadores de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc clínicamente útiles con actividades de hasta 350 mCi con una capacidad de adsorción máxima de (156±6) mg Mo/g de adsorbente en condiciones dinámicas y la producción de <sup>99m</sup>Tc con contenido de aluminio de 0,1 ppm (<10 ppm) y en general con concentración radiactiva y pureza altas adecuadas para la formulación de radiofármacos.

#### **1.4.2.3. Mesoporous Alumina (MA) Based Double Column Approach for Development of a Clinical Scale <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc Generator Using (n, $\gamma$ )<sup>99</sup>Mo: An Enticing Application of Nanomaterial (Chakravarty y otros, 2013)**

Los investigadores involucrados sintetizaron nanoalúmina mesoporosa, la caracterizaron y determinaron características de adsorción como las relaciones de distribución Kd de <sup>99</sup>Mo y <sup>99m</sup>Tc a diferentes pH y realizaron el estudio de una de estas relaciones a pH 2 en función del tiempo de adsorción; determinando la capacidad de adsorción de Mo en condiciones estáticas y dinámicas logrando una retención de molibdeno en alúmina de 168 mg Mo por gramo de adsorbente en condiciones dinámicas.

Los investigadores concluyeron que la implementación de una segunda columna cromatográfica en serie incrementa el rendimiento de elución de 55% (rendimiento en una sola columna) a 85% logrando una retención de 168 mg Mo/g de adsorbente la que es suficientemente alta para la preparación de generadores de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc de actividad mayor a los 500 mCi.

#### **1.4.2.4. Adsorption of Molybdenum on Mesoporous Aluminum Oxides for**

### **Potential Application in Nuclear Medicine (Denkova y otros, 2013)**

Se investigó el potencial de dos óxidos de aluminio mesoporosos con una gran área superficial, MSU-X (mesoporosa) y Al-TUD-1 (tetraédrica). Realizaron el estudio de la cinética de adsorción, isotermas de adsorción y el rendimiento de elución del  $^{99m}\text{Tc}$  en ambos adsorbentes concluyendo que los óxidos de aluminio mesoporosos poseen un rendimiento de adsorción mucho mayor al de la AA (alúmina ácida activada), material utilizado actualmente en los generadores de  $^{99m}\text{Tc}$ . Las características de adsorción mejoradas se reflejaron tanto en la cinética de adsorción como en la capacidad de adsorción máxima mucho más alta (más de 2 veces) en comparación con la de la AA encontrándose que la capacidad de adsorción aumenta linealmente al aumentar el área superficial. La capacidad de adsorción máxima alcanzada fue de 112 mgMo/g por la alúmina tetraédrica, más de dos veces la capacidad de adsorción de los materiales de AA.

### **1.4.2.5. Comparative Assessment of Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Develop Clinically Useful $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ Generators using (n, $\gamma$ ) $^{99}\text{Mo}$ (Chakravarty y otros, 2014)**

En este artículo se compararon los óxidos metálicos nanoestructurados tales como nanotitania ( $\text{TiO}_2$ ), nanozirconia ( $\text{ZrO}_2$ ), nanoalúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y alúmina mesoporosa (meso- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como adsorbentes en columnas cromatográficas usando (n, $\gamma$ ) $^{99}\text{Mo}$  con el objetivo de determinar su utilidad en generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ .

Sintetizaron los óxidos, determinaron los coeficientes de distribución  $K_d$  tanto del  $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$  and  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  en los adsorbentes mencionados, así como su potencial zeta y la cinética de adsorción, la capacidad de adsorción mediante el perfil de avance, la vida útil del generador, la concentración radiactiva y la pureza del  $^{99m}\text{Tc}$  para aplicaciones radiofarmacéuticas así como la recuperación del Mo de los generadores agotados.

Concluyeron que la alúmina mesoporosa es el adsorbente más adecuado para asegurar la producción sostenible de generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  de grado clínico utilizando

una actividad específica baja de  $^{99}\text{Mo}$  con una capacidad de adsorción estática de 225 mgMo/g y dinámica de 182 mgMo/g de adsorbente, sin embargo, esta no se encuentra tan lejana de la capacidad de la  $\gamma$ -alúmina que adsorbe 205 mgMo/g en condiciones estáticas y 156 mgMo/g de adsorbente en una columna cromatográfica.

#### **1.4.2.6. Influence of Alumina Phases on the Molybdenum Adsorption Capacity and Chemical Stability for $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generators Columns (Guedes-Silva y otros, 2016)**

Se estudió a la alúmina, en sus diferentes fases, como adsorbente del  $^{99}\text{Mo}$  comparando tanto el área superficial específica, la capacidad máxima de adsorción, así como el contenido de aluminio presente en la solución salina después de la prueba de estabilidad química que se le realizaron a las 3 alúminas sintetizadas.

Para las síntesis, se usaron nitrato de aluminio nonahidratado y carbonato de amonio los que, en composición estequiométrica, se trituraron y se secaron a 100 °C durante 24 horas y se calcinaron con aire a 700 °C durante 2 horas (AMS700-2h), 900 °C durante 5 horas (AMS900-5h) y 1000 °C durante 5 horas (AMS1000-5h). La identificación de las fases de la alúmina cristalina se realizó por difracción de rayos X (Difractómetro de Rayos X Siemens D5000, radiación  $\text{CuK}\alpha$ ). Se identificaron las fases de alúmina presentes en los materiales obtenidos: AMS700-2h como  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , AMS900-5h como una mezcla de las fases  $\theta$  y  $\gamma$ ; mientras que AMS1000-5h presentó  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  y  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  como fases de transición y estable, respectivamente.

Sus áreas superficiales específicas resultaron  $312,0\pm 2.0\text{ m}^2/\text{g}$ ,  $153,7\pm 0.3\text{ m}^2/\text{g}$  y  $36,0\pm 0.1\text{ m}^2/\text{g}$  respectivamente, indicando que la especie AMS700-2h tendría mayor capacidad de adsorción de molibdeno que las demás. Esto se confirma con los reportes de adsorción máxima de molibdeno que para la primera especie resultó en 113,42 Mo(mg)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (g) mucho mayor a las otras dos especies, siendo estas de 92,45 y 37,11 respectivamente. Sin embargo, en el test de contenido de aluminio en la solución salina (usada en la elución de iones pertecnetato para formulación de radiofármacos) después

de la prueba de estabilidad química, la alúmina AMS700-2h presentó de 17,50 a 25,00 ppm de Al (contradiendo lo encontrado por Chakravarty, Ram, Dash & Pillai, 2012 en pruebas de estabilidad relacionadas), mientras que tanto AMS900-5h como AMS1000-5h presentaron de 2,0 a 3,5 ppm de Al, esto indicaría que la fase  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tiene una mayor solubilidad en solución salina fisiológica que las otras fases.

La presencia de la fase  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en AMS900-5h fue suficiente para reducir la solubilidad a niveles inferiores a 2 ppm de aluminio, exactos a los encontrados para el material AMS1000-5h calcinado a 1000 °C durante 5 horas constituido principalmente por  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sin embargo, la baja capacidad de adsorción de molibdeno de este último adsorbente hizo impracticable su aplicación para columnas generadoras de alta actividad de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc.

Concluyeron que AMS700-2h era inadecuado para su uso en columnas de generadores de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc debido a que cuenta con una alta superficie específica y alta capacidad de adsorción de molibdeno, pero baja estabilidad química. Por otro lado, AMS1000-5h tuvo una gran estabilidad química pero bajos valores de área de superficie específica y capacidad de adsorción de molibdeno debido a la presencia de la fase  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y la menor porosidad. Encontrándose los mejores resultados con AMS900-5h, la presencia de las fases  $\theta$  y  $\gamma$  condujo a un área de superficie, estabilidad química y capacidad de adsorción de molibdeno relativamente altas, lo que lo convierte en un adsorbente prometedor en generadores de alta actividad de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc.

#### **1.4.2.7. Mesoporous Alumina as an Effective Adsorbent for Molybdenum (Mo) toward Instant Production of Radioisotope for Medical Use (Saptiama y otros, 2017)**

En este artículo se expuso el problema del suministro insuficiente tanto de <sup>99m</sup>Tc como de <sup>99</sup>Mo que impactó en Japón y en la atención médica japonesa significativamente en los años 2001, 2009 y 2010 debido a rutas aéreas obstaculizadas y problemas con el reactor nuclear de Canadá, principal exportador, por ello propusieron el desarrollo de un adsorbente con alta capacidad de adsorción del <sup>99</sup>Mo para posibilitar el uso de <sup>99</sup>Mo

obtenido por activación neutrónica  $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$  sin tener que incrementar el tamaño del generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

Los materiales porosos tienen potencial para ser empleados como adsorbentes de Mo en generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  debido a su gran área superficial. Este y un gran volumen de poro son requisitos críticos para los materiales adsorbentes, ya que estos factores determinan la cantidad de sitios activos disponibles para la adsorción de Mo.

Se preparó alúmina mesoporosa (MA) aplicando diferentes temperaturas de calcinación en aire (600, 700 y 900 °C) durante 5 h después de su preparación para controlar el ordenamiento mesoestructural, las áreas de superficie y la cristalinidad de los materiales de MA. A las muestras preparadas se les denominó MA\_600, MA\_700 y MA\_900 respectivamente.

En los estudios de caracterización se encontró que para MA\_600 y MA\_700 la estructura es amorfa, mientras que MA\_900 presenta la fase de la  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; las isothermas de adsorción de  $\text{N}_2$  mostraron que, con el aumento de la temperatura de calcinación, el área superficial de las muestras de MA se reduce gradualmente obteniéndose: 275, 229 y 139  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$  respectivamente.

Se realizaron pruebas de adsorción a pH 3 y 7 obteniendo la mayor adsorción a pH 3 variando las capacidades de retención según la temperatura de calcinación como sigue: a 700 °C (31,3  $\text{mg g}^{-1}$ ), 900 °C (17,5  $\text{mg g}^{-1}$ ), 600 °C (12,5  $\text{mg g}^{-1}$ ) a pH = 3, esto debido a que los grupos de aluminol (Al-OH) en los poros de la MA se convierten en el catión  $\text{Al-OH}_3^{3+}$  que adsorbe las especies de  $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$  (especie dominante a un pH entre 2 y 6) en cambio, a un pH de 7, los grupos de aluminol no pueden adsorber eficazmente las especies aniónicas de Mo ( $\text{MoO}_4^{2-}$  y  $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$ ). También se obtuvo, en una prueba de adsorción en columna, que la capacidad de adsorción de Mo de MA\_700 es mayor (41,6  $\text{mg g}^{-1}$ ) que la del polvo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  comercial (34,9  $\text{mg g}^{-1}$ ) por lo que concluyeron que este material es el más adecuado para su uso como adsorbente de Mo en un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

#### **1.4.2.8. Molybdenum Adsorption Properties of Alumina-Embedded Mesoporous Silica for Medical Radioisotope Production (Saptiama y otros, 2018)**

Se estudió el aluminosilicato mesoporoso como posible material adsorbente de molibdeno debido a sus propiedades únicas, como su gran área de superficie, gran volumen de poros, tamaño de poro ajustable, capacidad de adsorción mejorada y una cinética rápida.

Se prepararon partículas de sílice mesoporosa (MPS) incrustadas en alúmina con relaciones molares Al/Si finales de 0,1, 0,3, 0,5 y 0,6. Los polvos amarillentos preparados se calcinaron en aire para convertirse en alúmina a diversas temperaturas: 600, 750, 900 y 1050 °C. Las muestras de MPS incrustadas en alúmina se denominaron Al<sub>x</sub>-MPS, siendo x las relaciones molares de Al/Si. La muestra prístina de MPS (sin alúmina) se denotó como Al<sub>0</sub>-MPS.

Se realizaron experimentos de adsorción de Mo por el método por lotes con cada una de las muestras preparadas mezclándose 20 mg de la muestra con 2,0 ml de solución de molibdato de sodio (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>) (1000 mg (Mo) L<sup>-1</sup>) y se agitó en un pequeño tubo de ensayo a temperatura ambiente. La proporción de mezcla entre la muestra y la solución fue de 1:100. El pH de la solución se ajustó con una solución de HCl a pH 3 y pH 7. Luego, la suspensión se agitó durante 2 horas y el sobrenadante se filtró a través de un filtro de membrana con un diámetro de poro de 0,2 µm. La concentración de Mo en el filtrado resultante se midió utilizando espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES).

La temperatura de calcinación 750 °C se identificó como la temperatura óptima de calcinación para lograr un área de superficie alta, un gran volumen de poros y una distribución estrecha del tamaño de los poros simultáneamente. En las pruebas de adsorción de Mo, las muestras de Al<sub>0,6</sub>-MPS retuvieron mucho más a pH 3 que a pH 7 dado que los grupos de aluminol (Al-OH) incrustados en los poros de los MPS se convierten en sitios catiónicos ( $\equiv\text{Al-OH}_2^+$ ) a pH bajo y son responsables de adsorber las

especies aniónicas de  $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$  (predominante en pH 2-6), mientras que a pH 7, los grupos de aluminol se convierten en sitios con carga negativa y no pueden adsorber las especies  $\text{MoO}_4^{2-}$  y  $\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{6-}$  (predominantes a pH 7) de manera efectiva.

La tendencia en la capacidad de adsorción de Mo en relación con la temperatura de calcinación fue  $750\text{ }^\circ\text{C} > 600\text{ }^\circ\text{C} > 900\text{ }^\circ\text{C} > 1050\text{ }^\circ\text{C}$  y relación molar Al/Si:  $\text{Al}_{0.1}\text{-MPS} < \text{Al}_{0.3}\text{-MPS} < \text{Al}_{0.5}\text{-MPS} < \text{Al}_{0.6}\text{-MPS}$ . Entre todas las muestras estudiadas, la muestra de  $\text{Al}_{0.6}\text{-MPS}$  calcinada a  $750\text{ }^\circ\text{C}$  mostró la mayor capacidad de adsorción de Mo ( $16,8\text{ mg de Mo g}^{-1}$  de adsorbente). A temperaturas más bajas ( $600\text{-}750\text{ }^\circ\text{C}$ ), el proceso de calcinación no alteró la estructura de sílice mesoporosa, sin embargo, a temperaturas de calcinación más altas ( $900\text{-}1050\text{ }^\circ\text{C}$ ), la estructura mesoporosa se destruyó debido a la gran contracción térmica dando paso a la fase  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

## CAPÍTULO II

### MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 2.1. Marco teórico

##### 2.1.1. Producción de $^{99}\text{Mo}$

La producción de  $^{99}\text{Mo}$  se realiza mediante: fisión, activación neutrónica y aceleradores de partículas, las que se describen a continuación:

##### 2.1.1.1. Fisión

Es la irradiación de blancos de uranio enriquecidos en un reactor nuclear, con la posterior extracción del  $^{99}\text{Mo}$ , su nomenclatura es:  $^{235}\text{U}(n, \text{fisión})^{99}\text{Mo}$ . La principal desventaja de este método es que otros productos de fisión pueden generarse junto con el  $^{99}\text{Mo}$  como  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  y  $^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$  y, por lo tanto, se requieren de procedimientos complejos de separación para obtener  $^{99}\text{Mo}$  puro (Tanase y otros, 1976); otro inconveniente de este proceso es que requiere blancos que contengan uranio-235, que están sujetos a las precauciones de seguridad de los materiales fisionables (Oliveira, 2012). Otra dificultad es que el molibdeno de fisión se produce en un número limitado de reactores de potencia próximos a cerrar (IAEA Staff Report, 2011). En la Tabla se muestran los reactores de investigación que producen  $^{99}\text{Mo}$ .

**Tabla 1**  
*Reactores productores de  $F^{99}\text{Mo}$*

Nombre	País	Capacidad de producción de $F^{99}\text{Mo}$ (en seis días de operación a la semana)	Inicio de operación comercial	Año estimado de cierre
BR-2	Bélgica	7800 Ci	1963	2026
HFR	Países Bajos	6200 Ci	1961	2024
LVR-15	República Checa	3000 Ci	1957	2028
SAFARI-I	Sudáfrica	3000 Ci	1965	2030
Maria	Polonia	2700 Ci	1974	2030
OPAL	Australia	2150 Ci	2006	2057
RBT-6/RBT-10a	Rusia	1000 Ci	1975/1984	2025
RA-3	Argentina	400 Ci	1967	2027
VVR-Ts	Rusia	350 Ci	1964	2025

Ci: Curies

Fuente: Adaptación de (Nuclear and Radiation Studies Board; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2001, pág. 14)

### 2.1.1.2. Activación neutrónica

Este proceso de activación se basa en la reacción de captura radiactiva de un neutrón en el núcleo de  $^{98}\text{Mo}$  y su nomenclatura es:  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ . A pesar de ser un proceso conocido desde hace muchos años, se está revalorando mundialmente en el actual contexto de escasez según (Nuclear Energy Agency, 2010, pág. 39) en *Review of Potential Molybdenum-99/Technetium-99m Production Technologies*. Tal proceso es el empleado para la producción de  $^{99}\text{Mo}$  en el Instituto Peruano de Energía Nuclear aplicando la extracción por solventes como método de separación del  $^{99m}\text{Tc}$ , el que luego se provee a los centros de medicina nuclear del país.

### 2.1.1.3. Aceleradores

Se podría usar una fuente de neutrones accionada por un acelerador para las mismas reacciones descritas anteriormente:  $^{235}\text{U}(n, \text{fisión})^{99}\text{Mo}$  o  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ . Otra posible reacción de neutrones es  $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$  con neutrones de 14MeV en un objetivo enriquecido de  $^{100}\text{Mo}$ . Esta reacción tiene un orden de magnitud de sección transversal mayor que la reacción de captura de neutrones térmicos de  $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ , pero produce

un producto similar de baja actividad específica.

La reacción impulsada por protones de  $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$  tiene una sección transversal relativamente baja y produciría un producto de baja actividad. La reacción de deuterón  $^{100}\text{Mo}(d, p2n)^{99}\text{Mo}$  tiene el doble de la sección transversal de  $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ , pero también requiere haces de energía más altos (Bertsche, 2010, págs. 121-122).

### 2.1.2. Mecanismos de obtención de $^{99m}\text{Tc}$

Existen cuatro métodos más comúnmente utilizados para la separación del  $^{99m}\text{Tc}$  del  $^{99}\text{Mo}$ , cuando el primero proviene del segundo: cromatografía en una columna de alúmina, extracción del  $^{99m}\text{Tc}$  con MEK como solvente, sublimación de óxidos de Tc a partir de compuestos de Mo, y elución de  $^{99m}\text{Tc}$  de columnas de gel de molibdato de zirconio ( $^{99}\text{Mo}$ ), sin embargo, el generador comercialmente disponible más utilizado, está basado en la columna cromatográfica de alúmina. En él, la operación de elución es de un solo paso obteniendo  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  mediante una solución salina estéril. Su fácil operación, alto rendimiento y alta pureza radionucleídica hacen que los generadores de columna se adapten idealmente a los departamentos de medicina nuclear en los hospitales permitiendo la disponibilidad de este radionúclido de forma práctica y económica diariamente (Banerjee y otros, 2001).

En la Tabla 2 se muestra de manera resumida las tecnologías de producción de  $^{99}\text{Mo}$  y  $^{99m}\text{Tc}$  a partir de operaciones en reactores o aceleradores y no de separaciones fisicoquímicas que acaban de ser mencionadas para el caso de  $^{99m}\text{Tc}$ .

La producción directa de  $^{99m}\text{Tc}$  en un acelerador también se ha investigado a través de la reacción  $^{100}\text{Mo}(p, 2n)^{99m}\text{Tc}$ , que tiene una sección transversal relativamente grande en la región de 20MeV (Bertsche, 2010, pág. 122). Esta técnica podría utilizar ciclotrones regionales para proporcionar  $^{99m}\text{Tc}$  local en grandes áreas metropolitanas.

**Tabla 2**  
**Tecnologías para la producción de  $^{99m}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$**

Recinto	Operación	Reacción
Reactores	Fisión del $^{235}\text{U}$	$n+^{235}\text{U}\rightarrow^{99}\text{Mo}+xn+\text{otros productos de fisión}$
	Activación neutrónica del $^{98}\text{Mo}$	$n+^{98}\text{Mo}\rightarrow^{99}\text{Mo}$
Aceleradores	Foto-fisión del $^{238}\text{U}$	$\text{Fotón}+^{238}\text{U}\rightarrow^{99}\text{Mo}+xn+\text{otros productos de fisión}$
	Transmutación del $^{100}\text{Mo}$	$\text{Fotón}+^{100}\text{Mo}\rightarrow^{99}\text{Mo}+n$
	Producción directa del $^{99m}\text{Tc}$	$p+^{100}\text{Mo}\rightarrow^{99m}\text{Tc}+2n$

Fuente: Adaptación de (Singh, 2011, pág. 7)

### 2.1.2.1. Adsorción en columna cromatográfica de alúmina

El principio de la cromatografía en columna se basa en las diferencias de la afinidad existente de la alúmina por el  $^{99}\text{Mo}$  y  $^{99m}\text{Tc}$  durante la adsorción. El objetivo es obtener una constante de distribución  $K_d$  del padre ( $^{99}\text{Mo}$ ) alta en el adsorbente y un bajo  $K_d$  para el producto de descomposición o 'hijo' ( $^{99m}\text{Tc}$ ), que luego se puede separar de manera fácil mediante el uso del eluyente más apropiado. Algunos aspectos que deben considerarse son: el tipo de columna, la dimensión de la columna, la calidad del lecho de la columna, la naturaleza química del adsorbente, el pretratamiento del lecho de la columna, la técnica de carga del adsorbente, entre otros.

La comparación del generador cromatográfico de columna  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  basado en  $^{99}\text{Mo}$  y  $(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$  se representa en la Tabla .

Debido a la actividad específica relativamente baja, el uso de  $(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$  requiere una columna de alúmina muy grande para adsorber cantidades útiles de  $^{99}\text{Mo}$  para la fabricación de generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  a escala clínica. El generador con  $(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$  también requiere de mayores volúmenes de eluyente para recuperar el  $^{99m}\text{Tc}$  (Dash y otros, 2013).

Existen dos tipos de generadores cromatográficos: generadores de presión positiva y generadores de presión negativa. En ambos casos el radionúclido padre está dentro de la columna del generador, rodeada por un blindaje de plomo.

**Tabla 3**

Comparación de columnas cromatográficas de alúmina de generadores fabricados a partir de  $F^{99}\text{Mo}$  y  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$

Descripción	$(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$	$F^{99}\text{Mo}$
Tiempo requerido para la preparación de la columna cromatográfica del generador	>2h	<5min
Actividad específica del $^{99}\text{Mo}$	<111GBq (3Ci)/g	>37TBq (1000Ci)/g
Tamaño mínimo del generador	2cm(d)x4cm(h)	<0,3(d)x1cm(h)
Recuperación del $^{99m}\text{Tc}$ (%)	40-90% en 10 ml de solución salina	~95% en <4 ml de solución salina
Ruptura del $^{99}\text{Mo}$ (% del producto $^{99}\text{Mo}$ disponible)	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-4}$

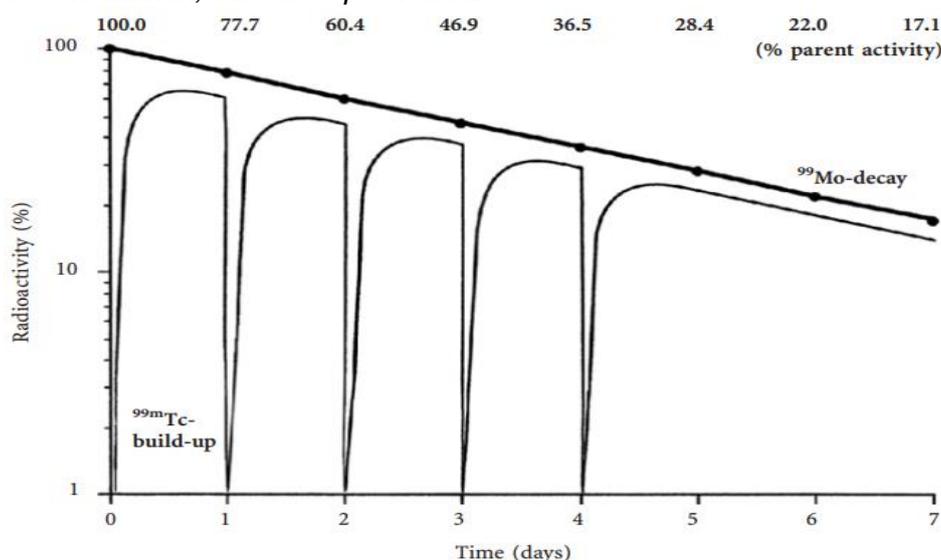
Fuente: (Dash y otros, 2013, pág. 169)

A ambos se les adapta un terminal con filtro de 0,22  $\mu\text{m}$  para asegurar la esterilidad del eluido y retener cualquier partícula que pudiera disgregarse de la columna (Consejo de Seguridad Nuclear; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2015).

En la Figura 1 se muestra el decaimiento-crecimiento del par  $^{99m}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$  en un generador.

**Figura 1**

Decaimiento radiactivo del  $^{99}\text{Mo}$  y crecimiento de la actividad del  $^{99m}\text{Tc}$  dentro de las 24h después de la elución, calculado por 7 días.



Fuente (Zolle, 2007, pág. 84)

Desde la aplicación del  $F^{99}\text{Mo}$  para la obtención de  $^{99m}\text{Tc}$  como radioisótopo de

uso médico, se optó por el uso de la alúmina ácida en la columna de los generadores, sin embargo, debido a la interrupción del suministro de  $F^{99}\text{Mo}$  la pasada década (IAEA Staff Report, 2011), se iniciaron investigaciones que abarcan el estudio de la capacidad de adsorción de la alúmina en sus diferentes presentaciones: microesferas de alúmina (Dash y otros, 2012), Alúmina 90 ácida activa (0.063-0.200 mm) (Asif & Mushtaq, 2010), ácida-Fluka, débilmente ácida-Fluka, Neutra-Fluka, Neutra-Merck, Súper ácida-ICN, y Súper básica-ICN, todas tamizadas (malla <200) y para  $F^{99}\text{Mo}$  (Wilkinson y otros, 2002), entre otros; así como en sus diferentes fases: alfa (Kadarisman y otros, 2018), gamma (Chakravarty y otros, 2012), alfa, delta, theta y gamma (Guedes-Silva y otros, 2016), entre otros; en sus diferentes tamaños de poro como microporosa (Guedes-Silva y otros, 2016), y mesoporosa (Denkova y otros, 2013) y en modificaciones a su estructura como por ejemplo, sílice mesoporosa incrustada en alúmina (Saptiama y otros, 2018). Los nanomateriales adsorbentes de óxido de aluminio (alúmina) poseen una capacidad de adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  mucho más alta que la de los adsorbentes convencionales y es por ello que se continúan estudiando.

#### **2.1.2.1.1. $\gamma$ -Alúmina nanopartícula**

De todas las presentaciones y fases de la alúmina, la  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  nanopartícula ha demostrado ser un material novedoso que podría proporcionar una capacidad de adsorción de hasta 200 mg de Mo/g y tener un impacto en la preparación de generadores de más de 1 Ci teniendo como antecedente los obtenidos por (Chakravarty y otros, 2012) de 350 mCi usando  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ .

#### **2.1.2.2. Extracción líquido - líquido**

La base de esta técnica consiste en las diferencias de solubilidad de la mezcla  $^{99m}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$  en dos fases líquidas inmiscibles. Existen dos categorías principales para la extracción con solvente, la extracción con solvente convencional que emplea dos líquidos inmiscibles (fase acuosa/MEK) y el sistema bifásico acuoso (ABS) que utiliza dos polímeros inmiscibles solubles en agua.

### 2.1.2.2.1. Extracción con MEK

La técnica de extracción con solvente para la separación de  $^{99m}\text{Tc}$  se realizó originalmente usando MEK. Y es el método actualmente usado por la Planta de Producción de Radioisótopos PPR del IPEN, cuyos diagramas de producción se muestran en las figuras 2, 3 y 4. Sin embargo, esta técnica se está ampliando al uso de otros solventes, como bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB), azul de metileno/nitrobenceno, trioctilamina, entre otros. A pesar de ello, el MEK, sigue siendo el más ampliamente usado, debido a las ventajas que presenta:

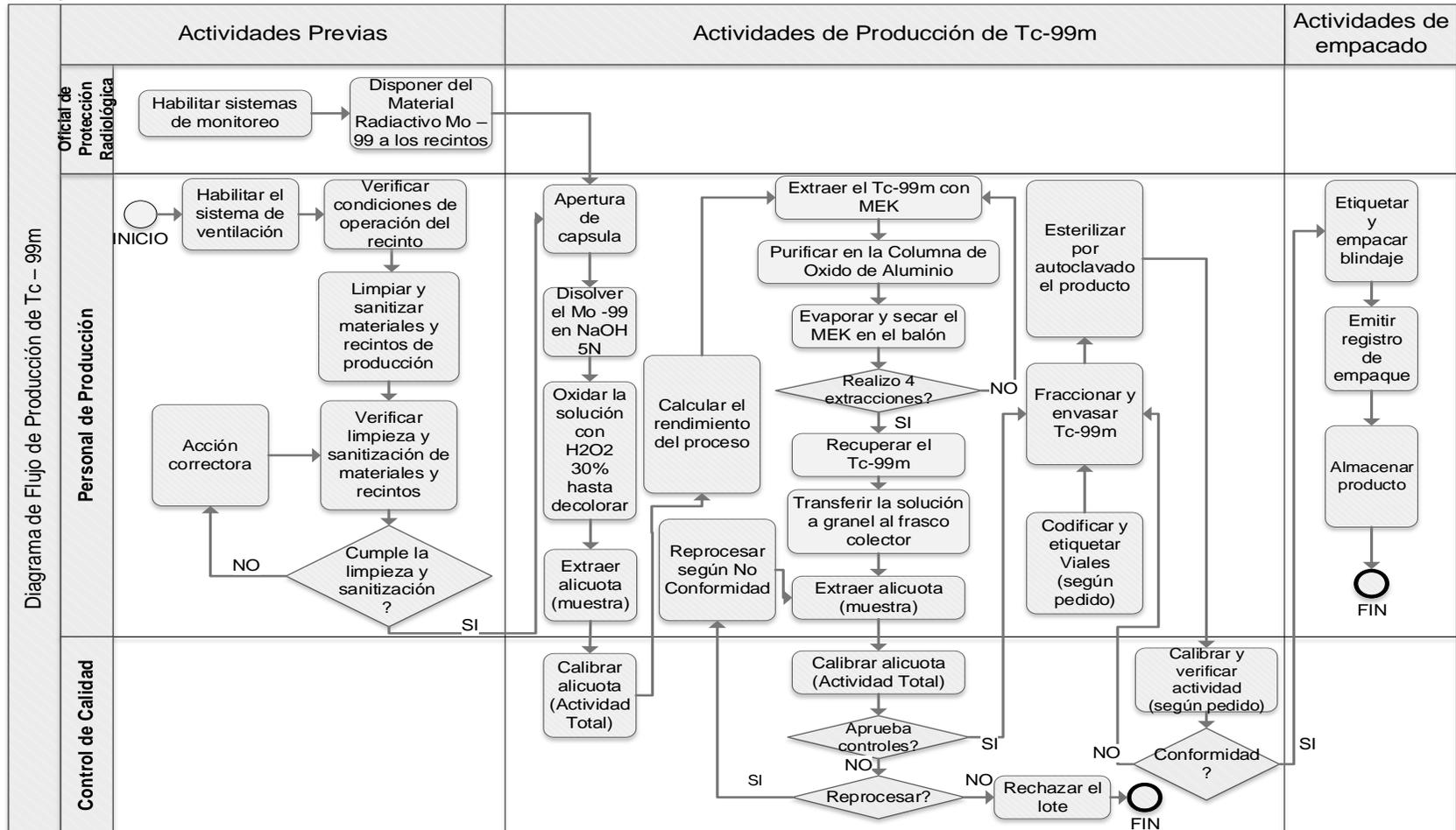
- Permite el uso de  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$  de baja actividad específica.
- Alta eficiencia de separación y alta concentración radiactiva.
- Sistema económico en comparación con los generadores de columnas cromatográficas.
- Alta pureza radionucleídica, radioquímica y química.
- Fácil de automatizar.

Sin embargo, algunas preocupaciones que provoca el uso de esta técnica incluyen:

- El uso de MEK requiere un alto grado de robustez de los sistemas operativos debido a su propiedad de inflamabilidad para afrontar los problemas de seguridad debido a su bajo punto de inflamación ( $-9^{\circ}\text{C}$ ) (Brenntag Nordic AB, 2014).
- El sistema utilizado actualmente es complejo, voluminoso y requiere un alto grado de control manual.
- El MEK es susceptible a la degradación por radiación.
- Posibilidad de contaminación orgánica polimérica junto con impurezas aldólicas en el producto que tiene efectos perjudiciales en la radiomarcación posterior.
- El proceso MEK se lleva a cabo en un sistema abierto y requiere esterilización del  $^{99m}\text{Tc}$  extraído antes de su aplicación clínica (Dash y otros, 2013, pág. 170).

**Figura 2**

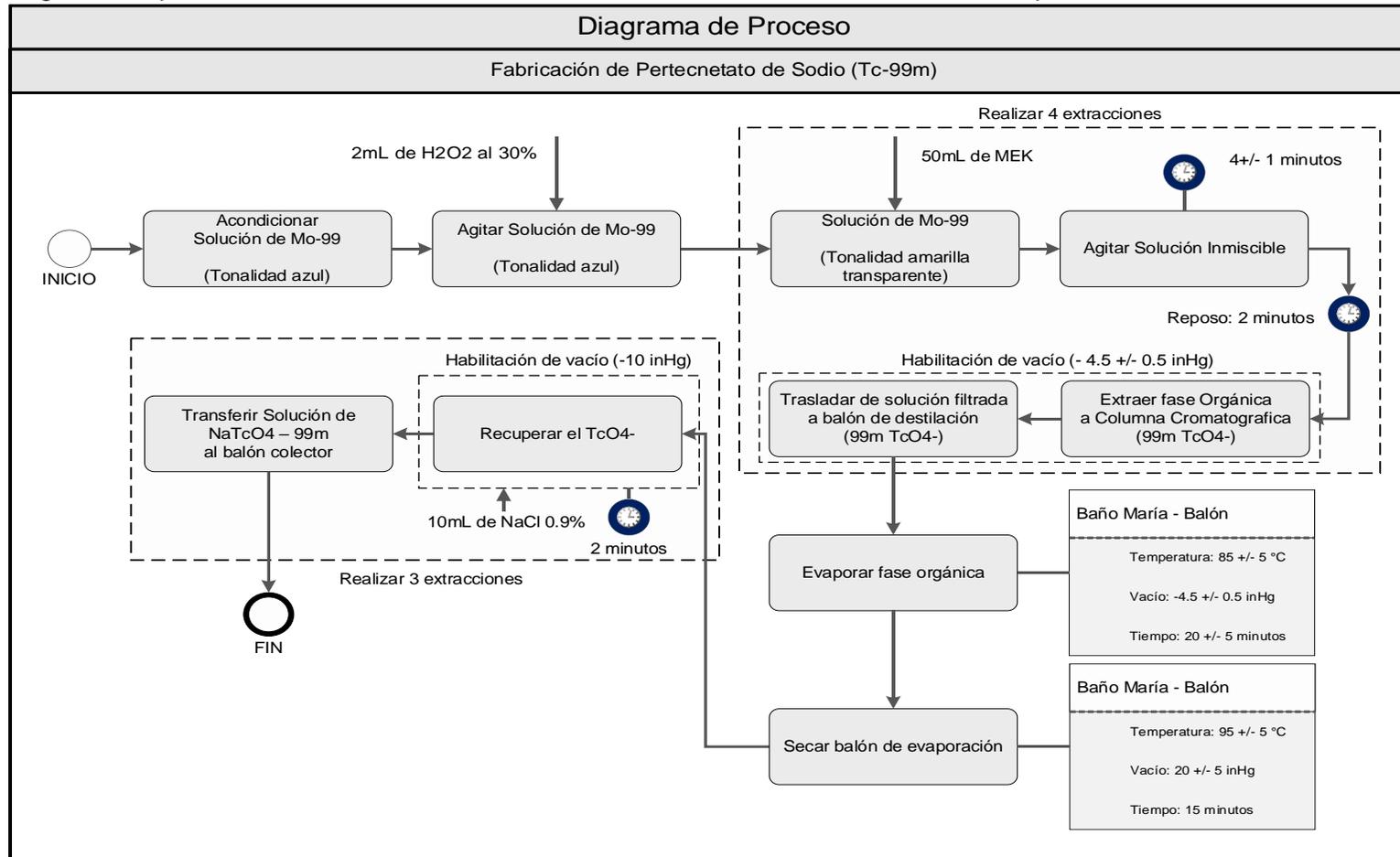
Diagrama de flujo de producción de <sup>99m</sup>Tc en la Planta de Producción de Radiosíotopos del IPEN



Fuente (Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2018)

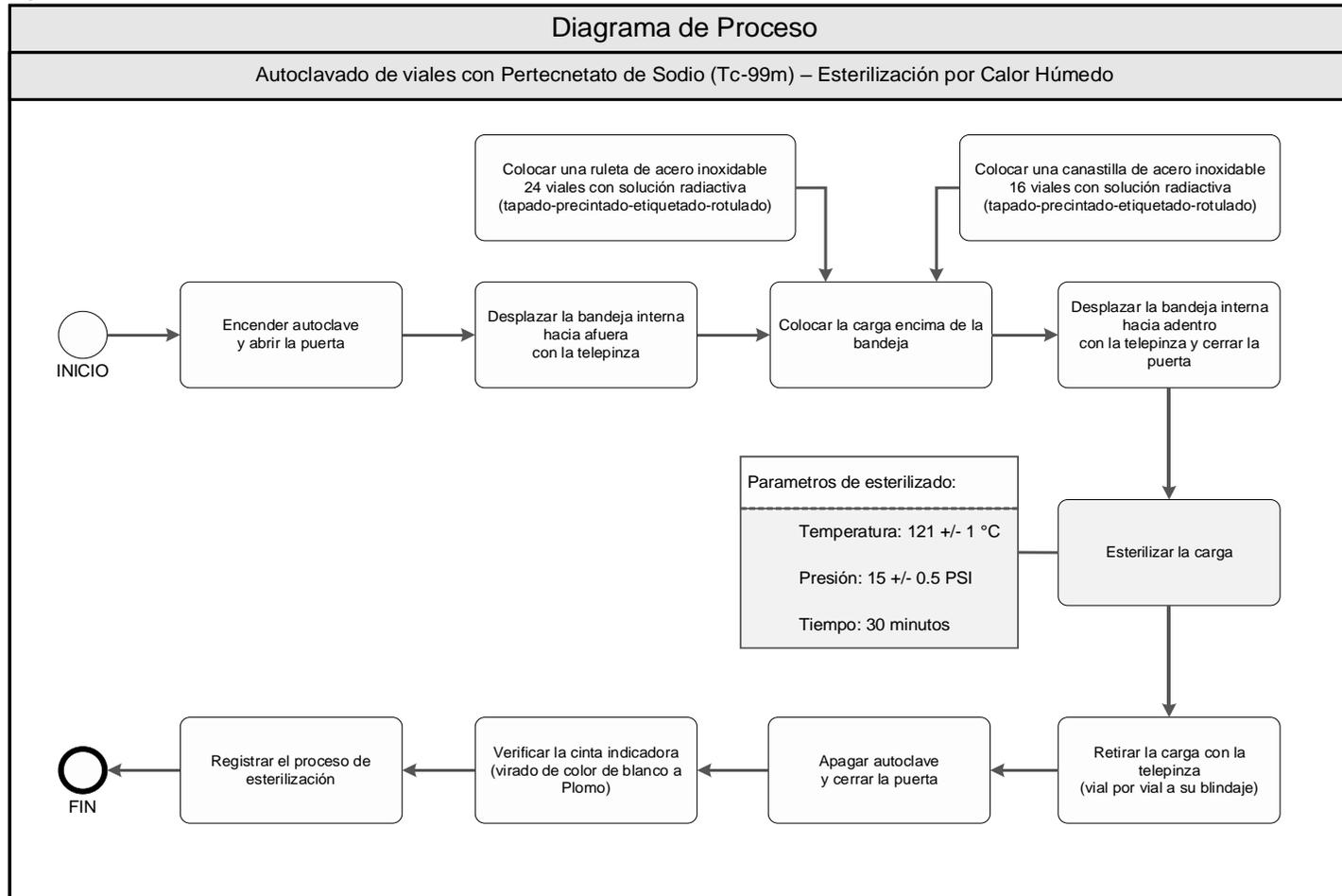
**Figura 3**

*Diagrama de proceso de fabricación de <sup>99m</sup>Tc en la Planta de Producción de Radiosítopos del IPEN*



Fuente (Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2018)

**Figura 4**  
 Diagrama de proceso de esterilización de viales con <sup>99m</sup>Tc en la Planta de Producción de Radiosiótopos del IPEN



Fuente: (Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2018)

### 2.1.2.3. Sublimación

La técnica se basa en la diferencia de las propiedades de volatilización de los óxidos de molibdeno y tecnecio.

La tecnología de sublimación es adecuada para la producción centralizada de  $^{99m}\text{Tc}$  presentando las siguientes ventajas:

- Permite el uso de  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$  de baja actividad específica.
- El  $\text{MoO}_3$  irradiado se puede usar directamente sin procesamiento químico.
- El proceso es flexible y puede producir diferentes cantidades de curies de una manera sencilla.
- Alta pureza radionucleídica.
- Generación de pocos residuos radiactivos.

Pero presenta las siguientes dificultades por lo que se duda de su utilidad a gran escala:

- El aparato de destilación es voluminoso, costoso y complejo y requiere un alto grado de medidas de seguridad.
- Requiere personal calificado y estrictas medidas de seguridad.
- La eficiencia de separación lograda es de hasta 50%.
- Requiere esterilización del  $^{99m}\text{Tc}$  extraído antes de su aplicación clínica (Dash y otros, 2013, pág. 171).

### 2.1.2.4. Elución de columnas de gel de molibdato de zirconio

En la técnica que utiliza gel de molibdato  $^{99}\text{Mo}$  de zirconio (ZMG), los gránulos de ZMG se empaquetan en una columna de lecho fijo en la que se extrae el  $^{99m}\text{Tc}$  (formado por el decaimiento del  $^{99}\text{Mo}$ ) con una solución de  $\text{NaCl}$  al 0,9% a través del lecho. Esta estrategia implica la disolución de  $(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ , la precipitación en forma de gel como molibdato de circonio, filtración en gel, secado, fragmentación del gel y empaquetamiento en columna. Las ventajas que posee son:

- Fácil operación en columna y aplicación de (n,γ)<sup>99</sup>Mo.
- Proporciona <sup>99m</sup>Tc de alta pureza.

Las desventajas consideran:

- Alta inversión en una instalación blindada para el proceso radioquímico.
- Procedimiento complejo que, al depender de varios factores, puede provocar variaciones entre lotes.
- Proceso costoso (Dash y otros, 2013, págs. 171-172).

### 2.1.3. Actividad radiactiva

La actividad es la tasa de desintegración radiactiva (Berkeley Lab, ABC's of Nuclear Science, 2005). La actividad de un radionúclido producido por la irradiación de un material objetivo con partículas cargadas en un ciclotrón o con neutrones en un reactor nuclear viene dada por (Urdaniz & Real, 2004):

$$A = \frac{m_{Mo} \times N_A \times Ab_{isot}}{A_{Mo}} \times (F_{ter} \times \sigma + F_{epi} \times I_R) \times (e^{-\lambda t_d})(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (1)$$

Donde:

A: Actividad (Bq)

m<sub>Mo</sub>: Masa de Mo (g)

N<sub>A</sub>: Número de Avogadro, 6.022 × 10<sup>23</sup>

Ab<sub>isot</sub>: Abundancia isotópica

A<sub>Mo</sub>: Masa atómica de Mo

F<sub>ter</sub>: Flujo térmico

σ: Sección eficaz transversal (probabilidad) de formación del radionúclido (cm<sup>2</sup>); se da en unidades de "barn" que es igual a 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>

F<sub>epi</sub>: Flujo epitérmico

I<sub>R</sub>: Integral de resonancia (barn)

$\lambda$ : Constante de decaimiento o semidesintegración equivalente a  $0.693/t_{1/2}$  ( $s^{-1}$ )

$t_i$ : Duración de la irradiación (s)

$t_d$ : Tiempo de decaimiento (s)

La actividad radiactiva se mide en becquerel o becquerelio (Bq) en el Sistema Internacional de Unidades. Un becquerel se define como la actividad de una cantidad de material radiactivo con decaimiento de un núcleo por segundo. Equivale a una desintegración nuclear por segundo (Ojeda Guzzini, 2015, pág. 203).

El curio (Ci) también es una unidad de actividad radiactiva. Su equivalencia es:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

### **2.1.3.1. Medición de la radiactividad**

El detector Geiger-Müller es ampliamente utilizado para detectar radiación gamma, es un método de contaje sencillo y económico, sin embargo, no puede medir directamente la energía de la radiación y queda limitado a tasas de recuento relativamente bajas. Los detectores de germanio hiperpuro (HPGe) tienen un excelente poder de resolución de la energía en espectroscopía de rayos gamma, y en este campo han desplazado prácticamente a todos los demás sistemas (Flakus, 2014).

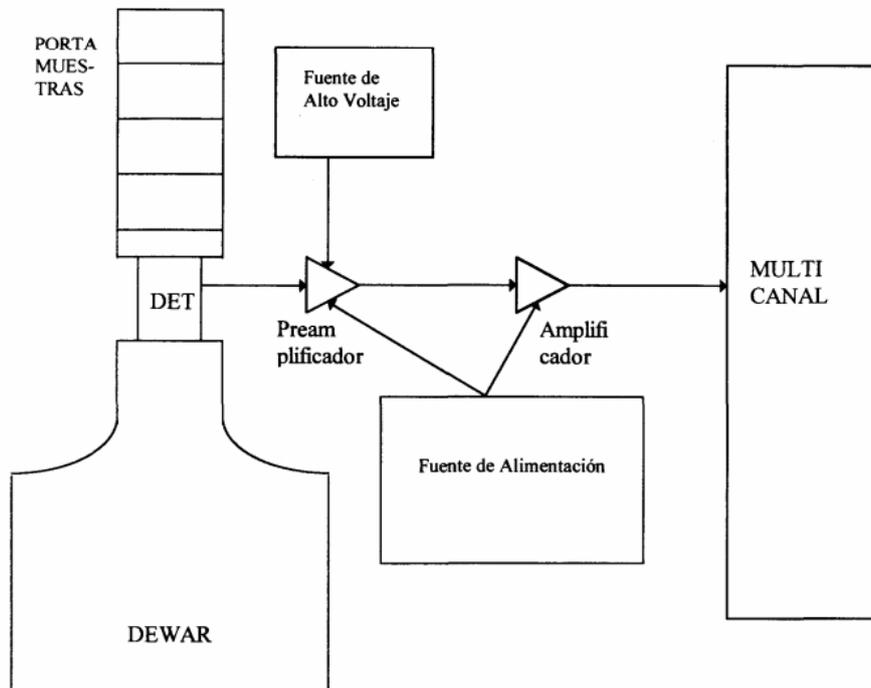
#### **2.1.3.1.1. Espectrómetro gamma**

El equipo de detección de radiación gamma HPGe cuenta con los siguientes elementos, como se muestra en la Figura 5 y en Anexo H: Imágenes de equipos, instrumentos, materiales y otros utilizados en la parte experimental (Imagen 2):

- Detector de germanio hiperpuro
- Preamplificador
- Amplificador lineal
- Fuente de alto voltaje
- Chasis con fuente de alimentación

- Multicanal
- Portamuestras para colocar a las fuentes a diferentes distancias fuente-detector.
- Blindaje de plomo de forma cilíndrica

**Figura 5**  
*Esquema del espectrómetro gamma*

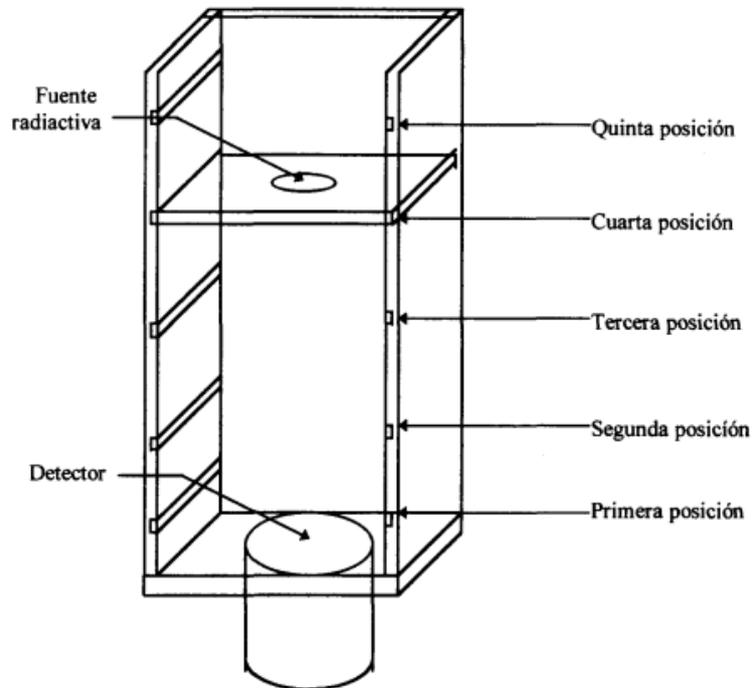


Fuente: (Cortés Palacios, 1999, pág. 38)

La posición de la fuente (Anexo H: Imágenes de equipos, instrumentos, materiales y otros utilizados en la parte experimental, Imagen 8) con respecto al detector, se fija por medio de un porta muestras con el cual se pueden colocar a diferentes distancias del detector sobre su eje longitudinal como se puede ver en la Figura 6.

### Figura 6

Porta muestra para colocar las fuentes radiactivas a diferentes distancias (5 posiciones) entre la fuente y el detector



Nota: fuente (Cortés Palacios, 1999, pág. 40)

#### 2.1.3.2. Cálculo de radiactividad por espectrometría gamma

La actividad de una muestra en el detector se calcula de la siguiente manera (Montoya Rossi, 1995):

$$A_0 = \frac{P \times e^{\lambda \times t_d} \times \left(\frac{t_r}{t_v}\right) \times \lambda}{\eta \times h \times (1 - e^{\lambda \times t_r})} \quad (2)$$

Donde:

$A_0$ : Actividad a tiempo de decaimiento cero (Bq)

P: Área neta del fotopico analizado en cuentas acumuladas

$\lambda$ : Constante de semidesintegración ( $s^{-1}$ )

$t_d$ : Tiempo de decaimiento (s)

$t_r$ : Tiempo real del contaje (s)

$t_v$ : Tiempo vivo del contaje (s)

$\eta$ : Eficiencia del detector

$h$ : Abundancia absoluta o intensidad absoluta del rayo gamma en fotones emitidos por desintegración

#### 2.1.4. Capacidad de adsorción

El proceso de adsorción de los nano adsorbentes de óxidos metálicos es una combinación de interacciones físicas y químicas que depende principalmente del área superficial, el tamaño de poro y sus distribuciones, coeficientes de difusión y la capacidad de formar un enlace químico en la superficie sólida (Chakravarty y otros, 2014).

##### 2.1.4.1. Cinética de adsorción

Es el estudio de la adsorción en función del tiempo. Para representar los modelos cinéticos de adsorción se emplean dos criterios: la concentración de la solución o la carga en el adsorbente. Los modelos de pseudo primer orden (Lagergren, 1898) y el de pseudo segundo orden (Ho & McKay, 1999) han sido comúnmente usados como modelos simplificados en la dinámica de adsorción del molibdeno en alúmina.

La ecuación linealizada que describe el modelo cinético de Lagergren es:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (3)$$

La ecuación para el modelo de pseudo segundo orden es:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

Donde  $t$  es el tiempo de contacto del molibdeno en alúmina,  $q_t$  y  $q_e$  son las cantidades adsorbidas en un tiempo  $t$  y en el equilibrio respectivamente,  $k_1$  y  $k_2$  son las constantes de velocidad de los modelos de pseudo primer y segundo orden respectivamente.

#### 2.1.4.2. Isothermas de adsorción

O también llamado equilibrio de adsorción, describen el comportamiento de la interacción entre adsorbato-adsorbente (molibdeno-alúmina) y proveen información sobre la capacidad del adsorbente estudiado.

Dos modelos, Langmuir y Freundlich se estudiaron ampliamente para el par molibdeno-alúmina.

La ecuación de Freundlich viene dada por:

$$q_{e,F} = K_F \times C_e^{1/n} \quad (5)$$

Y la ecuación de Langmuir por:

$$\frac{C_e}{q_{e,L}} = \frac{C_e}{q_{m,L}} + \frac{1}{K_L \times q_{m,L}} \quad (6)$$

Donde  $C_e$  es la concentración del molibdeno en el equilibrio,  $K_F$  y  $K_L$  son las constantes de Freundlich y Langmuir respectivamente,  $n$  en la ecuación de Freundlich es la constante relacionada con la fuerza de adsorción del material,  $q_{e,F}$  y  $q_{e,L}$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ) son las cantidades adsorbidas en el equilibrio según la ecuación de Freundlich y Langmuir, respectivamente, y  $q_{m,L}$  corresponde a la capacidad de adsorción máxima de acuerdo al modelo de Langmuir.

#### 2.1.4.3. Constantes de distribución $K_d$

Es la relación de la concentración de una sustancia en una sola forma definida en el extracto (adsorbente) y su concentración en la misma forma en la otra fase en equilibrio (solución acuosa) (IUPAC, 2014).

$$K_d(\text{mL/g}) = \frac{(A_i - A_{eq})}{A_{eq}} \times \frac{V}{m} \quad (7)$$

Donde  $A$  es la radioactividad de la especie a estudiar, aunque también podrían

serlo unidades de medida de masa o concentración de la misma.  $A_i$  es la radioactividad total inicial de 1 ml de solución,  $A_{eq}$  es la radioactividad de 1 ml de la solución en equilibrio,  $V$  es el volumen de la solución (ml), y  $m$  es la masa de adsorbente (g).

#### **2.1.4.4. Rendimiento de elución**

Es el porcentaje de radionúclido hijo ( $^{99m}\text{Tc}$ ) en el interior del generador (o columna) que es separado del padre ( $^{99}\text{Mo}$ ) durante el proceso de elución. El rendimiento de elución del  $^{99m}\text{Tc}$  obtenida en un generador se sitúa entre el 85 y el 95%. La concentración de la actividad de  $^{99m}\text{Tc}$  en el eluido aumenta inicialmente, alcanza un máximo y finalmente decrece con el aumento de volumen del eluido. (Consejo de Seguridad Nuclear; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2015, págs. 16-21).

El rendimiento de elución del  $^{99m}\text{Tc}$  es considerablemente menor que el calculado debido a la retención de ciertas especies de  $^{99m}\text{Tc}$  y otros factores (Zolle, 2007, pág. 85).

#### **2.1.5. Control de calidad del pertecnetato de sodio**

Existen parámetros de control de calidad que deben cumplir las preparaciones farmacéuticas como la pureza radionucleídica, pureza radioquímica, pureza química, actividad específica, controles fisicoquímicos y biológicos (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica, 2013).

##### **2.1.5.1. Pureza radionucleída**

Es la relación, expresada como un porcentaje, de la radioactividad del radionucleido deseado y la radioactividad total de la fuente (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2016).

Debido a que cada radionucleído posee su propio período de semidesintegración, la pureza radionucleídica de una preparación radiofarmacéutica dada puede sufrir cambios desde el momento de su producción. El requerimiento de pureza radionucleídica establecido en cada caso debe cumplirse a lo largo de todo el

período de validez de cada preparación radiofarmacéutica (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica, 2013).

El contenido de  $^{99}\text{Mo}$  en el eluido de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  debe ser menor de  $0.15 \mu\text{Ci/mCi}$  de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  al momento de su administración (Verdera y otros, 2011, pág. 17).

#### **2.1.5.2. Pureza radioquímica**

Es el porcentaje de la radiactividad total presente en una muestra que se encuentra en la forma radioquímica específica o deseada (Ziessman y otros, 2007, pág. 9). En el caso del eluido de  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ , se evalúa su radiactividad frente a la del  $^{99\text{m}}\text{TcO}_2$ .

La pureza radioquímica debe ser mayor al 95% determinada por el método de cromatografía ascendente (Verdera y otros, 2011, pág. 17).

#### **2.1.5.3. Pureza química**

Es la fracción del componente principal presente en una muestra dada; una muestra es lo suficientemente pura cuando sus propiedades que deben investigarse o usarse son representativas de las del componente principal dentro de ciertos límites de errores prescritos (Staveley, 1971, pág. 7).

El eluido de pertecnetato de sodio podría contener como impurezas iones aluminio, metiletilcetona o molibdeno.

Se controla la cantidad de aluminio en el caso de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  obtenido de un generador con columna de alúmina y la concentración de ión aluminio en el eluido del generador debe ser inferior a  $10 \mu\text{g/ml}$  (10 ppm). Una concentración de este superior al límite, interfiere con la distribución normal de ciertos fármacos, lo que produce una mayor actividad pulmonar en el caso del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sulfuro coloidal y una mayor actividad hepática con el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -metilendifosfonato (Tc-MDP) (Ziessman y otros, 2007, pág. 8).

La cantidad de metiletilcetona se controla en el caso del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  obtenido por el método de extracción por solvente y su contenido debe ser menor del 0,1%, determinado por el método de precipitación por reacción del yodoformo.

El contenido de Molibdeno no debe ser mayor de 100 ppm. La determinación se realiza mediante colorimetría. La coloración de la muestra debería ser de menor intensidad que la del patrón de Mo y nunca debería formarse una coloración marrón (Verdera y otros, 2011, pág. 16).

#### **2.1.6. Diseño de un generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$**

El diseño de los componentes individuales de un generador de radionúclidos de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  varía según el fabricante, pero siempre permite la separación de los radionúclidos. La elución da como resultado un producto estéril y libre de impurezas, lo que lo hace inmediatamente apto para inyección humana. Los componentes en el generador típico son:

La columna, generalmente de vidrio, que contiene un lecho de óxido de aluminio (alúmina) como soporte para el radionucleido original. El  $^{99}\text{Mo}$  (como molibdato) se unirá fuertemente a este medio de soporte y no se eliminará durante la elución posterior del radionúclido hijo  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (como pertecnetato). Las dimensiones varían de 4 a 12 cm de alto (Bukhari y otros, 2007) y 0,7 cm a 2 cm de diámetro interno (Saptiama y otros, 2016).

Un sistema de tubería permite lavar la columna con una solución salina estéril. El tubo de entrada (con aprobación médica) está accesible para el operador que extrae el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  del generador, generalmente a través de una aguja a la que se puede conectar un vial de solución salina según sea necesario. Otros diseños proporcionan un depósito interno de solución salina para este fin. El tubo de salida también es accesible y generalmente termina en una aguja a la que se puede conectar un vial vacío. La mayoría de los generadores utilizan un vial de vacío para la recolección, de modo que la solución salina del lado de entrada pase a través de la columna hacia el vial de salida.

Los filtros se encuentran en los generadores en forma de fritas porosas, que sirven para contener la alúmina dentro de la columna, y normalmente un filtro de 0,22

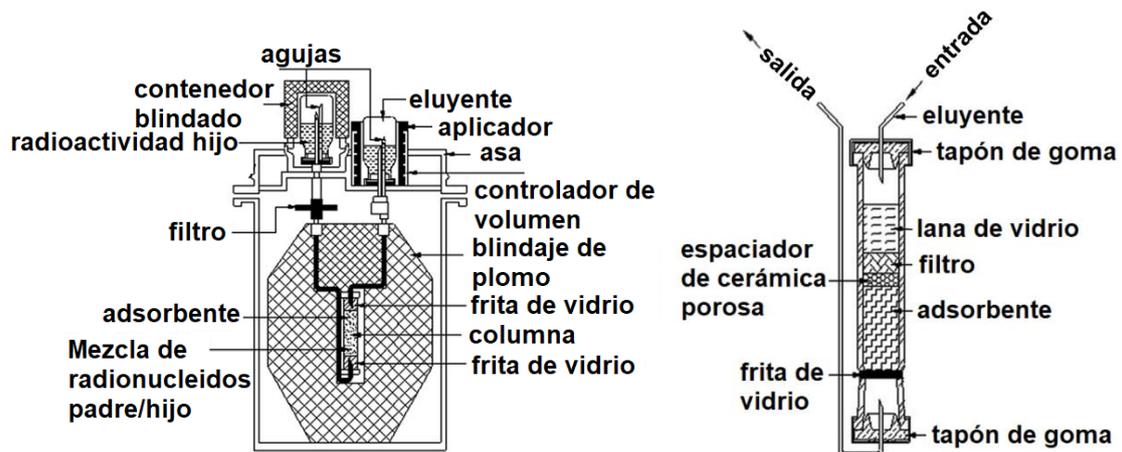
µm que sirve para eliminar cualquier pequeña partícula de la muestra eluida y actuar como dispositivo de seguridad para garantizar un producto estéril.

La columna de vidrio actúa como un escudo parcial pero no puede detener la penetración de la radiación gamma. Todos los generadores proporcionan un escudo de plomo alrededor de la columna y la tubería de salida. Se utiliza protección adicional durante el proceso de recolección y, por supuesto, el  $^{99m}\text{Tc}$  eluido debe protegerse una vez que se recolecta del generador.

Los generadores están contenidos en una carcasa de plástico y tienen algún método (mangos, correas) para permitir la elevación y posicionamiento manual o mecánico. Un generador con su blindaje de plomo pesa más de 10 kg según el diseño del fabricante. Hay una cubierta para proteger las agujas de entrada y salida y el etiquetado adecuado en la carcasa del generador (Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2016).

**Figura 7**

*Componentes de un generador portátil de  $^{99m}\text{Tc}$  basado en separación cromatográfica*



*Nota:* Izquierda: Diagrama esquemático de un generador de cromatografía en columna alojado en un contenedor blindado con plomo para proporcionar un radionúclido hijo. Derecha: Diagrama esquemático de una columna de cromatografía de un generador de radionúclidos.

Fuente (Dash & Chakravarty, 2014)

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Radioisótopo**

Los radioisótopos son átomos que emiten radiación ionizante (Petrucci y otros, 2011, pág. 1112). Esta energía es utilizada en medicina nuclear para proporcionar información exclusiva sobre el funcionamiento y la estructura de los órganos dentro del cuerpo. En algunos casos, la radiación se puede usar para tratar órganos enfermos o tumores (World Nuclear Association, 2019).

### **2.2.2. Radiofármaco**

Un radiofármaco es una molécula o fármaco biológicamente activo marcado por un radioisótopo. Este se inhala, ingiere o inyecta en una persona para medir el tamaño y el funcionamiento de los órganos mediante escaneo y obtención de imágenes que permiten la detección de alteraciones y posterior dirección del tratamiento a una zona concreta (Sasha Henriques, Oficina de Información al Público y Comunicación del OIEA, 2014).

### **2.2.3. Radiotrazador**

Los trazadores usados para marcar un fármaco son llamados radiotrazadores y son generalmente isótopos de vida corta que emiten radiación gamma (World Nuclear Association, 2019). En la Tabla 4 se muestran algunos isótopos y su aplicación en medicina nuclear.

### **2.2.4. Período de semidesintegración**

El período de semidesintegración  $t_{1/2}$  es el tiempo necesario para que la mitad de los átomos de una sustancia radiactiva se desintegren, y la actividad de la misma se reduzca a la mitad de su valor inicial. Este período es característico de cada isótopo radiactivo (Foro Nuclear, 2020).

**Tabla 4*****Algunos isótopos frecuentemente usados en medicina nuclear y radiología***

Isótopo	Período de semidesintegración	de Decaimiento	Energía principal	Aplicación
<sup>60</sup> Co	5,3 años	β-	0.3 MeV...	Tratamiento de tumor
		γ	1173 keV	
		γ	1332 keV	
<sup>67</sup> Cu	61,9 h	β-	0.4 MeV...	Radioinmunoterapia
		γ	185 keV...	
<sup>99</sup> Mo*	66 h	β-	1.2 MeV...	Padre de <sup>99m</sup> Tc
		γ	740 keV	
<sup>99m</sup> Tc*	6 h	γ	140.5 keV...	Esqueleto, músculo cardíaco, cerebro, tiroides, pulmones, hígado, bazo, riñón, vesícula biliar, médula ósea, glándulas salivales y lagrimales
<sup>131</sup> I*	8,0 d	β-	0.6 MeV...	Tratamiento del cáncer de tiroides con terapia beta
		γ	364 keV...	
<sup>153</sup> Sm*	46,3 h	β-	0.7 MeV...	Cáncer de próstata y mama, alivio del dolor de cánceres secundarios
		γ	103 keV...	
<sup>177</sup> Lu	6,7 d	β-	0.5 MeV...	Radiación β para pequeños tumores, rayos γ para imágenes
		γ	208 keV...	
<sup>192</sup> Ir	74d	β-	0.7 MeV...	Braquiterapia contra el cáncer, fuente suministrada en forma de alambre
		γ	317 keV...	
		EC		

*Nota:* Adaptación de (Gruppen, 2010, págs. 351-353). Abreviaciones: EC: captura de electrón. Para decaimiento β se dan las máximas energías.

\*Producidos por el Instituto Peruano de Energía Nuclear como productos intermedios o finales (Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2022).

**2.2.5. Decaimiento**

El decaimiento es el proceso espontáneo y estocástico por el cual un núcleo inestable se desintegra en otro que puede ser estable o inestable emitiendo una partícula o radiación electromagnética. Al núcleo inicial se lo conoce como núcleo padre y al resultante como núcleo hijo o hija. La radiación emitida puede ser una partícula alfa (dos protones y dos neutrones), beta (un electrón o positrón) o un fotón γ (Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba,

2020).

### **2.2.6. Tecnecio-99 metaestable**

El  $^{99m}\text{Tc}$  es un radionúclido emisor  $\gamma$  puro con una energía de 140 keV y un período de semidesintegración  $t_{1/2}$  de 6,0 h, proveniente del decaimiento del  $^{99}\text{Mo}$  por emisión  $\beta^-$  con un  $t_{1/2}$  de 66 h (Verdera y otros, 2011).

El  $^{99m}\text{Tc}$  es el isótopo más aplicado en medicina nuclear, se usa en escintigrafía, diagnóstico por imágenes, en gammagrafía planar y SPECT (tomografía computarizada por emisión de fotón único) (Banerjee y otros, 2001), y representa casi el 80% de todas las pruebas de diagnóstico nuclear (Eckelman, 2009).

## CAPÍTULO III

### PARTE EXPERIMENTAL

El trabajo experimental de esta investigación se divide en la caracterización del adsorbente, la evaluación de la adsorción del  $^{99}\text{Mo}$  en la alúmina, y la obtención y evaluación del radioisótopo  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . A continuación, se describen los procedimientos y materiales empleados en cada ensayo.

#### 3.1. Estudio del adsorbente

En el presente trabajo se utilizó:

- “ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ácida” para denominar al Óxido de aluminio, súper activado, ácido, Grado I Alfa Aesar <sup>TM</sup> con tamaño de partícula 150-200 $\mu\text{m}$  según fábrica
- “ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm” para denominar a las nanopartículas de óxido de aluminio, pureza 99,99%, fase gamma, hidrofílica US Research Nanomaterials, Inc., con tamaño de partícula de 5nm según fábrica; y,
- “ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm” para denominar a las nanopartículas de óxido de aluminio, pureza 99,5%, fase gamma US Research Nanomaterials, Inc., con tamaño de partícula de 80nm según fábrica.

El estudio se centró en la evaluación de las características como adsorbentes de  $^{99}\text{Mo}$  de las nanopartículas de alúmina para determinar la idoneidad de su potencial uso en la producción de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Para efectos de comparación, también se estudió en muchos casos a la alúmina ácida activada, adsorbente utilizado actualmente en los generadores de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

Además, los materiales nanoparticulados de  $\gamma$ -alúmina tienen altas áreas superficiales, y han sido fabricados mediante método de combustión a alta temperatura, contienen nano poros, exhiben granularidad, suficiente resistencia mecánica y características de flujo libre, por lo que se puede trabajar directamente con ellas, sin necesidad de activación por calentamiento, tanto en aplicaciones en lote como para

aplicaciones cromatográficas en columna.

### 3.1.1. Caracterización

#### i. Tamaño hidrodinámico de partícula

Se realizaron mediciones de tamaño de partícula usando el método de dispersión de luz dinámica DLS (por sus siglas en inglés). Se preparó 10 ppm de cada alúmina nanopartícula en agua desionizada pH= 8,3 y se dispersó por sonicación en el equipo Branson Ultrasonics™ CPX-952-238R a una frecuencia de 40 kHz (Nicomp® DLS System, 2019). La temperatura del laboratorio fue de  $20 \pm 1$  °C. En la Tabla 5 se muestran los tiempos de sonicado ensayados con los dos tipos de material nanoparticulado. Las mediciones se llevaron a cabo en el equipo Nicomp® Nano N3000 del Laboratorio de Nanotecnología e Innovación Tecnológica de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. El software obtuvo las distribuciones de tamaño por intensidad, volumen y número de partículas.

**Tabla 5**

*Condiciones de medición de diámetro hidrodinámico de partícula de la alúmina nanopartícula*

Ensayo	Muestra	Tiempo de sonicado
M1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	20 min
M2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	40 min
M3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	20 min
M4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	40 min

#### ii. Área superficial y distribución de tamaño de poro

Las propiedades texturales de los adsorbentes nanoparticulados de alúmina se obtuvieron del informe de análisis textural por fisisorción de N<sub>2</sub> (BET) proporcionado por el Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería utilizando el equipo Micromeritics GEMINI-VII serie T.

Se determinó el área superficial específica ( $S_{BET}$ ), el diámetro medio de poros

( $D_p$ ) y el volumen de poros ( $V_p$ ). Previamente, las muestras fueron desgasificadas con He a 150°C durante 2 h y para los análisis se empleó  $N_2$  a 77 K. El  $S_{BET}$  se calculó utilizando el método estándar de Brunauer, Emmett y Teller sobre la base de los datos de adsorción de  $N_2$  (Brunauer y otros, 1938). El área microporosa se evaluó mediante el método t-plot (Gregg, & Sing, 1982). El  $V_p$  de la adsorción a  $P/P_0 = 0,98$ , la distribución del tamaño de los poros y el  $D_p$  se estimaron mediante el método de análisis Barrett-Joyner-Halenda (BJH) aplicado a la rama de desorción de la isoterma (Barrett, 1951). La clasificación IUPAC de poros e isothermas se utilizaron en este estudio (Thommes, 2015).

### iii. Potencial de carga cero PZC

El punto de carga cero ( $pH_{PZC}$ ) se determinó utilizando soluciones ácidas y básicas de HCl 0,1 M y NaOH 0,1 M, respectivamente, en el rango de pH de 2 a 11. Se mezclaron 0,100 g de cada adsorbente con 50 ml de cada solución preparada anteriormente, con agitación constante durante 24 horas a temperatura ambiente (Meza Lopez, 2017). Luego, se filtró y se midió el pH con un medidor de pH Hanna modelo HI 255 con un electrodo de vidrio combinado, en el Laboratorio de Determinación de Humedad del IPEN. El  $pH_{PZC}$  se obtuvo graficando los valores de diferencia de pH final versus el pH inicial (Lim y otros, 2014).

#### 3.1.2. Estabilidad química

Se pesaron 0,050 g de  $Al_2O_3$ -05nm en cada uno de 4 tubos cónicos de polipropileno de 15 ml (Sarstedt) para centrífuga. Se añadieron 5 ml de ácido clorhídrico 0,1 N al primer y segundo tubo, 5 ml de ácido nítrico 0,1 N al tercero, y 5 ml de hidróxido de sodio 0,1 N al cuarto. Todos los tubos fueron sometidos a agitación en un agitador orbital IKA Works Vibrax® Orbital Shaker a 800 rpm y  $20 \pm 1$  °C durante 6 horas (Maslova y otros, 2020). Posteriormente, solo el primer tubo fue separado y centrifugado a 5000 rpm durante 25 minutos, se decantó el sobrenadante, y se añadieron 5 ml de cloruro de sodio 0,15 M, sometiéndolo nuevamente a agitación a 800 rpm por 6 horas

adicionales. Los cuatro tubos fueron luego dejados en reposo durante 10 días. Finalmente, todos los tubos se centrifugaron a 4 °C y 5000 rpm durante 25 minutos.

El procedimiento aplicado al primer tubo, en el que se utilizaron dos soluciones de contacto (HCl 0,1 N y posteriormente NaCl 0,15 M), fue diseñado para simular las condiciones de un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Guedes-Silva y otros, 2016). En estos generadores, el  $^{99}\text{Mo}$  se carga inicialmente sobre la alúmina en un medio ácido y, durante el uso, se eluye con una solución de NaCl 0,15 M, de acuerdo con estándares establecidos para generadores de radioisótopos (Asif & Mushtaq, 2010).

Se retiraron 2 ml del sobrenadante de cada tubo, se diluyó hasta que la concentración estuvo dentro del rango de análisis y se procedió a analizar la concentración de aluminio por el método de absorción atómica en el equipo marca Analytik Jena AG modelo contrAA 800 D con lámpara de arco de xenón de espectro continuo del Laboratorio de Investigación y Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Las mediciones se realizaron a una longitud de onda de 309,3 nm, con una llama de acetileno-óxido nítrico, flujo de combustible 210 L/h, cabezal de óxido de titanio de 5 cm, altura del cabezal de 6 mm, con corrección de línea base iterativa (Bohrer y otros, 2007) y utilizando estándares de  $\text{Al}^{3+}$  de 0, 3, 5 y 10 ppm.

Se repitió el mismo procedimiento para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm.

La denominación por muestra se describe en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Denominación de las muestras según tipo de alúmina y sustancia de contacto*

	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm
Ácido clorhídrico 0,1N	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm-AC	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm-AC
Ácido nítrico 0,1N	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm-AN	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm-AN
Hidróxido de sodio 0,1N	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm-HS	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm-HS
Ácido clorhídrico 0,1N y Cloruro de sodio 0,15M	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm-CS	$\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm-CS

### 3.1.3. Coeficiente de distribución Kd

Se pesó 0,100 g de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida en cada tubo para centrífuga y se añadió 10 ml de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio que contenían los iones radiactivos de interés calibrados y producidos por la PPR del IPEN, ajustando el pH de 1 a 13 en cada tubo (Mishra & Tiwary, 1992). Para la estimación de los valores de Kd para <sup>99</sup>Mo, se usó la mezcla <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc, mientras que para <sup>99m</sup>Tc, se usó <sup>99m</sup>Tc puro (Chakravarty y otros, 2014). Los tubos se agitaron en un agitador orbital a 800 rpm durante 40 minutos a temperatura del laboratorio (20±1 °C) y luego se filtraron a través de microfiltros de membrana Millipore de 0,22 µm Merck. Se extrajo 1 ml del filtrado y se separó en un vial de vidrio de 10 ml para la posterior medición de radioactividad (Chakravarty y otros, 2010). Esta y todas las mediciones de radioactividad de las pruebas posteriores se realizaron en el detector HPGe (Canberra GC 7019, eficiencia relativa = 70%, resolución FWHM de 1,9 keV para el pico gamma 1332,5 keV del <sup>60</sup>Co) con 18 mm de geometría de conteo entre la muestra y la cubierta de aluminio del detector que está acoplado a un analizador multicanal, del Laboratorio de Espectrometría Gamma del IPEN. Los picos de rayos gamma a 140 keV y 740 keV se usaron para determinar la radioactividad de <sup>99m</sup>Tc y <sup>99</sup>Mo, respectivamente.

Se repitió el mismo procedimiento para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm.

En todas las pruebas realizadas por lote se mantuvo la relación 1 g de adsorbente por 100 ml de solución acuosa.

El análisis de los espectros se realizó utilizando el software Genie 2000 (v 2.1) de Canberra y para el cálculo de las radiactividades de los elementos se utilizaron las herramientas de Excel.

### 3.1.4. Cinética de adsorción de <sup>99</sup>Mo

Se irradió 0,50 g de MoO<sub>3</sub> en el reactor de investigación RP-10 del IPEN de 10 MW mediante el sistema neumático de irradiación de muestras SNIM durante 5 minutos

con un flujo de neutrones térmicos de  $1,25 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y flujo de neutrones epitérmicos de  $2,50 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . El  $\text{MoO}_3$  irradiado se disolvió en una solución que contenía NaOH a pH 14, se trasvasó a una fiola de 200 ml y se le añadió  $\text{HNO}_3$  1 M y una solución tampón de acetato de sodio/ácido acético 0,2 M hasta un pH de 4 y una concentración aproximada de 0,1 mg Mo/ml ( $\sim 1.04 \text{ mM}$ ) (Mishra & Tiwary, 1993). Este procedimiento simula las condiciones reales en un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , donde el molibdeno irradiado en forma de  $\text{MoO}_3$  pasa por etapas de disolución con NaOH y ajuste de pH con  $\text{HNO}_3$  antes de su adsorción en alúmina (Nuclear Energy Agency, 2010). Se extrajo 10 mL de esta solución con pH inicial de 4, en cada toma para llenar cada tubo plástico de centrifugación que ya contenía 0,100 g de alúmina ácida activada. Se inició la agitación en el agitador a 800 rpm y al cabo de 1 minuto se separó un tubo y se filtró el contenido a través de un filtro de  $0,22 \mu\text{m}$ . Se extrajo 1 mL del filtrado y se separó en un vial de vidrio para la posterior medición de la actividad del  $^{99}\text{Mo}$ . Se repitieron las operaciones para tiempos de agitación de 5, 10, 20 minutos y más hasta el tiempo de equilibrio.

Se repitió el mismo procedimiento para  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}05\text{nm}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}80\text{nm}$  con concentraciones iniciales de 0,1 mg Mo/ml y 1 mg Mo/ml.

### **3.1.5. Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado estacionario**

La capacidad de adsorción estática de cada adsorbente fue determinada tomando 0,200 g del adsorbente en un tubo de centrifugación cónico que contiene 20 ml de solución de molibdato de sodio a pH inicial de 4 a partir de la sal  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $10 \text{ mg Mo ml}^{-1}$ ) y HCl con aproximadamente  $40 \mu\text{Ci}$  de  $^{99}\text{Mo}$  añadido como radiotrazador (Marlina y otros, 2020). En este caso, se utilizó una sal de molibdato de sodio dihidratada para garantizar una solución homogénea y estable que permitió un control preciso de la concentración de molibdeno en el análisis de adsorción en equilibrio (IMO: International Molybdenum Association, 2013).

Todos los ensayos con  $^{99}\text{Mo}$  como radiotrazador se realizaron con actividades

entre 10 y 40  $\mu\text{Ci}$ , rango común en estudios de trazado preclínico que asegura una detección adecuada sin recurrir a altos niveles de radiación, ya que equipos especializados pueden medir con exactitud pequeñas actividades en un margen de 0,1 a 100  $\mu\text{Ci}$  (National Cancer Institute, 2018).

El adsorbente se mantuvo en contacto con la solución radiactiva con agitación en el agitador orbital a 800 rpm por 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, el contenido fue filtrado usando filtro de membrana de 0,22  $\mu\text{m}$ . Las actividades de  $^{99}\text{Mo}$  en la solución antes y después de la adsorción fueron estimadas usando el detector HPGe. Todas las mediciones fueron llevadas a cabo a 20 °C por quintuplicado.

### **3.1.6. Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado dinámico**

Se preparó una columna de vidrio de borosilicato de 10 cm de altura y 1 cm de diámetro interno con una frita G2 en el fondo con 1,0 g de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm. La columna se acondicionó con  $\text{HNO}_3$  0,0001 M, luego, se añadió la solución de molibdato de sodio 10 mg Mo  $\text{ml}^{-1}$  que contenía 370 kBq ( $\sim 10 \mu\text{Ci}$ ) de  $^{99}\text{Mo}$  como radiotrazador (Marlina y otros, 2020), a una velocidad de 0,25  $\text{ml min}^{-1}$ . Se separó 1 ml de esta solución como referencia ( $C_0$ ), se colectó el efluente en alícuotas de 2 ml ( $C_i$ ), se midió la actividad de  $^{99}\text{Mo}$  tanto en  $C_0$  como en  $C_i$ , se graficó el volumen pasante versus  $C_i/C_0$  (equivalente a  $A_i/A_0$ ) para obtener el perfil de avance o de la curva. Se aplicó una presión de vacío de 5 psi para simular las condiciones de presión de un vial de elución sellado al vacío cuando se conecta a un generador  $^{99\text{m}}\text{Tc}/^{99}\text{Mo}$ .

### **3.1.7. Isoterma de adsorción**

Las isotermas de adsorción se llevaron a cabo añadiendo 50 mg de cada adsorbente a 5 ml de una solución tampón de acetato de sodio/ácido acético 0,2 M de diversas concentraciones de molibdeno que varían de 0,3 a 14,0 mg Mo/ml a partir de la sal  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Denkova y otros, 2013) y que contenían a su vez  $\sim 15 \mu\text{Ci}$  de  $^{99}\text{Mo}$  añadido como radiotrazador a cada muestra en los tubos de centrifugación (Marlina

y otros, 2020). El pH de la solución tampón de acetato se ajustó a 4 con HNO<sub>3</sub> 1 M. Todas las muestras se agitaron a 800 rpm durante 20 minutos a 20±1 °C, después de lo cual la suspensión se centrifugó (5000 rpm a 4 °C durante 10 minutos), se extrajo 1 mL del sobrenadante transparente y se separó en un vial de vidrio para la posterior medición de la actividad del <sup>99</sup>Mo en el detector HPGe.

### **3.1.8. Efecto del anión del ácido en la adsorción**

Se ajustó el pH inicial de una solución de molibdato con HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> y CH<sub>3</sub>COOH/CH<sub>3</sub>COONa (solución tampón 0,2 M) a 4 y se agregó 1 mL de una solución calibrada de <sup>99</sup>Mo (Marlina y otros, 2020) completando el volumen en fioles de 25 mL con una concentración final en cada una de 0,001 gMo/mL de solución (Ali, 2009). Se extrajeron 10 mL de cada fiola y se agregaron a viales plásticos de 15 mL de capacidad que contenían 0,1 g de cada alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm y se dispusieron en el agitador a 800 rpm durante 60 minutos. Se filtró el contenido de cada una a través de un filtro de 0,22 µm (Millipore, Merck). Se extrajo 1 mL del filtrado y se separó en un vial de vidrio para la posterior medición de la actividad del <sup>99</sup>Mo en un detector de HPGe.

Se repitió todo el procedimiento con una concentración de 0,01 gMo/mL.

## **3.2. Producción de <sup>99m</sup>Tc**

### **3.2.1. Rendimiento de elución**

Se recibió de la PPR y para cada ensayo, <sup>99</sup>MoO<sub>3</sub> disuelto en NaOH 5 M, con actividad inicial entre 2 y 25 mCi. Se transfirieron cada vez a un matraz aforado de 50 ml, 25 ml o 10 ml, y se añadió HNO<sub>3</sub> 2 M hasta un pH inicial de 4 o 5. En otro set de pruebas se agregó una solución tampón de ácido acético/acetato de sodio 0,2 M. Se utilizaron diferentes concentraciones iniciales de <sup>99</sup>Mo (por lo tanto, actividades). Se extrajeron 4 ml de cada solución para llenar los tubos de centrifuga de plástico que contenían 40 mg de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80 nm. Se agitó a una velocidad de 800 rpm durante 30 minutos, lavando los adsorbentes dos veces con 2 ml de HCl 0,1 M y 3 veces con 3 ml

de solución de NaCl 0,15 M. A continuación, se añadieron 2 ml de NaCl 0,15 M a los adsorbentes lavados y las soluciones se mantuvieron durante aproximadamente 24 horas para alcanzar el equilibrio transitorio entre  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Posteriormente, la muestra se agitó a 800 rpm durante 5 minutos, y se filtró el eluido a través de un filtro Millipore de 0,22  $\mu\text{m}$ , y posteriormente, se midió la actividad de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Denkova y otros, 2013). La presencia de Al en el sobrenadante se determinó usando un método colorimétrico y la presencia de  $^{99}\text{Mo}$  se evaluó midiendo la actividad de  $^{99}\text{Mo}$  antes y después de la separación del sobrenadante y el adsorbente (Verdera y otros, 2011).

### **3.2.2. Determinación de eficiencia de filtraciones a través de filtro de membrana 0,22 $\mu\text{m}$**

Para determinar una relación directa entre la cantidad de filtraciones del eluido de pertecnetato de sodio  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$  y la disminución de la cantidad de óxido de aluminio presente como contaminante en el eluido, se midió el contenido de aluminio en las soluciones de pertecnetato de sodio  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$  filtradas una, dos y hasta tres veces a través de un filtro de membrana de 0,22  $\mu\text{m}$  (Millipore, Merck). La determinación se realizó mediante el método comparativo y análisis por activación neutrónica, que consiste en la irradiación simultánea y prácticamente en la misma posición, de la muestra y un estándar o patrón (en este caso aluminio) que contiene cantidades exactamente conocidas del elemento que se desea analizar. Las soluciones de pertecnetato de sodio  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$  se dejaron decaer 10 veces su período de semidesintegración, se extrajeron 500  $\mu\text{g}$  de cada una y se trasvasó hacia tapas de polietileno de alta densidad, con posterior secado con lámpara de secado infrarrojo, las muestras se sellaron y se enviaron hacia se la posición de irradiación (Esquivel y otros, 1993). La irradiación realizó a una potencia de reactor de 6,0 MW, posición B-1 del SNIM, tiempo de irradiación de 5 minutos, temperatura 73°C, flujo térmico de  $6,421 \times 10^{12}$  y flujo epitérmico  $1,690 \times 10^{11}$ . La medición se realizó en el pico de rayo gamma 1780 keV que caracteriza al isótopo  $^{27}\text{Al}$  en un detector de HPGe (Canberra GC15020,

eficiencia relativa = 150%, resolución FWHM de 2,0 keV para el pico gamma 1332,5 keV del  $^{60}\text{Co}$ ) con 185 mm de geometría de conteo entre la muestra y la cubierta de aluminio del detector que está acoplado a un analizador multicanal.

### **3.2.3. Controles de la solución de pertecnetato de sodio $^{99\text{m}}\text{Tc}$**

#### **i. Controles nucleares**

##### **Identificación radionucleídica**

Mediante una cadena de espectrometría gamma de alta resolución calibrada, compuesto por un detector de germanio hiperpuro y un analizador multicanal, se identificó el espectro gamma del tecnecio-99m; el cual mostró un fotopico característico con una energía de 0,140 MeV (Verdera y otros, 2011).

*Especificación: Fotopico gamma del tecnecio-99m es  $0,140 \pm 0,0025$  MeV*

##### **Pureza radionucleídica**

Mediante una cadena de espectrometría gamma de alta resolución calibrada, compuesto por un detector de germanio hiperpuro y un analizador multicanal, se midió la actividad del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  y de otros radionúclidos emisores gamma (Verdera y otros, 2011).

*Especificación: La actividad del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  debe ser  $\geq 99,996\%$  con respecto a la actividad total.*

##### **Determinación de Molibdeno 99**

Se determinó por atenuación gamma en un calibrador de dosis calibrado, blindando la solución de pertecnetato de sodio  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  con un contenedor de plomo de 6 mm de espesor para detener todos los fotones de 140 keV de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  y contar solo 740 keV y fotones de 780 keV del  $^{99}\text{Mo}$  (Saha, 2010).

La relación de actividades  $A_{^{99}\text{Mo}}/A_{^{99\text{m}}\text{Tc}}$  aumenta con el tiempo porque el  $^{99}\text{Mo}$  ( $t_{1/2} = 66$  h) se desintegra más lentamente que el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ( $t_{1/2} = 6$  h). El momento en el que la relación  $A_{^{99}\text{Mo}}/A_{^{99\text{m}}\text{Tc}}$  supera 0,15 kBq/MBq o  $\mu\text{Ci}/\text{mCi}$  (límite máximo) (United States

Pharmacopeia USP XXI, 1984) puede calcularse teniendo en cuenta el período de caducidad de 12 h para su uso clínico.

$$0,15 = \frac{A_{99\text{Mo}} \times e^{-0.0105t}}{A_{99\text{mTc}} \times e^{-0.1155t}} \quad (8)$$

Para un uso válido de  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$  durante 12 h, la relación  $A_{99\text{Mo}}/A_{99\text{mTc}}$  en la elución inicial puede calcularse despejando t de la ecuación anterior:

$$t = \frac{-\ln[A_{99\text{Mo}}/A_{99\text{mTc}}]}{0,105} - 18,07 \quad (9)$$

Siendo 0,043  $\mu\text{Ci}$  de  $^{99}\text{Mo}/\text{mCi}$  de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  o 0,043 kBq de  $^{99}\text{Mo}/\text{MBq}$  de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Saha, 2010) la ratio máxima de actividad de  $^{99}\text{Mo}$  en  $\mu\text{Ci}$  por mCi de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  considerado por el IPEN.

*Especificación:  $\leq 0,043 \mu\text{Ci}$  de  $^{99}\text{Mo}$  por mCi de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (Planta de Producción de Radioisótopos del Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2005)*

### **Otros radionúclidos emisores gamma**

Mediante una cadena de espectrometría gamma de alta resolución calibrada, compuesto por un detector de germanio hiperpuro y un analizador multicanal, se midió la actividad del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  y de otros radionúclidos emisores gamma.

*Especificación:  $\leq 0,02 \mu\text{Ci}$  de otros emisores gamma por mCi de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$*

### **ii. Controles fisicoquímicos**

#### **Aspecto**

Se determinó por inspección visual directa del producto interponiendo un vidrio plomado. Se observó cualquier desviación del color y claridad de la solución de pertecnetato (Verdera y otros, 2011).

*Especificación: Solución acuosa límpida e incolora*

#### **Partículas extrañas**

Se determinó por inspección visual directa del producto, sobre fondo blanco y negro, interponiendo un vidrio plomado (Verdera y otros, 2011).

*Especificación: Ausencia de partículas extrañas*

## **pH**

Se midió con papel indicador de rango universal 1,0-14,0

*Especificación: De 4,5 a 7,5*

## **Pureza radioquímica**

Se determinó por cromatografía en papel. Una alícuota de la solución de pertecnetato de sodio  $^{99m}\text{Tc}$ , se diluyó apropiadamente con una solución de cloruro de sodio al 0,9%, hasta obtener un nivel de cuentas cercana a 20000 cuentas por minuto (cpm) en 20 a 50  $\mu\text{L}$ . Se sembró una gota sobre una tira de 10 x 100 mm de papel cromatográfico (ITLC.SG ó filtro N°1). Se desarrolló el cromatograma por cromatografía ascendente, usando como fase móvil metiletilcetona (MEC) (Verdera y otros, 2011).

Los valores de referencia  $R_f$  fueron los siguientes:

**Tabla 7**

*Valores de referencia  $R_f$  para determinación de la pureza radioquímica del  $^{99m}\text{Tc}$*

Parámetro	Especificación
Soporte	ITLC SG (Filtro N°1)
Solvente	MEC
$R_f$ Tc VII (TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	1,0
$R_f$ Tc V	0,3
$R_f$ Tc IV (reducido-hidrolizado)	0,0
Tiempo	5 min (150 min.)

Nota: Especificación:  $\geq$  de 95% como TcO<sub>4</sub><sup>-</sup> (VII)

## **Pureza química**

### ***Determinación de aluminio (+3)***

Se preparó una solución patrón de Aluminio (+3) 100 ppm (0,1 mg/mL) a partir de Potasio y Aluminio estándar de referencia y agua destilada. Desde esta solución se

prepararon los patrones de Aluminio (+3) de 5, 10 y 20 ppm. Se reservó.

Se preparó la solución de alizarina S (0,1%) pesando 0,1 g de Alizarina-S y disolviendo en agua destilada hasta 100 mL, y filtrando si fuera necesario. Se conservó en frasco ámbar herméticamente cerrado.

Ensayo a la gota: En una placa de porcelana o vidrio se colocó una gota de la muestra, una gota de NaOH 1N, una gota de la solución de alizarina S (0,1%) y dos a tres gotas de ácido acético 1N agitando suavemente hasta decoloración del reactivo. Se comparó la coloración de la muestra con patrones de aluminio de 5, 10 y 20 ppm tratados de la misma manera (Verdera y otros, 2011).

*Especificación:  $\leq 10$  ppm ( $\mu\text{g/mL}$ )*

#### ***Determinación de Molibdeno total***

Se preparó una solución estándar de 100 ppm de molibdeno a partir de  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , se disolvió, cuando fue necesario, con HCl 1N, se trasvasó a una fiola de 100 mL y se completó con agua destilada. Se preparó el estándar de 20 ppm tomando una alícuota de 2 mL de la solución de 100 ppm, en una fiola, y completando con agua destilada a 10 mL. Se reservó.

Se colocó en diferentes pocillos de una placa de porcelana 1 gota de cloruro de sodio 0.9%, 1 gota de muestra de pertecnetato de sodio y 1 gota de estándar de 20 ppm de molibdeno. Se añadió a cada uno de los pocillos 1 gota de tiocianato de potasio (KSCN) al 10 % m/v y 1 gota de  $\text{SnCl}_2$  al 10% m/v.

Se agitó ligeramente la placa y se comparó con el estándar. La placa se lavó inmediatamente.

La reacción también podría llevarse a cabo sobre papel de filtro N° 3 en lugar de la placa de porcelana (Verdera y otros, 2011).

*Especificación:  $\leq 20$  ppm de Mo*

Todas las pruebas realizadas con radioisótopos se llevaron a cabo utilizando un dosímetro personal, colocado en el bolsillo delantero de la bata de laboratorio, el cual registraba la dosis de radiación recibida durante los ensayos (Anexo H: Imágenes de equipos, instrumentos, materiales y otros utilizados en la parte experimental, Imagen 14, y Anexo M: Reporte de dosimetría personal).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Estudio del adsorbente

##### 4.1.1. Caracterización

Se incluye la Tabla 8 con los valores de fábrica de las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina. Los datos completos se muestran en: Anexo I: Certificado de análisis de alúmina ácida, Anexo J: Certificado de análisis de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm, y Anexo K: Certificado de análisis de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm

**Tabla 8**  
*Características de las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina*

Característica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm
Pureza	99,99%	>99,9%
Tamaño de partícula promedio	5nm*	80nm
Área superficial específica	250-480 m <sup>2</sup> /g	58 m <sup>2</sup> /g
Morfología	Semiesférica	Semiesférica
Color	Blanco	Blanco
Capacidad calorífica específica	880 J/(kg·K)	No reporta
Densidad	3890 kg/m <sup>3</sup>	"
Densidad aparente	0,18 g/ml	"
Pérdida por secado	1,9% en peso	"
Pérdida por ignición	3,2% en peso	"
pH	6,5-7,5	"

\*Verificado por Microscopía electrónica de barrido con energía dispersiva de rayos X del Laboratorio de Nanotecnología de Materiales de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Equipo modelo HITACHI S-3000N.

##### i. Tamaño hidrodinámico de partícula

El pH del agua desionizada usada fue de 8,3, valor al que se pueden hacer mediciones de tamaño de partícula por este método debido a que es mayor que el valor del pH en el punto de carga cero PZC de la nanopartícula de  $\gamma$ -alúmina, 7,69-7,97, previniendo el fenómeno de aglomeración de partículas a pH del PZC que impiden una correcta medición del tamaño de partícula (Mui y otros, 2016) incrementando su valor.

En la Tabla 9 y en el Anexo Ñ: Resultados de medición DLS se muestran los resultados de las mediciones de tamaño de partícula realizadas por DLS.

**Tabla 9**  
*Datos del análisis de distribución ponderada de NICOMP (Partícula sólida) usando la técnica de DLS*

Criterios	Muestra	M1			M2			M3			M4		
	Característica	Tamaño (nm)	%	P.I.	Tamaño (nm)	%	P.I.	Tamaño (nm)	%	P.I.	Tamaño (nm)	%	P.I.
Intensidad	Población 1	10,9	1,32		10,8	33,69		90,1	100		97,5	8,43	
	Población 2	342,8	38,51	0,383	900,7	66,31	0,342	-	-	1,674	146,8	8,93	0,442
	Población 3	898,6	60,17		-	-		-	-		904,9	82,64	
Volumen	Población 1	11,5	95,4		11,5	99,8		88,3	100		95,8	20,62	
	Población 2	347,6	0,97	0,383	907,4	0,2	0,342	-	-	1,674	145,9	5,66	0,442
	Población 3	905,2	3,63		-	-		-	-		911,5	73,72	
Número	Población 1	11,5	99,92		11,5	100		87,7	100		95,3	75,64	
	Población 2	344	0,03	0,383	-	-	0,342	-	-	1,674	904,9	24,36	0,442
	Población 3	898,6	0,05		-	-		-	-		-	-	

P.I.: índice de polidispersidad

Para la estimación del tamaño hidrodinámico de partículas, se consideró más apropiado utilizar la distribución por número de partículas, ya que este enfoque es el más adecuado para muestras con distribuciones de tamaños polidispersas (Stetefeld, 2016). Este criterio permite obtener un valor promedio representativo del tamaño de las partículas en lugar de centrarse en poblaciones específicas según su intensidad o volumen. En cuanto a la polidispersidad de las muestras, M1, M2 y M4 presentaron valores de P.I. inferiores a 0.5, lo cual indica una distribución moderadamente polidispersa. En contraste, la muestra M3 mostró un P.I. de 1.674, lo que sugiere una alta polidispersidad y, por ende, una mayor variabilidad en el tamaño de partículas (Bhattacharjee, 2016).

En las muestras de 80 nm (M3 y M4), el tamaño promedio por número fue de 87.7 nm tras 20 minutos de sonicado (M3) y aumentó a 95.3 nm tras 40 minutos (M4). Este incremento apunta a que un tiempo de sonicado prolongado podría inducir aglomeración secundaria o estabilización a un tamaño mayor debido a la redistribución en la dispersión (Na Kim & Suslick, 2018), alterando el balance de fuerzas interpartículas

y promoviendo la reagrupación (Gielen y otros, 2017). Así, para partículas de 80 nm, 20 minutos de sonicado parecen suficientes para lograr una dispersión uniforme sin efectos secundarios, mientras que el tiempo adicional podría resultar contraproducente.

Los resultados promediados, finalmente, se muestran en la tabla 10:

**Tabla 10**  
*Diámetros hidrodinámicos de las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina*

Alúmina	Diámetro hidrodinámico
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	11,5 nm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	91,5 nm

El tamaño del diámetro hidrodinámico de ambas es mayor que el hallado por SEM, reportado por el fabricante debido a que el análisis por DLS tiene en cuenta la capa de solvatación/hidratación en la superficie de las nanopartículas (Siepmann y otros, 2012).

## ii. Área superficial y distribución de tamaño de poro

La diferencia en la capacidad de adsorción de N<sub>2</sub> es indicativa de la diferencia de área de superficie específica y volumen para microporos ( $\phi < 2$  nm), mesoporos ( $\phi = 2-50$  nm) y macroporos ( $\phi > 50$  nm) (Shi y otros, 2021). N<sub>2</sub>-BJH se puede utilizar para describir la distribución del tamaño de los poros entre 1,7 y 300 nm (Kuila & Prasad, 2013), es decir, mesoporos y algunos macroporos. De acuerdo al modelo de Brunauer (Brunauer y otros, 1938), tanto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm exhibieron isothermas de tipo IV según clasificación IUPAC, caracterizada por una curva de histéresis en la zona alta de la curva causada por condensación capilar en mesoporos (ALothman, 2012) tal como se puede apreciar en las figuras 8 y 9, en donde en el eje de las abscisas se encuentra la presión relativa P/P<sub>0</sub> y en el de las ordenadas la cantidad adsorbida Q, mientras que según la clasificación IUPAC (Thommes, 2015) de los bucles de histéresis, ambos corresponden al tipo H<sub>3</sub>, caracterizado por materiales con poros en forma de hendidura (las isothermas que revelan el tipo H<sub>3</sub> no muestran ninguna adsorción limitante

a un  $P/P_0$  alto, que se observa con agregados no rígidos de partículas en forma de lámina). La curva de desorción de la histéresis de  $H_3$  contiene una pendiente asociada con una fuerza en el bucle de histéresis, debido al llamado efecto de resistencia a la tracción (S.W. Sing & T. Williams, 2004). Los diámetros o tamaño de poros obtenidos por el método BJH confirmaron la existencia de mesoporos en los materiales estudiados.

La Tabla 11 muestra los parámetros estructurales obtenidos de las isotermas, lo mismo que en la Figura 10.

**Tabla 11**

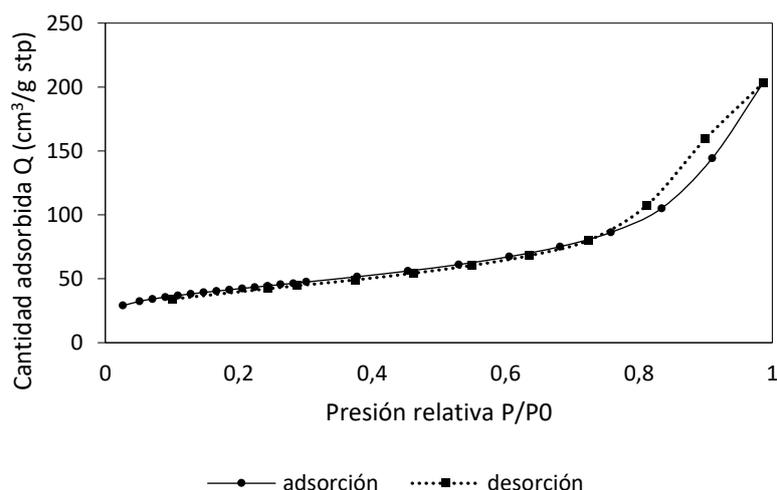
*Características estructurales de los adsorbentes de nanopartículas de alúmina*

Muestra	Superficie BET (m <sup>2</sup> /g)	Superficie Langmuir (m <sup>2</sup> /g)	Superficie Mesoporosa (m <sup>2</sup> /g)	Superficie Microporosa (m <sup>2</sup> /g)	Relación áreas superficiales específicas en fracción	Tamaño de poro (nm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	148	218	128	20	Como 1,00	8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	186	274	161	25	Como 1,25	8

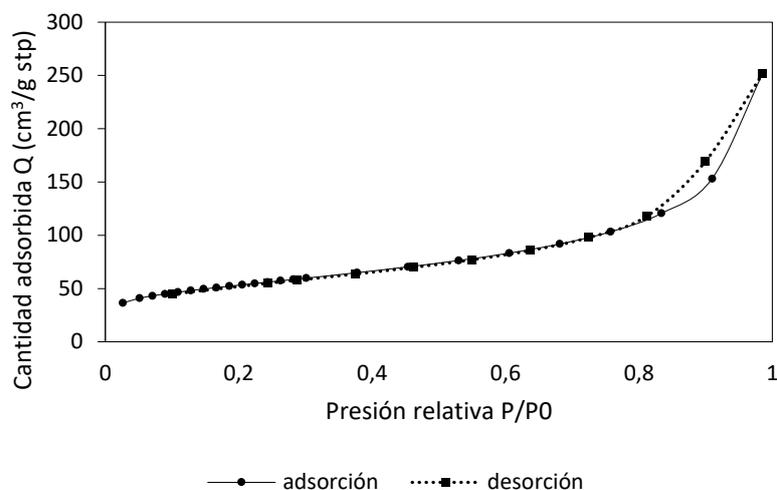
Nota: la aproximación de la medición experimental del instrumento fue de  $\pm 1$  m<sup>2</sup>/g

**Figura 8**

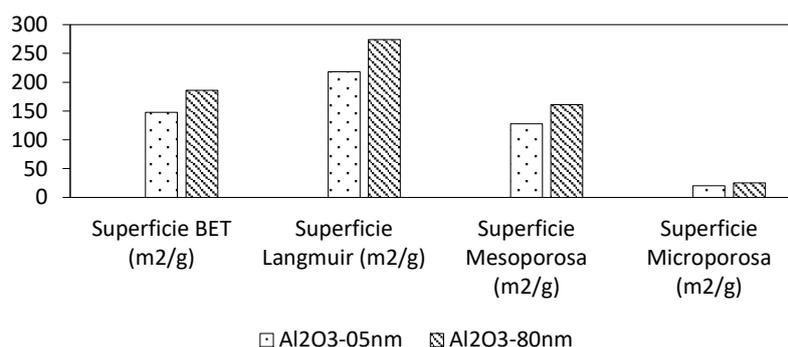
*Isoterma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> en alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm*



**Figura 9**  
*Isoterma de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> en alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm*



**Figura 10**  
*Área superficial específica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm*



El estudio arrojó tamaños de poros semejantes para ambos materiales, lo que nos haría pensar que los resultados de esta prueba describen bien la data obtenida en las siguientes secciones en donde las curvas de cinética e isotermas son similares para ambos materiales ya que es a través de los poros por donde se transporta y difunde el adsorbato (Hameed & El-Khaiary, 2008), en este caso, las especies de molibdeno; sin embargo, las áreas superficiales tanto de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm como de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm resultaron alejadas de las presentadas por el fabricante, a pesar de que este último no registró la técnica utilizada en la determinación. El área superficial de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm de 186 m<sup>2</sup>/g resultó ser mayor que el de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm con 148 m<sup>2</sup>/g, y esto explicaría por qué los resultados posteriores varían en proporcionalidad directa, es decir, a mayor área

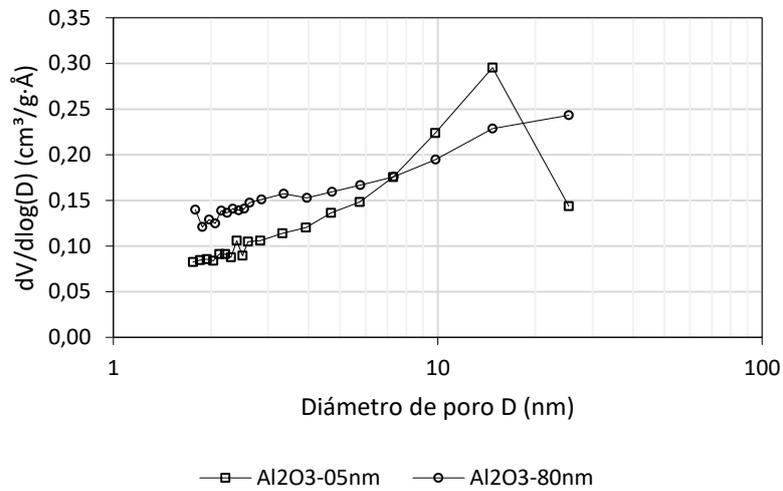
superficial específica, mayor capacidad de adsorción (Munir y otros, 2019).

Las distribuciones del tamaño de los poros  $dV/d\log D$  versus  $D$  para las nanopartículas de alúmina (Figura 11) muestra un pico relativamente agudo entre 10 y 20 nm que sugiere homogeneidad de la estructura porosa de la  $Al_2O_3$ -05nm (Puziy y otros, 2016).

La Figura 12 muestra la distribución de  $dA/d\log D$  versus  $D$  evidenciando que el tamaño de poro menor de 10 nm proporciona la mayor contribución al área de superficie específica, y la diferencia entre las 2 muestras de alúmina es causada por las contribuciones variables en este rango de tamaño de poro.

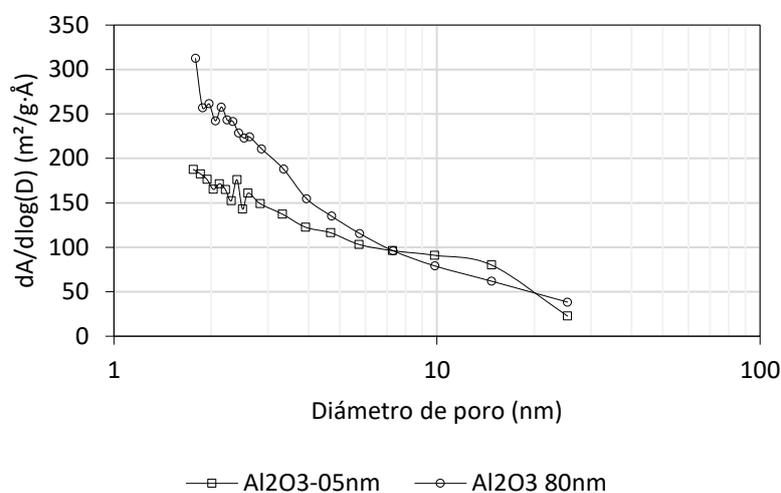
**Figura 11**

*Volumen de poro en función de la distribución del tamaño de poro en las nanopartículas de alúmina  $Al_2O_3$ -05nm y  $Al_2O_3$ -80nm*



**Figura 12**

Área superficial en función de la distribución del tamaño de poro en las nanopartículas de alúmina  $Al_2O_3$ -05nm y  $Al_2O_3$ -80nm



La  $Al_2O_3$ -80nm fue el material con una mayor área superficial. Las superficies específicas de las nanopartículas de alúmina fueron superiores en comparación con otros óxidos de aluminio comerciales (Ram y otros, 2009). Como resultado, la viabilidad de usar estos materiales como adsorbentes resulta alentador. Sin embargo, es importante evaluar el desempeño de estos materiales como adsorbentes de molibdeno, así como en procesos de elución del tecnecio-99m.

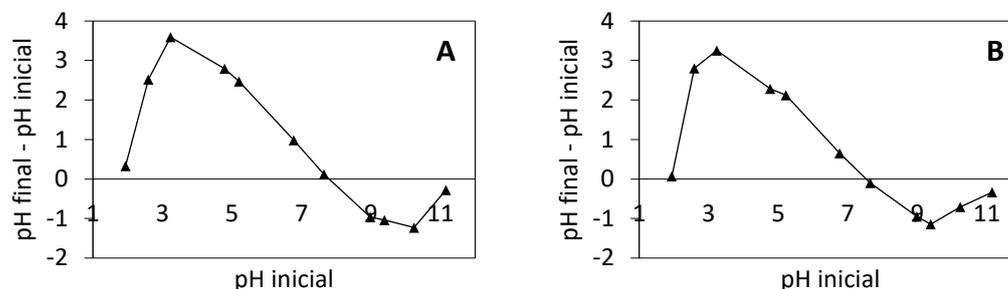
### iii. Potencial de carga cero PZC

En la Figura 13 se esquematiza el pH inicial versus la diferencia de pH entre el valor final e inicial, mostrándose el valor gráfico del potencial de carga cero para  $Al_2O_3$ -5 nm y  $Al_2O_3$ -80 nm. Estos resultados fueron 7,97 y 7,69 respectivamente, lo que explica la afinidad con los cationes y aniones de ambos adsorbentes. La variación de la carga superficial de la alúmina con respecto al pH puede explicarse por el hecho de que las partículas de alúmina están hidratadas y cubiertas por grupos hidroxilo con una superficie anfótera que puede reaccionar con  $H^+$  u  $OH^-$  y desarrollar cargas positivas o negativas en la superficie dependiendo del pH de la solución externa. A pH bajo, estos

grupos hidróxido se protonan y la superficie de la alúmina desarrolla una carga positiva.

**Figura 13**

*Determinación del punto de carga cero para A)  $Al_2O_3$ -5 nm B)  $Al_2O_3$ -80 nm*



El valor del potencial de carga cero para  $Al_2O_3$ -5 nm y  $Al_2O_3$ -80 nm de 7,97 y 7,69, respectivamente, concuerdan con la reportada por la literatura y se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Valores de PZC de la nanopartícula de  $\gamma$ -alúmina reportado por diferentes autores*

Punto de carga cero PZC	Técnica	Autor
8,5	Electroacústica	(Zamorategui M. y otros, 2016)
7,5-8,0	Titulación potenciométrica	(Mui y otros, 2016)
8,6	Titulación potenciométrica	(Bourikas y otros, 2005)
8,4	Titulación de masa	
8,2	Microelectroforesis	"
8	Inmersión	"
8,0	Titulación potenciométrica de masa	"
8,2±0,1	Titulación potenciométrica diferencial	"
8,1±0,1	Titulación potenciométrica	(Sprycha, 1989)
8,5	Titulación potenciométrica	(Huang & Stumm, 1973)

#### 4.1.2. Estabilidad química

El estudio de la estabilidad química se hace necesario debido a que es imperativo garantizar la mínima degradación química del adsorbente durante su operación. Los resultados de la medición de aluminio, en forma de ion  $Al^{3+}$ , en los

líquidos sobrenadantes se muestran en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Aluminio disuelto por las soluciones químicas en contacto con muestras de alúmina, analizado por absorción atómica*

	Al <sup>3+</sup> (ppm)		Al <sup>3+</sup> (ppm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-AC	30,880	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-AC	25,781
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-AN	20,710	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-AN	17,542
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-HS	8,182	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-HS	7,415
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-CS	8,078	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-CS	7,264

Nota: AC: ácido clorhídrico, AN: ácido nítrico, HS: hidróxido de sodio, CS: cloruro de sodio

Se puede advertir que la mayor degradación de la alúmina ocurrió en medio ácido mientras que en contacto previo con ácido y posterior con cloruro de sodio 0,15 M solo registró una degradación de 7-8 ppm, valores que, aunque menores de 10 ppm recomendado por la farmacopea para el eluido de pertecnetato de sodio (United States Pharmacopeia USP XXI, 1984), deben ser reducidos por operaciones posteriores dado que son cercanos al límite.

#### 4.1.3. Coeficiente de distribución Kd

El tratamiento de la información de cómo se calcularon las actividades y los Kd se muestran en el Anexo B: Especificaciones y detalle de resultados de cinética de adsorción de <sup>99</sup>Mo, el coeficiente de distribución Kd para cada pH se muestra en la Tabla 14, mientras que el mismo para cada especie radioquímica se muestran en las Figura 14 y Figura 15.

El coeficiente de distribución Kd permite identificar la conveniencia de la alúmina como adsorbente de <sup>99</sup>Mo a partir de soluciones acuosas y la elución selectiva de <sup>99m</sup>Tc.

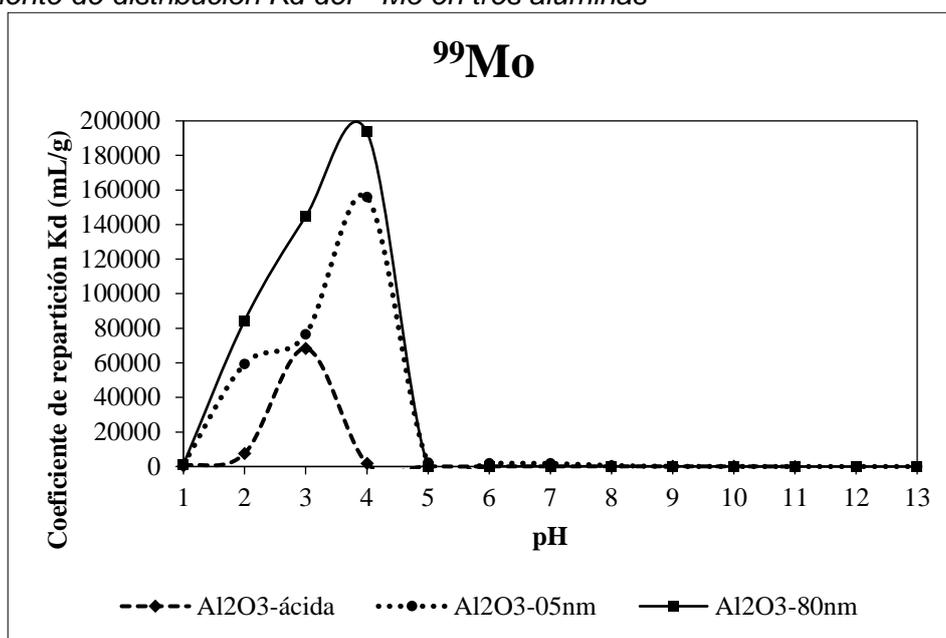
Tanto la carga superficial de los adsorbentes como la especiación del molibdeno serían responsables en la determinación de los valores de Kd, debido a que no sería posible distinguir la contribución propia de cada una.

**Tabla 14***Coeficiente de distribución Kd de iones de <sup>99</sup>Mo y <sup>99m</sup>Tc a diferentes pH*

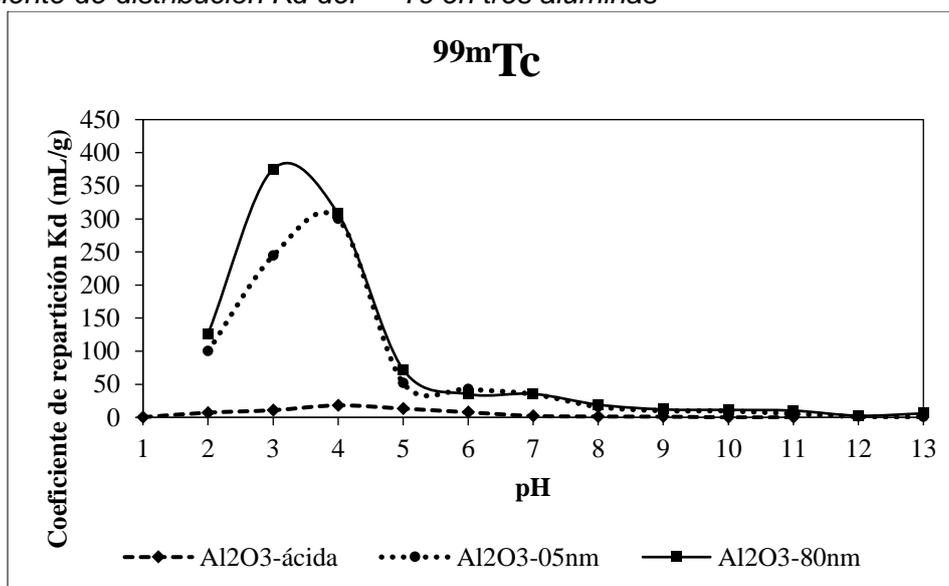
pH	Kd					
	<sup>99m</sup> Tc			<sup>99</sup> Mo		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm
1	0,3	-	-	372,9	1257,8	1293,8
2	7,2	100,1	126,3	7602,8	59342,5	84453,6
3	10,9	244,1	375,1	68323,8	76405,9	144679,0
4	18,2	300,0	307,7	1809,4	155909,8	193526,8
5	13,3	52,0	72,3	142,8	2125,8	152,5
6	7,7	42,7	35,2	111,4	1880,0	122,2
7	2,2	35,0	35,5	104,6	1755,6	114,1
8	1,3	16,0	19,2	118,2	578,5	122,9
9	1,1	10,1	12,1	102,6	105,9	119,0
10	0,1	9,7	11,3	87,8	38,4	31,5
11	0,1	5,4	10,3	3,1	5,8	5,1
12	-	1,1	2,5	-	0,4	0,8
13	-	0,5	6,0	-	0,1	0,5
NaCl 0,9%	0,1	2,6	4,3	2408,2	40494,6	37693,6

Los valores de Kd para <sup>99</sup>Mo y <sup>99m</sup>Tc alcanzaron su máximo a pH=4 para la alúmina nanopartícula mientras que, para la alúmina ácida, el valor máximo del Kd se reportó a pH=3. Por lo tanto, estas condiciones son las adecuadas para la adsorción de <sup>99</sup>Mo. Los altos valores de Kd para <sup>99</sup>Mo en la solución de NaCl al 0,9% indican una eficiente retención de Mo en la alúmina, mientras que los bajos valores de Kd para <sup>99m</sup>Tc sugieren que no se retendrán en gran proporción y se eluirán fácilmente.

**Figura 14**  
 Coeficiente de distribución  $K_d$  del  $^{99}\text{Mo}$  en tres alúminas



**Figura 15**  
 Coeficiente de distribución  $K_d$  del  $^{99m}\text{Tc}$  en tres alúminas



Para ajustar el pH a 7 se utilizó agua desionizada con una conductividad de 15,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que contiene una cantidad insignificante de iones  $\text{H}^+$ . El pH de la solución de  $\text{NaCl}$  al 0,9% es aproximadamente 7, sin embargo, tiene una concentración mucho mayor de iones positivos  $\text{Na}^+$  que la del agua desionizada. Los iones  $\text{Na}^+$  se adhieren a la superficie de la alúmina dando como resultado una carga positiva general y así los iones  $\text{MoO}_4^{2-}$  son adsorbidos debido a la atracción electrostática (Chakravarty y otros,

2014).

#### 4.1.4. Cinética de adsorción de <sup>99</sup>Mo

El tratamiento de la información de cómo se calcularon las actividades se muestran en el Anexo C: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción de adsorbentes.

La cantidad adsorbida de molibdeno en alúmina por masa de adsorbente se cuantificó mediante la ecuación:

$$q_t = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (10)$$

$$C_t = \frac{A_t}{A_{inicial}} C_0 \quad (11)$$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial de la solución (mg/ml),  $C_t$  es la concentración en un instante  $t$  una vez iniciado el proceso,  $A_{inicial}$  y  $A_t$  es la actividad de <sup>99</sup>Mo de la solución al inicio y en un instante  $t$ , respectivamente,  $V$  es el volumen de la solución (ml) y  $m$  es la masa del adsorbente (g).

El resumen de los resultados y cálculo de  $q_t$  así como del porcentaje adsorbido se muestran en las Tablas 15 a la 19.

**Tabla 15**

*Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~0,1 mg Mo/ml en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida con <sup>99</sup>Mo como radiotrazador*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Actividad (μCi)	Concentración mg Mo/ml	Cantidad adsorbida (mg alúmina)	$q_t$ (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
Inicial		51,195	0,1192	0,000		0,00%
Mo 1min	1,0	31,029	0,0722	4,70		39,4%
Mo 5min	5,0	14,951	0,0348	8,44		70,8%
Mo 10min	10,0	3,209	0,0075	11,17		93,7%
Mo 20min	20,0	2,183	0,0051	11,41		95,7%
Mo 40min	40,0	0,210	0,0005	11,87		99,6%
Mo 60min	60,0	0,231	0,0005	11,87		99,5%
Mo 80min	80,0	0,206	0,0005	11,87		99,6%

**Tabla 16**

*Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~0,1 mg Mo/ml en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm con <sup>99</sup>Mo como radiotrazador*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Actividad (μCi)	Concentración μg Mo/ml	Cantidad adsorbida q <sub>t</sub> (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
Inicial	0,00	48,907	91,8050	0,000	0,00%
Mo 0,5min	0,50	3,217	6,0388	8,577	93,42%
Mo 01min	1,00	0,039	0,0737	9,173	99,92%
Mo 05min	5,00	0,026	0,0479	9,176	99,95%
Mo 10min	10,00	0,021	0,0390	9,177	99,96%
Mo 15min	15,00	0,020	0,0370	9,177	99,96%
Mo 20min	20,00	0,021	0,0395	9,177	99,96%

**Tabla 17**

*Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~0,1 mg Mo/ml en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm con <sup>99</sup>Mo como radiotrazador*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Actividad (μCi)	Concentración μg Mo/ml	Cantidad adsorbida q <sub>t</sub> (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
Inicial	0,00	49,182	90,7560	0,000	0,00%
Mo 0,5min	0,50	3,487	6,4347	8,432	92,91%
Mo 01min	1,00	0,060	0,1098	9,065	99,88%
Mo 05min	5,00	0,011	0,0202	9,074	99,98%
Mo 10min	10,00	0,014	0,0260	9,073	99,97%
Mo 15min	15,00	0,015	0,0268	9,073	99,97%
Mo 20min	20,00	0,014	0,0260	9,073	99,97%

**Tabla 18**

*Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~1,0 mg Mo/ml en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm con <sup>99</sup>Mo como radiotrazador*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Actividad (μCi)	Concentración μg Mo/ml	Cantidad adsorbida q <sub>t</sub> (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
Inicial	0,00	214,918	1017,0730	0,000	0,00%
Mo 0,5min	0,50	120,001	567,8867	44,919	44,16%
Mo 01min	1,00	113,920	539,1097	47,796	46,99%
Mo 05min	5,00	111,101	525,7711	49,130	48,31%
Mo 10min	10,00	109,978	520,4570	49,662	48,83%
Mo 15min	15,00	110,152	521,2804	49,579	48,75%
Mo 20min	20,00	110,046	520,7760	49,630	48,80%

**Tabla 19**

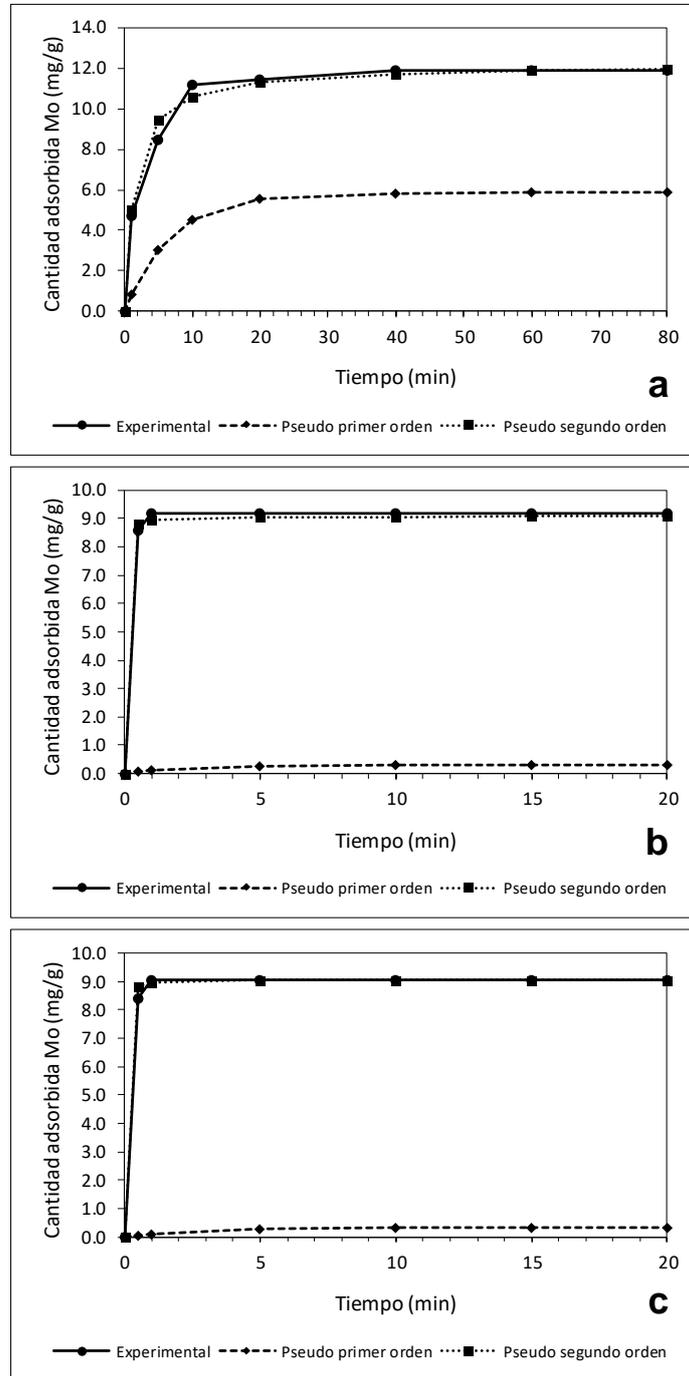
*Datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales de adsorción con una concentración inicial de ~1,0 mg Mo/ml en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm con <sup>99</sup>Mo como radiotrazador*

Muestra	Tiempo de agitación (min)	Actividad (μCi)	Concentración μg Mo/ml	Cantidad adsorbida q <sub>t</sub> (mg Mo/g alúmina)	Porcentaje adsorbido (%)
Inicial	0,00	214,918	1008,3200	0,000	0,00%
Mo 0,5min	0,50	117,955	553,4032	45,492	45,12%
Mo 01min	1,00	116,159	544,9782	46,334	45,95%
Mo 05min	5,00	115,408	541,4531	46,687	46,30%
Mo 10min	10,00	112,767	529,0620	47,926	47,53%
Mo 15min	15,00	112,213	526,4618	48,186	47,79%
Mo 20min	20,00	112,617	528,3597	47,996	47,60%

De acuerdo con la Figura 16, se observó que la cantidad adsorbida aumentó con el tiempo de contacto, alcanzando el equilibrio a los 40 minutos para la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida a pH óptimo. En contraste, para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm, el equilibrio se alcanzó dentro del primer minuto de iniciada la agitación en ambos casos. La rápida adsorción en las etapas iniciales puede atribuirse al hecho de que inicialmente los sitios de adsorción estaban vacíos, lo que facilitó la adsorción de los iones de molibdato. Sin embargo, la tasa de adsorción disminuyó debido a la ocupación de los poros de la alúmina por las especies de molibdeno en los (Ghaedi y otros, 2012) resultando en una curva de adsorción finalmente constante, lo que indica una saturación completa de los sitios de adsorción. Los valores de coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) para el modelo de pseudo segundo orden son más altos que los del modelo de pseudo primer orden, como se muestran en la Tabla 20. Las capacidades de adsorción de equilibrio obtenidas (q<sub>e</sub>) con la ecuación de pseudo segundo orden están cerca de los valores experimentales, lo que indica que esta ecuación describe mejor la cinética de adsorción de molibdeno en las tres alúminas ensayadas a pH=4.

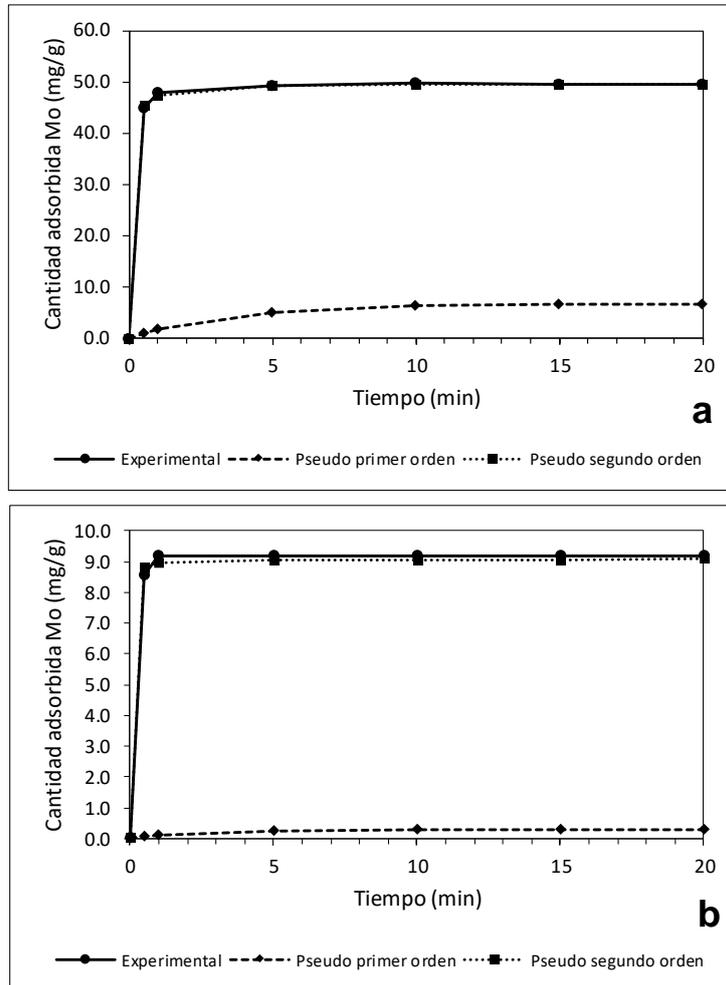
**Figura 16**

Cantidad adsorbida de iones de molibdeno ( $H_2Mo_7O_{24}^{4-}$ ,  $H[MoO_4]^-$ ,  $H_2(MoO_4)_{(ac)}$  y  $HMo_7O_{24}^{5-}$ ) hasta el tiempo de equilibrio en a)  $Al_2O_3$ -ácida b)  $Al_2O_3$ -05nm c)  $Al_2O_3$ -80nm. La concentración inicial de molibdeno fue de  $0,1 \text{ mg ml}^{-1}$  ( $\sim 1,0 \text{ mM}$ ), la concentración del adsorbente fue de  $10 \text{ mg ml}^{-1}$ . La adsorción tuvo lugar a  $\text{pH}=4$  y  $T=20^\circ \text{C}$ .



### Figura 17

Cantidad adsorbida de iones de molibdeno ( $H_2Mo_7O_{24}^{4-}$ ,  $H[MoO_4]^-$ ,  $H_2(MoO_4)_{(ac)}$  y  $HMo_7O_{24}^{5-}$ ) hasta el tiempo de equilibrio en a)  $Al_2O_3$ -05nm b)  $Al_2O_3$ -80nm. La concentración inicial de molibdeno fue de  $1,0mg\ ml^{-1}$  ( $\sim 10,0\ mM$ ), la concentración del adsorbente fue de  $10\ mg\ ml^{-1}$ . La adsorción tuvo lugar a pH 4 y  $T=20^\circ C$ .



**Tabla 20***Parámetros cinéticos de la adsorción de especies de molibdeno a pH 4 en alúmina*

Pseudo primer orden					
Adsorbente	Conc. Mo inicial μg/ml	$q_{e, \text{exp}}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$q_{e, \text{teo}}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$k_1$ (min)	R <sup>2</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida	119,20	11,87	5,84	0,15	0,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	91,81	9,18	0,12	0,41	0,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	1017,07	49,66	6,74	0,29	0,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	90,76	9,07	0,31	0,39	0,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	1008,32	48,19	5,48	0,20	0,62

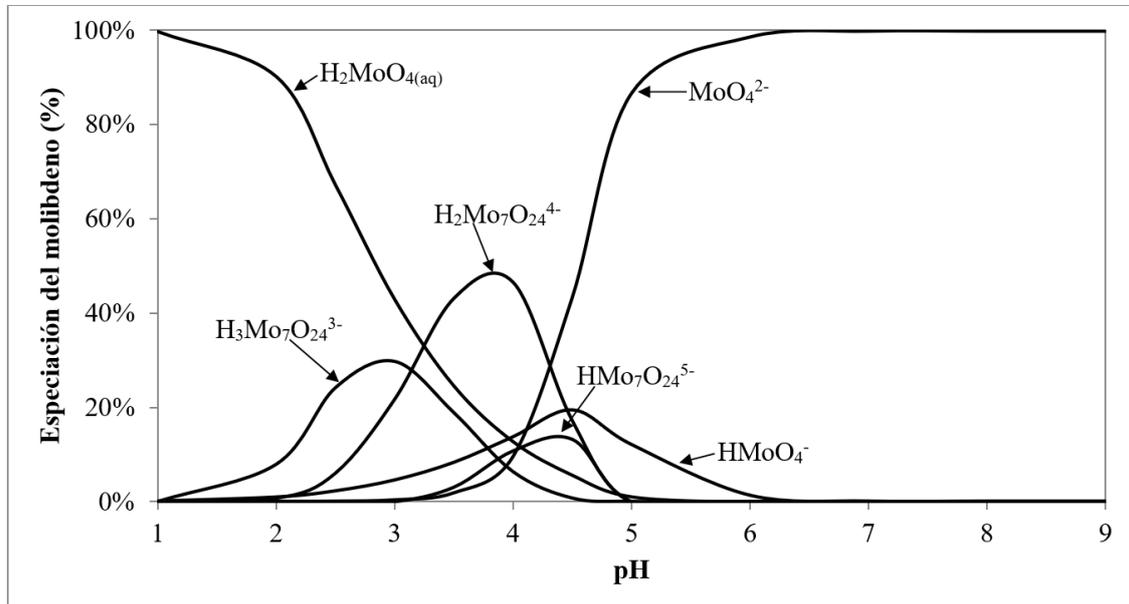
Pseudo segundo orden					
Adsorbente	Conc. Mo inicial μg/ml	$q_{e, \text{exp}}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$q_{e, \text{teo}}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$k_2$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida	119,20	11,87	12,14	0,06	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	91,81	9,18	9,19	7,80	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	1017,07	49,66	49,76	0,42	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	90,76	9,07	9,08	7,27	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	1008,32	48,19	48,21	0,32	0,99

Las figuras 16 y 17 manifiestan que el proceso de adsorción ocurre rápidamente en todos los materiales de alúmina, independientemente de la concentración inicial, alcanzando el equilibrio en pocos minutos. Las constantes de velocidad de pseudo segundo orden calculadas  $k_2$  indican que la tasa de adsorción de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm es ligeramente mayor al de la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm para ambas concentraciones iniciales. Sin embargo, a una concentración inicial del orden 100 μg/ml de Mo, los valores de  $k_2$  para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm son aproximadamente 2,6 veces el de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida, lo que sugiere que la tasa de adsorción del molibdeno en alúmina nanopartículas es 2,6 veces más rápida que en la alúmina ácida. La rápida adsorción en todos los casos insinúa que los poros son de fácil acceso para los iones molibdato. Los resultados obtenidos para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida son parecidos a los reportados previamente por Denkova et al. (2013), sin embargo, las constantes de velocidad de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm difieren significativamente. Al incrementar la concentración inicial de molibdeno 10 veces, el porcentaje de adsorción en el equilibrio de las alúminas nanopartículas se reduce a la

mitad (de 99% a 48-49%).

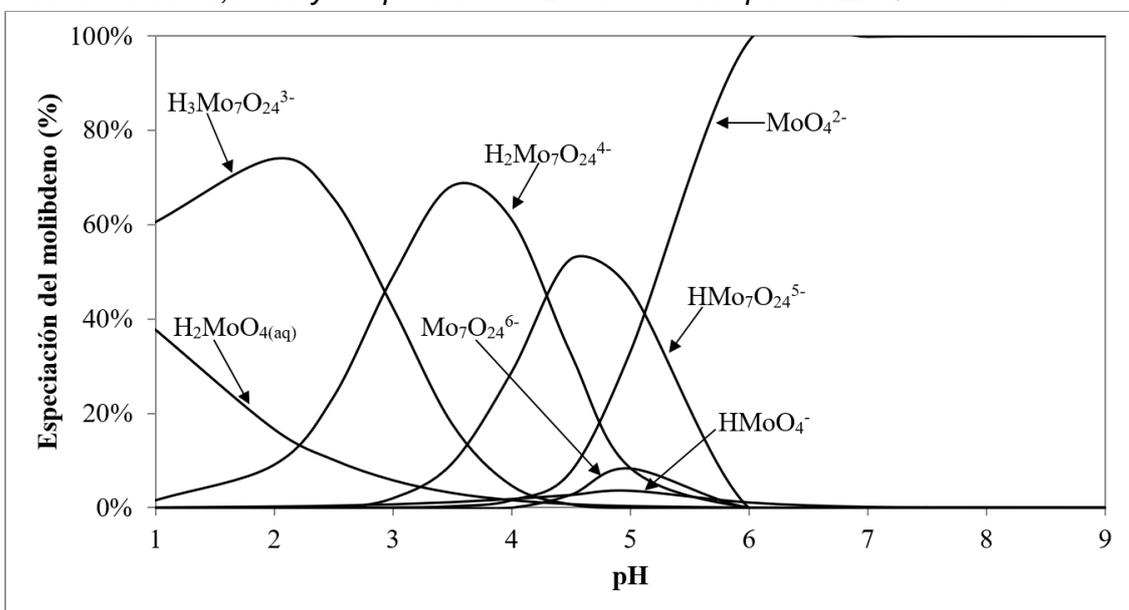
**Figura 18**

Especiación de iones de molibdeno como función del pH a una concentración fija de molibdeno de 1,0 mM y temperatura de 20 °C obtenido por CHEAQS software



**Figura 19**

Especiación de iones de molibdeno como función del pH a una concentración fija de molibdeno de 10,0 mM y temperatura de 20 °C obtenido por CHEAQS software



Usando el programa de especiación de software libre CHEAQS (usa base de datos NIST 46 (versión 8) (Verweij & Simonin, 2021)), se calculó la especiación de molibdeno a pH 4 en la concentración estudiada de molibdeno (1,0 mM). La Figura 18 y Figura 19

muestran los porcentajes de las especies de molibdeno más importantes en función del pH obtenido por CHEAQS para concentraciones de 1,0 y 10,0 mM, respectivamente.

Los cálculos de especiación revelan que a pH 4 más del 45% del molibdeno asume la forma de  $\text{H}_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{4-}$  y el resto en su mayoría  $\text{H}(\text{MoO}_4)^-$ ,  $\text{H}_2(\text{MoO}_4)_{(\text{ac})}$  y  $\text{HMo}_7\text{O}_{24}^{5-}$  (Mitchell, 2009).

#### 4.1.5. Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado estacionario

La capacidad de adsorción fue calculada usando la siguiente expresión:

$$\text{Capacidad máx} = \frac{(A_0 - A_e)VC_0}{A_0m} \text{ mg/g} \quad (12)$$

Donde  $A_0$  y  $A_e$  representan la radiactividad de 1 ml de  $^{99}\text{Mo}$  de la solución sobrenadante antes y después de la adsorción, respectivamente,  $C_0$  el contenido total de Mo (10 mg) en 1 ml de solución antes de la adsorción,  $V$  es el volumen de la solución (ml) y  $m$  (g) la masa del adsorbente.

La capacidad de adsorción es un parámetro experimental importante porque determina la cantidad de  $^{99}\text{Mo}$  que puede ser cuantitativamente retenida por el adsorbente y, por lo tanto, es indicativo del número de sitios activos disponibles en la alúmina para la adsorción de iones de  $^{99}\text{Mo}$  (Chakravarty y otros, 2013), asimismo, representa un valor límite superior de la cantidad adsorbida, esta información es útil para determinar la cantidad de alúmina que podría usarse en una columna cromatográfica para desarrollar el generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . El detalle del cálculo de la capacidad de adsorción se muestra en el Anexo C: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción de adsorbentes, y de forma resumida en la Tabla 21 .

**Tabla 21***Resultados de la prueba de capacidad máxima de adsorción por adsorbente*

Código de muestra	Capacidad máxima de adsorción (mg Mo/g adsorbente)	Promedio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida-01	16,76	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida-02	18,58	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida-03	18,62	18±1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida-04	20,02	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ácida-05	17,85	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-01	174,26	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-02	182,84	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-03	180,49	176±6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-04	175,10	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm-05	167,26	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-01	205,26	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-02	196,38	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-03	195,90	199±10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-04	211,46	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm-05	186,54	

‘±’ indica la desviación estándar

Se determinó que la capacidad de adsorción estática más alta fue la de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm (199±10 mg Mo/g), seguida por la de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm (176±6 mg Mo/g), que representa aproximadamente 10 veces el valor de la capacidad de adsorción de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida (18±1 mg Mo/g). Los valores obtenidos por la nanopartícula de  $\gamma$ -alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm) son comparables a los obtenidos por (Chakravarty y otros, 2012) en su estudio de la capacidad máxima de adsorción estática y dinámica de la  $\gamma$ -alúmina siendo la primera de 205±10 mg Mo/g; aunque el área superficial específica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm haya sido de 4 a 8 veces el de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm según lo reportado por el fabricante, los resultados reflejan que se conciben de una mejor manera con los obtenidos en la caracterización estructural realizada en el presente estudio. Aunque ambas tienen el mismo tamaño de poro, la diferencia en el área superficial específica de ambos adsorbentes se ve reflejada en la magnitud de las capacidades de adsorción, y un menor tamaño de partícula podría traducirse en una mayor interacción superficial de las partículas de un mismo adsorbente en presencia de un medio acuoso y la aglomeración

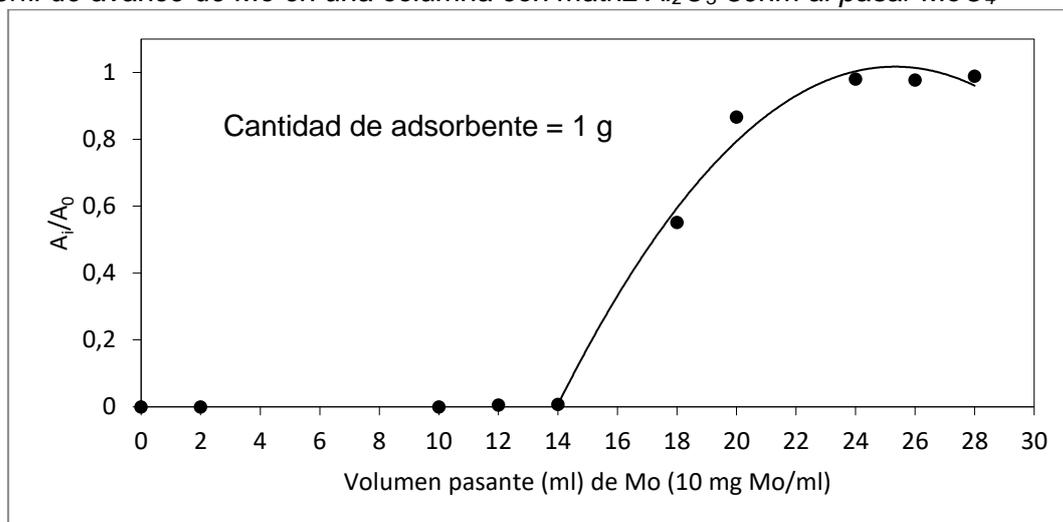
de nanopartículas podría no estar permitiendo la interacción de la matriz adsorbente y los iones adsorbidos voluminosos tales como  $\text{H}_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}^{4-}$  (Ikenyiri & Ukpaka, 2016).

#### 4.1.6. Capacidad máxima de adsorción de molibdeno en estado dinámico

El perfil de avance de la solución de  $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$  a través de la columna con  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm se representa en la Figura 20. La ruptura de la curva ocurrió en el volumen pasante 14 ml con una concentración de 10 mg Mo/ml y un  $A_t/A_0$  de 0,007, equivalente a la retención cuantitativa de 140 mg Mo por g de adsorbente, comparativamente más alta que las reportadas en estudios similares: 15 mg/g para microesferas de alúmina (Dash y otros, 2012) y 20 mg/g para alúmina ácida (Ram y otros, 2009), pero semejante a los obtenidos en otras publicaciones: 156 mg/g para  $\gamma$ -alúmina (Chakravarty y otros, 2014) y 182 mg/g para meso alúmina en la misma divulgación.

**Figura 20**

*Perfil de avance de Mo en una columna con matriz  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm al pasar  $\text{MoO}_4^{2-}$*



Si bien el perfil de avance representa el comportamiento de la carga de  $^{99}\text{Mo}$  a pH 4, la determinación de la capacidad de adsorción máxima alcanzable en un generador se calcula teniendo en cuenta la pérdida de  $^{99}\text{Mo}$  debido al cambio de pH de la solución en contacto durante el lavado previo a la elución del  $^{99m}\text{Tc}$  con  $\text{NaCl}$  0,9%.

La capacidad de adsorción máxima alcanzable resulta ser menor que el punto de ruptura de la curva debido a que durante el lavado, trazas de  $^{99}\text{Mo}$  que no fueron

adsorbidos se desprenden. El lavado se realiza para evitar la presencia de  $^{99}\text{Mo}$  en el eluido durante el funcionamiento regular del generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Por lo tanto, se recomienda que la capacidad de adsorción máxima de alúmina en columna se realice teniendo en cuenta la fase de lavado con  $\text{NaCl}$  0,9% (Chakravarty y otros, 2013).

Como se esperaba, el punto de ruptura es menor que la capacidad máxima de adsorción en estado estacionario, principalmente debido a las limitaciones de transferencia de masa.

Para este estudio se considera que la ruptura se da a  $A_i/A_0$  de 0,007, dada la cantidad de puntos o muestras; de modo similar se consideró 0,01 en estudios análogos según (Ram y otros, 2009), (Chakravarty y otros, 2012), (Chakravarty y otros, 2013), (Chakravarty y otros, 2014), y (Wang y otros, 2021), mientras que (Dash y otros, 2012) consideraron un valor de 0,1.

Algunos autores también definen la capacidad de adsorción práctica como la capacidad total de adsorción de molibdeno en alúmina en  $\text{mg/g}$  en columna o la medida de saturación de la columna, tales como (Dash y otros, 2012) y (Chakravarty, 2011, pág. 214), considerando la cantidad pasante de  $\text{Mo}$  a  $C/C_0 = 0,9$  que sería equivalente a una relación de actividades  $A_i/A_0 = 0,9$ . Sin embargo, otros autores solo comparan la capacidad máxima estática y dinámica tal como se muestra en la Tabla 22, de donde se obtienen relaciones de estas magnitudes en porcentaje variables, alrededor del rango 70-80% incluyendo el presente estudio. Evidentemente, resulta conveniente que este porcentaje sea el mayor posible, pero la capacidad máxima estática será el valor de mayor interés puesto que representa la cantidad máxima de adsorción de molibdeno en el adsorbente.

Las pruebas no se repitieron para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm, debido a que, por su alta capacidad hidrofílica, se mantenía dispersa en el medio y al aplicar vacío en un ensayo previo, la presión que ejercía sobrepasaba los 5 psi y cierta cantidad de alúmina traspasaba la frita y la membrana, junto a la solución eluída.

**Tabla 22**

*Comparación de materiales adsorbentes de alúmina alternativos para la adsorción de molibdeno reportados según estudios estáticos, dinámicos y en generadores de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc*

Tipo de estudio	Referencia	An	Alumina	Comparative	Comparative	Development	Mesoporous	Preparatio	Practicality	of	Presente
estático	Based <sup>99</sup> Mo- <sup>99m</sup> Tc generator to produce <sup>99m</sup> Tc in Organic Medium Suitable for Industrial Radiotracer Applications (Ram y otros, 2009)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> comercial	ácida	Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Develop Clinically Useful <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc Generators using <sup>99</sup> Mo (Chakravarty y otros, 2014)	Assessment of Nanostructure d Metal Oxides: A Potential Step Forward to Develop Clinically ... (Chakravarty y otros, 2014)	Assessment of a <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications (Dash y otros, 2012)	Alumina (MA) Based Double Column Approach for Development of a Clinical Scale Generator Using <sup>99</sup> Mo: An Enticing Application of Nanomaterial ... (Chakravarty y otros, 2013)	Preparation of clinical-scale <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc generator ... (Chakravar ty y otros, 2012)	of hierarchically macro/mesoporous $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> as a promising sorbent in the preparation of low specific activity <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc generator (Wang y otros, 2021)		investigación
Estudio estático	Adsorbente	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> comercial	ácida	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sintetizada por los autores	Meso-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sintetizada por los autores	Microesferas de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sintetizada por los autores	Nano mesoporosa sintetizada por los autores	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nano cristalina sintetizada por los autores	Hierarchically macro-/mesoporous $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm nanopartículas comercial
	Capac. estática (mg/g)	Máx 26-30		205	225	46	225		205	250	199
Estudio dinámico	Capac. estudio dinámico (mg/g) (Ruptura)	Máx 20		156	182	15	168		156	200	140
	± desviación	No reportado		No reportado	No reportado	No reportado	12		6	No reportado	No reportado
	n (cantidad de pruebas)	1		1	1	1	10		5	3	1
	% desviación promedio	No aplica		No aplica	No aplica	No aplica	0,1		0,038	No aplica	No aplica

Tipo de estudio	Referencia	An Based generator to produce 99mTc in Organic Medium Suitable for Industrial Radiotracer Applications (Ram y otros, 2009)	Alumina 99Mo-99mTc to Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Useful 99Mo/99mTc Generators using (n,y) (Chakravarty y otros, 2014)	Comparative Assessment of Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Useful 99Mo/99mTc Generators using (n,y) (Chakravarty y otros, 2014)	Comparative Assessment of Nanostructure Metal Oxides: A Potential Step Forward to Useful 99Mo/99mTc Generators using (n,y) (Chakravarty y otros, 2014)	Development of a 99Mo/99mTc generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications (Dash y otros, 2012)	Mesoporous Alumina (MA) Based Double Column Approach for Development of a Clinical Scale Generator Using 99Mo: An Application of Nanomaterial ... (Chakravarty y otros, 2013)	Preparation of clinical-scale 99Mo/99mTc generator ... (Chakravarty y otros, 2012)	Practicality of hierarchically macro/mesoporous $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> as a promising sorbent in the preparation of low specific activity 99Mo/99mTc generator (Wang y otros, 2021)	Presente investigación
	Concentración inicial C <sub>0</sub> (mg Mo/ml)	5	10	10	10	25	25	10	10	
	Actividad aproximada de la muestra C <sub>0</sub> ( $\mu$ Ci)	1	No especifica	No especifica	0,01	No especifica	No especifica	No aplica	0,01	
	Volumen pasante (ml)	30	38	38	50	80	50	No especifica	30	
	Flujo (ml/min)	0,25	2	2	0,25	2	2	1	0,25	
	Masa alúmina en columna (g)	2	1	1	0,5	4,5	5	1	1	
	Dimensión columna	15cmx0,4cm(d.i.)	6cmx1cm	6cmx1cm	15cmx0,4cm(d.i.)	No especifica	6cmx1cm	3 cm x 1 cm (d.i.)	10cmx1,0cm	
	Fración % de Capac. Máx. en estudio dinámico/estático	71	76	81	33	75	76	80	70	
Estudio en generador	Masa alúmina en columna (g)	10	4	4	10	9	5,5	1	No aplica	

Tipo de estudio	Referencia	An Based generator produce 99mTc in Organic Medium Suitable for Industrial Radiotracer Applications (Ram y otros, 2009)	Alumina 99Mo-99mTc to Nanostructured Metal Oxides: A Step Forward Useful Generators (n,y) (Chakravarty y otros, 2014)	Comparative Assessment of Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Clinically Useful 99Mo/99mTc Generators using 99Mo (n,y) (Chakravarty y otros, 2014)	Comparative Assessment of Nanostructure Metal Oxides: A Potential Step Forward to Clinically ... (Chakravarty y otros, 2014)	Development of a 99Mo/99mTc generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications (Dash y otros, 2012)	Mesoporous Alumina (MA) Based Double Column Approach for Clinical Scale Generator Using 99Mo: An Application of Nanomaterial ... (Chakravarty y otros, 2013)	Preparation of clinical-scale 99Mo/99mTc generator ... (Chakravarty y otros, 2012)	Practicality of hierarchically macro/mesoporous $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> as a promising sorbent in the preparation of low specific activity 99Mo/99mTc generator (Wang y otros, 2021)	Presente investigación
Dimensión columna	5cmx1cm	6cmx1cm	6cmx1cm	20cmx1,5cm	No especifica	6cmx1cm	3 cm x 1 cm (d.i.)	No aplica		
Cantidad inicial	Mo 150 mg/ml	1,66 g	1,66 g	166mg	1,66 g	10 g	10 g/L	No aplica		
Volumen de lavado con NaCl 0.9% (ml)	0	500	500	100	200	500	100	No aplica		
Volumen de elución con NaCl 0.9% (ml)	10	20	20	10	16	10	1,5	No aplica		
Actividad inicial del generador (mCi)	20	250	250	50	600	350	9,15	No aplica		

#### 4.1.7. Isotherma de adsorción

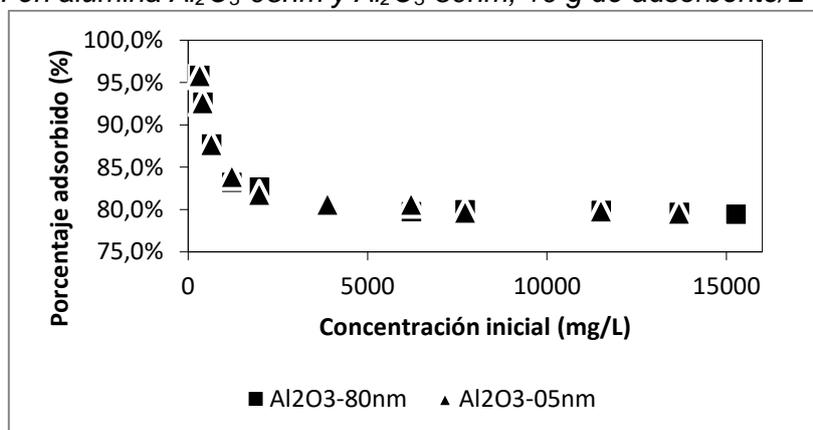
El equilibrio de adsorción se utiliza para evaluar la aplicabilidad de los procesos de adsorción a partir de datos fisicoquímicos fundamentales. Las ecuaciones de isoterma de equilibrio se utilizan para describir datos experimentales de sorción (Ho & McKay, 1999). Las isotermas de adsorción describen cómo los polianiones de molibdeno interactúan con la alúmina como material adsorbente y, por lo tanto, son importantes para optimizar las condiciones de adsorción en el diseño de la columna cromatográfica.

Para la presente investigación, las isotermas de Freundlich y Langmuir se ajustaron a los datos experimentales.

El porcentaje de adsorción determinado para cada concentración de Mo en el rango de 0,3 a 14,0 mg Mo/ml se ilustró en la Figura 21. La adsorción disminuyó del 100% al 80% con el aumento de la concentración de Mo hasta 14 mg/l para ambas nano alúminas. La adsorción disminuyó del 100% al 83% con el aumento de la concentración de Mo hasta 1210 mg/l; desde una concentración de 6000 mg/l, el porcentaje de adsorción se estabilizó alrededor del 80%. Ninguna de las dos nano alúminas muestra una variación del porcentaje de adsorción de los iones Mo cuando se alcanza la concentración máxima analizada de 15000 mg/l.

**Figura 21**

*Adsorción de polianiones de molibdeno en soluciones tampón de acetato de sodio y nítrico, pH 4 en alúmina  $Al_2O_3$ -05nm y  $Al_2O_3$ -80nm, 10 g de adsorbente/L*



El modelo de isoterma de Freundlich es aplicable para la adsorción en superficies heterogéneas y la adsorción multicapa. El uso de este modelo sugiere que la energía de adsorción disminuye exponencialmente a medida que los centros de adsorción o sitios activos de un adsorbente se completan. Esta isoterma se emplea para describir sistemas heterogéneos y se obtiene mediante la forma lineal de la expresión de Freundlich (13) (Crini & Peindy, 2006):

$$\ln(q_{e,F}) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (13)$$

Donde  $1/n$  es un parámetro de heterogeneidad, cuanto menor es  $1/n$ , mayor es la heterogeneidad esperada. Esta expresión se reduce a una isoterma de adsorción lineal cuando  $1/n = 1$ . Si  $n$  varía entre 1 y 10, el proceso de sorción podría ser favorable (Dada, 2012). De los datos de la Tabla 23, se obtuvo un valor de  $n = 1.4$  para ambas alúminas, lo que indica que la adsorción de especies de molibdeno en la alúmina es favorable, obteniendo un valor para  $R^2$  de 0,97.

El modelo de isoterma de Langmuir considera que el proceso de adsorción ocurre sobre una superficie que contiene un número finito de sitios idénticos, es decir, que todos los sitios de adsorción son igualmente activos. La forma linealizada del modelo viene dada por la ecuación (6) (Denkova y otros, 2013).

Las características esenciales de la isoterma de Langmuir pueden expresarse en términos del parámetro de equilibrio  $R_L$ , que es una constante adimensional denominada factor de separación o parámetro de equilibrio según la ecuación (14) (Zahra Derakhshan, 2013):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (14)$$

Donde  $C_0$  es la concentración inicial y  $K_L$  es la constante relacionada con la energía de adsorción (constante de Langmuir). Los valores de  $R_L$  indican que el tipo de isoterma es irreversible ( $R_L = 0$ ), favorable ( $0 < R_L < 1$ ), lineal ( $R_L = 1$ ) o desfavorable ( $R_L >$

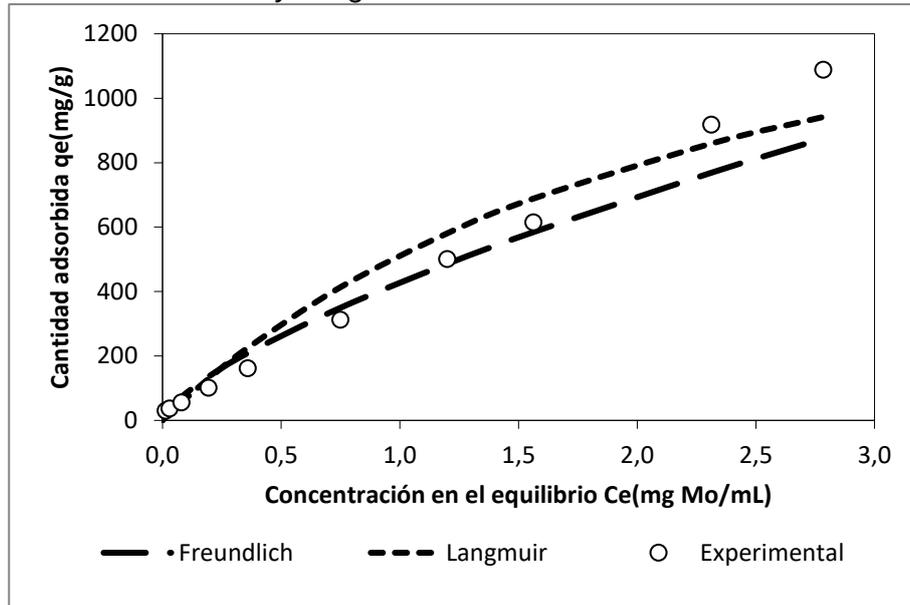
1) (Weber & Chakravorti, 1974). De la Tabla 23 se encuentra que  $R_L$  es menor que la unidad, pero mayor que cero, lo que confirma el proceso de adsorción factible para el molibdeno en ambas nanoalúminas.

A partir de esta investigación, se determinó que la capacidad máxima de cobertura de monocapa ( $q_{m,L}$ ) del modelo de isoterma de Langmuir fue de 2017,2 mg/g para  $Al_2O_3$ -80nm mientras que para  $Al_2O_3$ -05nm fue de 1780,4 mg/g,  $R_L$  (el factor de separación de Langmuir) es 0,5, lo que indica que la adsorción de equilibrio fue significativa pero al ser el valor  $R^2$  de aproximadamente 0,5 para ambos tamaños de nanopartículas de alúmina, se determina que los datos de adsorción no se ajustan bien al modelo de isoterma de Langmuir, por tanto este modelo no es el más adecuado para la representación del equilibrio de adsorción de molibdeno en alúmina.

Nótese que tanto en la figura 22 y 23, la isoterma de Freundlich se aleja de los puntos experimentales a una concentración superior a 2,3 mg Mo/ml, esto se debe a que la ecuación (13) proviene de la que propuso originalmente Freundlich en 1909 para un sistema heterogéneo de adsorción de un gas en un adsorbente sólido, en donde en lugar de la concentración en equilibrio  $C_e$ , se utiliza presión  $p$ , que denota presión. Ecuación que falla a presiones mayores, porque experimentalmente se encuentra que la cantidad de adsorción  $q_{e,F}$  varía inmediatamente con la presión  $p$  y luego varía directamente con la presión elevada a la potencia  $1/n$  hasta que se alcanza la presión de saturación. Más allá de ese punto, la adsorción se satura incluso después de aplicar más presión. (Shaji & Zachariah, 2017). Análogamente usamos esta ecuación para sistemas heterogéneos de adsorbatos acuosos en adsorbentes sólidos, caso del presente estudio, en donde la ecuación falla a altas concentraciones debido a que ya se alcanzó la concentración de saturación.

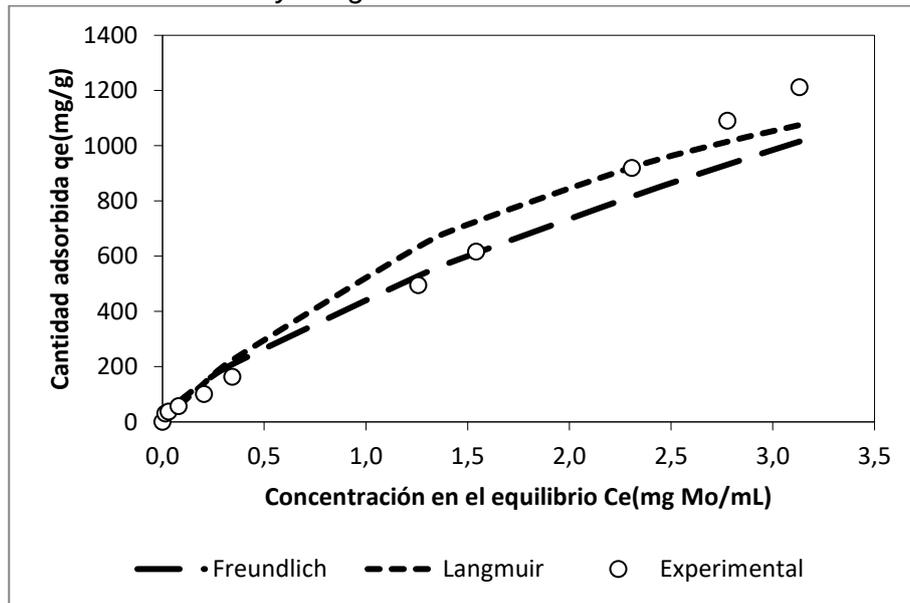
**Figura 22**

Isoterma de adsorción de Mo a pH 4 y 20 °C en  $Al_2O_3$ -05nm, datos experimentales y modelamiento de Freundlich y Langmuir



**Figura 23**

Isoterma de adsorción de Mo a pH 4 y 20 °C en  $Al_2O_3$ -80nm, datos experimentales y modelamiento de Freundlich y Langmuir



**Tabla 23***Constantes y coeficientes de correlación de isotermas de molibdeno en alúmina*

Isoterma de Freundlich				
Adsorbente	$K_F$ (mL/mg)	1/n	n	$R^2$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	0,428	0,700	1,429	0,971
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	0,449	0,716	1,397	0,974
Isoterma de Langmuir				
Adsorbente	$K_L$ (mL/mg)	$q_{m,L}$ (mg/g)	$R_L$	$R^2$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -05nm	0,403	1780,415	0,502	0,526
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -80nm	0,364	2017,245	0,493	0,573

#### 4.1.8. Efecto de los aniones del ácido en la adsorción

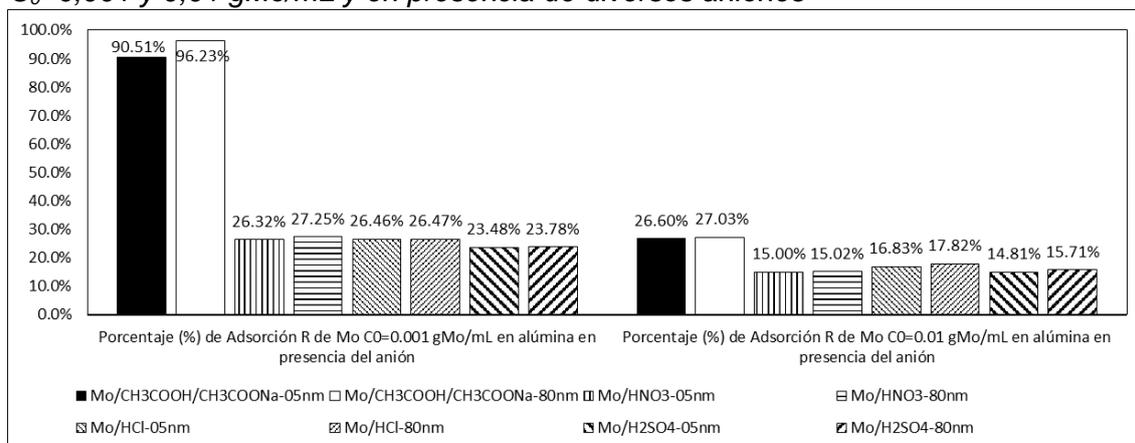
Se investigó el efecto de los diversos aniones inorgánicos de los ácidos que figuran en las operaciones de dilución y adsorción del molibdeno, además de ser alternativas unas de otras. Siendo el ácido nítrico y clorhídrico los más usados en la literatura (Chakravarty y otros, 2014), se ha encontrado bibliografía (United States Patente nº 3,830,746, 1974) y (United States Patente nº 3,833,509, 1974) en la que el ácido acético es el más apropiado para disminuir la concentración de molibdato residual en la columna cromatográfica de alúmina. En este estudio se usó la solución tampón de acetato debido a que mantiene el pH estable. Se observa que, para los demás ácidos, al finalizar la adsorción, el pH se incrementa, así como que a mayor tiempo de adsorción este tiende al neutro y al no poderse controlar, el proceso pierde dependencia del pH inicial (Benavente, 2008, pág. 4) y por ello, el porcentaje de adsorción disminuye con respecto al del tampón de acetato. Se estudió el efecto de los aniones de los ácidos: cloruro, nitrato, sulfato y acetato a pH 4 en soluciones de 0,001 y 0,01 gMo/mL.

De la Figura 24, se observó que a una mayor concentración de molibdeno inicial hay un menor porcentaje adsorbido en presencia de todos los aniones, este resultado no es determinante ya que la cantidad adsorbida siempre está en función de la concentración inicial. Sin embargo, es importante para la comparación con los resultados de los diferentes aniones.

Se observó que el tampón de acetato es el más conveniente para ambas concentraciones, aunque a una mayor concentración de molibdatos su eficacia disminuye, no deja de ser mayor al de los demás aniones. Además, para que este pueda considerarse el más idóneo durante la adsorción, debe estudiarse la cantidad de molibdato residual en los eluidos que contienen pertecnetato durante la fase de elución con cada uno de los ácidos ensayados debido a que los ácidos fuertes y débiles pueden fijar los polianiones de molibdeno en la matriz alúmina de diferente manera (Pechishcheva y otros, 2021). Asimismo, estos resultados corresponden a un proceso de adsorción aparente (Le, 2014), (Dano y otros, 2017), ya que no se realizaron lavados después del proceso de adsorción, tal como lo harían otros autores en ensayos similares (Chakravarty y otros, 2012), (Dash y otros, 2012).

**Figura 24**

Porcentaje (%) de Mo adsorbido en  $Al_2O_3-05nm$  y  $Al_2O_3-80nm$  a pH 4, conc. inicial  $C_0=0,001$  y  $0,01$  gMo/mL y en presencia de diversos aniones



## 4.2. Producción de <sup>99m</sup>Tc

### 4.2.1. Rendimiento de elución

El rendimiento de elución del <sup>99m</sup>Tc es determinado por la siguiente relación:

$$\text{Rendimiento de elución}(\%) = \frac{A_{99mTc}(\text{medido})}{A_{99mTc}(\text{teórico})} \times 100 \quad (15)$$

Donde:

$A_{99mTc}(\text{medido})$  es la actividad del <sup>99m</sup>Tc medido en el eluido, y

$A_{99mTc(teórico)}$  es la actividad del  $^{99m}Tc$  calculado a partir de la actividad de  $^{99}Mo$  adsorbido por el adsorbente

Pero:

$$A_{Tc (teórico)} = A_{99Mo(medido)} \times (1 - e^{-\lambda t}) \quad (16)$$

Donde:

$A_{99Mo(medido)}$  es la actividad del  $^{99}Mo$  en el adsorbente

$\lambda$  es la constante de decaimiento del  $^{99m}Tc$

$t$  es el tiempo transcurrido entre la adsorción y la elución, llamado también tiempo de crecimiento del  $^{99m}Tc$

Por lo que la ecuación se puede sintetizar como (Ram y otros, 2009):

$$Rendimiento\ de\ elución(\%) = \frac{A_{99mTc (medido)}}{A_{99Mo(medido)} \times (1 - e^{-\lambda t})} \times 100 \quad (17)$$

La alúmina cargada con  $^{99}Mo$  fue lavada con una solución de NaCl 0,9% para eliminar el  $^{99m}Tc$  producido durante la adsorción de  $^{99}Mo$  y así fijar el tiempo cero en el cálculo del crecimiento del  $^{99m}Tc$  y, asimismo, para notar el rompimiento del  $^{99}Mo$  en el eluido si así sucediera.

Los sets de pruebas (Tabla 24) en los que la adsorción del molibdeno en la alúmina se hacía usando ácido acético/acetato de sodio (pruebas 1-5) a diferentes concentraciones iniciales de molibdeno y a pH entre 4 y 5, no pasaron los controles de calidad durante las eluciones, siempre que se usó ácido acético/acetato, las eluciones con NaCl 0,9% contenían  $^{99}Mo$  en concentraciones que excedían los límites de acuerdo a (Planta de Producción de Radioisótopos del Instituto Peruano de Energía Nuclear, 2005). Los iones molibdato tienen una mayor presencia en los eluidos de los ensayos que contenían el buffer de acetato, lo que indicaría que la presencia de los iones del par acetato/ácido acético estaría compitiendo con el proceso de adsorción de las especies

de molibdato en la superficie de alúmina, de forma similar a lo mencionado por (Solongo y otros, 2018).

**Tabla 24**

*Resultados de pruebas de rendimiento de elución y conformidad según controles de calidad de la solución de pertecnetato de sodio <sup>99m</sup>Tc*

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ácido solución de molibdeno	Tampón acetato	Ácido nítrico								
Alúmina	80nm	80nm	80nm	80nm	80nm	80nm	80nm	5nm	80nm	80nm
pH de adsorción	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4
Actividad inicial <sup>99</sup> Mo (mCi)	20,90	0,39	6,82	19,60	10,51	0,04	2,82	2,82	8,83	14,94
Masa inicial Mo (mg)	261,6	3,5	75,2	228,6	79,4	0,3	23,5	23,5	95,3	113,2
% Adsorción	6,3%	4,9%	44,7%	5,2%	15,6%	75,2%	32,2%	32,2%	52,7%	6,8%
Actividad <sup>99m</sup> Tc (mCi)	0,38	0,01	0,47	0,52	0,35	0,02	0,10	0,12	0,56	0,53
% Rendimiento de elución	35%	63%	17%	60%	24%	80%	12%	15%	14%	59%
Tiempo de crecimiento del <sup>99m</sup> Tc (h)	17,4	21,6	21,1	18,0	20,9	21,6	24,0	24,0	20,4	20,7
Controles (conformidad)										
pH	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Al	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	NO
Mo99	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	NO
Mo total / Pureza química	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	NO
Pureza radioquímica	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI

Se ha establecido que existen 4 sitios/grupos de adsorción en la superficie de la alúmina dependiendo del pH y tipo de alúmina: grupo OH básico (=Al-OH), grupo OH neutro (-Al-OH-Al-), grupo OH ácido (-Al-OH[-Al]<sub>2</sub>), y sitio coordinativamente insaturado (-Al<sup>3+</sup>-). El molibdato reacciona irreversiblemente en una reacción (quimisorción) con los grupos OH básicos (a pH 8,5-6). Sin embargo, tan pronto como estos se protonan, el molibdato también comienza a ser adsorbido de forma reversible mediante interacción electrostática. Los grupos OH neutros, cuando están protonados, también adsorben reversiblemente los iones molibdato. El molibdato es fuertemente adsorbido por los sitios coordinativamente insaturados y por los grupos OH ácidos mediante una interacción de fisorción/electrostática a pH <5 (Le, 2014).

Comparando los tipos de fijación de los iones nitrato en alúmina (Fakhri y otros, 2018) y acetato en alúmina (Karaman y otros, 2001), ambos presentan una adsorción del tipo quimisorción, generando enlaces químicos fuertes.

Las pruebas realizadas usando ácido nítrico como medio de adsorción de los polianiones molibdato en alúmina no pasaron los controles de calidad cuando se les ensayó a concentraciones de molibdeno iniciales mayores a 5,9 mg/ml (pruebas 9 y 10).

Las pruebas que pasaron todos los controles de calidad para la solución de

pertecnato de sodio  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$  son 6, 7 y 8, en que las cantidades iniciales de Mo fueron 0,3 y 23,5 mg; sin embargo, para un mayor tiempo de crecimiento, el porcentaje de rendimiento de elución disminuye, lo que contradice la lógica de los generadores actuales en donde cada elución de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  en un tiempo de crecimiento del nucleótido hijo más corto (elución “temprana”) da como resultado un rendimiento de elución de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  más bajo (Le, 2014), por lo que la causa podría deberse a otras razones.

En la prueba 7 y 8 se trabajaron en las mismas condiciones a excepción del tipo de alúmina usada como adsorbente. Aunque ambos mostraron similares porcentajes de adsorción y rendimiento de elución, la filtración de las muestras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm resultó más conveniente que para las de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm, esto podría deberse a que una de las características de los adsorbentes más idóneos para cromatografía es su propiedad hidrofóbica (Decristoforo & Zolle, 2007), y siendo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm (tal como declara el fabricante en su ficha de datos), hidrofílica, entonces la dispersión de esta alúmina ocurre con mayor facilidad en el medio dificultando su separación mediante la filtración, razón por la que no se realizaron más pruebas con esta alúmina.

En el Perú se comercializan generadores para la producción de tecnecio metaestable estéril  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , según la U.S.P., de las siguientes actividades de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ : 7400 MBq (200 mCi), 9250 MBq (250 mCi), 18500 MBq (500 mCi), 27750 MBq (750 mCi), 37000 MBq (1000 mCi) y 55500 MBq (1500 mCi) (EE Medicina Nuclear, 2019).

Para considerar la construcción de un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  usando nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina, usaremos como base el ensayo 7 (que logró controles de calidad conformes), con una columna cromatográfica de 4 gramos de alúmina y de actividad inicial de carga de  $^{99}\text{Mo}$  (mCi) de 90,8 mCi:

$$\begin{aligned} \text{Actividad inicial } ^{99}\text{Mo} \times \% \text{Adsorción} & & (18) \\ = \text{Actividad } ^{99}\text{Mo adsorbido en alúmina} & & \end{aligned}$$

$$282 \text{ mCi } ^{99}\text{Mo} \times 32,2\% = 90,8 \text{ mCi } ^{99}\text{Mo}$$

**Tabla 25**

*Parámetros de un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  a partir del ensayo 7 de Rendimiento de elución*

Condiciones	Ensayo 7	Generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$
Masa alúmina (g)	0,04	4
Altura columna alúmina (cm)	No aplica	1,3
Diámetro columna alúmina (cm)	No aplica	1,0
Actividad inicial $^{99}\text{Mo}$ adsorbida en alúmina (mCi)	0,908	90,8
Actividad $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (mCi) 1° elución a 24 horas de crecimiento	0,10	10
Masa inicial Mo (g)	0,023	2,3
Volumen de elución (ml)	2	5
Actividad específica $^{99}\text{Mo}$ (Ci/g)	0,123	0,123

La altura de la columna se calculó a partir de la masa de alúmina (4 g), la densidad relativa de la alúmina de 3,9 (Anexo L: Ficha de datos de seguridad de alúmina, fabricante US Research Nanomaterials, Anexo I: Certificado de análisis de alúmina ácida) y la fórmula del volumen de un cilindro.

La actividad específica de 0,123 Ci  $^{99}\text{Mo}/\text{g}$  de molibdeno, se encuentra dentro del rango de producción de la PPR-IPEN que tuvo una variación en un rango de 0,119 a 0,208 Ci  $^{99}\text{Mo}/\text{g}$  de molibdeno entre marzo del 2019 y enero del 2020.

Aplicando un factor de multiplicación a cada parámetro del ensayo 7 de 100 para obtener los parámetros del Generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , debemos irradiar 2,3 g de Mo para obtener una actividad inicial de 282 mCi  $^{99}\text{Mo}$ , una actividad adsorbida de 90,8 mCi  $^{99}\text{Mo}$  y una actividad de 10 mCi  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Estos valores son similares a los obtenidos en un generador de investigación (Wang y otros, 2021).

Aplicando la ecuación (16), la actividad teórica de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  después de 24 horas de crecimiento, debería ser de 64,6 mCi  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , del mismo modo que para el ensayo 7, la actividad teórica fue de 0,646 mCi  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , sin embargo, se obtuvo un porcentaje menor dando como resultado 0,10 mCi, siendo este último el que se escaló.

El volumen de elución se escoge de acuerdo a la concentración de  $^{99m}\text{Tc}$  que requiera el profesional de medicina nuclear por ello no se ve afectado por el factor. Se usó 5 ml para el volumen de elución por ser el comúnmente usado en generadores, en este caso el eluyente fue una solución fisiológica estéril (Anexo N: Cotización de generadores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  RADIOFARMA®).

Reemplazando cada parámetro de operación en la ecuación (1) de acuerdo a las condiciones típicas de trabajo del RP-10:

A: 282 mCi

$m_{\text{Mo}}$ : 2,3 g

$F_{\text{ter}}$ :  $1,998 \times 10^{13}$

$\sigma$ :  $1,3 \times 10^{-25}$  barn

$F_{\text{epi}}$ :  $3,699 \times 10^{11}$

$I_{\text{R}}$ :  $6,2 \times 10^{-24}$  (barn)

$t_{\text{d}}$ : 24 horas considerando el tiempo de ensamblaje del generador  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  y su despacho al cliente

Despejamos el tiempo de irradiación  $t_{\text{i}}$ : 510120 s equivalente a 141,7 horas. Actualmente el RP-10 del IPEN opera como máximo aproximadamente 120 horas continuas. Entonces el tiempo de operación se ajustó a 120 horas:

Reemplazando cada parámetro de operación en la ecuación (1) de acuerdo a las condiciones típicas de trabajo del RP-10:

$t_{\text{i}}$ : 120 h

$m_{\text{Mo}}$ : 2,3 g

$F_{\text{ter}}$ :  $1,998 \times 10^{13}$

$\sigma$ :  $1,3 \times 10^{-25}$  barn

$F_{\text{epi}}: 3,699 \times 10^{11}$

$I_R: 6,2 \times 10^{-24}$  (barn)

$t_d$ : 24 horas considerando el tiempo de ensamblaje del generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  y su despacho al cliente

Despejamos la actividad inicial del generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  A: 260,8 mCi  $^{99}\text{Mo}$ , que sería factible de fabricar para su uso en centros de medicina nuclear, según las condiciones descritas anteriormente.

Además, el blindaje de plomo que protege de la radiación directa al dosímetro de cuerpo entero, usado en generadores de 250 o 500 mCi, son de aproximadamente 5 cm de espesor (Sanz y otros, 2017).

Una columna estándar usada en la Planta de Producción de radioisótopos tiene 10 cm de altura y 1 cm de diámetro interno con una frita G2 y es usada en la etapa de purificación del tecnecio 99 metaestable, estas dimensiones también son útiles para una columna que se usará en un generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  debido a que esta debe ser lo más compacta posible puesto que se transportará a diferentes centros de medicina nuclear e incluso dentro de los centros médicos (Hasan & Prelas, 2020), deberán poder ser trasladados sin inconvenientes por el personal de salud además de ser prácticos de operar (Chattopadhyay y otros, 2018).

Un generador con una producción de 10 mCi de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  en la primera elución sería insuficiente en la atención de adultos, teniendo en cuenta que se aplican 20 mCi por dosis promedio por paciente adulto de 70 kg de peso en un centro de medicina nuclear (INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR, 2024, pág. 33), sin embargo, el cálculo de dosis se realiza de acuerdo al peso del paciente, y un generador con una producción de 10 mCi de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  en la primera elución sería adecuado para satisfacer la demanda de diagnósticos pediátricos de medicina nuclear teniendo en cuenta que la dosis para el estudio de vaciamiento gástrico es de 1 mCi por niño (a), mientras que

para gammagrafía cortical renal así como renogramas isotópicos es de 0,04 a 0,05 mCi/kg (Balsa & Garcerant, 2009).

El generador de 10 mCi de  $^{99m}\text{Tc}$  calculado, demostró viabilidad en la producción de  $^{99m}\text{Tc}$  ya que contiene el eluido de  $^{99m}\text{Tc}$  en alta pureza y cumpliendo los controles USP (United States Pharmacopeia USP XXI, 1984, pág. 765).

#### 4.2.2. Determinación de eficiencia de filtraciones a través de filtro de membrana

##### 0.22 $\mu\text{m}$

Los resultados muestran que para disminuir la cantidad de óxido de aluminio en el eluido que contiene pertechnetato de sodio, se debe realizar una primera filtración con una membrana de 0,22  $\mu\text{m}$ , posterior a esta, la cantidad de filtraciones que se realicen no tienen ninguna ventaja. El detalle de los parámetros de cálculo se muestra en el Anexo G: Mediciones y cálculos de la determinación de Aluminio por activación neutrónica.

**Tabla 26**

*Concentración de aluminio en muestras de eluido de pertechnetato de sodio  $\text{Na}_2^{99m}\text{TcO}_4$  con y sin filtración mediante membrana 0.22  $\mu\text{m}$*

Denominación de la muestra	Descripción	Concentración de aluminio (ppm)
Al-01	Agua desionizada	0,2
Al-02	Eluido sin filtrar	24,8
Al-03	1era filtración	12,6
Al-04	2da filtración	11,9
Al-05	3era filtración	11,6
R-01	Referencia zero	0,4

## CONCLUSIONES

- La caracterización textural de las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina determinó que  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm tiene una superficie BET de 148  $\text{m}^2/\text{g}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm de 186  $\text{m}^2/\text{g}$ , con un tamaño de poro de 8 nm en ambos casos. Las isothermas de adsorción-desorción de  $\text{N}_2$  fueron similares, clasificándose como tipo IV con bucles de histéresis H3, característicos de poros en forma de hendidura.
- La adsorción de  $^{99}\text{Mo}$  se favorece a pH 4 en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm, y a pH 3 en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ácida, lo cual se explica por la especiación de los adsorbatos de molibdato polianiónico y sus efectos en la carga superficial de los adsorbentes. Los aniones nitrato, cloruro y sulfato mostraron comportamientos similares en presencia de polianiones de molibdeno, mientras que el buffer acetato/acético incrementó la adsorción al mantener un pH ácido durante el proceso.
- La capacidad máxima de adsorción fue de 18 mg Mo/g para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ácida, 176 mg Mo/g para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -05nm, y 199 mg Mo/g para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm, lo que representa una mejora de hasta diez veces en las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina respecto a la alúmina convencional. Además, la capacidad dinámica máxima de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm, determinada en el perfil de avance, fue de 140 mg Mo/g, con un punto de ruptura en 0,007. Asimismo, el adsorbente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm fue el más adecuado, ya que facilita el paso de fluidos, una propiedad deseada en columnas cromatográficas.
- El modelo de Freundlich se ajustó mejor al proceso de adsorción de molibdeno en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina hasta una concentración de 2,3 mg Mo/ml, a partir de la cual tanto Freundlich como Langmuir dejaron de ser representativos, mientras que el modelo cinético de pseudo-segundo orden rige el proceso, que ocurre de manera inmediata, alcanzando el equilibrio en medio minuto con concentraciones iniciales de 10 mg  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ml}$  y 1,0 mg Mo/ml, o 0,1 mg Mo/ml.
- El rendimiento de elución mostró que el ácido nítrico a pH 4 es el medio más adecuado para la adsorción de polianiones de molibdeno, ya que, en presencia

del buffer, la pureza química y radioquímica del eluido de  $^{99m}\text{Tc}$  superaba los límites de la USP XXI (1984), mientras que una concentración inicial de 5,88 mg/ml de  $^{99}\text{Mo}$  (23,5 mg en 4 ml de solución) y una actividad específica de 0,123 mCi resultan conformes con los controles de calidad, siendo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -80nm adecuada para el escalamiento de la actividad inicial de la columna.

- La utilidad y aplicación de las nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina comerciales como adsorbentes del molibdeno-99 de baja actividad específica para la producción de tecnecio-99 metaestable queda expresada en el presente trabajo de investigación. Los resultados obtenidos indican que el potencial generador podría proporcionar  $^{99m}\text{Tc}$  con características adecuadas para su uso clínico; por lo que se espera que las tecnologías asociadas al desarrollo de generadores  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  con esta matriz se desarrollen prontamente al ser de importancia para la medicina nuclear.

## RECOMENDACIONES

1. Ampliar los ensayos en columna cromatográfica en un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  ensamblado y con actividades de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a partir de los 200 mCi teniendo como referencia los generadores comerciales.
2. Evaluar la adsorción de especies en la alúmina (en microscopía electrónica u otro análisis de estructura a alta resolución) en el estudio de efecto de aniones como variable del ensayo rendimiento de elución.
3. Estudiar la recuperación de molibdeno de la columna cromatográfica gastada empleando NaOH 5M y  $\text{H}_2\text{O}_2$  como reactivos convencionales para este propósito.
4. Estudiar la regeneración de la alúmina de la columna.
5. Ensayar tiempos menores a los 30 segundos para el estudio de cinética de absorción de molibdeno en nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina con una concentración inicial tanto de 0,1 mg Mo/ml como 1,0 mg Mo/ml
6. Estudiar el rendimiento de elución en un generador  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  que tenga como matriz de la columna cromatográfica, nanopartículas de  $\gamma$ -alúmina.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acemioğlu, B. (2019). Removal of a reactive dye using NaOH-activated biochar prepared from peanut shell by pyrolysis process. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1644326>
- Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica. (2013). *Criterios generales para el control de calidad de las preparaciones radiofarmacéuticas*. Retrieved 2023, from Farmacopea Argentina 7° Ed. Vol. I: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/libro\\_primer.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/libro_primer.pdf)
- Ali, I. M. (2009). Sorption studies of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{152+154}\text{Eu}$  on phosphoric acid activated silico-antimonate crystals in high acidic media. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 580-585. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.07.050>
- AlOthman, Z. A. (2012). A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*, 5(12), 2874-2902. <https://doi.org/10.3390/ma5122874>
- Andersson, J. D., Gagnon, K., Wilson, J. S., Romaniuk, J., Abrams, D. N., & McQuarrie, S. A. (19 de diciembre de 2012). Separation of molybdenum and technetium. *AIP Conference Proceedings*, 1509(2012), 233-238. <https://doi.org/10.1063/1.4773975>
- Asif, M., & Mushtaq, A. (mayo de 2010). Evaluation of highly loaded low specific activity  $^{99}\text{Mo}$  on alumina column as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 284(2), 439–442. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0490-z>
- Balsa, M. Á., & Garcerant, M. (2009). Medicina nuclear en pediatría (I). *Anales de Pediatría Continuada*, 7(3), 165-172. [https://doi.org/10.1016/S1696-2818\(09\)71122-9](https://doi.org/10.1016/S1696-2818(09)71122-9)
- Banerjee, S., Ambikalmajan Pillai, M. R., & Ramamoorthy, N. (octubre de 2001). Evolution of Tc-99m in Diagnostic Radiopharmaceuticals. *Seminars in Nuclear*

- Medicine*, 31(4), 260-277. <https://doi.org/10.1053/snuc.2001.26205>
- Barrett, E. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373-380. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>
- Benavente, M. (2008). *Adsorption of Metallic Ions onto Chitosan: Equilibrium and Kinetic Studies*. Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology. Estocolmo: KTH Chemical Science and Engineering.
- Berkeley Lab, ABC's of Nuclear Science. (2005). *Appendix A Glossary of Nuclear Terms*. Retrieved Octubre de 2022, from The Nuclear Wall Chart: <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/glossary/glossary.html>
- Bertsche, K. (2010). Accelerator Production Options for 99Mo. *1st International Particle Accelerator Conference* (págs. 121-123). Kyoto: SLAC National Accelerator Laboratory (United States). <https://www.slac.stanford.edu/cgi-bin/getdoc/slac-pub-14132.pdf>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Bohrer, D., Heitmann, U., Huang, M.-d., Becker-Ross, H., Florek, S., Welz, B., & Bertagnolli, D. (2007). Determination of aluminum in highly concentrated iron samples: Study of interferences using high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(9), 1012-1018. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.04.014>
- Boissière, C., Nicole, L., Gervais, C., Babonneau, F., Antonietti, M., Amenitsch, H., . . . Grosso, D. (4 de octubre de 2006). Nanocrystalline Mesoporous  $\gamma$ -Alumina Powders “UPMC1 Material” Gathers Thermal and Chemical Stability with High Surface Area. *American Chemical Society*, 18(22), 5238-5243.

<https://doi.org/10.1021/cm061489j>

Bourikas, K., Kordulis, C., & Lycourghiotis, A. (2005). Differential Potentiometric Titration: Development of a Methodology for Determining the Point of Zero Charge of Metal (Hydr)oxides by One Titration Curve. *Environmental Science and Technology*, 39(11), 4100-4108. <https://doi.org/10.1021/es048139n>

Braithwaite, E. R., & Haber, J. (1994). *Molybdenum: An Outline of its Chemistry and Uses*. Amsterdam: Elsevier.

Brown, J. L., & Harris, O. A. (1974). *United States Patente n° 3,830,746*.

Brown, J. L., & Harris, O. A. (1974). *United States Patente n° 3,833,509*.

Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>

Bukhari, T. H., Mushtaq, A., & Khan, I. U. (25 de setiembre de 2007). Lead (Pb) column for concentration of <sup>99m</sup>Tc-pertechnetate. *Radiochimica Acta*, 95(11), 663–667. <https://doi.org/10.1524/ract.2007.95.11.663>

C. Aharoni, M. U. (1977). Kinetics of activated chemisorption. Part 2. Theoretical models. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 73(0), 456-464. <https://doi.org/10.1039/F19777300456>

Chakravarty, R. (2011). *Development of radionuclide generators for biomedical applications*. Bombay: Homi Bhabha National Institute.

Chakravarty, R., Ram, R., & Dash, A. (17 de December de 2014). Comparative Assessment of Nanostructured Metal Oxides: A Potential Step Forward to Develop Clinically Useful <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc Generators using (n,γ)<sup>99</sup>Mo. *Separation Science and Technology*, 49(12), 1825–1837. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.905596>

- Chakravarty, R., Ram, R., Dash, A., & Pillai, M. R. (2012). Preparation of clinical-scale  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  column generator using neutron activated low specific activity  $^{99}\text{Mo}$  and nanocrystalline  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  as column matrix. *Nuclear Medicine and Biology*, 39(7), 916-922. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2012.03.010>
- Chakravarty, R., Ram, R., Mishra, R., Sen, D., Mazumber, S., Pillai, M. R., & Dash, A. (22 de July de 2013). Mesoporous Alumina (MA) Based Double Column Approach for Development of a Clinical Scale  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  Generator Using (n, $\gamma$ ) $^{99}\text{Mo}$ : An Enticing Application of Nanomaterial. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(33), 11673-11684. <https://doi.org/10.1021/ie401042n>
- Chakravarty, R., Shukla, R., Ram, R., Tyagi, A., Dash, A., & Venkatesh, M. (2010). Practicality of tetragonal nano-zirconia as a prospective sorbent in the preparation of  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator for biomedical applications. *Chromatographia*, 72(9), 875–884. <https://doi.org/10.1365/s10337-010-1754-z>
- Chattopadhyay, S., Saha Das, S., Barua, L., Kumar Pal, A., Kumar, U., Madhusmita, . . . Banerjee, S. (2018). A compact solvent extraction based  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator for Hospital Radiopharmacy. *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.10.017>
- Consejo de Seguridad Nuclear; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. (2015). *Curso de operadores de instalaciones radiactivas (IR)*. Retrieved 2019, from Módulo de Medicina Nuclear: [http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/1901503726\\_4122009122755.pdf](http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1901503726_4122009122755.pdf)
- Cortés Palacios, C. A. (1999). *Medición de actividad nuclear con detectores de Ge y su incertidumbre*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/050/33050425.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/050/33050425.pdf)

- Crini, G., & Peindy, H. (2006). Adsorption of CI Basic Blue 9 on cyclodextrin-based material containing carboxylic groups. *Dyes and Pigments*, 70(3), 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.05.004>
- Dada, A. O. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn<sup>2+</sup> Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38-45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>
- Dano, M., Viglasová, E., Galambos, M., Rajec, P., & Novák, I. (11 de octubre de 2017). Sorption behaviour of pertechnetate on oxidized and reduced surface of activated carbon. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 314, 2219–2227. <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5532-3>
- Dash, A., & Chakravarty, R. (2014). Pivotal role of separation chemistry in the development of radionuclide generators to meet clinical demands. *RSC Advances*, 4(81), 42779-42803. <https://doi.org/10.1039/C4RA07218A>
- Dash, A., Chakravarty, R., Ram, R., Pillai, K. T., Yadav, Y. Y., Wagh, D. N., . . . Venkatesh, M. (enero de 2012). Development of a <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(1), 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.07.012>
- Dash, A., Knapp, F. F., & Pillai, M. (febrero de 2013). <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc separation: An assessment of technology options. *Nuclear Medicine and Biology*, 40(2), 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2012.10.005>.
- de Ossó, J. F. (1981). *Estudio experimental y control de calidad de un generador de tecnecio-99m*. Madrid: Junta de energía nuclear. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/12/641/12641884.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/12/641/12641884.pdf)
- Decristoforo, C., & Zolle, I. (2007). Quality Control Methods Of <sup>99m</sup>Tc Pharmaceuticals. En *Technetium-99m Pharmaceuticals. Preparation and Quality Control in*

*Nuclear Medicine* (págs. 123-150). Vienna: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-540-33990-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-33990-8_9)

Denkova, A. G., Terpstra, B. E., Steinbach, O. M., Dam, J. t., & Wolterbeek, H. T. (2 de mayo de 2013). Adsorption of Molybdenum on Mesoporous Aluminum Oxides for Potential Application in Nuclear Medicine. *Separation Science and Technology*, 48(9), 1331-1338. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.736443>

Dubinín, M. M., & Radushkevich, L. V. (1947). The equation of the characteristic curve of the activated charcoal. *Proceedings of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section*, 55, 331-333.

Eckelman, W. C. (Marzo de 2009). Unparalleled Contribution of Technetium-99m to Medicine Over 5 Decades. *Journal of the American College of Cardiology: Cardiovascular Imaging*, 2(3), 364-368.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2008.12.013>

EE Medicina Nuclear. (Marzo de 2019). *Technetium Tc 99m Generator*. Retrieved Octubre de 2022, from Products:  
<https://eemednuclear.com/portfolio1/technetium-tc-99m-generator/>

El Shafei, G. M., Moussa, N. A., & Philip, C. A. (23 de agosto de 2000). Association of Molybdenum Ionic Species with Alumina Surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 228(1), 105-113. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6876>

Esquivel, D., Eguren, L., & Montoya, E. (1993). Análisis de trazas de elementos metálicos por activación neutrónica. *Revista de Química*, 7(1), 21-29.

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba. (2020). P. Perez. Retrieved Octubre de 2022, from Fundamentos físicos de la medicina nuclear:  
<https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cmn/capitulo2.html>

Fakhri, Y., Kakavandi, B., Safaei, Z., Asadi, A., Mohsen Mohseni, S., & Golestanifar, H.

- (2018). Efficient nitrate adsorption from water by aluminum powder. kinetic, equilibrium and influence of anion competition studies. *Environment Protection Engineering*, 44(3), 19-31. <https://doi.org/10.5277/epe180302>
- Flakus, F. N. (Agosto de 2014). Detección de radiaciones. *Oiea Boletín*, págs. 31-36. Retrieved Abril de 2020, from Detección y medición de las radiaciones ionizantes: historia sucinta: [https://www.iaea.org/sites/default/files/23405043136\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/23405043136_es.pdf)
- Foro Nuclear. (Abril de 2020). *Glosario de términos*. Retrieved Octubre de 2022, from Foro de la Industria Nuclear Española: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos/?letra=s>
- Ghaedi, M., Tavallali, H., Sharif, M., Kokhdan, S. N., & Asghari, A. (febrero de 2012). Preparation of low cost activated carbon from *Myrtus communis* and pomegranate and their efficient application for removal of Congo red from aqueous solution. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 86, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.10.012>
- Gielen, B., Jordens, J., Thomassen, L. C., Braeken, L., & Van Gerven, T. (2017). Agglomeration Control during Ultrasonic Crystallization of an Active Pharmaceutical Ingredient. *Crystals*, 7(2), 1-20. <https://doi.org/10.3390/cryst7020040>
- Gregg, S., & Sing, K. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity* (2nd ed.). London: Academic Press.
- Grün, M., Kurganov, A. A., Schacht, S., Schüth, F., & Unger, K. K. (julio de 1996). Comparison of an ordered mesoporous aluminosilicate, silica, alumina, titania and zirconia in normal-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 740(1), 1-9. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(96\)00205-](https://doi.org/10.1016/0021-9673(96)00205-1)

- Gruppen, C. (2010). List of Isotopes Frequently Used in Nuclear Medicine and Radiology. En *Introduction to Radiation Protection* (págs. 351-400). Springer.
- Guedes-Silva, C. C., dos Santos Ferreira, T., Carvalho, F. M., de Paula, C. M., & Otubo, L. (2016). Influence of Alumina Phases on the Molybdenum Adsorption Capacity and Chemical Stability for  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  Generators Columns. *Materials Research, 19*(4), 791-794. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0560>
- Hameed, B. H., & El-Khaiary, M. I. (mayo de 2008). Kinetics and equilibrium studies of malachite green adsorption on rice straw-derived char. *Journal of Hazardous Materials, 153*(1), 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.019>
- Hasan, S., & Prelas, M. A. (octubre de 2020). Molybdenum-99 production pathways and the sorbents for  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  generator systems using (n,  $\gamma$ )  $^{99}\text{Mo}$ : a review. *SN Applied Sciences, 2*(11), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03524-1>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry, 34*(5), 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Ho, Y., Porter, J., & McKay, G. (2002). Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: Copper, nickel and lead single component systems. *Water, Air, & Soil Pollution, 141*(1/4), 1-33. <https://doi.org/10.1023/A:1021304828010>
- Huang, C.-P., & Stumm, W. (1973). Specific adsorption of cations on hydrous  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . *Journal of Colloid and Interface Science, 43*(2), 409-420. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(73\)90387-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(73)90387-1)
- IAEA Staff Report. (Enero de 2011). *IAEA Helps to Close Radioisotope Production Gap*. Retrieved 2019, from Vitally Important Diagnostic Isotope Used Nearly Once a Second Worldwide: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-helps-close-radioisotope-production-gap>

Ikenyiri, & Ukpaka. (2016). Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 7(5), 1-4. <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000315>

IMO: International Molybdenum Association. (2013). *SIDS INITIAL ASSESSMENT PROFILE*. Retrieved 2024, from Cooperative Chemicals Assessment Meeting: <https://www.imoa.info/HSE/OECD/OECDapprovedSIAPforhighlysolubleMolybdenumsalts-April2014.pdf?m=1417174659>

Instituto Peruano de Energía Nuclear. (2018). *Diagramas de Producción de Pertecnetato de sodio (Na<sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>)*. Documento de Control de Proceso, Lima.

Instituto Peruano de Energía Nuclear. (30 de diciembre de 2022). *Texto Único de Servicios No Exclusivos - TUSNE*. Retrieved enero de 2024, from <https://www.gob.pe/institucion/ipen/informes-publicaciones/1844082-texto-unico-de-servicios-no-exclusivos-del-ipen>

INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR. (Mayo de 2024). *Informe de Evaluación Institucional correspondiente al año 2023, Pliego 220*. Retrieved Junio de 2024, from Gobierno del Perú: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6354073/5578283-informe-de-evaluacion-institucional-2023-ipen-anexosf.pdf>

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Radionuclide Purity*. Retrieved 2019, from Human Health Campus: [https://humanhealth.iaea.org/HHW/Radiopharmacy/VirRad/Quality\\_Control\\_Procedures/Quality\\_Control\\_Module/Radionuclide\\_Purity/index.html](https://humanhealth.iaea.org/HHW/Radiopharmacy/VirRad/Quality_Control_Procedures/Quality_Control_Module/Radionuclide_Purity/index.html)

International Atomic Energy Agency. (2017). *International Atomic Energy Agency*. Retrieved Julio de 2019, from New Ways of Producing Tc-99m and Tc-99m Generators (Beyond Fission and Cyclotron Methods): <https://www.iaea.org/projects/crp/f22068>

- IUPAC. (2014). *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")*. (S. J. Chalk, Editor) Retrieved 2020, from <https://doi.org/10.1351/goldbook>
- K. Vijayaraghavan, T. P. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1-3), 304-308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.016>
- Kadarisman, Sriyono, Abidin, Lestari, E., Marlina, Saptiama, I., & Setiawan, H. (2018). Synthesis of Nano- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for 99Mo Adsorbent. *Atom Indonesia*, 44(1), 17-21. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.849>
- Karaman, M., Antelmi, D., & Pashley, R. (junio de 2001). The production of stable hydrophobic surfaces by the adsorption of hydrocarbon and fluorocarbon carboxylic acids onto alumina substrates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 182(1-3), 285-298. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00821-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00821-9)
- Karpeles, A., & Rivero, M. (1973). *Obtención de soluciones de pertecneciato (Tc-99m) de alta concentración de actividad*. Comisión Nacional de Energía Atómica, Departamento de Radioisótopos, Buenos Aires. <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/1c6aa7fc-ce44-40beb2d5-4e4116f7946c/content>
- Khan, T. A., Chaudhry, S. A., & Ali, I. (20 de febrero de 2013). Thermodynamic and kinetic studies of As (V) removal from water by zirconium oxide-coated marine sand. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(8), 5425-5440. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1543-y>
- Kuila, U., & Prasad, M. (29 de enero de 2013). Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales. *Geophysical Prospecting*, 61(2), 341-362. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12028>

- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(1).
- Le, V. S. (16 de enero de 2014). 99mTc Generator Development: Up-to-Date 99mTc Recovery Technologies for Increasing the Effectiveness of Mo Utilisation. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1-41. <https://doi.org/10.1155/2014/345252>
- Lim, L. B., Priyantha, N., & Mohd Mansor, N. H. (2014). Artocarpus altilis (breadfruit) skin as a potential low-cost biosorbent for the removal of crystal violet dye: equilibrium, thermodynamics and kinetics studies. *Environmental Earth Sciences*, 73(7), 3239–3247. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3616-8>
- Mallaupoma, M., Ortiz, P., & Morilla, L. (2013). La capacitación como estrategia para reducir los casos de rechazos de expediciones de material radiactivo en la región de América Latina y el Caribe. *Informe Científico Tecnológico*, 13(1), 173-177. <https://revistas.ipen.gob.pe/index.php/ict/article/view/55>
- Mallaupoma, M., Sobreira, A., & Braga, N. (2009). Casos de Rechazos y retrasos en el transporte de material radiactivo en la Región de América Latina y el Caribe. *Informe Científico Tecnológico*, 226-229. <https://www.ipen.gob.pe/images/pdf/ict2009.pdf>
- Marlina, Lestari, E., Abidin, Hambali, Saptiama, I., Febriana, S., . . . Tsuchiya, K. (2020). Molybdenum-99 (99Mo) Adsorption Profile of Zirconia-Based Materials for 99Mo/99mTc Generator Application. *Atom Indonesia*, 46(2), 91-97. <https://doi.org/10.17146/aij.2020.914>
- Maslova, M. V., Ivanenko, V. I., Yanicheva, N. Y., & Mudruk, N. V. (2020). Comparison of The Sorption Kinetics of Lead(II) and Zinc(II) on Titanium Phosphate Ion-Exchanger. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(2), 447. <https://doi.org/10.3390/ijms21020447>

- Meza Lopez, F. d. (2017). *Estudio de la adsorción de arsénico presente en soluciones acuosas empleando materiales adsorbentes a base de quitosano modificado*. Master thesis, PUCP, Chemistry, Lima.
- Mishra , S., & Tiwary , D. (1993). Radiotracer technique in adsorption studies X. Efficient removal of Ba(II) from aqueous solutions by hydrous manganese oxide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 170, 133-141. <https://doi.org/10.1007/BF02134584>
- Mishra, S. P., & Tiwary, D. (1992). Radiotracer Technique in Adsorption Study Part VIII. Adsorption of Phosphate Ions on Alumina-Supported Copper Oxide. *Radiochimica Acta*, 56(4), 201-207. <https://doi.org/10.1524/ract.1992.56.4.201>
- Mitchell, D. P. (2009). *Speciation of molybdenum compounds in water, Ultraviolet spectra and REACH read across*. (R. f. Association, Ed.) Retrieved 2024, from IMO: International Molybdenum Association: [https://www.imoa.info/download\\_files/HSE/Uv\\_analysis\\_Mo\\_compounds.pdf](https://www.imoa.info/download_files/HSE/Uv_analysis_Mo_compounds.pdf)
- Molinski, V. J. (octubre de 1982). A review of <sup>99m</sup>Tc generator technology. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 33(10), 811–819. [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90122-3](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90122-3)
- Montero de Espinosa Costa, G. (1993). *Control de calidad de generadores de molibdeno-99/tecnecio-99m de columna seca*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de farmacia y tecnología farmacéutica, Madrid. <https://webs.ucm.es/BUCM/tesis/19911996/D/1/D1015001.pdf>
- Montoya Rossi, E. H. (1995). *Evaluación y estandarización del análisis por activación neutrónica según el método del k-sub-cero, en el reactor nuclear RP-10*. Tesis de maestría, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima. <https://repositorio.ipen.gob.pe/bitstream/handle/20.500.13054/121/T027.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Mui, J., Ngo, J., & Kim, B. (mayo de 2016). Aggregation and Colloidal Stability of Commercially Available Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles in Aqueous Environments. *Nanomaterials*, 6(5), 1-15. <https://doi.org/10.3390/nano6050090>
- Munir, M., Lestari, E., Hambali, Kadarisman, & Marlina. (2019). Development of Novel Alumina by Solid-State Reaction for <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc Adsorbent Material. *Al-Kimia*, 7(2), 154-164. <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v7i2.9123>
- N. Ayawei, A. T. (24 de julio de 2015). Adsorption of congo red by Ni/Al-CO<sub>3</sub>: equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *Oriental Journal of Chemistry*, 31(3), 1307-1318. <https://doi.org/10.13005/ojc/310307>
- Na Kim, H., & Suslick, K. S. (2018). The Effects of Ultrasound on Crystals: Sonocrystallization and Sonofragmentation. *Crystals*, 8(7), 1-20. <https://doi.org/10.3390/cryst8070280>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). Molybdenum-99 for Medical Imaging. En *Production of Mo-99* (págs. 29-32). Washington, DC: The National Academies Press.
- National Cancer Institute. (February de 2018). *Technology Transfer Center*. Retrieved 2024, from Micro-Dose Calibrator for Pre-clinical Radiotracer Assays: <https://techtransfer.cancer.gov/available-technologies?abstract=TAB-4158>
- Nicom® DLS System. (2019). *DLS Sample Preparation*. Retrieved 2024, from Entegris - ADVANCED MATERIALS HANDLING | TECHNICAL NOTE: <https://www.entegris.com/content/dam/product-assets/nicompanodszlssystem/technote-dls-sample-preparation-10568.pdf>
- Nuclear and Radiation Studies Board; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2001). Current Molybdenum-99 Supply. En *Opportunities and Approaches for Supplying Molybdenum-99 and Associated Medical Isotopes to Global Markets*:

*Proceedings of a Symposium* (pág. 67). Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24909>

Nuclear Energy Agency. (Noviembre de 2010). *The Supply of Medical Radioisotopes*. Retrieved Agosto de 2019, from Review of Potential Molybdenum-99/Technetium-99m Production Technologies: <https://www.oecd-nea.org/med-radio/reports/Med-Radio-99Mo-Prod-Tech.pdf>

Nuclear Energy Agency. (2010). *The Supply of Medical Radioisotopes*. Retrieved Julio de 2019, from An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain: <http://www.oecd-nea.org/med-radio/reports/MO-99.pdf>

Ojeda Guzzini, M. (2015). *Tratamiento de agua potable* (Quinta ed.). Madrid, España: Elearning S. L.

Oliveira, P. (2012). *The elements: Periodic Table Reference*. Retrieved 2023, from Technetium: <https://books.google.com.pe/books?id=J90PQpnE5l4C&lpg=PA1641&dq=An%20A-Z%20Guide%20to%20the%20Elements%20pdf&pg=PA672#v=snippet&q=technetium&f=false>

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2016). *Principios de diseño del generador de radionucleidos 99Mo → 99mTc*. Retrieved 2020, from Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA): [https://humanhealth.iaea.org/HHW/Radiopharmacy/VirRad/Eluting\\_the\\_Generator/Generator\\_Module/Design\\_principles/index.html](https://humanhealth.iaea.org/HHW/Radiopharmacy/VirRad/Eluting_the_Generator/Generator_Module/Design_principles/index.html)

Pechishcheva, N., Korobitsyna, A., Ordinartsev, D., Zaitceva, P., Melchakova, O., & Estemirova, S. (abril de 2021). Effective simultaneous separation of copper (II) and molybdenum (VI) from rhenium (VII) by adsorption on X-alumina. *Separation Science and Technology*, 57(6), 1-12.

<https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1891436>

Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2011). *Química General*. Madrid: Pearson Education S. A.

Pillai, M. R., Dash, A., & Knapp, F. F. (febrero de 2012). Sustained Availability of  $^{99m}\text{Tc}$ : Possible Paths Forward. *Journal of Nuclear Medicine*, *54*(2), 313-323. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.110338>

Planta de Producción de Radioisótopos del Instituto Peruano de Energía Nuclear. (2005). *Controles de la solución de Pertecnetato de sodio  $^{99m}\text{Tc}$* . Lima: Documentación PPR-IPEN.

Puziy, A. M., Poddubnaya, O. I., Derylo-Marczewska, A., Marczewski, A. W., Blachnio, M., Tsyba, M. M., . . . Klymchuk, D. O. (mayo de 2016). Kinetics of protein adsorption by nanoporous carbons with different pore size. *Adsorption*, *22*, 541-552. <https://doi.org/10.1007/s10450-015-9723-3>

Qili Hu, Z. Z. (marzo de 2019). Application of Dubinin–Radushkevich isotherm model at the solid/solution interface: A theoretical analysis. *Journal of Molecular Liquids*, *277*, 646-648. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.005>

Ram, R., Chakravarty, R., Pamale, Y., Dash, A., & Venkatesh, M. (marzo de 2009). An Alumina Based  $^{99}\text{Mo}$ – $^{99m}\text{Tc}$  Generator to Produce  $^{99m}\text{Tc}$  in Organic Medium Suitable for Industrial Radiotracer Applications. *Chromatographia*, *69*(5-6), 497-501. <https://doi.org/10.1365/s10337-008-0931-9>

Richards, P. (1960). A survey of the production at Brookhaven National Laboratory of radioisotopes for medical research. *VII Rassegna Internazionale Elettronica e Nucleare*, (págs. 223-244). Roma.

Roginsky, S. Z., & Zeldovich, Y. B. (1934). An equation for the kinetics of activated adsorption. *Acta physicochimica U.R.S.S.*, *1*, 554-559.

S.W. Sing, K., & T. Williams, R. (diciembre de 2004). Physisorption Hysteresis Loops

- and the Characterization of Nanoporous Materials. *Adsorption Science & Technology*, 22(10), 773-782. <https://doi.org/10.1260/0263617053499032>
- Sachse, A., Gérardin, C., Delahay, G., Belamie, E., Kostov, K. L., & Alonso, B. (febrero de 2017). A Facile Strategy for the Preparation of Highly Mesoporous  $\gamma$ -Alumina. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2017(11), 1516-1519. <https://doi.org/10.1002/ejic.201700175>
- Saha, G. B. (2010). Radionuclide Generators. En *Fundamentals of Nuclear Pharmacy* (Sétima ed., págs. 80-87). Springer. <https://oasis.iik.ac.id:9331/library/index.php?p=fstream-pdf&fid=1359&bid=11950>
- Sanz, V., Fernandez, L., & Illanes, L. (2017). Fundamentos y buenas prácticas. En *Radioprotección en Medicina Nuclear* (Primera ed., págs. 1-73). La Plata: Editorial de la Universidad de La Plata. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/793/785/2623-1>
- Saptiama, I., Kaneti, Y. V., Oveisi, H., Suzuki, Y., Tsuchiya, K., Takai, K., . . . Yamauchi, Y. (November de 2018). Molybdenum Adsorption Properties of Alumina-Embedded Mesoporous Silica for Medical Radioisotope Production. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 91(2), 195-200. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20170295>
- Saptiama, I., Kaneti, Y. V., Suzuki, Y., Suzuki, Y., Tsuchiya, K., Sakae, T., . . . Yamauchi, Y. (octubre de 2017). Mesoporous Alumina as an Effective Adsorbent for Molybdenum (Mo) toward Instant Production of Radioisotope for Medical Use. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 90(10), 1174-1179. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20170184>
- Saptiama, I., Lestari, E., Sarmini, E., Lubis, H., Marlina, & Mutalib, A. (17 de julio de 2016). Development of  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  Generator System for Production of Medical

Radionuclide  $^{99m}\text{Tc}$  using a Neutron-activated  $^{99}\text{Mo}$  and Zirconium Based Material (ZBM) as its Adsorbent. *Atom Indonesia*, 42(3), 115-121. <https://doi.org/10.17146/aij.2016.531>

Sasha Henriques, Oficina de Información al Público y Comunicación del OIEA. (Diciembre de 2014). *Siete cosas que hay que saber sobre los radioisótopos*. Retrieved Agosto de 2024, from Boletín del OIEA: [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull55-4/55405810809\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull55-4/55405810809_es.pdf)

Shaji, A., & Zachariah, A. K. (2017). Surface Area Analysis of Nanomaterials. Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization. En *Adsorption Isotherm - an overview* (págs. 197-231). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46139-9.00009-8>

Shi, S., Wang, Y., Guo, H., Chen, C., & Deng, R. (febrero de 2021). Variations in pore structure of marine shale from the same horizon of the Longmaxi Formation with changing position in a small-scale anticline: Implications for the influence of structural deformation. *Marine and Petroleum Geology*, 124(104837), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104837>

Siahpoosh, S. M., Salahi, E., Hessari, F. A., & Mobasherpour, I. (31 de julio de 2016). Facile Preparation of Mesoporous  $\gamma$ -Alumina Nanoparticles with High Surface-Area via Sol-Gel Method and their Efficiency for the Removal of Lead from Aqueous Solution. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 85, 890-911. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.5738>

Siepmann, J., Siegel, R. A., & Rathbone, M. J. (2012). Basic characterization of nanoparticles. En *Fundamentals and Applications of Controlled Release Drug Delivery* (pág. 264). Londres: Springer. <https://books.google.com.pe/books?id=9yKSJdK37aMC&printsec=copyright&re>

dir\_esc=y#v=onepage&q&f=false

- Singh, N. (2011). *Radioisotopes: Applications in Bio-Medical Science*. Rijeka: InTech.  
<https://doi.org/10.5772/1937>
- Solongo, T., Fukushi, K., Altansukh, O., Takahashi, Y., Akehi, A., Baasansuren, G., . . . Hasebe, N. (5 de julio de 2018). Distribution and Chemical Speciation of Molybdenum in River and Pond Sediments Affected by Mining Activity in Erdenet City, Mongolia. *Minerals*, 8(7), 288-303. <https://doi.org/10.3390/min8070288>
- Sprycha, R. (enero de 1989). Electrical double layer at alumina/electrolyte interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 127(1), 1-11.  
[https://doi.org/doi.org/10.1016/0021-9797\(89\)90002-7](https://doi.org/doi.org/10.1016/0021-9797(89)90002-7)
- Staveley, L. A. (1971). *The Characterization of Chemical Purity: Organic Compounds*. London: International Union of Pure and Applied Chemistry.  
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-11774-6>
- Steigman, J., & Eckelman, W. C. (1992). *The Chemistry of Technetium in Medicine*. Washington: Nuclear Science Series. <https://doi.org/10.17226/20845>
- Stetefeld, J. M. (2016). Dynamic light scattering: a practical guide and applications in biomedical sciences. *Biophysical Reviews*, 8(4), 409–427.  
<https://doi.org/10.1007/s12551-016-0218-6>
- Tanase, M., Kase, T., & Shikata, E. (1976). Separation of Molybdenum-99 from Neutron-Irradiated Uranium-235 with Sulfur as Collector. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 13(10), 591-595. <https://doi.org/10.1080/18811248.1976.9734078>
- Tendilla del Pozo, J. I. (1984). *Producción piloto de un generador de tecnecio 99m a partir de molibdeno 99 de fisión*. Reporte del seminario de proyecto II, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Ingeniería de Procesos e hidráulica, Ocoyoacac.  
<http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=7361&docs=>

UAM7361.PDF

Teng, H., & Hsieh, C.-T. (1999). Activation Energy for Oxygen Chemisorption on Carbon at Low Temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(1), 292–297. <https://doi.org/10.1021/ie980107j>

Thermo Fisher Scientific. (19 de octubre de 2023). *Safety Data Sheet Methyl ethyl ketone (MEK)*. Retrieved 2024, from [https://www.fishersci.fi/chemicalProductData\\_uk/wercs?itemCode=11498253&lang=EN](https://www.fishersci.fi/chemicalProductData_uk/wercs?itemCode=11498253&lang=EN)

Thommes, M. K.-R. (2 de julio de 2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1-19. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de Transferencia de Masa* (Segunda ed.). Rhode Island: McGraw Hill.

Tucker, W. D., & Greene, M. W. (junio de 1958). Methods of preparation of some carrier-free radioisotopes involving sorption on alumina. *Transactions American Nuclear Society*, 1-8. <https://doi.org/10.2172/4305138>

United States Pharmacopeia USP XXI. (1984). *Sodium Pertechnetate (99m-Tc) Injection*. Official Monographs.

Urdaniz, M. C., & Real, M. (2004). *Física Creativa - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA*. Retrieved octubre de 2022, from Activación Neutrónica y Vida Media: [https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_especial/activa\\_n\\_Corina\\_Mariano2k4a.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_especial/activa_n_Corina_Mariano2k4a.pdf)

Valenzuela Barrientos, W., & La Rosa-Toro Gomez, A. (2015). Preparación, caracterización y evaluación de la estabilidad electroquímica de electrodos

- Ti/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-xIrO<sub>2</sub>. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 148-159.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371942316007>
- Verdera, E. S., Gomez de Castiglia, S., Figols de Barboza, M., Fukumori, N., Robles, A., & León, A. (2011). *99mTc - Pertecnetato de sodio*. Retrieved 2019, from Control de calidad de radiofármacos: [http://sbmn.org.br/wp-content/uploads/2015/10/control\\_de\\_calidad\\_de\\_radiofarmacos.pdf](http://sbmn.org.br/wp-content/uploads/2015/10/control_de_calidad_de_radiofarmacos.pdf)
- Verweij, W. (2004). CHEAQS Next: <https://www.cheaqs.eu/download.html>
- Verweij, W., & Simonin, J.-P. (Agosto de 2021). Manual for CHEAQS Next (64 bits), a program for calculating CHEMical Equilibria in AQUatic Systems. <https://www.cheaqs.eu/manual64.pdf>
- Wang, J., Gao, R., Huang, Q., Yin, X., Lin, M., Cao, S., . . . Jia, Z. (2021). Practicality of hierarchically macro/mesoporous  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a promising sorbent in the preparation of low specific activity <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc generator. *Applied Radiation and Isotopes*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109986>
- Weber Jr., W. J., & Morris, J. C. (abril de 1963). Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-59. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>
- Weber, T. W., & Chakravorti, R. K. (marzo de 1974). Pore and Solid Diffusion Models for Fixed-Bed Adsorbers. *AIChE Journal*, 20(2), 228-238. <https://doi.org/10.1002/aic.690200204>
- Wilkinson, M. V., Mondino, A. V., & Manzini, A. (2002). Study of alumina use as a separation step in Mo-99 production. *Abstracts and Available Papers Presented at the 2002 International RERTR Meeting* (págs. 3-8). Bariloche: Radioquímica y Química de las Radiaciones, Centro Atómico Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica. <https://www.rertr.anl.gov/Web2002/2003Web/FullPapers-PDF/Wilkinson.pdf>

- World Nuclear Association. (Febrero de 2019). *Radioisotopes in Medicine*. Retrieved 2023, from <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx>
- Zahra Derakhshan, M. A. (3 de noviembre de 2013). Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solutions by Modified Pumice Stone: Kinetics and Equilibrium Studies. *Health Scope*, 2(3), 136-144. <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-12492>
- Zamorategui M., A., Ramírez R., N., Martínez R., J. M., & Serafín M., A. H. (2016). Synthesis and characterization of gamma alumina and compared with an activated charcoal on the fluoride removal from potable well water. *Acta Universitaria*, 26(2), 30-35. <https://doi.org/10.15174/au.2016.878>
- Zhang, Z., Hicks, R. W., Pauly, T. R., & Pinnavaia, T. J. (2 de febrero de 2002). Messtructured forms of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of the American Chemical Society*, 124(8), 1592-1593. <https://doi.org/10.1021/ja016974o>
- Ziessman, H. A., O'Malley, J. P., & Thrall, J. H. (2007). *Medicina nuclear : los requisitos en radiología* (Tercera ed.). Madrid: Elsevier. [https://books.google.co.ve/books?id=AbFbaUvHHbQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.ve/books?id=AbFbaUvHHbQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Zolle, I. (2007). Performance and Quality Control of the 99Mo/99mTc Generator. En I. Zolle, *Technetium-99m Pharmaceuticals* (págs. 77-93). Springer. <http://eknygos.lsmuni.lt/springer/439/77-93.pdf>

# ANEXOS

## Anexo A: Especificaciones y detalle de resultados de resultados de coeficiente de repartición Kd

### Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99mTc en Al2O3-ácida

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 140keV 99mTc*	0.873
Eficiencia 140keV vial de vidrio de 10ml	0.0794

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99mTc	
Tiempo de semidesintegración**	6.0067 h
Tiempo de semidesintegración	21624.12 seg
Constante de semidesintegración	3.20475E-05 seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	14/08/2018
Hora Calibración	9:42
Actividad mCi (calibrada)	0.1134
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	0.0567

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.2 g de alúmina
V	20 mL de solución que estuvo en contacto con el sorbente

### Resultados Experimentales

Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 140keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	16/08/2018	7:01:38	5996.26	6000.00	163178	39613.3	5.287E-04	1.00	5.287E-04	0.80	4.230E-04	
ph1	15/08/2018	10:32:35	2279.34	2280.22	89435	6763.9	2.108E-05	1.00	2.108E-05	20.00	4.217E-04	0.3
ph2	15/08/2018	11:14:36	1799.55	1800.26	91956	4645.4	1.973E-05	1.00	1.973E-05	20.00	3.947E-04	7.2
ph3	15/08/2018	11:45:51	1999.26	2000.00	93831	4682.8	1.908E-05	1.00	1.908E-05	20.00	3.815E-04	10.9
ph4	15/08/2018	12:48:06	3998.67	4000.00	97566	7555.1	1.790E-05	1.00	1.790E-05	20.00	3.580E-04	18.2
ph5	15/08/2018	13:56:07	1799.33	1800.02	101647	3221.5	1.867E-05	1.00	1.867E-05	20.00	3.734E-04	13.3
ph6	15/08/2018	14:27:26	2049.63	2050.30	103526	3618.8	1.963E-05	1.00	1.963E-05	20.00	3.927E-04	7.7
ph7	15/08/2018	15:56:05	3998.76	4000.00	108845	6084.8	2.069E-05	1.00	2.069E-05	20.00	4.138E-04	2.2
ph8	15/08/2018	17:04:47	3998.25	4000.00	112967	5378.5	2.088E-05	1.00	2.088E-05	20.00	4.175E-04	1.3
ph9	15/08/2018	18:13:28	3998.20	4000.00	117088	4722.3	2.092E-05	1.00	2.092E-05	20.00	4.183E-04	1.1
ph10	15/08/2018	9:49:37	2259.16	2260.09	86857	7298.3	2.113E-05	1.00	2.113E-05	20.00	4.225E-04	0.1
ph11	15/08/2018	19:22:09	3998.38	4000.00	121209	4179.6	2.113E-05	1.00	2.113E-05	20.00	4.225E-04	0.1
NaCl0.9%	15/08/2018	20:30:51	4998.16	5000.00	125331	4507.2	2.113E-05	1.00	2.113E-05	20.00	4.225E-04	0.1

**Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99mTc en Al2O3-05nm**

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrilico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 140keV 99mTc*	0.873
Eficiencia 140keV vial de vidrio de 10ml	0.0794

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99mTc	
Tiempo de semidesintegración**	6.0067 h
Tiempo de semidesintegración	21624.12 seg
Constante de semidesintegración	3.20475E-05 seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	20/03/2019
Hora Calibración	09:12:00
Actividad mCi (calibrada)	1.09
Volumen mL	2.00
Concentración de actividad mCi/mL	0.55

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el sorbente

g de alúmina  
mL de solución que estuvo en contacto con el sorbente

Resultados Experimentales												
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 140keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	21/03/2019	12:45:45	286.88	300.00	99225	258209.7	8.480E-03	1.00	8.480E-03	0.40	3.392E-03	
ph2	20/03/2019	17:03:07	346.89	350.00	28267	60607.6	1.695E-04	1.00	1.695E-04	10.00	1.695E-03	100.1
ph3	20/03/2019	17:10:47	348.41	350.00	28727	34880.8	9.858E-05	1.00	9.858E-05	10.00	9.858E-04	244.1
ph4	20/03/2019	17:25:11	347.94	350.00	29591	29147.4	8.480E-05	1.00	8.480E-05	10.00	8.480E-04	300.0
ph5	20/03/2019	16:25:58	347.67	350.00	26038	85887.9	2.232E-04	1.00	2.232E-04	10.00	2.232E-03	52.0
ph6	20/03/2019	16:34:32	346.80	350.00	26552	89765.2	2.377E-04	1.00	2.377E-04	10.00	2.377E-03	42.7
ph7	20/03/2019	16:43:14	347.15	350.00	27074	93405.4	2.513E-04	1.00	2.513E-04	10.00	2.513E-03	35.0
ph8	20/03/2019	16:50:04	348.02	350.00	27484	107554.2	2.924E-04	1.00	2.924E-04	10.00	2.924E-03	16.0
ph9	20/03/2019	16:12:56	492.06	500.00	25256	171664.1	3.081E-04	1.00	3.081E-04	10.00	3.081E-03	10.1
ph10	20/03/2019	16:03:51	493.11	500.00	24711	175699.1	3.092E-04	1.00	3.092E-04	10.00	3.092E-03	9.7
ph11	20/03/2019	15:51:12	494.73	500.00	23952	187986.2	3.218E-04	1.00	3.218E-04	10.00	3.218E-03	5.4
ph12	20/03/2019	15:36:12	492.37	500.00	23052	200754.5	3.355E-04	1.00	3.355E-04	10.00	3.355E-03	1.1
ph13	20/03/2019	15:30:26	288.25	300.00	22706	119931.3	3.375E-04	1.00	3.375E-04	10.00	3.375E-03	0.5
NaCl0.9%	20/03/2019	17:32:08	348.27	350.00	30008	112232.9	3.306E-04	1.00	3.306E-04	10.00	3.306E-03	2.6

**Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99mTc en Al2O3-80nm**

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrilico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 140keV 99mTc*	0.873
Eficiencia 140keV vial de vidrio de 10ml	0.0794

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99mTc		
Tiempo de semidesintegración**	6.0067	h
Tiempo de semidesintegración	21624.12	seg
Constante de semidesintegración	3.20475E-05	seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	2/10/2018
Hora Calibración	9:40
Actividad mCi (calibrada)	1.052
Volumen mL	3
Concentración de actividad mCi/mL	0.351

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el sorbente

g de alúmina

mL de solución que estuvo en contacto con el sorbente

Resultados Experimentales												
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 140keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	3/10/2018	12:31:33	286.71	300.00	96693	258209.7	7.824E-03	1.00	7.824E-03	0.40	3.130E-03	
ph2	2/10/2018	16:48:55	347.29	350.00	25735	53673.3	1.383E-04	1.00	1.383E-04	10.00	1.383E-03	126.3
ph3	2/10/2018	16:56:35	348.69	350.00	26195	25297.7	6.587E-05	1.00	6.587E-05	10.00	6.587E-04	375.1
ph4	2/10/2018	17:10:59	348.54	350.00	27059	28666.7	7.677E-05	1.00	7.677E-05	10.00	7.677E-04	307.7
ph5	2/10/2018	16:11:46	403.34	407.73	23506	87872.4	1.816E-04	1.00	1.816E-04	10.00	1.816E-03	72.3
ph6	2/10/2018	16:20:20	345.30	350.00	24020	94420.0	2.316E-04	1.00	2.316E-04	10.00	2.316E-03	35.2
ph7	2/10/2018	16:29:02	345.35	350.00	24542	92643.8	2.310E-04	1.00	2.310E-04	10.00	2.310E-03	35.5
ph8	2/10/2018	16:35:52	344.82	350.00	24952	103757.0	2.625E-04	1.00	2.625E-04	10.00	2.625E-03	19.2
ph9	2/10/2018	15:58:44	491.60	500.00	22724	168616.5	2.793E-04	1.00	2.793E-04	10.00	2.793E-03	12.1
ph10	2/10/2018	15:49:39	452.81	460.74	22179	159248.5	2.812E-04	1.00	2.812E-04	10.00	2.812E-03	11.3
ph11	2/10/2018	15:37:00	491.12	500.00	21420	178505.9	2.839E-04	1.00	2.839E-04	10.00	2.839E-03	10.3
ph12	2/10/2018	15:22:00	490.19	500.00	20520	197198.2	3.052E-04	1.00	3.052E-04	10.00	3.052E-03	2.5
ph13	2/10/2018	15:16:14	245.32	250.18	20174	96898.7	2.952E-04	1.00	2.952E-04	10.00	2.952E-03	6.0
NaCl0.9%	2/10/2018	17:17:04	346.75	350.00	27424	110170.5	3.001E-04	1.00	3.001E-04	10.00	3.001E-03	4.3

### Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99Mo en Al2O3-ácida

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo		
Tiempo de semidesintegración**	65.9496	h
Tiempo de semidesintegración	237418.56	seg
Constante de semidesintegración	2.919E-06	seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	22/08/2018
Hora Calibración	3:05:00 a. m.
Actividad mCi (calibrada)	2.2
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	1.1

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.2 g de alúmina
V	20 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

g de alúmina

mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

Resultados Experimentales												
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad inicial (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	28/08/2018	13:03:00	870.14	930.19	554280	39702.4	2.062E-03	1.00	2.062E-03	0.80	1.650E-03	
ph1	22/08/2018	15:44:06	992.27	1000.00	45546	1690.4	1.744E-05	1.00	1.744E-05	20.00	3.489E-04	372.9
ph2	22/08/2018	15:27:36	496.33	500.00	44556	52.1	1.071E-06	1.00	1.071E-06	20.00	2.142E-05	7602.8
ph3	23/08/2018	16:00:25	9994.49	10000.00	132925	90.0	1.206E-07	1.00	1.206E-07	20.00	2.411E-06	68323.8
ph4	23/08/2018	18:49:07	9994.82	10000.00	143047	3131.4	4.321E-06	1.00	4.321E-06	20.00	8.641E-05	1809.4
ph5	27/08/2018	14:01:15	721.19	770.10	471375	690.8	3.398E-05	1.00	3.398E-05	20.00	6.797E-04	142.8
ph6	27/08/2018	14:16:00	923.09	990.17	472260	1012.5	3.903E-05	1.00	3.903E-05	20.00	7.805E-04	111.4
ph7	27/08/2018	14:33:48	9972.12	10000.00	473328	11116.7	4.031E-05	1.00	4.031E-05	20.00	8.063E-04	104.6
ph8	22/08/2018	16:01:17	9946.59	10000.00	46577	36138.4	3.781E-05	1.00	3.781E-05	20.00	7.562E-04	118.2
ph9	23/08/2018	08:14:12	538.97	540.00	104952	1803.4	4.072E-05	1.00	4.072E-05	20.00	8.145E-04	102.6
ph10	23/08/2018	12:10:21	538.33	540.30	119121	1864.3	4.393E-05	1.00	4.393E-05	20.00	8.786E-04	87.8
ph11	23/08/2018	11:50:23	683.24	690.10	117923	4324.2	8.002E-05	1.00	8.002E-05	20.00	1.600E-03	3.1
NaClO.9%	23/08/2018	08:42:20	1967.08	1970.00	106640	527.9	3.289E-06	1.00	3.289E-06	20.00	6.578E-05	2408.2

**Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99Mo en Al2O3-05nm**

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	12/12/2018
Hora Calibración	09:17:00
Actividad mCi (calibrada)	5.10
Volumen mL	5.00
Concentración de actividad mCi/mL	1.02

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

g de alúmina

mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

Resultados Experimentales												
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad inicial (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	7/01/2019	10:08:00	1205.98	1235.46	2249460	14924.6	7.885E-02	1.00	7.885E-02	1.00	7.885E-02	
ph1	9/01/2019	15:34:39	68779.09	68800.15	2441859	3244.8	5.807E-04	1.00	5.807E-04	10.00	5.807E-03	1257.8
ph2	21/12/2018	15:53:41	401564.41	403341.70	801401	33713.1	1.327E-05	1.00	1.327E-05	10.00	1.327E-04	59342.5
ph3	27/12/2018	09:43:47	16263.11	16267.45	1297607	414.2	1.031E-05	1.00	1.031E-05	10.00	1.031E-04	76405.9
ph4	7/01/2019	15:54:50	58314.17	58324.10	2270270	40.1	5.054E-06	1.00	5.054E-06	10.00	5.054E-05	155909.8
ph5	7/01/2019	12:17:19	9367.86	9375.50	2257219	503.2	3.543E-04	1.00	3.543E-04	10.00	3.543E-03	2125.8
ph6	8/01/2019	15:50:05	57856.22	57896.21	2356385	2439.5	3.982E-04	1.00	3.982E-04	10.00	3.982E-03	1880.0
ph7	10/01/2019	13:49:10	67525.80	67560.08	2521930	1848.5	4.250E-04	1.00	4.250E-04	10.00	4.250E-03	1755.6
ph8	15/01/2019	16:43:17	56885.22	56900.17	2964377	1188.4	1.162E-03	1.00	1.162E-03	10.00	1.162E-02	578.5
ph9	10/01/2019	10:42:05	11113.97	11120.18	2510705	3071.8	3.830E-03	1.00	3.830E-03	10.00	3.830E-02	105.9
ph10	11/01/2019	08:37:03	24435.61	24450.93	2589603	7827.9	5.698E-03	1.00	5.698E-03	10.00	5.698E-02	38.4
ph11	16/01/2019	08:36:49	96029.80	96060.23	3021589	10299.7	7.450E-03	1.00	7.450E-03	10.00	7.450E-02	5.8
ph12	9/01/2019	08:08:16	13245.17	13262.26	2415076	9893.4	7.854E-03	1.00	7.854E-03	10.00	7.854E-02	0.4
ph13	9/01/2019	11:51:53	12603.46	12618.63	2428493	9088.1	7.877E-03	1.00	7.877E-03	10.00	7.877E-02	0.1
NaClO.9%	27/12/2018	15:33:05	17996.03	18000.00	1318565	810.5	1.942E-05	1.00	1.942E-05	10.00	1.942E-04	40494.6

**Estudio de coeficiente de repartición Kd del 99Mo en Al2O3-80nm**

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo		
Tiempo de semidesintegración**	65.9496	h
Tiempo de semidesintegración	237418.56	seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06	seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	28/11/2018
Hora Calibración	09:32:00
Actividad mCi (calibrada)	3.33
Volumen mL	3.00
Concentración de actividad mCi/mL	1.11

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

g de alúmina

mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente

Resultados Experimentales												
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Kd (mL/g)
Inicial	21/12/2018	11:29:13	1262.08	1325.50	1994233	35309.6	8.464E-02	1.00	8.464E-02	1.00	8.464E-02	
ph1	6/12/2018	12:11:17	2339.21	2370.36	700757	20450.5	6.073E-04	1.00	6.073E-04	10.00	6.073E-03	1293.8
ph2	5/12/2018	15:58:33	58873.78	58900.11	627993	9673.1	1.001E-05	1.00	1.001E-05	10.00	1.001E-04	84453.6
ph3	7/12/2018	14:52:01	59976.24	60000.00	796801	3510.6	5.846E-06	1.00	5.846E-06	10.00	5.846E-05	144679.0
ph4	4/12/2018	15:55:31	61149.41	61170.51	541411	5630.7	4.371E-06	1.00	4.371E-06	10.00	4.371E-05	193526.8
ph5	10/12/2018	09:04:00	1127.85	1157.55	1035120	20546.2	3.352E-03	1.00	3.352E-03	10.00	3.352E-02	152.5
ph6	10/12/2018	09:24:48	1038.53	1069.73	1036368	21425.6	3.810E-03	1.00	3.810E-03	10.00	3.810E-02	122.2
ph7	10/12/2018	09:43:32	3330.92	3434.30	1037492	70850.0	3.954E-03	1.00	3.954E-03	10.00	3.954E-02	114.1
ph8	10/12/2018	10:42:24	1031.74	1062.36	1041024	20926.4	3.797E-03	1.00	3.797E-03	10.00	3.797E-02	122.9
ph9	10/12/2018	11:18:35	980.31	1009.22	1043195	20112.1	3.864E-03	1.00	3.864E-03	10.00	3.864E-02	119.0
ph10	10/12/2018	11:36:25	1637.78	1719.69	1044265	55721.9	6.435E-03	1.00	6.435E-03	10.00	6.435E-02	31.5
ph11	10/12/2018	08:39:40	454.45	484.19	1033660	20002.6	8.057E-03	1.00	8.057E-03	10.00	8.057E-02	5.1
ph12	10/12/2018	12:05:54	950.01	1015.95	1046034	42002.1	8.397E-03	1.00	8.397E-03	10.00	8.397E-02	0.8
ph13	10/12/2018	12:23:47	782.92	836.61	1047107	34626.2	8.424E-03	1.00	8.424E-03	10.00	8.424E-02	0.5
NaClO.9%	10/12/2018	13:05:23	57574.30	57600.00	1049603	6193.4	2.240E-05	1.00	2.240E-05	10.00	2.240E-04	37693.6

## Anexo B: Especificaciones y detalle de resultados de cinética de adsorción de <sup>99</sup>Mo

### Estudio de la cinética de adsorción del <sup>99</sup>Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida. Conc. Inicial de Mo 1 mM

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV <sup>99</sup> Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of <sup>99</sup>Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos <sup>99</sup> Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	28/08/2018
Hora Calibración	9:33
Actividad mCi (calibrada)	0.91
Volumen mL	2.0
Concentración de actividad mCi/mL	0.455

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4
Concentración inicial de Mo	1 mM

Resultados Experimentales													
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	%Porcentaje adsorbido	Masa Mo (mg)
Inicial	29/08/2018	14:53:48	294.16	309.19	105648	123528.0	5.120E-03	1.00	5.120E-03	10.00	5.120E-02		1.1920
Mo 1min	29/08/2018	10:42:17	766.33	800.00	90557	203686.8	3.103E-03	1.00	3.103E-03	10.00	3.103E-02	39.4%	0.7225
Mo 5min	29/08/2018	11:13:53	1930.92	2000.00	92453	245500.8	1.495E-03	1.00	1.495E-03	10.00	1.495E-02	70.8%	0.3481
Mo 10min	29/08/2018	12:01:12	1942.90	2000.00	95292	52584.0	3.209E-04	1.00	3.209E-04	10.00	3.209E-03	93.7%	0.0747
Mo 20min	29/08/2018	13:49:54	889.41	910.28	101814	16092.0	2.183E-04	1.00	2.183E-04	10.00	2.183E-03	95.7%	0.0508
Mo 40min	29/08/2018	14:06:41	1004.37	1028.09	102821	1743.6	2.101E-05	1.00	2.101E-05	10.00	2.101E-04	99.6%	0.0049
Mo 60min	29/08/2018	14:27:07	731.91	749.41	104047	1389.6	2.305E-05	1.00	2.305E-05	10.00	2.305E-04	99.5%	0.0054
Mo 80min	29/08/2018	14:42:39	489.20	500.81	104979	829.2	2.063E-05	1.00	2.063E-05	10.00	2.063E-04	99.6%	0.0048

### Estudio de la cinética de adsorción del 99Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm. Conc. Inicial de Mo 1 mM

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo		
Tiempo de semidesintegración**	65.9496	h
Tiempo de semidesintegración	237418.56	seg
Constante de semidesintegración	2.919E-06	seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	23/10/2018
Hora Calibración	10:05
Actividad mCi (calibrada)	1.025
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	0.5125

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4
Concentración inicial de Mo	1 mM

Resultados Experimentales													
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	%Porcentaje adsorbido	Masa Mo (mg)
Inicial	7/11/2018	09:12:07	3000.00	3052.86	1292827	37477.2	4.891E-03	1.00	4.891E-03	10.00	4.891E-02		0.9181
Mo 0.5min	7/11/2018	11:12:07	14294.94	14400.00	1300027	11314.2	3.217E-04	1.00	3.217E-04	10.00	3.217E-03	93.422%	0.0604
Mo 1min	31/10/2018	15:54:24	99975.05	100000.00	712164	4757.5	3.927E-06	1.00	3.927E-06	10.00	3.927E-05	99.920%	0.0007
Mo 5min	30/10/2018	08:06:41	99975.78	100000.00	597701	4321.0	2.554E-06	1.00	2.554E-06	10.00	2.554E-05	99.948%	0.0005
Mo 10min	26/10/2018	14:54:24	19993.69	20000.00	276564	2010.1	2.077E-06	1.00	2.077E-06	10.00	2.077E-05	99.958%	0.0004
Mo 15min	26/10/2018	11:14:24	10157.92	10160.39	263364	1021.6	1.971E-06	1.00	1.971E-06	10.00	1.971E-05	99.960%	0.0004
Mo 20min	26/10/2018	08:06:38	9632.84	10000.00	252098	1068.5	2.103E-06	1.00	2.103E-06	10.00	2.103E-05	99.957%	0.0004

### Estudio de la cinética de adsorción del <sup>99</sup>Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm. Conc. Inicial de Mo 10 mM

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV <sup>99</sup> Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of <sup>99</sup>Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos <sup>99</sup> Mo		
Tiempo de semidesintegración**	65.9496	h
Tiempo de semidesintegración	237418.56	seg
Constante de semidesintegración	2.919E-06	seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	23/01/2019
Hora Calibración	9:00
Actividad mCi (calibrada)	5.2
Volumen mL	5
Concentración de actividad mCi/mL	1.04

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4
Concentración inicial de Mo	10 mM

Resultados Experimentales													
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	%Porcentaje adsorbido	Masa Mo (mg)
Inicial	13/02/2019	11:06:00	1417.04	1444.08	1821960.0	16641.4	2.149E-02	1.00	2.149E-02	10.00	2.149E-01		10.1707
Mo 0.5min	13/02/2019	13:56:50	3567.09	3600.00	1832210.0	22629.4	1.200E-02	1.00	1.200E-02	10.00	1.200E-01	44.165%	5.6789
Mo 1min	13/02/2019	16:50:34	3569.20	3600.00	1842634.0	20851.2	1.139E-02	1.00	1.139E-02	10.00	1.139E-01	46.994%	5.3911
Mo 5min	13/02/2019	10:35:12	1745.33	1760.57	1820112.0	10648.1	1.111E-02	1.00	1.111E-02	10.00	1.111E-01	48.305%	5.2577
Mo 10min	13/02/2019	14:56:40	2439.33	2459.62	1835800.0	14058.0	1.100E-02	1.00	1.100E-02	10.00	1.100E-01	48.828%	5.2046
Mo 15min	13/02/2019	12:59:27	3163.47	3190.12	1828767.0	18619.0	1.102E-02	1.00	1.102E-02	10.00	1.102E-01	48.747%	5.2128
Mo 20min	13/02/2019	15:56:28	3571.19	3600.00	1839388.0	20345.2	1.100E-02	1.00	1.100E-02	10.00	1.100E-01	48.797%	5.2078

### Estudio de la cinética de adsorción del <sup>99</sup>Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm. Conc. Inicial de Mo 1 Mm

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV <sup>99</sup> Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of <sup>99</sup>Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos <sup>99</sup> Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	23/10/2018
Hora Calibración	10:05
Actividad mCi (calibrada)	1.025
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	0.5125

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1
V	10
pH	4
Concentración inicial de Mo	1 mM

Resultados Experimentales													
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	%Porcentaje adsorbido	Masa Mo (mg)
Inicial	7/11/2018	10:11:28	2555.28	2599.96	1296388	31790.2	4.918E-03	1.00	4.918E-03	10.00	4.918E-02		0.9076
Mo 0.5min	7/11/2018	15:12:07	19993.81	20000.00	1314427	16314.3	3.487E-04	1.00	3.487E-04	10.00	3.487E-03	92.910%	0.0643
Mo 1min	24/10/2018	19:59:07	7918.55	8000.00	122047	3644.6	5.953E-06	1.00	5.953E-06	10.00	5.953E-05	99.88%	0.0011
Mo 5min	24/10/2018	22:14:28	7941.82	8000.00	130168	655.3	1.093E-06	1.00	1.093E-06	10.00	1.093E-05	99.98%	0.0002
Mo 10min	25/10/2018	05:00:33	7968.74	8000.00	154533	790.5	1.411E-06	1.00	1.411E-06	10.00	1.411E-05	99.97%	0.0003
Mo 15min	25/10/2018	10:12:36	7972.04	8000.00	173256	772.2	1.455E-06	1.00	1.455E-06	10.00	1.455E-05	99.97%	0.0003
Mo 20min	25/10/2018	07:15:54	7978.18	8000.00	162654	772.0	1.409E-06	1.00	1.409E-06	10.00	1.409E-05	99.97%	0.0003

### Estudio de la cinética de adsorción del <sup>99</sup>Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm. Conc. Inicial de Mo 10 mM

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV <sup>99</sup> Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of <sup>99</sup>Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos <sup>99</sup> Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	23/01/2019
Hora Calibración	9:00
Actividad mCi (calibrada)	5.2
Volumen mL	5
Concentración de actividad mCi/mL	1.04

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1
V	10
pH	4
Concentración inicial de Mo	10 mM

Resultados Experimentales													
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	%Porcentaje adsorbido	Masa Mo (mg)
Inicial	13/02/2019	11:06:00	1417.04	1444.08	1821960.0	16641.4	2.149E-02	1.00	2.149E-02	10.00	2.149E-01		10.0832
Mo 0.5min	11/02/2019	11:54:13	2168.08	2200.48	1652053	22920.9	1.180E-02	1.00	1.180E-02	10.00	1.180E-01	45.116%	5.5340
Mo 1min	11/02/2019	09:40:05	2266.25	2300.44	1644005	24151.3	1.162E-02	1.00	1.162E-02	10.00	1.162E-01	45.95%	5.4498
Mo 5min	11/02/2019	08:26:06	2127.43	2159.49	1639566	22823.7	1.154E-02	1.00	1.154E-02	10.00	1.154E-01	46.30%	5.4145
Mo 10min	11/02/2019	10:20:03	2711.35	2750.63	1646403	27836.9	1.128E-02	1.00	1.128E-02	10.00	1.128E-01	47.53%	5.2906
Mo 15min	11/02/2019	09:04:54	1971.79	2000.50	1641894	20433.7	1.122E-02	1.00	1.122E-02	10.00	1.122E-01	47.79%	5.2646
Mo 20min	11/02/2019	14:02:34	2071.23	2100.00	1659754	20444.4	1.126E-02	1.00	1.126E-02	10.00	1.126E-01	47.60%	5.2836

## Anexo C: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción de adsorbentes

### Estudio de capacidad máxima de adsorción de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ácida, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	5/06/2019
Hora Calibración	09:55:00
Actividad mCi (calibrada)	2.10
Volumen mL	2.00
Concentración de actividad mCi/mL	1.05

#### Datos de adsorción

T	20°C
m	0.2 g de alúmina
V	20 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
C <sub>0</sub>	10 mg Mo/mL de solución

Resultados Experimentales												
Código	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Capacidad de Adsorción mg 99Mo/g alúmina
Inicial-ph4	14/06/2019	15:49:28	873.08	900.00	798868	18736.0	1.981E-03	1.00	1.981E-03	20.00	3.961E-02	
ácida-ph4-01	14/06/2019	08:32:40	870.51	900.00	772660	19828.0	1.947E-03	1.00	1.947E-03	20.00	3.895E-02	16.76
ácida-ph4-02	14/06/2019	09:19:40	870.90	900.00	775480	19637.8	1.944E-03	1.00	1.944E-03	20.00	3.888E-02	18.58
ácida-ph4-03	14/06/2019	09:42:27	871.26	900.00	776847	19566.9	1.944E-03	1.00	1.944E-03	20.00	3.888E-02	18.62
ácida-ph4-04	14/06/2019	09:59:06	871.15	900.00	777846	19479.6	1.941E-03	1.00	1.941E-03	20.00	3.882E-02	20.02
ácida-ph4-05	14/06/2019	10:24:28	871.20	900.00	779368	19437.4	1.945E-03	1.00	1.945E-03	20.00	3.891E-02	17.85
05nm-ph4-01	14/06/2019	10:43:06	875.70	900.00	780486	16372.8	1.636E-03	1.00	1.636E-03	20.00	3.271E-02	174.26
05nm-ph4-02	14/06/2019	11:01:28	876.17	900.00	781588	16159.3	1.619E-03	1.00	1.619E-03	20.00	3.237E-02	182.84
05nm-ph4-03	14/06/2019	11:22:58	876.47	900.00	782878	16150.4	1.623E-03	1.00	1.623E-03	20.00	3.246E-02	180.49
05nm-ph4-04	14/06/2019	11:42:35	876.43	900.00	784055	16200.1	1.634E-03	1.00	1.634E-03	20.00	3.268E-02	175.10
05nm-ph4-05	14/06/2019	12:03:54	875.74	900.00	785334	16280.4	1.649E-03	1.00	1.649E-03	20.00	3.299E-02	167.26
80nm-ph4-01	14/06/2019	12:20:32	877.06	900.00	786332	15515.6	1.574E-03	1.00	1.574E-03	20.00	3.148E-02	205.26
80nm-ph4-02	14/06/2019	08:58:44	876.22	900.00	774224	16237.8	1.592E-03	1.00	1.592E-03	20.00	3.183E-02	196.38
80nm-ph4-03	14/06/2019	13:24:37	877.06	900.00	790177	15523.2	1.593E-03	1.00	1.593E-03	20.00	3.185E-02	195.90
80nm-ph4-04	14/06/2019	13:43:35	877.31	900.00	791315	15176.6	1.562E-03	1.00	1.562E-03	20.00	3.124E-02	211.46
80nm-ph4-05	14/06/2019	14:01:05	876.83	900.00	792365	15599.8	1.611E-03	1.00	1.611E-03	20.00	3.222E-02	186.54

## Anexo D: Especificaciones y detalle de resultados de capacidad máxima de adsorción en estudio dinámico o perfil de avance

### Estudio curva de ruptura 99Mo en Al2O3-80nm

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml	0.0245

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	16/12/2019
Hora Calibración	9:05
Actividad mCi (calibrada)	3.1
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	1.55

Datos de adsorción	
T (°C)	20°C
m (g)	1.0 g de alúmina
V (ml)	30 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4

Resultados Experimentales										
Muestra	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Ai/A0 exp
Muestra inicial	16/12/2019	13:02:45	1192.34	1200.00		14265	51230.4	4.017E-04	1.00	4.017E-04
Vol pasante 2 ml	17/12/2019	07:56:13	10756.56	10800.00		82273	39.3	4.224E-08	1.00	4.224E-08
Vol pasante 10 ml	17/12/2019	11:01:32	10762.34	10800.00		93392	53.7	5.959E-08	1.00	5.959E-08
Vol pasante 12 ml	17/12/2019	14:07:21	10774.54	10800.00		104541	1989.4	2.278E-06	1.00	2.278E-06
Vol pasante 14 ml	17/12/2019	17:11:13	10784.32	10800.00		115573	2400.3	2.836E-06	1.00	2.836E-06
Vol pasante 18 ml	16/12/2019	13:26:54	1191.84	1200.00		15714	28115.1	2.215E-04	1.00	2.215E-04
Vol pasante 20 ml	16/12/2019	13:51:26	1192.34	1200.00		17186	44038.5	3.483E-04	1.00	3.483E-04
Vol pasante 24 ml	16/12/2019	14:12:36	1189.47	1200.00		18456	49512.9	3.940E-04	1.00	3.940E-04
Vol pasante 26 ml	16/12/2019	14:33:07	1196.76	1200.00		19687	49487.5	3.928E-04	1.00	3.928E-04
Vol pasante 28 ml	16/12/2019	14:59:09	1191.44	1200.00		21249	49602.3	3.972E-04	1.00	3.972E-04

## Anexo E: Especificaciones y detalle de resultados de isotermas de adsorción

### Estudio de las isotermas de adsorción del 99Mo en Al2O3-05nm y Al2O3-80nm.

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml - Contenido 2ml	0.0222

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	28/01/2019
Hora Calibración	15:00
Actividad mCi (calibrada)	5.17
Volumen mL	5
Concentración de actividad mCi/mL	1.034

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.05 g de alúmina
V	5 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4

Resultados Experimentales											
Código	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)
Inicial	18/02/2019	16:14:10	906.19	936.17	1818850	19225.8	0.042490	2.00	0.021245	5.00	0.10623
05nm-ISO-01	15/02/2019	11:28:04	4834.14	4847.95	1542484	9422.0	0.001752	2.00	0.000876	5.00	0.00438
05nm-ISO-02	15/02/2019	09:53:47	3052.12	3067.84	1536827	10730.0	0.003101	2.00	0.001550	5.00	0.00775
05nm-ISO-03	13/02/2019	15:46:44	2449.17	2482.12	1385204	22530.6	0.005208	2.00	0.002604	5.00	0.01302
05nm-ISO-04	14/02/2019	13:23:08	1047.67	1062.52	1462988	10051.5	0.006801	2.00	0.003401	5.00	0.01700
05nm-ISO-05	15/02/2019	09:09:11	1433.92	1452.39	1534151	12664.4	0.007711	2.00	0.003855	5.00	0.01928
05nm-ISO-06	14/02/2019	14:25:01	883.92	898.66	1466701	10124.5	0.008206	2.00	0.004103	5.00	0.02052
05nm-ISO-07	14/02/2019	08:58:41	1386.17	1410.49	1447121	16793.7	0.008204	2.00	0.004102	5.00	0.02051
05nm-ISO-08	14/02/2019	14:09:11	864.73	879.72	1465751	10419.1	0.008608	2.00	0.004304	5.00	0.02152
05nm-ISO-09	14/02/2019	12:28:19	2752.49	2800.00	1459699	33401.3	0.008542	2.00	0.004271	5.00	0.02135
05nm-ISO-10	14/02/2019	11:07:11	3536.97	3600.00	1454831	44030.4	0.008649	2.00	0.004325	5.00	0.02162
80nm-ISO-01	15/02/2019	12:50:03	4433.76	4446.50	1547403	8538.4	0.001755	2.00	0.000878	5.00	0.00439
80nm-ISO-02	18/02/2019	10:17:03	5185.02	5197.61	1797423	8481.3	0.003096	2.00	0.001548	5.00	0.00774
80nm-ISO-03	14/02/2019	14:40:51	1391.58	1406.10	1467651	10056.3	0.005196	2.00	0.002598	5.00	0.01299
80nm-ISO-04	18/02/2019	12:26:35	2781.15	2796.96	1805195	10261.7	0.007120	2.00	0.003560	5.00	0.01780
80nm-ISO-05	19/02/2019	09:22:27	3346.81	3362.95	1880547	10237.9	0.007361	2.00	0.003681	5.00	0.01840
80nm-ISO-06	18/02/2019	11:44:42	2433.50	2449.78	1802682	10929.7	0.008599	2.00	0.004300	5.00	0.02150
80nm-ISO-07	19/02/2019	10:19:28	3142.75	3158.75	1883968	10986.6	0.008494	2.00	0.004247	5.00	0.02124
80nm-ISO-08	15/02/2019	14:05:14	1425.12	1443.93	1551914	13209.9	0.008523	2.00	0.004262	5.00	0.02131
80nm-ISO-09	19/02/2019	08:34:18	2810.69	2825.22	1877658	10165.2	0.008623	2.00	0.004312	5.00	0.02156
80nm-ISO-10	19/02/2019	13:46:48	3333.17	3349.55	1896408	11533.5	0.008721	2.00	0.004361	5.00	0.02180

### Cálculos para modelamiento de isothermas de adsorción según Freundlich y Langmuir para Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm

m 0.05 g de alúmina  
 V 5 mL de muestra  
 Masa molar Mo 95.96 g/mol

$$q(e,F)=KF*Ce^{(1/n)}$$

$$Ce/q(e,L) = Ce/q(m,L) + 1/(KL \times q(m,L))$$

Muestra	Actividad inicial (mCi)	Actividad final (mCi)	Concentración inicial C0(mol/L)	Concentración en el equilibrio Ce(mg Mo/mL)	Cantidad adsorbida qe (mg Mo/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Isotherma Adsorción Freundlich		Isotherma adsorción Langmuir		
						ln(Ce)	ln(qe,F)	Ce	Ce/qe,L	RL
05nm-ISO-01	0.1062	0.0044	0.0033	0.0131	30.5421	-4.3323	3.4191	0.0131	0.00043	0.88613
05nm-ISO-02	0.1062	0.0078	0.0042	0.0292	37.0610	-3.5345	3.6126	0.0292	0.00079	0.86113
05nm-ISO-03	0.1062	0.0130	0.0067	0.0790	56.5712	-2.5381	4.0355	0.0790	0.00140	0.79360
05nm-ISO-04	0.1062	0.0170	0.0126	0.1938	101.6965	-1.6409	4.6220	0.1938	0.00191	0.67185
05nm-ISO-05	0.1062	0.0193	0.0206	0.3588	161.8502	-1.0249	5.0867	0.3588	0.00222	0.55628
05nm-ISO-06	0.1062	0.0205	0.0404	0.7491	312.9446	-0.2889	5.7460	0.7491	0.00239	0.38993
05nm-ISO-07	0.1062	0.0205	0.0647	1.1993	501.1972	0.1817	6.2170	1.1993	0.00239	0.28526
05nm-ISO-08	0.1062	0.0215	0.0804	1.5628	615.1083	0.4465	6.4218	1.5628	0.00254	0.24320
05nm-ISO-09	0.1062	0.0214	0.1198	2.3116	918.6935	0.8379	6.8230	2.3116	0.00252	0.17735
05nm-ISO-10	0.1062	0.0216	0.1425	2.7842	1089.3467	1.0240	6.9933	2.7842	0.00256	0.15343

1/n	0.6996	1/qm,L	0.000562
ln(KF)	6.0581	1/(KL*qm,L)	0.001392
n	1.4293	qm,L (mg Mo/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1780.414759
KF (ml/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	427.5829	KL (ml/mg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.403396
R2	0.9713	R2	0.525825
		RL	0.501816

### Cálculos para modelamiento de isotermas de adsorción según Freundlich y Langmuir para Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm

m 0.05 g de alúmina  
 V 5 mL de muestra  
 Masa molar Mo 95.96 g/mol

$$q(e,F)=KF*Ce^{(1/n)}$$

$$Ce/q(e,L) = Ce/q(m,L) + 1/(KL \times q(m,L))$$

Muestra	Actividad inicial (mCi)	Actividad final (mCi)	Concentración inicial C0(mol/L)	Concentración en el equilibrio Ce(mg Mo/mL)	Cantidad adsorbida qe (mg Mo/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Isotherma Adsorción Freundlich		Isotherma adsorción Langmuir		
						ln(Ce)	ln(qe,F)	Ce	Ce/qe,L	RL
80nm-ISO-01	0.1062	0.0044	0.0033	0.0132	30.5398	-4.3306	3.4190	0.0132	0.0004	0.89598
80nm-ISO-02	0.1062	0.0077	0.0042	0.0291	37.0649	-3.5358	3.6127	0.0291	0.0008	0.87283
80nm-ISO-03	0.1062	0.0130	0.0067	0.0788	56.5892	-2.5404	4.0358	0.0788	0.0014	0.80974
80nm-ISO-04	0.1062	0.0178	0.0126	0.2029	100.7883	-1.5951	4.6130	0.2029	0.0020	0.69385
80nm-ISO-05	0.1062	0.0184	0.0206	0.3426	163.4777	-1.0713	5.0967	0.3426	0.0021	0.58119
80nm-ISO-06	0.1062	0.0215	0.0647	1.2571	495.4191	0.2288	6.2054	1.2571	0.0025	0.30641
80nm-ISO-07	0.1062	0.0212	0.0804	1.5421	617.1802	0.4332	6.4252	1.5421	0.0025	0.26239
80nm-ISO-08	0.1062	0.0213	0.1198	2.3066	919.1991	0.8358	6.8235	2.3066	0.0025	0.19266
80nm-ISO-09	0.1062	0.0216	0.1425	2.7758	1090.1837	1.0210	6.9941	2.7758	0.0025	0.16710
80nm-ISO-10	0.1062	0.0218	0.1590	3.1317	1212.6115	1.1416	7.1005	3.1317	0.0026	0.15243

1/n	0.71563729	1/qm,L	0.00049573
ln(KF)	6.106218474	1/(KL*qm,L)	0.00136028
n	1.397355915	qm,L (mg Mo/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2017.24541
KF (ml/g Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	448.6389632	KL (ml/mg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.36442997
R2	0.973879592	R2	0.57294971
		RL	0.49346

## Anexo F: Especificaciones y detalle de resultados del efecto de aniones en la adsorción de <sup>99</sup>Mo en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### Competencia de aniones acetato, sulfato, cloruro, nitrato en la adsorción de Molibdeno en alúmina 0.001 gMo/mL

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV <sup>99</sup> Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml - Contenido 2ml	0.0222

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of <sup>99</sup>Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos <sup>99</sup> Mo	
Tiempo de semidesintegración**	65.9496 h
Tiempo de semidesintegración	237418.56 seg
Constante de semidesintegración	2.9189E-06 seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	5/12/2019
Hora Calibración	8:00
Actividad mCi (calibrada)	10
Volumen mL	2
Concentración de actividad mCi/mL	5

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4

Resultados Experimentales												
Código	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Porcentaje de Adsorción R(%)
Inicial Mo/CH <sub>3</sub> COOH/CH <sub>3</sub> COONa	26/12/2019	14:28:26	579.86	600.00	1837706	11818.3	0.043107	1.00	0.043107	10.00	0.43107	-
Inicial Mo/HNO <sub>3</sub>	26/12/2019	14:41:03	966.34	1000.00	1838463	19557.1	0.042924	1.00	0.042924	10.00	0.42924	-
Inicial Mo/HCl	26/12/2019	15:22:03	966.65	1000.00	1840923	19336.7	0.042732	1.00	0.042732	10.00	0.42732	-
Inicial Mo/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	26/12/2019	14:58:57	966.30	1000.00	1839537	19560.7	0.043068	1.00	0.043068	10.00	0.43068	-
Mo/CH <sub>3</sub> COOH/CH <sub>3</sub> COONa-05nm	19/12/2019	08:31:49	1179.41	1200.00	1211509	14176.6	0.004091	1.00	0.004091	10.00	0.04091	90.51%
Mo/CH <sub>3</sub> COOH/CH <sub>3</sub> COONa-80nm	19/12/2019	09:03:40	2384.20	2400.00	1213420	11312.9	0.001627	1.00	0.001627	10.00	0.01627	96.23%
Mo/HNO <sub>3</sub> -05nm	23/12/2019	10:46:08	954.68	1000.00	1565168	31609.9	0.031626	1.00	0.031626	10.00	0.31626	26.32%
Mo/HNO <sub>3</sub> -80nm	23/12/2019	09:30:25	954.44	1000.00	1560625	31620.6	0.031228	1.00	0.031228	10.00	0.31228	27.25%
Mo/HCl-05nm	23/12/2019	08:01:19	953.47	1000.00	1555279	32289.6	0.031427	1.00	0.031427	10.00	0.31427	26.46%
Mo/HCl-80nm	23/12/2019	08:28:50	953.48	1000.00	1556930	32130.2	0.031422	1.00	0.031422	10.00	0.31422	26.47%
Mo/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -05nm	23/12/2019	09:58:00	952.20	1000.00	1562280	33133.3	0.032958	1.00	0.032958	10.00	0.32958	23.48%
Mo/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -80nm	23/12/2019	10:28:00	952.49	1000.00	1564080	32838.2	0.032826	1.00	0.032826	10.00	0.32826	23.78%

**Competencia de aniones acetato, sulfato, cloruro, nitrato en la adsorción de Molibdeno en alúmina 0.01 gMo/mL**

Características del Equipo	
Detector	Canberra Gc7019
Geometría	Contacto pastilla (acrílico 8 mm + marinelli)
Intensidad gamma 739keV 99Mo*	0.123
Eficiencia 739keV vial de vidrio de 10ml - Contenido 2ml	0.0222

\*Fuente: Absolute Intensity of the 140.5keV Gamma-Ray of 99Mo, A. Simonits, L. Moens, F. de Corte, 1981

Datos 99Mo			
Tiempo de semidesintegración**		65.9496	h
Tiempo de semidesintegración		237418.56	seg
Constante de semidesintegración		2.9189E-06	seg-1

\*\*Fuente: F. De Corte 2003 The Updated NAA Nuclear data library derived

Datos de calibración	
Fecha Calibración	8/05/2019
Hora Calibración	11:02
Actividad mCi (calibrada)	5.27
Volumen mL	5
Concentración de actividad mCi/mL	1.054

Datos de adsorción	
T	20°C
m	0.1 g de alúmina
V	10 mL de solución que estuvo en contacto con el adsorbente
pH	4

Resultados Experimentales												
Código	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Tiempo decaimiento (s)	Area 739keV	Actividad (mCi)	Volumen muestra (mL)	Concentración actividad (mCi/mL)	Volumen inicial (mL)	Actividad (mCi)	Porcentaje de Adsorción R(%)
Inicial Mo/CH3COOH/CH3COONa	21/05/2019	08:39:22	761.45	800.00	1114642	26586.2	0.008951	1.00	0.008951	10.00	0.08951	-
Inicial Mo/HNO3	21/05/2019	09:06:23	761.28	800.00	1116263	26454.3	0.008950	1.00	0.008950	10.00	0.08950	-
Inicial Mo/HCl	21/05/2019	09:40:58	762.92	800.00	1118338	26698.7	0.009068	1.00	0.009068	10.00	0.09068	-
Inicial Mo/H2SO4	21/05/2019	09:56:02	764.47	800.00	1119242	26680.5	0.009068	1.00	0.009068	10.00	0.09068	-
Mo/CH3COOH/CH3COONa-05nm	21/05/2019	10:41:07	763.40	800.00	1121947	19151.1	0.006570	1.00	0.006570	10.00	0.06570	26.6%
Mo/CH3COOH/CH3COONa-80nm	21/05/2019	10:57:20	764.37	800.00	1122920	19008.7	0.006531	1.00	0.006531	10.00	0.06531	27.0%
Mo/HNO3-05nm	21/05/2019	11:11:39	763.91	800.00	1123779	22074.2	0.007608	1.00	0.007608	10.00	0.07608	15.0%
Mo/HNO3-80nm	21/05/2019	11:26:28	763.00	800.00	1124668	21985.2	0.007606	1.00	0.007606	10.00	0.07606	15.0%
Mo/HCl-05nm	21/05/2019	11:41:49	765.11	800.00	1125589	21801.4	0.007542	1.00	0.007542	10.00	0.07542	16.8%
Mo/HCl-80nm	21/05/2019	11:56:42	764.10	800.00	1126482	21458.0	0.007452	1.00	0.007452	10.00	0.07452	17.8%
Mo/H2SO4-05nm	21/05/2019	14:31:08	765.89	800.00	1135748	21699.1	0.007724	1.00	0.007724	10.00	0.07724	14.8%
Mo/H2SO4-80nm	21/05/2019	14:46:02	765.92	800.00	1136642	21416.7	0.007644	1.00	0.007644	10.00	0.07644	15.7%

## Anexo G: Mediciones y cálculos de la determinación de Aluminio por activación neutrónica

### Mediciones y cálculos de la determinación de Aluminio por activación neutrónica

Características del Equipo	
Detector	Canberra GC15020
Geometría (distancia del detector a la muestra)	185 mm

Datos 28Al		
Tiempo de semidesintegración**	2.2406	min
Tiempo de semidesintegración	134.436	seg
Constante de semidesintegración	0.00516	seg <sup>-1</sup>

\*\*Fuente: The k0-Consistent IRI Gamma-ray Catalogue for Instrumental Neutron Activation Analysis, Menno Blaauw, 1996

Datos de calibración	
Fecha irradiación	24/01/2020

Condiciones	
T	20°C

Patrones CC-X: Estándar de Al(+3) 993ppm en 1.5%w HCl, Sigma Aldrich

Resultados experimentales																		
Código	Descripción	Posición	Hora salida	Fecha de medición	Hora medición	Tiempo vivo (s)	Tiempo real (s)	Masa de la muestra (g)	Masa de la referencia (ug)	Tiempo decaimiento (s)	Area 1780keV	Incertidumbre absoluta de la medición U_1778 kev	Incertidumbre relativa de la medición U_1778 kev	Incertidumbre relativa de la masa	Actividad específica (kBq)	Masa de aluminio en la muestra (ug)	Concentración (ppm)	Incertidumbre de la concentración con 95% confianza (ppm)
Al-01	Agua desionizada	1	12:45:34	24/01/2020	12:48:24	244.51	245.27	0.50000		170	82.9	9	0.1086	0.0020	1.4	0.1	0.2	0.1
Al-02	Primer eluato sin filtrar	2	12:22:19	24/01/2020	12:28:22	242.93	300	0.50000		363	1578	51	0.0323	0.0020	83.0	12.4	24.8	1.7
Al-03	1era filtración	2	12:58:24	24/01/2020	13:01:46	124.05	140.22	0.50000		202	1403.3	39	0.0278	0.0020	45.0	6.3	12.6	0.7
Al-04	2da filtración	1	13:12:44	24/01/2020	13:15:30	105.35	120	0.50000		166	1365.9	39	0.0286	0.0020	40.9	5.9	11.9	0.7
Al-05	3era filtración	2	13:26:04	24/01/2020	13:29:18	106.08	120	0.50000		194	1244.7	36	0.0289	0.0020	42.8	5.8	11.6	0.7
R-01	Referencia zero	1	13:39:34	24/01/2020	13:41:54	119.47	120	0.50000		140	66.3	8	0.1207	0.0020	1.5	0.2	0.4	0.1
CC-1	Patrón referencia de Al-01	1	12:22:19	24/01/2020	12:36:23	215.49	300		496.5	844	8514.7	97	0.0114	0.0020	6026.3			
CC-2	Patrón referencia de Al-02	2	12:45:34	24/01/2020	12:54:08	79.28	100.08		496.5	514	14514.6	114	0.0079	0.0020	3317.7			
CC-3	Patrón referencia de Al-03	1	12:58:24	24/01/2020	13:07:00	93.87	120		496.5	516	17320.9	125	0.0072	0.0020	3539.3			
CC-4	Patrón referencia de Al-04	2	13:12:44	24/01/2020	13:21:00	94.02	120		496.5	496	18565.2	129	0.0069	0.0020	3416.4			
CC-5	Patrón referencia de Al-05	1	13:26:04	24/01/2020	13:35:33	94.88	120		496.5	569	13776.8	112	0.0081	0.0020	3660.4			
CC-6	Patrón referencia de R-01	2	13:39:34	24/01/2020	13:49:59	96.76	120		496.5	625	9985.5	96	0.0096	0.0020	3472.4			

Promedio (Actividad específica del CC-2 al CC-6)	3481.2
Desviación estándar (Actividad específica del CC-2 al CC-6)	128.9
Coefficiente de variación (%)	3.7

**Anexo H:** Imágenes de equipos, instrumentos, materiales y otros utilizados en la parte experimental

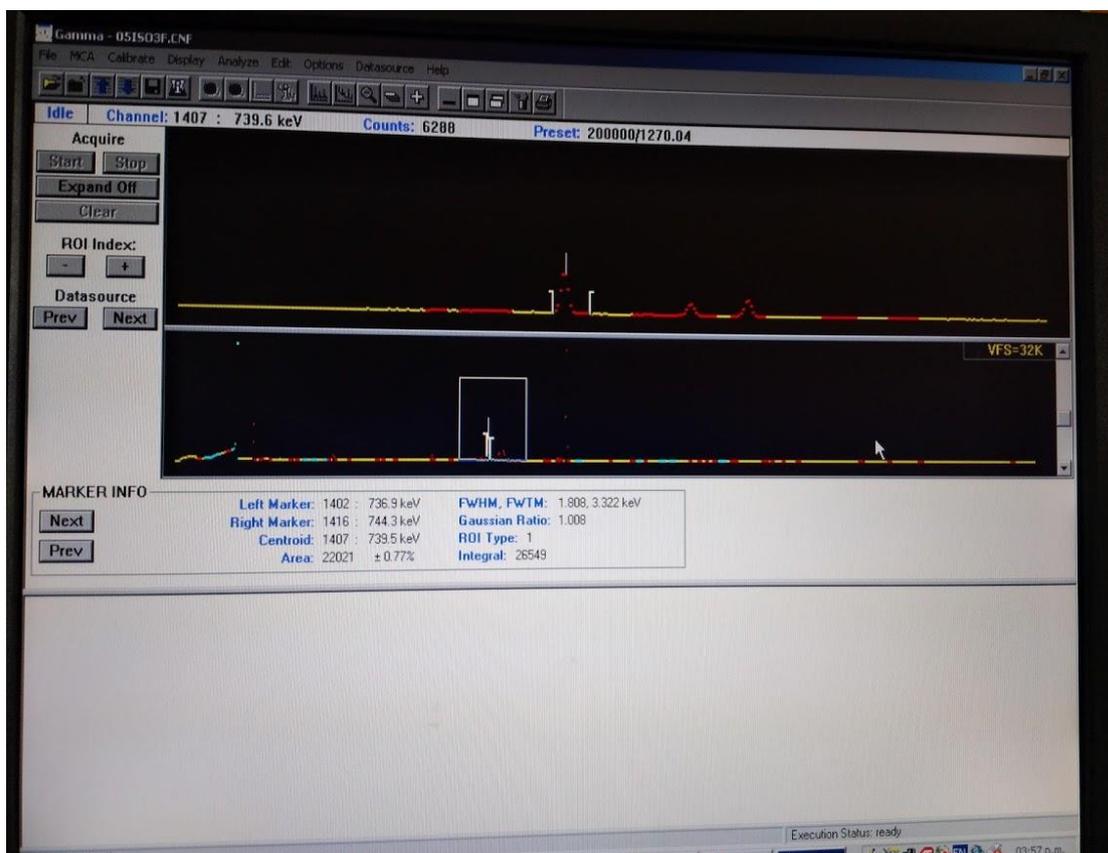
**Imagen 1.** Izquierda: Obtención de micrografía de la  $Al_2O_3$ -05nm en equipo de microscopía electrónica de barrido del Laboratorio de Nanotecnología de Materiales de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Equipo modelo HITACHI S-3000N, detector de electrones secundarios tipo centelleador-fotomultiplicador, un detector de electrones retrodispersados tipo semiconductor y un detector de rayos X tipo XFlash 3001 de Bruker para microanálisis (EDX) y mapping. Derecha: Módulo completo equipo de microscopía electrónica de barrido (Valenzuela Barrientos & La Rosa-Toro Gomez, 2015).



**Imagen 2.** Sistema del detector de germanio hiperpuro HPGe (Canberra Gc7019), blindaje de plomo, contenedor Dewar con nitrógeno como sistema de refrigeración y muestreador circular automático del Laboratorio de Espectrometría gamma de la Dirección de Investigación y Desarrollo del Instituto Peruano de Energía Nuclear



**Imagen 3.** Hoja de trabajo del Software de Espectroscopía Genie 2000. Centroide en 739.5 keV para análisis de molibdeno-99



**Imagen 4.** Agitador orbital IKA VXR basic Vibrax®



**Imagen 5.** Baño ultrasónico digital Branson Ultrasonics™ CPX-952-238R



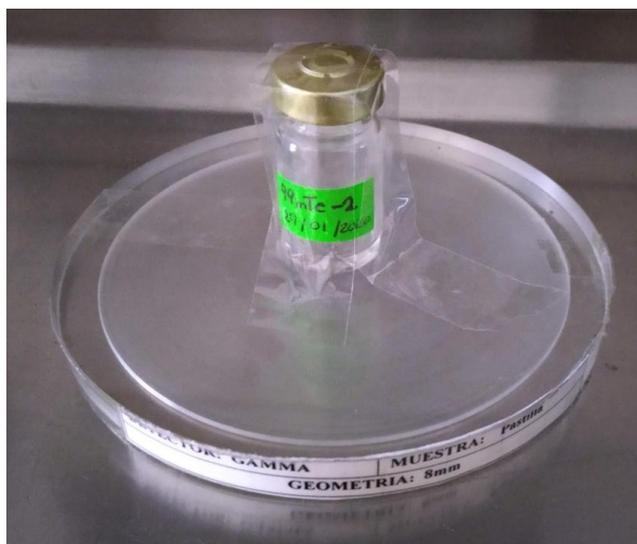
**Imagen 6.** Sistema de dispersión de luz dinámica Nicomp® Nano N3000 del Laboratorio de Nanotecnología e Innovación Tecnológica de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos



**Imagen 7.** Equipo de absorción atómica de flama modelo contrAA 800-D Analytik Jena AG con lámpara de arco de xenón de espectro continuo del Laboratorio de Investigación y Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería



**Imagen 8.** Porta muestra con vial de vidrio de 10ml de capacidad con 1 ml de solución de  $^{99m}\text{Tc}$  para medición de radioactividad en el detector de germanio hiperpuro HPGe



**Imagen 9.** Viales de vidrio de almacenamiento de muestras radiactivas filtradas y medidas en espera de su decaimiento para su disposición final



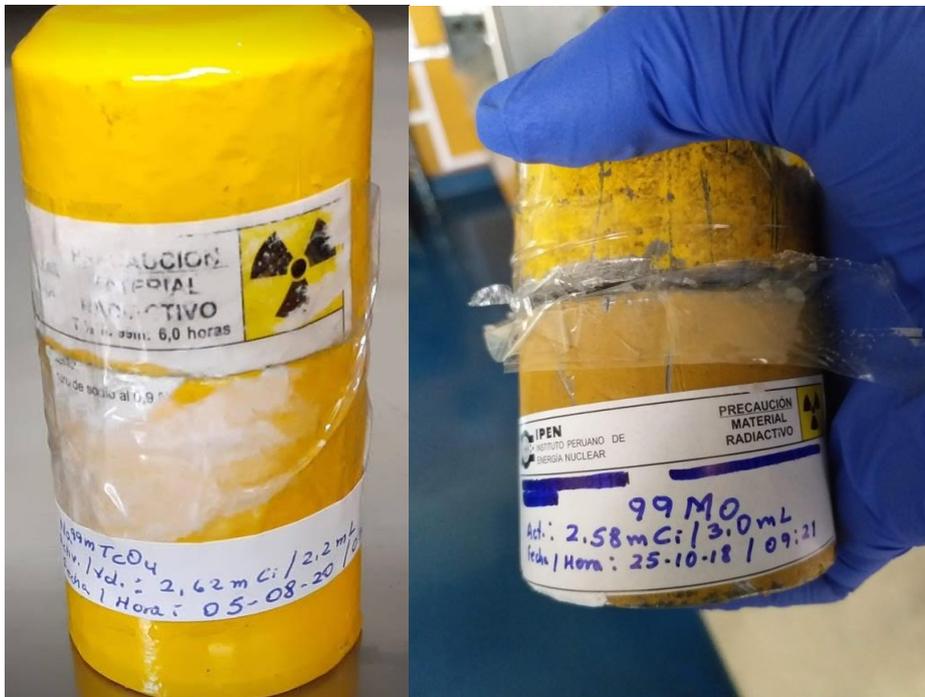
**Imagen 10.** Equipo de filtración compuesto por matraz Kitasato de 250ml, porta filtro poroso de 47 mm de diámetro sin esmerilar, embudo de filtración graduado de 200 ml, pinza de aluminio anodizado color azul, tapón de silicona, manguera de conexión a bomba de vacío



**Imagen 11.** Tubos cónicos para centrífuga de polipropileno de 50ml Sarstedt y viales de vidrio de 10ml de capacidad



**Imagen 12.** Blindaje de plomo de muestra de  $^{99}\text{Mo}$  calibrada y producida por la Planta de Producción de radioisótopos del Instituto Peruano de Energía Nuclear



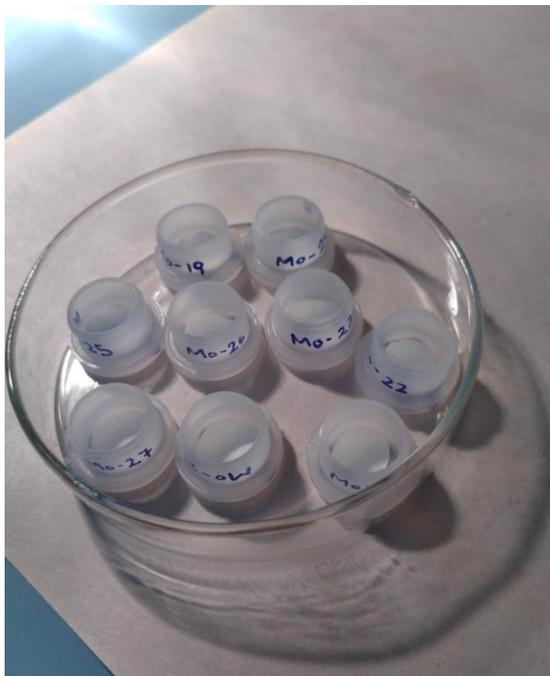
**Imagen 13.** Columna cromatográfica conectada al sistema de vacío



**Imagen 14.** Dosímetro TLD Harshaw modelo 8825 usado para medición de dosis absorbida (como dosis equivalente) en un contexto de protección radiológica al operario



**Imagen 15.** Tapas de polietileno de alta densidad, soporte de muestras para posterior secado e irradiación



**Imagen 16.** Secado de muestras de soluciones de eluido de pertecnetato de sodio  $\text{NaTcO}_4$  con lámpara de secado infrarrojo para análisis de aluminio por activación neutrónica



**Imagen 17.** Medición de pH en multiparámetro Hanna modelo HI 255 con un electrodo de vidrio combinado



**Alfa Aesar**

## Certificate of analysis

Product No.: 46065  
Product: Aluminum oxide, super activated, acidic, Grade I  
Lot No.: Q21A032

Appearance	White, free flowing powder
Activity	According to Brockman
Melting point	> 2046 °C
Odor	None
pH	4.5 ± 0.5 (5% aqueous slurry)
Exchange w/Methylene Blue	None
Exchange w/Orange GG	None
Bulk density	0.8-0.9 g/cc
Particle distribution	50-200 µm
Surface area (BET)	200 m <sup>2</sup> /g
Water soluble matter	< 0.1 %

This document has been electronically generated and does not require a signature.

Order our products online [www.alfa.com](http://www.alfa.com)

**ThermoFisher**  
SCIENTIFIC

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de revisión 14-feb-2020

Número de Revisión 2

### SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

**Nombre Del Producto** Aluminum oxide, super activated, acidic, Grade I

**Cat No. :** 46065

**Nº. CAS** 1344-28-1

**Sinónimos** Aluminum oxide; Morin Dyed.

**Uso recomendado** Productos químicos de laboratorio.

**Usos desaconsejados** Alimentos, drogas, pesticidas o productos biocidas.

**Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

#### Company

Alfa Aesar  
Thermo Fisher Scientific Chemicals, Inc.  
30 Bond Street  
Ward Hill, MA 01835-8099  
Tel: 800-343-0660  
Fax: 800-322-4757  
**Email:** tech@alfa.com  
www.alfa.com

#### **Emergency Telephone Number**

Durante el horario normal (de lunes a viernes de 8 am a 7 pm, hora), llame al (800) 343 a 0660.  
Después de horas de oficina, llame Carechem 24 al (866) 928-0789.

### SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

#### Clasificación

Classification under 2012 OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200)

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

#### Elementos de la etiqueta

No se requiere.

#### Peligros no clasificados de otra manera (HNOC)

Ninguno identificado

### SECCIÓN 3: Composición/Información sobre los componentes

Componente	Nº. CAS	Porcentaje en peso
Oxido de aluminio	1344-28-1	100

#### SECCIÓN 4: Primeros auxilios

<b>Contacto con los ojos</b>	Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Consultar a un médico.
<b>Contacto con la piel</b>	Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos. Consultar a un médico inmediatamente si se producen síntomas.
<b>Inhalación</b>	Transportar a la víctima al exterior. Consultar a un médico inmediatamente si se producen síntomas.
<b>Ingestión</b>	Limpiar la boca con agua y beber a continuación abundante agua. Consultar a un médico si se producen síntomas.
<b>Síntomas y efectos más importantes</b>	Ninguno razonablemente predecible.
<b>Notas para el médico</b>	Tratar los síntomas

#### SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

**Medios de extinción no apropiados** No hay información disponible

**Punto de Inflamación** No hay información disponible  
**Método -** No hay información disponible

**Temperatura de autoignición** No hay información disponible

**Limites de explosión**

**Superior** No hay datos disponibles

**Inferior** No hay datos disponibles

**Sensibilidad a impactos mecánicos** No hay información disponible

**Sensibilidad a descargas estáticas** No hay información disponible

**Peligros específicos que presenta el producto químico**

Mantener el producto y el recipiente vacío alejado de fuentes de calor e ignición.

**Productos de combustión**

**peligrosos**

Ninguno conocido.

**Equipo de protección y medidas de precaución para el personal de lucha contra incendios**

Como en cualquier incendio, llevar un aparato de respiración autónomo de presión a demanda MSHA/NIOSH (aprobado o equivalente) y todo el equipo de protección necesario.

**NEPA**

**Salud**  
1

**Inflamabilidad**  
0

**Inestabilidad**  
0

**Peligros físicos**  
N/A

#### SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

<b>Precauciones personales</b>	Asegurar una ventilación adecuada. Utilizar el equipo de protección individual obligatorio. Evitar la formación de polvo.
<b>Precauciones relativas al medio ambiente</b>	No debe liberarse en el medio ambiente. Para obtener más información ecológica, ver el apartado 12.
<b>Métodos de contención y limpieza</b>	Barrer y recoger en contenedores apropiados para su eliminación. Evitar la formación de

polvo.

**SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**

<b>Manipulación</b>	Llevar equipo de protección individual/máscara de protección. Asegurar una ventilación adecuada. Evitar el contacto con la piel, los ojos o la ropa. Evitar la inhalación y la ingestión. Evitar la formación de polvo.
<b>Almacenamiento</b>	Mantener los contenedores perfectamente cerrados en un lugar fresco, seco y bien ventilado.

**SECCIÓN 8: Controles de exposición / protección personal**Pautas relativas a la exposición

Componente	ACGIH TLV	OSHA PEL	NIOSH IDLH	Mexico OEL (TWA)
Oxido de aluminio	TWA: 1 mg/m <sup>3</sup>	(Vacated) TWA: 10 mg/m <sup>3</sup> (Vacated) TWA: 5 mg/m <sup>3</sup> TWA: 15 mg/m <sup>3</sup> TWA: 5 mg/m <sup>3</sup>		TWA: 10 mg/m <sup>3</sup> TWA: 1 ppm

Legenda

**ACGIH** - American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales)  
**OSHA** Administración de Seguridad y Salud

**Medidas técnicas** Ninguna en condiciones normales de uso.

Equipo de protección personal

<b>Protección ocular y de la cara:</b>	Utilizar lentes de protección adecuados o gafas para productos químicos como se describe en las normas para la protección de los ojos y la cara de la OSHA, en 29 CFR 1910.133.
<b>Protección de la piel y el cuerpo</b>	Utilizar guantes y ropas de protección adecuados para evitar la exposición de la piel.
<b>Protección respiratoria</b>	No necesario usar equipo protector en las condiciones normales de su uso.
<b>Medidas higiénicas</b>	Manipular respetando las buenas prácticas de higiene industrial y seguridad.

**SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**

<b>Estado físico</b>	Sólido
<b>Aspecto</b>	No hay información disponible
<b>Olor</b>	Inodoro
<b>Umbral olfativo</b>	No hay información disponible
<b>pH</b>	
<b>Punto/intervalo de fusión</b>	2030 °C / 3686 °F
<b>Punto /intervalo de ebullición</b>	2977 °C / 5390.6 °F @ 760 mmHg
<b>Punto de Inflamación</b>	No hay información disponible
<b>Índice de Evaporación</b>	No es aplicable
<b>Inflamabilidad (sólido, gas)</b>	No hay información disponible
<b>Inflamabilidad o explosión</b>	
<b>Superior</b>	No hay datos disponibles
<b>Inferior</b>	No hay datos disponibles
<b>Presión de vapor</b>	insignificante
<b>Densidad de vapor</b>	No es aplicable
<b>Densidad relativa</b>	3.9700
<b>Solubilidad</b>	Insoluble en agua
<b>Coefficiente de reparto octanol: agua</b>	No hay datos disponibles
<b>Temperatura de autoignición</b>	No hay información disponible
<b>Temperatura de descomposición</b>	No hay información disponible
<b>Viscosidad</b>	No es aplicable

Fórmula molecular	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Peso molecular	101.96

### SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

Riesgo de reacción	Ninguno conocido, en base a la información facilitada.
Estabilidad	Estable en condiciones normales.
Condiciones que deben evitarse	Productos incompatibles.
Materiales incompatibles	Agentes oxidantes fuertes
Productos de descomposición peligrosos	Ninguna en condiciones normales de uso
Polimerización peligrosa	No se produce ninguna polimerización peligrosa.
Reacciones peligrosas	Ninguno durante un proceso normal.

### SECCIÓN 11: Información toxicológica

#### Toxicidad aguda

#### Información del producto Información sobre los componentes

Componente	DL50 Oral	DL50 cutánea	LC50 Inhalación
Oxido de aluminio	> 5000 mg/kg ( Rat ) (OECD Guideline 401)	No figura en la lista	> 2.3 mg/l 4 h (OECD Guideline 403)

Productos Toxicológicamente Sinérgicos No hay información disponible

#### Efectos retardados e inmediatos, así como efectos crónicos producidos por una exposición a corto y largo plazo.

Irritación	No hay información disponible
Sensibilización	No hay información disponible
Carcinogenicidad	La tabla siguiente indica si cada agencia ha incluido alguno de los componentes en su lista de carcinógenos.

Componente	Nº. CAS	IARC	NTP	ACGIH	OSHA	México
Oxido de aluminio	1344-28-1	No figura en la lista				

Efectos mutagénicos No hay información disponible

Efectos sobre la reproducción No hay información disponible.

Efectos sobre el desarrollo No hay información disponible.

Teratogenicidad No hay información disponible.

STOT - exposición única Ninguno conocido

STOT - exposición repetida Ninguno conocido

Peligro por aspiración No hay información disponible

Sintomas / efectos, agudos y retardados No hay información disponible

Información del alterador del sistema endocrino No hay información disponible

Otros efectos adversos No se han estudiado completamente las propiedades toxicológicas.

### SECCIÓN 12: Información Ecológica

#### Ecotoxicidad

Persistencia/ Degradabilidad No hay información disponible

Bioacumulación No hay información disponible.

Movilidad No hay información disponible.

### SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

Métodos de eliminación de los desechos Quienes generen residuos químicos deberán determinar si los productos químicos desechados se clasifican como residuos peligrosos. Los generadores de residuos químicos deberán consultar también las normativas locales, regionales y nacionales relativas a residuos peligrosos con el fin de asegurar una clasificación completa y exacta.

### SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

DOT No regulado  
 .TDG No regulado  
 IATA No regulado  
 IMDG/IMO No regulado

### SECCIÓN 15: Información reglamentaria

#### United States of America Inventory

Componente	Nº. CAS	TSCA	TSCA Inventory notification - Active/Inactive	TSCA - EPA Regulatory Flags
Oxido de aluminio	1344-28-1	X	ACTIVE	-

#### Legenda:

TSCA - Toxic Substances Control Act, (40 CFR Part 710)

X - Incluido

'-' - No listado

TSCA 12 (b) - Avisos de exportación No es aplicable

#### Inventarios internacionales

Canadá (DSL/NDSL), Europa (EINECS/ELINCS/NLP), Filipinas (PICCS), Japan (ENCS), Australia (AICS), China (IECSC), Korea (ECL).

Componente	Nº. CAS	DSL	NDSL	EINECS	PICCS	ENCS	AICS	IECSC	KECL
Oxido de aluminio	1344-28-1	X	-	215-691-6	X	X	X	X	KE-01012

#### Reglamentaciones Federales

##### SARA 313

Componente	Nº. CAS	Porcentaje en peso	SARA 313 - % valores umbral
Oxido de aluminio	1344-28-1	100	1.0

Categorías de riesgos SARA 311/312 Para más información, ver la sección 2

CWA (Ley del agua limpia, Clean Water Act) No es aplicable

Ley del Aire Limpio No es aplicable

OSHA - Administración de Seguridad y Salud No es aplicable

CERCLA No es aplicable

Proposición 65 de California Este producto no contiene ninguna sustancia química de la Proposición 65.

**Normativas estatales de derecho a la información de los EE.UU.**

Componente	Massachusetts	Nueva Jersey	Pennsylvania	Illinois	Rhode Island
Oxido de aluminio	X	X	X	-	X

**Departamento de Transporte de EE.UU.**

Cantidad Reportable (RQ): N  
 Contaminante marino DOT N  
 DOT Severe Marine Pollutant N

Departamento de Seguridad Nacional de EE.UU. Este producto no contiene ningún ingrediente de DHS.

Otras regulaciones internacionales.

México - Grado No hay información disponible

**SECCIÓN 16: Otra información**

Preparado por Departamento de seguridad del producto  
 Email: tech@alfa.com  
 www.alfa.com

Fecha de revisión 14-feb-2020

Fecha de impresión 14-feb-2020

Resumen de la revisión SDS authoring systems update, replaces ChemGes SDS No. 1344-28-1/1.

**Descargo de responsabilidad**

La información facilitada en esta Ficha de Datos de Seguridad es correcta, a nuestro leal saber y entender, en la fecha de su publicación. Dicha información está concebida únicamente como guía para la seguridad en la manipulación, el uso, el procesamiento, el almacenamiento, el transporte, la eliminación y la liberación, no debiendo tomarse como garantía o especificación de calidades. La información se refiere únicamente al material específico mencionado y puede no ser válida para tal material usado en combinación con cualesquiera otros materiales o en cualquier proceso salvo que se especifique expresamente en el texto

**Fin de la FDS**

# Anexo J: Certificado de análisis de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-05nm

18/3/2020

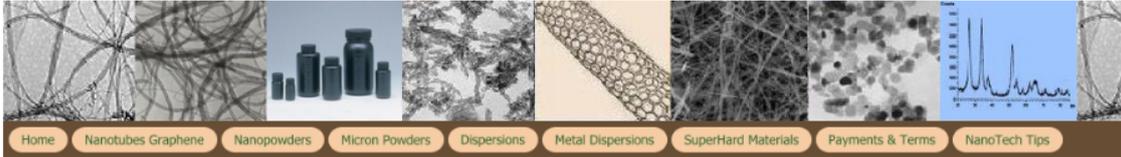
Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, 99.99%, 5nm, Hydrophilic)

My Account Cart Search Products



**US Research Nanomaterials, Inc**

The Advanced Nanomaterials Provider | Phone: 832-460-3661 Email: service@us-nano.com | Houston, TX USA



## Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, 99.99%, 5nm, Hydrophilic)

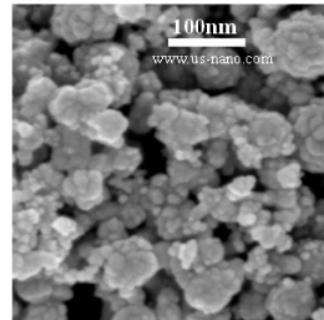
\$39/5g  
\$69/25g  
\$148/100g  
\$280/500g  
\$480/1kg

\$169/25g-Dry powder - PVP Coated for Water Dispersion  
\$169/25g-Dry powder - PVP Coated for Ester Dispersion  
\$169/25g-Dry powder - PVP Coated for Ethanol Dispersion  
\$169/25g-Dry powder - Silicon Oil Coated-Hydrophobic  
\$169/25g-Dry powder - Oleic Acid Coated-Hydrophobic  
\$169/25g-Dry powder - Stearic Acid Coated-Hydrophobic  
\$269/25g-Dry powder - Amino Acid Coated  
\$169/25g-Dry powder - Silane Coupling Agent Coated  
\$169/25g-Dry powder - Mineral Oil Coated-Hydrophobic

\$280/120ml-20wt% fully dispersed in Water  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Ethanol  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in NMP  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Toluene  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Ethylene Glycol (EG)  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Mineral Oil (MO)  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Silicone Oil (SO)  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in DMSO  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Isopropanol (IPA)  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Kerosene  
\$598/120ml-20wt% fully dispersed in Propylene glycol (PG) / 1, 2-Propanediol / Methylene glycol  
\$695/120ml-20wt% fully dispersed in Tetrahydrofuran (THF)  
\$580/120ml-20wt% fully dispersed in Acetone  
\$198/15ml-20wt% fully dispersed in Acetone

Please [contact us](#) for quotes on larger quantities.  
**Stock #:** US3007

Aluminum Oxide Nanopowder (gamma)  
Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Purity: 99.99%  
Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) APS: 5 nm - very narrow particle size range  
Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) SSA: 250-480m<sup>2</sup>/g  
Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Morphology: nearly spherical  
Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Color: white  
Specific heat capacity: 880 J/(Kg-K)  
Density: 3890 Kg/m<sup>3</sup>  
Bulk Density: 0.18g/ml  
Loss on drying:1.9wt%  
Loss on ignition:3.2wt%  
PH: 6.5-7.5



Order  
5g (add \$39)  
Quantity  
1

Add To Cart

Aluminum Oxide Nanoparticles (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gamma) Certificate of Analysis						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca	Fe	K	Na	Mn	Si
99.99%	≤1ppm	≤18ppm	≤29ppm	≤35ppm	≤1.2ppm	≤16ppm

**Aluminum Oxide Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Product Features:**  
US3023 g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with small size, high activity and low melting temperature, it can be used for producing synthetic sapphire with the method of thermal melting techniques; the g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with large surface area and high catalytic activity, it can be made into microporous spherical structure or honeycomb structure of catalytic materials. These kinds of structures can be excellent catalyst carriers. If used as industrial catalysts, they will be the main materials for petroleum refining, petrochemical and automotive exhaust purification. In addition, the g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can be used as analytical reagent.

**Aluminum Oxide Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Applications:**  
1. transparent ceramics: high-pressure sodium lamps, EP-ROM window; 2. cosmetic filler; 3. single crystal, ruby, sapphire, yttrium aluminum garnet; 4. high-strength aluminum oxide ceramic, C substrate, packaging materials, cutting tools, high purity crucible, winding axle, bombarding the target, furnace tubes; 5. polishing materials, glass products, metal products, semiconductor materials, plastic, tape, grinding belt; 6. paint, rubber, plastic wear-resistant reinforcement, advanced waterproof material; 7. vapor deposition materials, fluorescent materials, special glass, composite materials and resins; 8. catalyst, catalyst carrier, analytical reagent; 9. aerospace aircraft wing leading edge.

**Aluminum Oxide Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Dosage:**  
Recommended dosage is usually 1 to 5%, users should be based on different systems to test, and then determine the best dosage for the best use.

Aluminum Oxide Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [SDS](#)  
 Aluminum Oxide Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [X-Ray](#)  
[How to Disperse Nanoparticles / Nanopowders?](#)

**Related Products** (please click on links to view details)

[Alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Spherical Powder / Aluminum Oxide Spherical Powder Alpha\\_800nm](#)  
[Alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder / Aluminum Oxide Powder Alpha\\_500nm\\_800nm\\_1000nm](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_alpha\\_99+%,\\_80nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_alpha\\_High Purity\\_99.9%\\_135nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_alpha\\_High Purity\\_99.9%\\_200nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_alpha\\_High Purity\\_99.9%\\_300nm\)](#)  
[Alpha Aluminum Oxide Nanoparticles Coated with Aluminic Ester](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_gamma\\_99.99%\\_5nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_gamma\\_99+%,\\_20nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_gamma\\_99.5%\\_80nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_80%\\_alpha / 20%\\_gamma\\_99.9%\\_50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_50%\\_alpha / 50%\\_gamma\\_99.9%\\_50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_20%\\_alpha / 80%\\_gamma\\_99.9%\\_50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Amorphous\\_50nm\\_Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 93wt%\\_H<sub>2</sub>O 6-7wt%\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>\\_99.9%\\_10nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>\\_99.9%\\_50nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>\\_99.9%\\_100nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Alpha\\_20wt%\\_30nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder Ethanol Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Alpha\\_20wt% in Ethanol\\_80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder NMP Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Alpha\\_20wt% in NMP\\_80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder Mineral Oil Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Alpha\\_20wt% in Mineral Oil\\_80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gamma\\_20wt%\\_10nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gamma\\_20wt%\\_30nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in 2-Propanol \(Gamma 15nm 10wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in 1,2-Propanediol \(Gamma 15nm 20wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in Ethylene Glycol \(Gamma 15nm 20wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles Ethanol Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Gamma\\_20wt% in Ethanol\\_5-80nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles NMP Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Gamma\\_20wt% in NMP\\_5-80nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles Mineral Oil Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\\_Gamma\\_20wt% in Mineral Oil\\_5-80nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanoparticles 20wt% Water Dispersion\\_99.9%\\_10nm](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanoparticles 20wt% Ethanol Dispersion\\_99.9%\\_10nm](#)  
[Zirconia Toughened Alumina \(ZTA\) Nanopowder / ZTA Nanoparticles](#)  
[How to Disperse Nanoparticles? Nanoparticles Surfactant / Nanopowder Dispersant](#)

# Anexo K: Certificado de análisis de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-80nm

18/3/2020

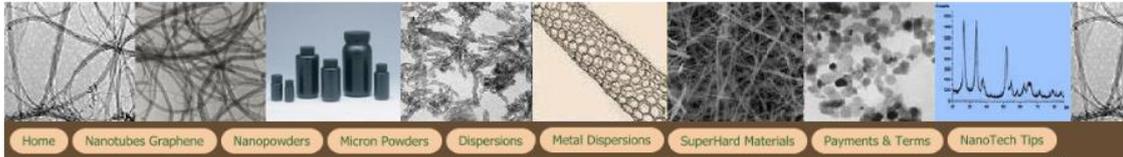
Aluminum Oxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, High Purity >99.5%, 80nm)

My Account Cart  Search Products



**US Research Nanomaterials, Inc**

The Advanced Nanomaterials Provider | Phone: 832-460-3661 Email: [service@us-nano.com](mailto:service@us-nano.com) | Houston, TX USA

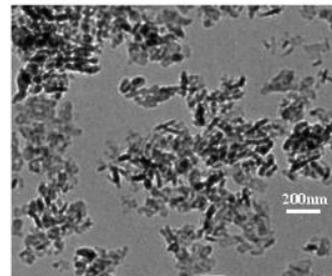


## Aluminum Oxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, High Purity >99.5%, 80nm)

\$45/25g  
\$99/100g  
\$239/500g  
\$392/1kg

\$138/25g with 1-2wt% PVP Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Silicon Oil Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Oleic Acid Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Stearic Acid Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Silane Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Mineral Oil Coated  
\$138/25g with 1-2wt% Amino Acid Coated

\$280/120ml-20wt% fully dispersed in Water  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Ethanol  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in NMP  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Toluene  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Ethylene Glycol (EG)  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Mineral Oil (MO)  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Acetone  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Silicone Oil (SO)  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in DMSO  
\$380/120ml-20wt% fully dispersed in Isopropanol / IPA / 2-Propanol  
\$680/120ml-20wt% fully dispersed in Isosrene  
\$598/120ml-20wt% fully dispersed in Propylene glycol (PG) / 1, 2-Propanediol / Methylene glycol  
\$695/120ml-20wt% fully dispersed in Tetrahydrofuran (THF)



Order

Quantity

[Add To Cart](#)

Please [contact us](#) for quotes on larger quantities.

Stock #: US3024

Aluminum Oxide Nanopowder (gamma-100% gamma phase, high purity)-Hydrophilic  
Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Purity: >99.9%  
Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) APS: 80 nm  
Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) SSA: 58 m<sup>2</sup>/g  
Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Morphology: nearly spherical  
Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Color: white

Aluminum Oxide Nanoparticles (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Gamma) Certificate of Analysis						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca	Fe	Cr	Na	Mn	Co
>99.9%	≤18ppm	≤35ppm	≤4ppm	≤30ppm	≤3ppm	≤2ppm

### Aluminum Oxide Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Product Features:

US3023 g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with small size, high activity and low melting temperature, it can be used for producing synthetic sapphire with the method of thermal melting techniques; the g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with large surface area and high catalytic activity, it can be made into microporous spherical structure or honeycomb structure of catalytic materials. These kinds of structures can be excellent catalyst carriers. If used as industrial catalysts, they will be the main materials for petroleum refining, petrochemical and automotive exhaust purification. In addition, the g-phase nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can be used as analytical reagent.

### Aluminum Oxide Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Applications:

1. transparent ceramics: high-pressure sodium lamps, EP-ROM window; 2. cosmetic filler; 3. single crystal, ruby, sapphire, sapphire, yttrium aluminum garnet; 4. high-strength aluminum oxide ceramic, C substrate, packaging materials, cutting tools, high purity crucible, winding axle, bombarding the target, furnace tubes; 5. polishing materials, glass products, metal products, semiconductor materials, plastic, tape, grinding belt; 6. paint, rubber, plastic wear-resistant reinforcement, advanced waterproof material; 7. vapor deposition materials, fluorescent materials, special glass, composite materials and resins; 8. catalyst, catalyst carrier, analytical reagent; 9. aerospace aircraft wing leading edge.

### Aluminum Oxide Nanopowder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Dosage:

Recommended dosage is usually 1 to 5%, users should be based on different systems to test, and then determine the best dosage for the best use.

[Aluminum Oxide Nanopowder \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) SDS](#)

[Aluminum Oxide Nanopowder \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) X-Ray](#)

[How to Disperse Nanoparticles / Nanopowders?](#)

[Related Products](#) (please click on links to view details)

[Alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Spherical Powder / Aluminum Oxide Spherical Powder Alpha, 800nm](#)

<https://www.us-nano.com/inc/sdetail/2614>

1/3

[Alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder / Aluminum Oxide Powder Alpha, 500nm, 800nm, 1000nm](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alpha, 99+%, 80 nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alpha, High Purity 99.9%, 135nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alpha, High Purity 99.9%, 200nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alpha, High Purity 99.9%, 300nm\)](#)  
[Alpha Aluminum Oxide Nanoparticles Coated with Aluminic Ester](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, 99.99%, 5nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, 99+%, 20nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gamma, 99.5% 80nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 80% alpha / 20% gamma, 99.9%, 50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 50% alpha / 50% gamma, 99.9%, 50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20% alpha / 80% gamma, 99.9%, 50nm\)](#)  
[Alumina Nanoparticles \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Amorphous, 50nm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 93wt%, H<sub>2</sub>O 6-7wt%\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>, 99.9%, 10nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>, 99.9%, 50nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanopowder / Nanoparticles \(Al\(OH\)<sub>3</sub>, 99.9%, 100nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Alpha, 20wt%, 30nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder Ethanol Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Alpha, 20wt% in Ethanol, 80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder NMP Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Alpha, 20wt% in NMP, 80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanopowder Mineral Oil Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Alpha, 20wt% in Mineral Oil, 80nm-1000nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gamma, 20wt%, 10nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanopowder / Nanoparticles Water Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gamma, 20wt%, 30nm\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in 2-Propanol \(Gamma 15nm 10wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in 1, 2-Propanediol \(Gamma 15nm 20wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\) Nanoparticles Dispersion in Ethylene Glycol \(Gamma 15nm 20wt%\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles Ethanol Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gamma, 20wt% in Ethanol, 5-80nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles NMP Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gamma, 20wt% in NMP, 5-80nm\)](#)  
[Aluminum Oxide Nanoparticles Mineral Oil Dispersion \(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gamma, 20wt% in Mineral Oil, 5-80nm\)](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanoparticles 20wt% Water Dispersion, 99.9%, 10nm](#)  
[Aluminum Hydroxide Al\(OH\)<sub>3</sub> Nanoparticles 20wt% Ethanol Dispersion, 99.9%, 10nm](#)  
[Zirconia Toughened Alumina \(ZTA\) Nanopowder / ZTA Nanoparticles](#)  
[How to Disperse Nanoparticles? Nanoparticles Surfactant / Nanopowder Dispersant](#)

## Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Powder

US Research Nanomaterials, Inc. [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com)

### SAFETY DATA SHEET

Revised Date 11/7/2022

#### 1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

##### 1.1 Product identifiers

Product name: Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Powder

Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) CAS#: 1344-28-1

##### 1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses : Research

##### 1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company: [US Research Nanomaterials, Inc.](http://www.us-nano.com) 3302 Twig Leaf Lane

Houston, TX 77084

USA

Telephone: +1 832-460-3661 Fax: +1 281-492-8628

##### 1.4 Emergency telephone number

Emergency Phone # : (832) 359-7887

## 2. HAZARDS IDENTIFICATION

### 2.1 Classification of the substance or mixture

GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910 (OSHA HCS)

Eye irritation (Category 2A), H319

Respiratory system, H335

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

### 2.2 GHS Label elements, including precautionary statements

Pictogram



Signal word

Warning

Hazard statement(s)

H319 Causes serious eye irritation. H335 May cause respiratory irritation.

Precautionary statement(s)

P261 Avoid breathing dust/ fume/ gas/ mist/ vapors/ spray.

P264 Wash skin thoroughly after handling.

P271 Use only outdoors or in a well-ventilated area.

P280 Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.

P304 + P340 IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing.

P305 + P351 + P338 IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

P312 Call a POISON CENTER or doctor/ physician if you feel unwell.

P337 + P313 If eye irritation persists: Get medical advice/ attention.

P403 + P233 Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed. P405 Store locked up.

P501 Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.

2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS None

### 3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS 3.1 Substances

Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) CAS#: 1344-28-1

Hazardous components

Component: Aluminum Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Powder

Classification: Eye Irrit. 2A; STOT SE 3;

H319, H335

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

### 4. FIRST AID MEASURES

#### 4.1 Description of first aid measures

General advice

Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance. Move out of dangerous area.

If inhaled

If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Consult a physician. In case of skin contact

Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.

In case of eye contact

Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.

If swallowed

Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.

#### 4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labeling (see section 2.2) and/or in section 11

#### 4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

no data available

### 5. FIREFIGHTING MEASURES

#### 5.1 Extinguishing media

Suitable extinguishing media

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

#### 5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

The product is not flammable

#### 5.3 Advice for firefighters

Wear self contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

#### 5.4 Further information

no data available

## 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

### 6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Use personal protective equipment. Avoid dust formation. Avoid breathing vapors, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Evacuate personnel to safe areas. Avoid breathing dust. For personal protection see section 8.

### 6.2 Environmental precautions

Do not let product enter drains.

### 6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Pick up and arrange disposal without creating dust. Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.

### 6.4 Reference to other sections

For disposal see section 13.

## 7. HANDLING AND STORAGE

### 7.1 Precautions for safe handling

Avoid contact with skin and eyes. Avoid formation of dust and aerosols. Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. For precautions see section 2.2.

### 7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place.

### 7.3 Specific end use(s)

Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated

## 8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

### 8.1 Control parameters

Components with workplace control parameters

Contains no substances with occupational exposure limit values.

### 8.2 Exposure controls

Appropriate engineering controls

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday.

Personal protective equipment

Eye/face protection

Safety glasses with side-shields conforming to EN166 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).

Skin protection

For any handling steps where the substance is in particulate form or in a suspension with pure water where the substance is not solubilized, the gloves must be comprised of material that successfully passes ASTM F-1671. For any handling steps where the substance is part of a carrier liquid, other than the aqueous suspension noted in the previous paragraph, gloves must be comprised of material that successfully passes ASTM F-739 (continuous liquid contact method). Gloves must be changed before they show degradation and before the designated breakthrough time for the carrier liquid (as determined by the ASTM F-739 testing or by the manufacturer). Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.

Body Protection

Impervious clothing, The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.

Respiratory protection

The EPA mandates the use of full face respirators with minimum N100 grade cartridges if there is any risk of exposure to the dust. For nuisance exposures use type P95 (US) or type P1 (EU EN 143) particle respirator. For higher level protection use type OV/AG/P99 (US) or type ABEK-P2 (EU EN

143) respirator cartridges. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

Control of environmental exposure

Do not let product enter drains.

## 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

- a) Appearance: solid
- b) Odor: odorless
- c) Odor Threshold: no data available
- d) pH: no data available
- e) Melting point/freezing point: 2072 °C
- f) Initial boiling point and boiling range: 2977 °C
- g) Flash point: no data available
- h) Evaporation rate: no data available
- i) Flammability (solid, gas): no data available
- j) Upper/lower flammability or explosive limits: no data available k) Vapor pressure: no data available
- l) Vapor density: no data available
- m) Relative density: 3.9
- n) Water solubility: insoluble
- o) Partition coefficient - noctanol/water: no data available
- p) Auto-ignition temperature: no data available
- q) Decomposition temperature: no data available
- r) Viscosity: no data available
- s) Explosive properties: no data available

t) Oxidizing properties: no data available

## 9.2 Other safety information

no data available

## 10. STABILITY AND REACTIVITY

### 10.1 Reactivity

no data available

### 10.2 Chemical stability

Stable under recommended storage conditions.

### 10.3 Possibility of hazardous reactions

no data available

### 10.4 Conditions to avoid

no data available

### 10.5 Incompatible materials

Strong oxidizing agents, Acids, Bases

### 10.6 Hazardous decomposition products

Other decomposition products - no data available In the event of fire: see section 5

## 11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

### 11.1 Information on toxicological effects Acute toxicity

no data available

Inhalation: no data available

Dermal: no data available

Skin corrosion/irritation

no data available

Serious eye damage/eye irritation

no data available

Respiratory or skin sensitization

no data available

Germ cell mutagenicity

no data available

Carcinogenicity

no data available

Reproductive toxicity

no data available

Specific target organ toxicity - single exposure

Inhalation - May cause respiratory irritation.

Specific target organ toxicity - repeated exposure

no data available

Aspiration hazard

no data available

Additional Information

RTECS: Not available

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.

## 12.ECOLOGICAL INFORMATION 12.1 Toxicity

no data available

## 12.2 Persistence and degradability

no data available

## 12.3 Bioaccumulative potential

no data available

## 12.4 Mobility in soil

no data available

## 12.5 Results of PBT and vPvB assessment

PBT/vPvB assessment not available as chemical safety assessment not required/not conducted

## 12.6 Other adverse effects

no data available

## 13.DISPOSAL CONSIDERATIONS

### 13.1 Waste treatment methods

#### Product

Offer surplus and non-recyclable solutions to a licensed disposal company. Contact a licensed professional waste disposal service to dispose of this material.

#### Contaminated packaging

Dispose of as unused product.

#### 14. TRANSPORT INFORMATION

DOT (US)

Not dangerous goods

IMDG

Not dangerous goods

IATA

Not dangerous goods

#### 15. REGULATORY INFORMATION

SARA 302 Components

SARA 302: No chemicals in this material are subject to the reporting requirements of SARA Title III, Section 302.

SARA 313 Components

SARA 313: This material does not contain any chemical components with known CAS numbers that exceed the threshold (De Minimis) reporting levels established by SARA Title III, Section 313. SARA 311/312 Hazards

#### 16. OTHER INFORMATION

Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.

Eye Irrit. Eye irritation

H319 Causes serious eye irritation.

H335 May cause respiratory irritation.

STOT SE Specific target organ toxicity - single exposure HMIS Rating

Health hazard: 1

Flammability: 0

Physical Hazard 0

NFPA Rating

Health hazard: 1

Fire Hazard: 0

Reactivity Hazard: 0

Further information

The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product.

Employers should use this information only as a supplement to other information gathered by them, and should make independent judgment of suitability of this information to ensure proper use and protect the health and safety of employees. This information is furnished without warranty, and any use of the product not in conformance with this Safety Data Sheet, or in combination with any other product or process, is the responsibility of the user.

# Anexo M: Reporte de dosimetría personal



SERV/ Metrología y Dosimetría de Radiaciones  
LSCD / Laboratorio de Dosimetría Externa

Reporte de Dosis: 051-2019  
Fecha de emisión: 12-07-2019

## REPORTE DE DOSIMETRÍA PERSONAL TLD

CÓDIGO		INSTITUCIÓN - ÁREA		PROCESO	PAG.
0001	0015	IPEN - Investigación y Desarrollo		P20190709-MDRA	1/2

Cod. Usuario	Nombre	SEXO	Dosis Efectiva (mSv)	Dosis Equivalente en piel (mSv)	Dosis Equivalente Cristalino (mSv)	Dosis Efectiva anual (mSv)	DOSIMETRO			
							Tipo	Rad.	Periodo	Código
00049	Baltuano Elias, Oscar Rolando	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050284a
00050	Bedregal Salas, Patricia	F	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050285a
00050	Bedregal Salas, Patricia	F		0,00			E	F	Jun-19	a0001226a
00051	Cunya Carmona, Eduardo	M		0,00			E	F	Jun-19	a0001229a
00051	Cunya Carmona, Eduardo	M	0,00	0,00	0,00	0,29	C	F	Jun-19	a0050286a
00052	Gago Campusano, Javier Jorge	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050287a
00053	Hernandez Paravecino, Yuri	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050288a
00055	Mendoza Barrientos, Mario Felix	M		0,00			E	F	Jun-19	a0001233a
00055	Mendoza Barrientos, Mario Felix	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050289a
00056	Mendoza Hidalgo, Pablo	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050290a
00056	Mendoza Hidalgo, Pablo	M		0,00			E	F	Jun-19	a0001238a
00057	Olivera Vilca, Paula Ofelia	F		0,00			E	F	Jun-19	a0001242a
00057	Olivera Vilca, Paula Ofelia	F	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050292a
00058	Ubillus Namihas, Marco	M	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050293a
00058	Ubillus Namihas, Marco	M		0,00			E	F	Jun-19	a0001244a
00129	Poma Llantoy, Victor Raul	M		0,00			E	F	Jun-19	a0001245a
00129	Poma Llantoy, Victor Raul	M	0,00	0,00	0,00	0,56	C	F	Jun-19	a0050294a
00149	Cáceres Rivero, Cynthia	F		0,00			E	F	Jun-19	a0001246a
00149	Cáceres Rivero, Cynthia	F	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050295a
00150	Vasquez Atachagua, Silvia	F		0,00			E	F	Jun-19	a0001248a
00150	Vasquez Atachagua, Silvia	F	0,00	0,00	0,00	0,00	C	F	Jun-19	a0050296a
00197	Escalante Prado, Luis Alberto	M	0,00	0,00		0,00	C	F	Jun-19	a0001168a
00198	Urquizo Rodríguez, Rafael	M	0,00	0,00		0,00	C	F	Jun-19	a0001169a

Dosis < 0,10 mSv serán reportados como cero.

Tipo: Rad:  
C: Cuerpo Entero. F: Fotones  
E: Extremidades. N: Neutrones

 <b>LIC. ROSAL CASTILLO DUEÑAS</b> <b>FÍSICO</b> Responsable Técnico Laboratorio de dosimetría	 INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR EQUIPO TÉCNICO DE METROLOGÍA Y DOSIMETRÍA DE LAS RADIACIONES Responsable Técnico TMA MDRA
--	---



## Anexo N: Cotización de generadores de <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc RADIOFARMA®

**COTIZACIÓN**  
2304 - 00121

RAZÓN SOCIAL : INSTITUTO PERUANO DE ENERGÍA NUCLEAR - IPEN  
RUC N° : 20131371293  
REFERENCIA : COTIZACIÓN GENERADOR DE TECNECIO



ITEM N°	DESCRIPCION	U.M.	CANT	MARCA	PLAZO DE ENTREGA	PRECIO UNITARIO S/ (Inc. IGV)	PRECIO TOTAL S/ (Inc. IGV)
1	GENERADOR DE Mo-99/Tc99m de columna seca RADIOFARMA®	250 mCi	1	BACOM	15 días	S/ 4,500.00	S/ 4,500.00
2	GENERADOR DE Mo-99/Tc99m de columna seca RADIOFARMA®	500 mCi	1	BACOM	15 días	S/ 6,000.00	S/ 6,000.00

RAZÓN SOCIAL : COMERSEC S.A.C.  
RUC N° : 20603680333  
REP. LEGAL : SEBASTIAN LOPEZ HENAO  
DIRECCIÓN : AV. VICTOR ANDRÉS BELAUNDE NRO. 181, San Isidro, Lima  
EJECUTIVO DE VENTAS : Fernando Soldevilla Rodríguez  
TELÉFONOS : Móvil: 960 316 435  
EMAIL : [fsoldevilla@comer-sec.com](mailto:fsoldevilla@comer-sec.com)  
FECHA : 24/04/2023

*Sebastián López Henao*

Sebastián López Henao  
CE 001383384

#### CONDICIONES COMERCIALES

LUGAR DE ENTREGA : Av. Canada Nro. 1480 - San Borja  
FOR. DE PAGO : Crédito comercial a 30 días  
VALIDEZ DE LA OFERTA : 15 días

#### CUENTAS BANCARIAS

BANCO BBVA : BBVA SOLES: 0011-0182-0100064449  
BBVA CCI SOLES: 011-182-000100064449-30  
BANCO BCP : BCP SOLES: 193-9774228-0-73  
BCP SOLES CCI: 00219300977422807314

 <b>ANEXO 2</b> <b>CERTIFICADO DE ANÁLISIS EN PROCESO</b>		Nro.: <b>TA-04-001</b> Revisión: 05
<b>NOMBRE COMERCIAL: GENERADOR MO99/TC99M DE COLUMNA SECA</b> <b>NOMBRE GENERICO: GENERADOR MO99/TC99M DE COLUMNA SECA</b> <b>FORMA FAUMACEUTICA: SOLUCION INYECTABLE ESTERIL</b>		Fecha de Vigencia Corresponde la fecha del documento que lo origina
Código Producto: 4-006		Página 1 de 1

LOTE	4-16556	N° ANÁLISIS	T-19602
------	---------	-------------	---------

DETERMINACIÓN	MÉTODO	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS	CUADERNO	PAG	ANALISTA
Aspecto	Visual	Solución transparente, incolora, libre de partículas extrañas.	CONFORME A LAS ESPECIFICACIONES	Pag/06	50	PA
Ensayo de Mo-99	Activímetro	<0.15 uCi 99Mo por mCi de 99mTc	0,07 uCi 99Mo	Pag/06	50	PA
Contenido de <sup>99m</sup> Tc	Visual	90% - 110%	100%	Pag/06	50	PA
pH	Tiras reactivas	Entre 4,5 y 7,5	5,3	Pag/37	133	GR
Identificación radionucleídica	Centelleador sólido EQUIPO: ICC-029	Fotopico en 0.140±0.001 MeV (140±1 KeV)	139 KeV	Pag/31	133	GR
Pureza radioquímica	TLC EQUIPO: ICC-017	≥95%	100%	Pag/37	133	GR
Pureza radionucleídica	Espectrómetro Gamma	Todas las impurezas entran dentro de los límites establecidos.	TODAS LAS IMPUREZAS ENTAN DENTRO DE LOS LÍMITES ESTABLECIDOS.	Pag/31	133	GR

FECHA DE INICIO	17-03-2023	FECHA DE FINALIZACIÓN	17/03/23
FECHA DE VENCIMIENTO	31-03-2023		

OBSERVACIONES:

17-03-23

DICTAMEN: **APROBADO**

RESPONSABLE:

17/03/23

FARM. PATRICIA ZUMBRA  
 Laboratorio de Icon S.A.C.  
 RUC: 20101011755

*[Firma]*

*[Firma]*  
**F. Cristina Espejo V.**  
 CQFP: 07714  
 Director Técnico  
 COMERSEC S.A.C.

Fecha de Impresión: 17/03/2023 7:20

Escaneado con CamScanner



## LABORATORIOS BACON S.A.I.C.

Reactivos de diagnóstico "in vivo" e "in vitro"

Radiofarmacos - Productos Químicos

Uruguay 136 (B1603DFD) Villa Martelli - Buenos Aires - Argentina

Tel: 4709-0171 (ROTATIVA) 4709-0170 / 4709-6546

Fax: 5411 4709-2636 e - mail: bacon@bacon.com.ar

### NOTIFICACIÓN DE PRODUCCION GENERADOR DE TECNECIO TC 99M DE COLUMNA SECA PARA GENERAR TC 99M ESTÉRIL 7.4 a 74.0 GBq

USUARIO: **COMERSEC S.A.C.**

FECHA: 15/03/2023

FECHA DE CALIBRACION: 20/03/2023

LOTE: 4-16556

VENCIMIENTO: 31/03/2023

Especificaciones de Controles de proceso:

Control de Elución: El equipo eluye correctamente una solución transparente, incolora, libre de partículas extrañas.

Molibdeno en eluido:  $< 0.15 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo}/\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$

Contenido de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ : Entre 90 y 110%

Según USP 42 - Resultados en CoA de producto

Recomendaciones:

- Mantenga el generador en estado de sequedad asegurando que todo el eluido ha pasado, de ser necesario coloque otro frasco de vacío .
- Evite colocar el frasco protector seguidamente al retiro del frasco de eluyente, espere a estabilizar las presiones internas. (Puede desplazar el frasco protector hacia la columna alterando el rendimiento de elución) .
- De ser posible, eluya el generador el domingo a fin de mejorar la actividad específica el lunes, esto mejora los rendimientos de marcación.

Guía de Problemas:

- No pasa líquido: utilizar otro frasco evacuado, colocarlo centrado.
- Pasa líquido con poca actividad : coloque uno o dos frascos evacuados para eliminar restos de líquido, espere 30 min para la oxidación del Tecnecio a pertecnecio. Vuelva a eluir.

Emergencias radioquímicas: +54 911 6744 1869

  
**F. Cristina Espejo V.**  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

  
Pablo Apolinario  
Responsable de Prod. Radioquímica  
  
COMERSEC S.A.C.  
PUC 3071680393  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.P. 001383134



## LABORATORIOS BACON S.A.I.C.

Uruguay 136 (B1603DFD) - Villa Martelli - Buenos Aires - Argentina  
Tel.: (5411) 4709-0171 (Rotativas) - Fax: (5411) 4709-2636  
www.bacon.com.ar - bacon@bacon.com.ar

REFERENCIA: FICHA TÉCNICA  
GENERADOR DE TECNECIO  
<sup>99m</sup>Tc DE COLUMNA SECA

- ❖ **NOMBRE COMERCIAL: GENERADOR DE TECNECIO <sup>99m</sup>Tc DE COLUMNA SECA**
  
- ❖ PRODUCTO PARA DIAGNÓSTICO / TERAPIA DE USO "IN VIVO".
  
- ❖ **EMPAQUE PRIMARIO / PRESENTACIÓN:** un generador de <sup>99m</sup>Tc de columna seca con 10 viales de solución fisiológica por 5 mL estéril y 14 viales para elución evacuados estériles de 20 mL de capacidad.
  
- ❖ **EMBALAJE:** el generador se encuentra contenido dentro de recipiente plástico blanco con tapa de cierre perfecto inviolable. Todo este acondicionamiento permite asegurar sus condiciones durante el transporte y cumple con las normativas AR 10.16.1 revisión 2 Normativa para el Transporte de material radiactivo.
  
- ❖ **TASA DE DOSIS:** dentro de las especificaciones establecidas por las normativas de transporte y por IATA para el traslado de este tipo de mercancías.
  
- ❖ **ROTULADO:** En el rótulo se consigna toda la información referida a: isótopo radiactivo, actividad a la fecha de calibración y la fecha de calibración, nombre del producto, lote, fecha de vencimiento, leyenda "Venta exclusiva a unidades de Medicina Nuclear", forma de administración, Logo de material radiactivo y datos identificatorios de Laboratorios Bacon SAIC con número de certificado ante la ANMAT. En cuanto al rotulado externo cumple las normas de rotulado para este tipo de mercancías establecido por IATA y la ARN (IT, etc). Tanto el generador como los viales de

Confidencial

  
COMERSEC S.A.C.  
RUC 20603680333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I.E. 001383384

  
F. Cristina Espejo V.  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

1/3



## LABORATORIOS BACON S.A.I.C.

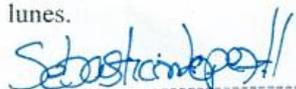
Uruguay 136 (B1603DFD) - Villa Martelli - Buenos Aires - Argentina  
Tel.: (5411) 4709-0171 (Rotativas) - Fax: (5411) 4709-2636  
www.bacon.com.ar - bacon@bacon.com.ar

solución fisiológica y los evacuados cuentan con la información de lote y fecha de vencimiento.

- ❖ **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS: EL PRODUCTO TERMINADO CUMPLE CON LAS ESPECIFICACIONES ESTABLECIDAS EN LA FARMACOPEA DE LOS ESTADOS UNIDOS (USP) DE CURSO VIGENTE.**

Identificación del Radionucleído <sup>99</sup> Mo	
Pureza Radionucleídica	
Nucleído	Especificación
<sup>131</sup> I / <sup>99</sup> Mo	< 5 x 10 <sup>-5</sup>
<sup>103</sup> Ru / <sup>99</sup> Mo	< 5 x 10 <sup>-5</sup>
Σβ / <sup>99</sup> Mo	< 5 x 10 <sup>-5</sup>
Σα / <sup>99</sup> Mo	< 6 x 10 <sup>-8</sup>
Σγ / <sup>99</sup> Mo	< 5 x 10 <sup>-7</sup>
Pureza Radioquímica	
Producto	Especificación
<sup>99</sup> MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / <sup>99</sup> Mo	> 95%

- Inspección del empaque: al momento del despacho cumple con especificaciones.
- Certificado de análisis: Al momento de recepción se les enviará por mail el certificado del lote que estén recibiendo.
- Fecha de vencimiento: la misma se consigna en la factura pro forma así como en el rotulado del producto
- Aspecto: solución acuosa límpida e incolora libre de partículas.
- pH: 4,5 a 7,5
- Pureza radioquímica: mayor al 95%
- Pureza química Aluminio <sup>3+</sup> <10ppm
- Determinación de la actividad > al 90% de la actividad solicitada al primer lunes.

  
COMERSEC S.A.C.  
RUC 20503680333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I. 001393304

Confidencial

  
2/3  
J.F. Cristina Espejo V.  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.



## LABORATORIOS BACON S.A.I.C.

Uruguay 136 (B1603DFD) - Villa Martelli - Buenos Aires - Argentina  
Tel.: (5411) 4709-0171 (Rotativas) - Fax: (5411) 4709-2636  
www.bacon.com.ar - bacon@bacon.com.ar

- ❖ USO: Para la producción de solución de Pertecneciato de Sodio <sup>99m</sup>Tc estéril apirógena. La solución obtenida se emplea para la exploración del cerebro, de la tiroides, de las glándulas salivales, estudios cardiovasculares, exploración de vejiga, estudios del lecho vascular y exploración del Sistema de drenaje Nasolacrimal.
  
- ❖ ADVERTENCIAS: Los radiofármacos deben ser utilizados por un profesional responsable ante la Autoridad Regulatoria Nuclear en el manejo de material radiactivo.  
VENTA EXCLUSIVA A UNIDADES DE MEDICINA NUCLEAR.
  
- ❖ CONDICIONES DE CONSERVACIÓN: Mantener a temperatura ambiente en blindaje adecuado.

Confidencial

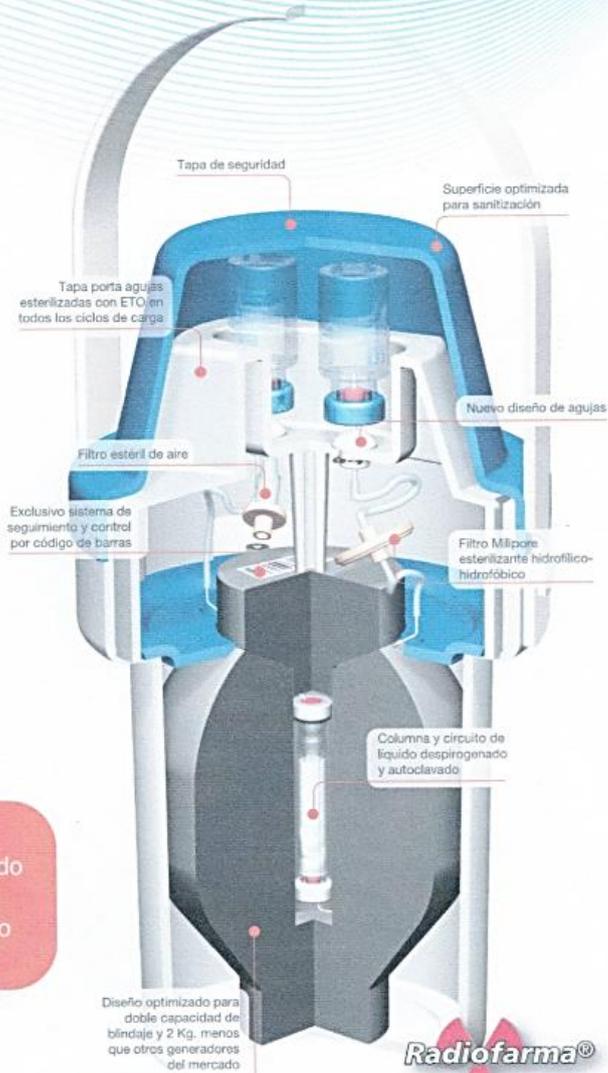
  
COMERSEC S.A.C.  
RUC 20603630333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.E. 001383384

  
Q.F. Cristina Espejo V.  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

# Generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ de columna seca

Producto de Diagnóstico de uso In Vivo. Para obtener solución estéril  $^{99\text{m}}\text{Tc}$

CON SUPERFICIES  
SANITIZABLES



Ante cualquier inquietud, personal especialmente calificado en Seguridad Radiológica y Buenas Prácticas de Laboratorio podrá asesorarlo. Contáctenos.

Radiofarma®



LABORATORIOS BACON S.A.I.C.

Tel +54(11) 4709-2636 | Fax +54(11) 4709-2636 | www.bacon.com.ar | ver@bacon.com.ar

RUC 20903680333

Juan Sebastian Lopez Henao

Gerente General

C.E. 001822394

Q.F. Cristina Espejo V.

COFP 07714  
Director Técnico  
COMETSEC S.A.C.

# Generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ de columna seca

## DECAIMIENTO DEL $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ( $T_{1/2} = 6 \text{ HS}$ ) ( $A_t = A_0 \times F$ )

Horas	$F = e^{-\lambda t}$	Horas	$F = e^{-\lambda t}$	Horas	$F = e^{-\lambda t}$
0,5	0,94	8,5	0,38	16,5	0,15
1	0,89	9	0,36	17	0,14
1,5	0,84	9,5	0,34	17,5	0,13
2	0,79	10	0,32	18	0,13
2,5	0,75	10,5	0,30	18,5	0,12
3	0,71	11	0,28	19	0,11
3,5	0,67	11,5	0,27	19,5	0,11
4	0,64	12	0,25	20	0,10
4,5	0,60	12,5	0,24	20,5	0,09
5	0,56	13	0,22	21	0,09
5,5	0,53	13,5	0,21	21,5	0,08
6	0,50	14	0,20	22	0,08
6,5	0,47	14,5	0,19	22,5	0,08
7	0,45	15	0,18	23	0,07
7,5	0,42	15,5	0,17	23,5	0,07
8	0,40	16	0,16	24	0,06

## CURVA DE ELUCIÓN

Actividad de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  eluible como fracción de la actividad de  $^{99}\text{Mo}$ , en función del tiempo transcurrido desde la elución precedente.  
( $B_t = A_t \times F$ )

Tiempo desde la última elución (hs)	$F = B/A$	Tiempo desde la última elución (hs)	$F = B/A$
1	0,096	25	0,891
2	0,182	26	0,897
3	0,259	27	0,904
4	0,329	28	0,909
5	0,392	29	0,914
6	0,449	30	0,919
7	0,500	31	0,923
8	0,546	32	0,927
9	0,587	33	0,930
10	0,624	34	0,933
11	0,658	35	0,936
12	0,688	36	0,938
13	0,715		
14	0,740		
15	0,762	48	0,951
16	0,782		
17	0,800	60	0,956
18	0,816		
19	0,831	72	0,959
20	0,844		
21	0,856	96	0,960
22	0,866		
23	0,876	>96	0,960
24	0,884		

## DECAIMIENTO DEL $^{99}\text{Mo}$ ( $T_{1/2} = 66 \text{ HS}$ ) ( $A_t = A_0 \times F$ )

Horas	$F = e^{-\lambda t}$	Horas	$F = e^{-\lambda t}$	Días	$F = e^{-\lambda t}$
1	0,989	25	0,769	0	1,000
2	0,979	26	0,761	1	0,777
3	0,969	27	0,753	2	0,604
4	0,959	28	0,745	3	0,469
5	0,949	29	0,737	4	0,365
6	0,939	30	0,730	5	0,284
7	0,929	31	0,722	6	0,220
8	0,919	32	0,715	7	0,171
9	0,910	33	0,707	8	0,133
10	0,900	34	0,700	9	0,103
11	0,891	35	0,692	10	0,080
12	0,882	36	0,685	11	0,063
13	0,872	37	0,678	12	0,049
14	0,863	38	0,671	13	0,038
15	0,854	39	0,664	14	0,029
16	0,845	40	0,657	15	0,023
17	0,836	41	0,650	20	0,006
18	0,828	42	0,643	25	0,002
19	0,819	43	0,637	30	0,0005
20	0,810	44	0,630		
21	0,802	45	0,623		
22	0,794	46	0,617		
23	0,785	47	0,610		
24	0,777	48	0,604		

40603183014

*Sebastián*  
**COMERSEC S.A.C.**  
 PUC 2082360333  
 Juan Sebastián López Henao  
 Gerente General  
 C.I. 407397394

*Cristina*  
**Q.F. Cristina Espejo V.**  
 CQFP 07714  
 Director Técnico  
 COMERSEC S.A.C.



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 1 de 12

### Tabla de contenidos

1. REFERENCIAS
2. FORMULA MAESTRA DEL PRODUCTO
3. MUESTREO
4. ESPECIFICACIONES
  - 4.1. Controles a Realizar Sobre la Muestra Activa
  - 4.2. Controles a Realizar Sobre la Muestra Decaída
5. ANEXOS

  
 COMERSEC S.A.C.  
 RUC 20603628333  
 Juan Sebastian Lopez Henao  
 Gerente General  
 C.I. 001339104

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2020 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado – VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión  
  
**F. Cristina Espejo V.**  
 CQFP. 07714  
 Director Técnico  
 COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.  
 RUC 20603628333  
 Juan Sebastian Lopez Henao  
 Gerente General  
 C.I. 001339104



## TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

### GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 2 de 12

#### 1. REFERENCIAS

- USP 42 NF 37 Sodium pertechnetate Tc 99m Injection, Página 4199.
- EP 10.0 "Sodium Molybdate (99Mo) Solution (fission)" Páginas 1239 y 1240 (Referencia de Punto 4.1.2.4).
- Técnicas generales LABORATORIOS BACON S.A.I.C.
- Código: 4-006

#### 2. FÓRMULA MAESTRA DEL PRODUCTO

Descripción del material	Cantidad
Generador de <sup>99m</sup> Tc	1
Molibdeno 99	100 a 3000 mCi

#### 3. MUESTREO

Debe realizarse en el área de producción Radioquímica, por personal entrenado en las Normas básicas de seguridad radiológica y con autorización de la ARN para el manejo de sustancias radiactivas. Muestrear según el siguiente esquema:

Destino de la muestra	Cantidad
Para controles sobre muestra activa y decaída	1 eluido
Para controles de esterilidad	10 viales con eluidos decaídos
Total a muestrear	11 eluidos

#### NOTA:

Se guardará como contramuestra en el sector de Radioquímica, un generador adicional, el cual será empleado para los controles de calidad a realizar.

*Sebastian Lopez Henao*  
COMERSEC S.A.C.  
RUC 20603680333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I. 001383184

#### 4. ESPECIFICACIONES

Por razones de radioprotección del personal ocupacionalmente expuesto y con la premisa de cumplir con los requisitos regulatorios vigentes en nuestra legislación en materia de

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

*Cristina Espejo V.*  
O.F. Cristina Espejo V.  
CQFP 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.  
RUC 20603680333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I. 001383184

	<b>TECNICA ANALITICA</b>	Código: TA-04-001 Revisión 05
	<b>GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA</b>	Fecha de Publicación: 15/10/2020
		Página 3 de 12

Seguridad Radiológica, las determinaciones detalladas a continuación tendrán como sustento la información aportada por el proveedor de la materia prima en cuestión.

**Nota:** Ciertos controles se realizan con equipamiento de alta complejidad como cadenas espectrométricas gamma, con detectores de Germanio Hiperpuro (HPGe) en sistemas de alto vacío que trabajan a temperaturas del nitrógeno líquido.

**4.1 Controles a realizar sobre muestra activa:**

**4.1.1 Controles de proceso a realizar por personal del sector de Radioquímica:**

El analista de Control de Calidad toma estos resultados del cuaderno de dicho sector y lo trasfiere al certificado de análisis ANEXO 2 Certificado de Análisis en proceso.

**4.1.1.1 Aspecto:** Solución transparente, incolora, libre de partículas extrañas.

*Aspecto de la elución:* Solución transparente, incolora, libre de partículas extrañas.

**4.1.1.2 Ensayo de 99Mo: <0.15 uCi 99Mo por mCi de 99mTc**

Colocar la primera elución en un blindaje de seis mm de plomo, monitorear con el Geiger. Si el Geiger anuncia actividad, medir en el activímetro. Medir con el activímetro dos procesos: Primero setear el equipo en Mo<sup>99</sup>, medir el fondo de Mo<sup>99</sup> y luego medir la elución del generador. En segundo paso, setear el equipo en Tc<sup>99m</sup>, medir el fondo y medir la actividad del Tc<sup>99m</sup> sin el blindaje. Realizar el siguiente cálculo (restando previamente la actividad del fondo medida, según corresponda):

$$\frac{\text{Actividad de Mo}^{99} [\mu\text{Ci}]}{\text{Actividad de Tc}^{99m} [\text{mCi}]} \leq 0,15 \mu\text{Ci Mo}^{99} / \text{mCi Tc}^{99m}$$

**4.1.1.3 Contenido de 99m Tc: Entre 90 y 110%.**

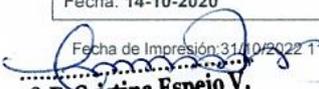
La solución de pertecnetato de sodio Tc 99m contiene no menos del 90.0 por ciento y no más del 110.0 por ciento de la cantidad etiquetada de 99mTc en la fecha y hora indicadas en la etiqueta. Otras formas químicas de 99mTc no exceden el 5 por ciento de la radiactividad total.

**4.1.2 Controles a realizar por personal del sector de Control de Calidad:**

  
**COMERSEC S.A.C.**  
RUC 2060300333  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I. 001382304

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

  
**Q.F. Cristina Espejo V.**  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 4 de 12

### 4.1.2.1 Pureza radioquímica: $\geq 95\%$

4.1.2.1.1 Realizar una cromatografía en placa delgada sobre papel cromatográfico, cromatofolio de papel Whatman 1 (banda de 25 x 300 mm), utilizando acetona/ ácido clorhídrico 2N (80:20) como solvente de desarrollo.

4.1.2.1.2 Preparar la fase móvil, colocarla en la cámara de desarrollo y dejar equilibrar el sistema.

4.1.2.1.3 Luego sembrar una gota de muestra de actividad conveniente, de modo que proporcione una velocidad de conteo de aproximadamente 20000 cuentas por minuto, aproximadamente a 25 mm de un extremo de la tira de papel cromatográfico.

4.1.2.1.4 Desarrollar el cromatograma hasta cubrir el 75 % de la longitud de la tira de papel y dejar que se seque al aire.

4.1.2.1.5 Cortar la tira por la mitad.

4.1.2.1.6 Determinar la distribución de radioactividad mediante barrido con un detector de radiación colimada adecuado (descontando el fondo), de cada porción.

4.1.2.1.7 La radioactividad de la banda de pertecnetato (frente de corrida, Rf aproximadamente 0.9), no es menos de 95% de la radioactividad total de la muestra. Realizar en el equipo ICC-017.

### 4.1.2.2 pH: 4.5 a 7.5

Realizar la determinación empleando tiras indicadoras de pH.

### 4.1.2.3 Identificación radionucleídica: Fotopico en 0.140 MeV (140 $\pm$ 1 KeV).

Determinar el espectro de emisión gamma de la muestra empleando un espectrómetro gamma. Su espectro de rayos gamma es idéntico al de una muestra de <sup>99m</sup>Tc que presenta un fotopico principal con una energía de 0.140 $\pm$ 0.001 MeV equivalente a 140 $\pm$ 1 KeV.

Realizar en el equipo IPC-029.

*Sebastián López Henao*  
COMERSEC S.A.C.  
RUC: 20503680333  
Juan Sebastián López Henao  
Gerente General  
C.I. 00138294

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2020 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

*Cristina Espejo V.*  
C.O.F.P. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 5 de 12

### 4.1.2.4 Pureza radionucleídica: Todas las impurezas entran dentro de los límites establecidos.

4.1.2.4.1 Verificar la detección y determinación de la radioactividad de cada impureza radionucleídica (emisoras de rayos gamma y beta) en la inyección, en kBq por MBq ( $\mu\text{Ci}$  por mCi) de tecnecio 99m. Para inyección preparada a partir de tecnecio 99m derivado del molibdeno 99 original formado como resultado de la fisión de uranio:

Radionucleído <sup>99</sup> Mo	
Pureza Radionucleídica	
Nucleído	Especificación
<sup>131</sup> I / <sup>99</sup> Mo	$\leq 5 \times 10^{-3}$
<sup>103</sup> Ru / <sup>99</sup> Mo	$\leq 5 \times 10^{-3}$
<sup>132</sup> Te/ <sup>99</sup> Mo	$\leq 5 \times 10^{-3}$
$\Sigma\beta$ / <sup>99</sup> Mo	$\leq 6 \times 10^{-5}$
$\Sigma\alpha$ / <sup>99</sup> Mo	$\leq 1 \times 10^{-7}$

**NOTA:** Los resultados para las impurezas  $\Sigma\beta$  / <sup>99</sup>Mo y  $\Sigma\gamma$  totales / <sup>99</sup>Mo son expresados en forma diferida, los ensayos concluidos llegan 4 meses después de la emisión del protocolo.

#### 4.1.2.4.2 Procedimiento:

4.1.2.4.2.1 *Solución S:* Diluir la solución para ser examinada a una concentración de radioactividad de aproximadamente 370 MBq / mL con una solución de 2.42 g / L de molibdato de sodio R.

#### 4.1.2.4.2.2 Espectrometría de rayos gamma.

Acondicionar una columna con un volumen interno de aproximadamente 1,5 ml de resina R de intercambio aniónico fuertemente básica con una mezcla de volúmenes iguales de ácido acético glacial R y agua R. Todas las eluciones de la columna se realizan a un caudal que no excede 1 ml / min.

4.1.2.4.2.3 *Solución muestra:* En un tubo de ensayo, agregar sucesivamente, mezclando 1 ml de una solución de 24,2 g / L de molibdato de sodio R, 0,5 ml de solución fuerte de peróxido de hidrógeno R, 2,5 ml de ácido acético glacial R, 1,0 ml de yodo-123, adicionar 1ml de rutenio-106 solución R y 1,0 ml de solución S. Dejar reposar durante 30 minutos a temperatura ambiente.

4.1.2.4.2.4 *Solución estándar:* Mezclar 1.0 mL de yodo-123 y adicionar 1. mL de solución de rutenio-106 R y 4,0 ml de agua R.

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04. COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión.

**F. Cristina Espejo V.**

CQFP 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

**Juan Sebastián**  
COMERSEC S.A.C.  
RUC 200802017  
Gerente General  
C.E. 001333034



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 6 de 12

4.1.2.4.2.5 *Procedimiento*: Colocar la solución de muestra en la columna y eluir. Justo antes de la desaparición del líquido de la parte superior de la columna, agregar 6 ml de una mezcla de volúmenes iguales de ácido acético glacial R y agua R y eluir. Transferir 5.0 mL de los eluidos combinados a un tubo de conteo. Determinar la radiactividad del yodo-123, yodo 131, rutenio 103, rutenio 106 y yodo 132 a las energías de rayos gamma de 0.159 MeV para yodo-123, 0.365 MeV para yodo-131, 0.497 MeV para rutenio-103, 0.512 MeV para rutenio-106 y 0.668 MeV para yodo-132.

Determinar de la misma manera la radiactividad del yodo-123 y rutenio-106 en la solución de estándar y calcular la recuperación de yodo-123 y rutenio-106 en el combinado eluido.

Calcule la radiactividad de yodo-131, yodo-132 y rutenio-103 en los eluatos combinados, teniendo en cuenta la recuperación, la fracción de eluato utilizada, el recuento eficiencia y la desintegración radiactiva. De la radiactividad de yodo-132 (radionúclido hijo de telurio-132).

Calcular la radiactividad del telurio-132, teniendo en cuenta el tiempo del ensayo y el tiempo de separación del molibdeno-99.

4.1.2.4.3 *Radioactividad total debido al estroncio 89 y al estroncio 90:*

( $<6 \times 10^{-5} \%$  de la radiactividad total.)

Espectrometría de centelleo líquido.

Conectar 2 columnas, cada una con un volumen interno de aproximadamente 1,5 ml de resina R de intercambio aniónico fuertemente básica, en serie y acondicionar las columnas con 10 mL de 4 g / L solución de hidróxido de sodio R. Todas las eluciones de las columnas se hacen a una velocidad de flujo que no excede 1 ml / min.

4.1.2.4.3.1 *Solución de muestra*: En un tubo de ensayo, agregue sucesivamente, una mezcla de 1,0 ml de solución S, 50 uL de solución de adición de estroncio-85 R y 0,05 ml de solución fuerte de hipoclorito de sodio R. Dejar reposar durante 10 minutos a temperatura ambiente.

*Solución de referencia*: Mezclar 50 uL de estroncio-85 solución R con 5.0 ml de una solución de ácido nítrico R de 9.5 g / L en un vial para el recuento de centelleo líquido y mezclar con los 10 ml preparados en cada vial de centelleo líquido.

4.1.2.4.3.2 *Procedimiento*: Aplicar la solución muestra a la parte superior de las 2 columnas y eluir Justo antes de la desaparición del líquido de la parte superior de la columna superior, agregar 3 ml de una solución de sodio de 4 g / L hidróxido R y eluir hasta que las columnas estén secas. Combinar el eluido y agregar 4 ml de una solución de 947 g / L de ácido nítrico R (eluato pobre en molibdeno). Determinar la radiactividad del molibdeno-99 usando espectrometría de rayos gamma. Si la radiactividad del molibdeno-99 es superior a  $6 \times 10^{-7} \%$  de la radiactividad del molibdeno-99 en 1 ml de solución S, repetir el procedimiento anterior con 2 columnas nuevas.

Acondicionar una columna con un volumen interno de aproximadamente 2 ml de resina R de extracción selectiva de estroncio con 5 ml de una solución de 473 g / L de ácido nítrico R y seque la columna. Todas las eluciones de la columna se realizan a un caudal que no excede

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

**F. Cristina Espejo V.**  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
MEASEC S.A.C.

**Juan Sebastián Lora Henao**  
COMERSEC S.A.C.  
RUC: 2050020030  
Gerente General  
C.I. 001382034



## TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

### GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 7 de 12

1 ml / min. Aplique a la columna el eluato y eluyente pobres en molibdeno. Justo antes de la desaparición del líquido de en la parte superior de la columna, agregue 20 ml de una solución de 473 g / L de ácido nítrico R y eluir hasta que la columna esté seca. Enjuague el columna con 2 ml de una solución de ácido nítrico R de 9,5 g / L, secar la columna y desechar el eluato. Eluir la columna con 8,0 ml de una solución de 9,5 g / L de ácido nítrico R hasta que la columna esté seca.

Transferir 5.0 mL del eluato a un vial para centelleo líquido contando y agregue 10 ml de cóctel de centelleo líquido R. Determinar la radiactividad total debido al estroncio-89 y estroncio-90 en esta solución por centelleo líquido espectrometría y la radioactividad debida al estroncio 85 por espectrometría de rayos gamma. Determinar la radiactividad debida al estroncio-85 en la solución de referencia por rayos gamma espectrometría. Calcular la recuperación de estroncio-85 en el eluato. Calcular la radiactividad total medida de estroncio-89 y estroncio-90 en el eluato, tomando en cuenta la recuperación de estroncio y la fracción de eluato usado.

4.1.2.4.4 *Radioactividad total debido a impurezas que emiten partículas alfa:*  
(máximo 1 x 10<sup>-7</sup> % de la radiactividad total)

Espectrometría de rayos alfa.

4.1.2.4.4.1 *Solución muestra:* A 0.2 mL de la preparación a examinar Añadir 1,0 ml de solución de adición de Plutonio-242 R, 1,0 ml de solución de adición de Americio-243 R y 9.0 ml de 927 g / L solución de ácido clorhídrico R. Evaporar la muestra para sequedad. Disolver el residuo en 2 ml de una solución de 927 g / L de ácido clorhídrico R. Evaporar nuevamente a sequedad. Disolver el residuo en 2 ml de una solución de ácido clorhídrico R de 10.3 g / L.

4.1.2.4.4.2 *Procedimiento:* Aplicar la solución muestra a una columna que contenga 0.7 g de resina R1 de intercambio aniónico. Recoger el eluato y lavar la columna con 1 ml de una solución de clorhidrato de 10.3 g / L ácido R. Evaporar los eluidos combinados hasta sequedad y disolver el residuo en 2 ml de una solución de clorhidrato de 10.3 g / L ácido R. Aplicar esta solución a una 2da columna que contiene 0.7 g de resina R de intercambio aniónico. Recoger el eluato y lave la columna con 1 ml de una solución de 10.3 g / L de ácido clorhídrico R. Evaporar los eluatos combinados hasta sequedad y disolver el residuo en 1 ml de ácido nítrico R. Evaporar hasta sequedad. Disolver el residuo nuevamente en 1 ml de ácido nítrico R. Agregar 1 ml de una solución de 42.6 g / L de sulfato de sodio anhidro R y evaporar a sequedad. Agregar 0.3 mL de ácido sulfúrico R. Calentar hasta que el residuo se disuelva. Añadir 4 ml de agua destilada R y 0,01 ml de solución azul de timol R. Añadir amoniaco R concentrado gota a gota hasta que el color cambia de rojo a amarillo.

Preparar una celda de electrodeposición de la siguiente manera. Se coloca una plancha de acero inoxidable electropulida en la tapa de un vial de centelleo de polietileno de 20 ml. La parte inferior del vial se ha cortado y se ha perforado un orificio a través de la entrada de la tapa para la conexión eléctrica al cátodo plano. La plancha, de 20 mm de diámetro y 0,5 mm

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

F. Cristina Espejo V.

CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.

RUC 20805630323

Juan Sebastian Lopez Henao

Gerente General

C.E. 001321134



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 8 de 12

de espesor, se enjuaga con acetona R y agua R antes de su uso. El ánodo, una espiral de platino, se introduce a través del fondo del vial y se ajusta a 5 mm del cátodo. Verter la solución preparada como se describe anteriormente en el celda de electrodeposición y enjuague el recipiente con un total de 5 ml de una solución de 10 g / L de ácido sulfúrico R (la solución se vuelve ligeramente rosada). Ajustar a pH 2.1-2.4 con amoníaco R concentrado o con una solución de ácido sulfúrico R de 200 g / l. Iniciar la electrolisis a 1,2 A durante 75 minutos sin agitar. Agregue 1 ml de amoníaco concentrado R aproximadamente 1 minuto antes de desconectando la corriente. Enjuagar la plancha con un 57 g / L solución de amoníaco R. Enjuagar la plancha con acetona R y eliminar cualquier solvente residual golpeando la plancha con papel absorbente Calentar la plancha sobre una placa caliente a 180 ° C por 10 min.

Determinar la radiactividad de los emisores alfa por espectrometría de rayos alfa, teniendo en cuenta la recuperación de radionucleidos emisores de partículas alfa (medidos utilizando las soluciones de adición de plutonio-242 y americio-243).

4.1.2.4.5 Total de radionucleidos emisores de rayos gamma otros que el molibdeno-99, el tecnecio-99m, el yodo-131, el rutenio-103 y el telurio-132: Máximo 1 x 10<sup>-2</sup>% de la radiactividad total.

4.1.2.4.5.1 Espectrometría de rayos gamma.

4.1.2.4.5.2 *Procedimiento:* Permitir que la preparación decaiga durante 4-6 semanas. Examinar el espectro de rayos gamma para detectar la presencia de otras impurezas emisoras de rayos gamma. Identificar y cuantificar otras impurezas emisoras de rayos gamma. La preparación puede ser liberada para su uso antes de completar la prueba.

**NOTA:** En el caso del Estroncio 89 y Estroncio 99 verificar que  $\Sigma\beta^{99}\text{Mo}$  sea menor a  $\leq 6 \times 10^{-5} \%$ .

En el caso de "Otras impurezas gamma emitidas" el ensayo se verifica en la materia prima, ya que esas impurezas provienen de la síntesis del Molibdeno, y como no aparecen en la materia prima no lo van a hacer en el producto.

### 4.2 Controles a Realizar Sobre la Muestra Decaída

#### 4.2.1 Control de esterilidad: Ausencia de crecimiento en el ensayo.

Según CC-047 "Control de esterilidad"

4.2.1.1 Proceder empleando el método de filtración por membrana o inoculación directa (transferencia directa a los medios de cultivo).

4.2.1.2 Para ello se inocula una parte de la muestra (medio filtro o 0.5 ml de muestra) en caldo Tioglicolato (TGL), incubando durante 14 días en estufa a 30-35°C, y la otra en caldo Caseína-Soja (TSB), incubando durante 14 días a 20-25°C.

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

F. Cristina Espejo V.  
CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.  
RUC 2050382032  
Juan Sebastián López Hondo  
Gerente General  
C.T. 001383134



## TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

Fecha de Publicación:

15/10/2020

### GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Página 9 de 12

- 4.2.1.3 Efectuar los testigos positivos, adicionando a un frasco de caldo Tioglicolato (TGL) un inóculo y a un frasco de caldo Caseína-Soja (TSB) un inóculo del microorganismo correspondiente.
- 4.2.1.4 Hacer los testigos negativos con un frasco de cada medio sin tratar, incubando ambos testigos en las condiciones descriptas para la muestra.
- 4.2.1.5 Resultados esperados:
- 4.2.1.4.1 Caldo Tioglicolato (TGL) + muestra: sin crecimiento.
  - 4.2.1.4.2 Caldo Caseína-Soja (TSB) + muestra: sin crecimiento.
  - 4.2.1.4.3 Caldo Tioglicolato (TGL) con inóculo: positivo.
  - 4.2.1.4.4 Caldo Caseína-Soja (TSB) con inóculo: positivo.
  - 4.2.1.4.5 Caldo Tioglicolato (TGL) sin muestra ni inóculo: sin crecimiento.
  - 4.2.1.4.6 Caldo Caseína-Soja (TSB) sin muestra ni inóculo: sin crecimiento.
- 4.2.1.6 Si los resultados obtenidos coinciden con los esperados, el producto cumple con el ensayo de esterilidad.  
Realizar con los equipos: Utilizar los equipos: ECC-009; ECC-001; ECC-002.

#### 4.2.2 Control de endotoxinas bacterianas: Menor o igual a 175 Unidades de endotoxina / V

Según CC-046 "Ensayo de límite de endotoxinas bacterianas".

- 4.2.2.1 No contiene más de 175/ V Unidades de endotoxina USP por mL de inyección, en donde V es la dosis máxima total administrada, en mL, al momento del vencimiento.
- 4.2.2.2 Aplicar la técnica de control que se describe a continuación, sobre un vial de uso exclusivo. Realizar todas las determinaciones por duplicado.
- 4.2.2.3 Emplear reactivo LAL de sensibilidad ( $\lambda$ ) = 0,125 UE USP/mL
- 4.2.2.4 *Solución 2M*: Transferir 30  $\mu$ L de muestra a un tubo apirógeno y adicionar 4170  $\mu$ L de agua destilada apirógena (AA). Agitar con vórtex al menos durante 30 segundos
- 4.2.2.5 *Solución Muestra*: Transferir 2000  $\mu$ L de la *Solución 2M* a un tubo apirógeno, al cual previamente se adiciona 2000  $\mu$ L de agua destilada apirógena estéril, agitar con vórtex durante 30 segundos.
- 4.2.2.6 *Solución Muestra Control Positivo*: Transferir 750  $\mu$ L de *Solución Muestra* a un tubo apirógeno, adicionar 750  $\mu$ L de Dilución 4 de Endotoxina Estándar y homogeneizar.
- 4.2.2.7 *Solución Solvente Control Positivo*: Transferir 300  $\mu$ L de agua destilada apirógena estéril a un tubo apirógeno, adicionar 300  $\mu$ L de Dilución 4 de Endotoxina Estándar y homogeneizar.
- 4.2.2.8 *MDV (máxima dilución válida)*:

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04 / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión.

F. Cristina Espéjo V.

CQFP. 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.  
RUT: 70603000332  
Juan Sebastian Lopez Henao  
Gerente General  
C.I. 001398104



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

Fecha de Publicación:

15/10/2020

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Página 10 de 12

$$MDV = \frac{175 \text{ UE} / 5 \text{ mL}}{0,125 \text{ UE/mL}} = 280$$

4.2.2.9 Todas las determinaciones se realizan por duplicado. Preparar 2 sets de 4 tubos, cada uno según el esquema que indica la tabla que se muestra más abajo.

Contenido	SET de TUBOS			
	1	2	3	4
	Muestra	Control muestra positivo	Control negativo	Control solvente positivo
	Volumen (µL)			
Reactivo LAL	100	100	100	100
Solución M	100	---	---	---
Agua estéril apirógena (AA)	---	---	100	---
Solución Solvente Control Positivo (2λ)	---	---	---	100
Solución Muestra Control Positivo (2λ)	---	100	---	---
Resultado esperado	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo

4.2.2.10 Si los resultados obtenidos coinciden con los esperados, el resultado se considera conforme.

Realizar en el equipo: ICC-016.

### 4.2.3 Pureza química del eluato: Menor de 10 µg de Aluminio/mL

CC-021 "Determinación del contenido de aluminio en eluciones de <sup>99m</sup>Tc"

*Preparación de solución muestra:* Tomar 500 µL de muestra y llevar a 5mL finales con agua calidad inyectable.

*Procedimiento:* Proceder según CC-021 "Determinación del contenido de aluminio en eluciones de <sup>99m</sup>Tc".

Calcular la cantidad en µg/mL de aluminio multiplicando por 10 el valor de la lectura obtenida en forma directa.

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04 / COPIA NO CONTROLADA Publicado - VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

Cristina Espejo V.  
CQFP 07714  
Director Técnico  
COMERSEC S.A.C.

COMERSEC S.A.C.  
RUC: 20601020833  
Juan Sebastián López Henao  
Gerente General  
C.I. 001332184



# TECNICA ANALITICA

Código: TA-04-001

Revisión 05

## GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA

Fecha de Publicación:

15/10/2020

Página 11 de 12

### 5. ANEXOS

Anexo 1 Certificado de Análisis.

Anexo 2 Certificado de Análisis en proceso.

#### CONTROL DE CAMBIOS:

**REVISIÓN 00:** Se toma como referencia la TA 04-001 Rev 09, del Sistema documental anterior, dada de alta el 12/10/2012. Sin Cambios.

**REVISIÓN 01:** Se modificó la referencia, se actualizó la codificación de los documentos asociados, se agrego en anexo 2, se agregaron los siguientes puntos: 4.1.3 Aspecto, 4.1.4 Pureza radionucleídica, 4.1.5 Performance de la elución, 4.1.6 % de 99 Mo, 4.1.7 Dosimetría en contacto.

**REVISIÓN 02:** Se añade el punto 4.1.2.4 Pureza radionucleídica. Se modifican los puntos 4.2.2; 4.2.3 y 4.1.2.3. Se adiciona la identificación de los procedimientos asociados. Se actualiza en el punto 1 REFERENCIAS y adjunta monografía de referencia. Se modifican y añaden las especificaciones en los Anexos 1 y 2, añadiendo el control de Pureza radionucleídica y actualizando el número de revisión. Se actualizaron los anexos 1 y 2.

**REVISIÓN 03:** Se actualizo la referencia a la USP 42 NF 37. En los puntos 4.1.1.1; 4.1.1.2; 4.1.2.4; 4.2.1; se actualizaron las conformidades. En el punto 4.1.1.4 se actualizo el ensayo a una version mas completa de lo que se realiza.

**REVISIÓN 04:** En los puntos 4.1.2.1; 4.1.2.3; 4.2.1; 4.2.2; se agrego la identificacion de los equipos a utilizar.

**REVISIÓN 05:** Se actualizó la tecnica analitica a la ultima version de la USP 42 NF37. En el punto 1 REFERENCIAS se agrego la referencia de USP 42 NF37 y EP 10.0 (en referencia de Punto 4.1.2.4). En el punto 4 se agrego un texto sobre la seguridad al realizar realizar los ensayos. En el punto 4.1.2.3 se agregó la tolerancia. Se actualizó el punto 4.1.2.4 agregando los procedimientos para realizar los ensayos. Se modificaron los anexos. Se saca los puntos: 4.1.1.2 Performance de la elución y 4.1.1.4 Dosimetría en contacto por sr controles de proceso y no estar incluidos en la

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2020 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado – VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión.

**F. Cristina Espejo V.**  
CQFP. 07714  
Directora Técnica  
MEHSEC S.A.C.

**Juan Sebastián**  
COMERSEC S.A.C.  
RUC: 2051380217  
Gerente General  
C.I. 001333334

	<b>TECNICA ANALITICA</b>	Código: <b>TA-04-001</b> Revisión <b>05</b>
	<b>GENERADOR Mo-99/Tc-99 DE COLUMNA SECA</b>	Fecha de Publicación: <b>15/10/2020</b>
		Página 12 de 12

Farmacopea de referencia. Se añade el punto 4.1.1.3 Contenido de 99m Tc contemplado en la Farmacopea de referencia.

**COMENTARIOS:**

Fecha	Nombre y Apellido	Comentarios
28/08/2020	Martin Molinari	Eliminar la referencia de farmacopea europea del punto 1 Eliminar los puntos: 4.1.1.2 Performance de Elución como realizado por RQ y colocarlo como realizado por Control de Calidad. Además modificar el tiempo de observación de "no menor a 2 minutos" por "no mayor a 2 minutos" 4.1.1.4 Dosimetría en contacto. Modificar en punto 4.1.1.1 la palabra "libe" por "libre"  Para consultar los cambios verificar protocolo de desarrollo N° VEF-P-001-20

  
 COMERSEC S.A.C.  
 RUC: 2060360333  
 Juan Sebastian Lopez Henao  
 Gerente General  
 C.I. 001482184

Redactó	Verificó	Aprobó
Christian Recavarren (Analista de Control de Calidad)	Carlos Soria (Responsable de Control de Calidad)	Patricia Zubata (Directora Técnica)
Fecha: 14-10-2020	Fecha: 14-10-2020	Fecha: 15-10-2020

Fecha de Impresión: 31/10/2022 11:04. / COPIA NO CONTROLADA Publicado – VALIDEZ: 7 días posteriores a la fecha de impresión

  
**F. Cristina Espejo V.**  
 CQFP. 07714  
 Director Técnico  
 COMERSEC S.A.C.

# Anexo Ñ: Resultados de medición DLS

Muestra M1

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

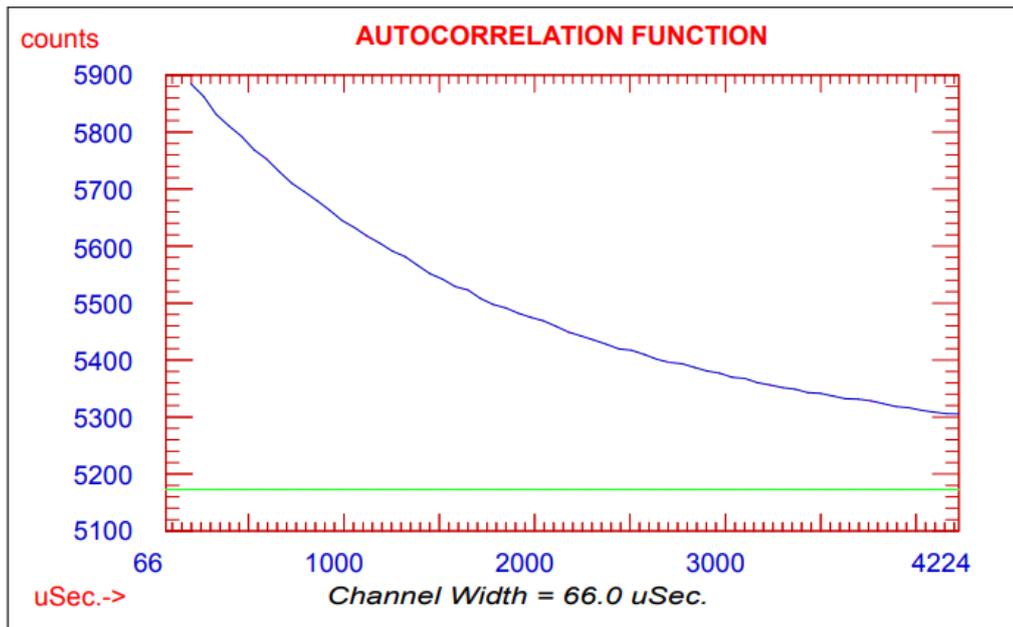
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-5nm-02-08-2 13:46:35 8/2/2019

## Autocorrelation Function

### GAUSSIAN SUMMARY:

<i>Mean Diameter</i>	= 601.7 nm	<i>Variance (P.I.)</i>	= 0.383
<i>Std. Deviation</i>	= 372.4 nm (61.9%)	<i>Chi Squared</i>	= 0.847
<i>Norm. Std. Dev.</i>	= 0.619	<i>Baseline Adj.</i>	= 0.000 %
<i>(Coeff. of Var'n)</i>		<i>Z-Avg. Diff. Coeff.</i>	= 7.72E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 12 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 23 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 5.9 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 66.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333



**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-5nm-02-08-2 13:46:35 8/2/2019

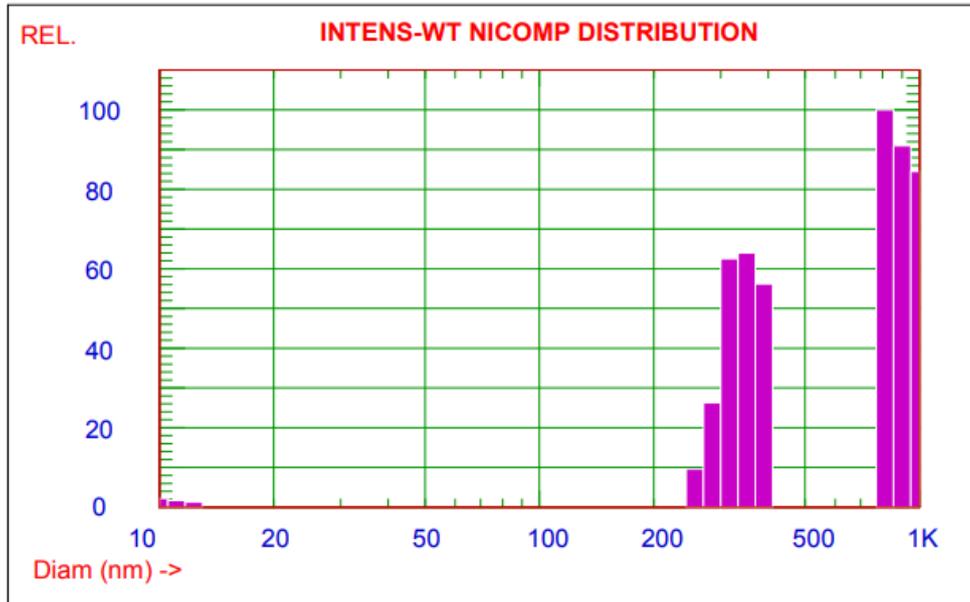
**INTENSITY-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 10.9 nm, S.Dev.= 0.7 nm (6.77%) Intens.= 1.32 %

Peak #2: Mean Diam.= 342.8 nm, S.Dev.= 34.6 nm (10.08%) Intens.= 38.51 %

Peak #3: Mean Diam.= 898.6 nm, S.Dev.= 57.1 nm (6.36%) Intens.= 60.17 %



AI2O3-5nm-02-08-2

Mean Diameter = 644.3 nm Fit Error = 26.350 Residual = 27.395

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 601.7 nm

Std. Deviation = 372.4 nm (61.9%)

Norm. Std. Dev. = 0.619

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 12 Sec

Count Rate = 23 KHz

Channel #1 = 5.9 K

Channel Width = 66.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.383

Chi Squared = 0.847

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 7.72E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-5nm-02-08-2 13:46:35 8/2/2019

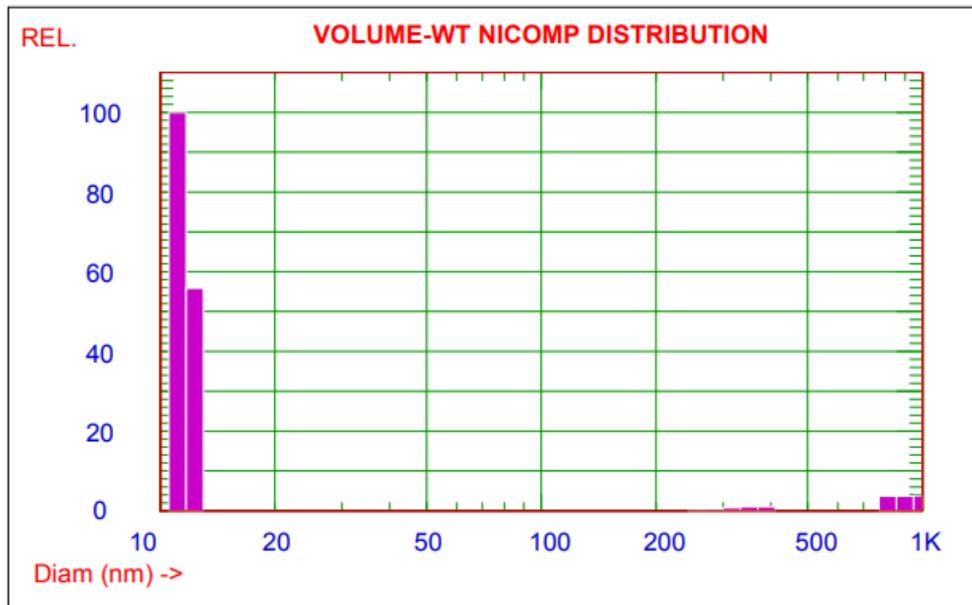
**VOLUME-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 11.5 nm, S.Dev.= 0.8 nm (6.81%) Vol= 95.40 %

Peak #2: Mean Diam.= 347.6 nm, S.Dev.= 33.9 nm (9.75%) Vol= 0.97 %

Peak #3: Mean Diam.= 905.2 nm, S.Dev.= 82.1 nm (9.07%) Vol= 3.63 %



AI2O3-5nm-02-08-2

Mean Diameter = 76.4 nm Fit Error = 26.350 Residual = 27.395

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 840.5 nm

Std. Deviation = 520.3 nm (61.9%)

Norm. Std. Dev. = 0.619

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 12 Sec

Count Rate = 23 KHz

Channel #1 = 5.9 K

Channel Width = 66.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.383

Chi Squared = 0.847

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 7.72E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

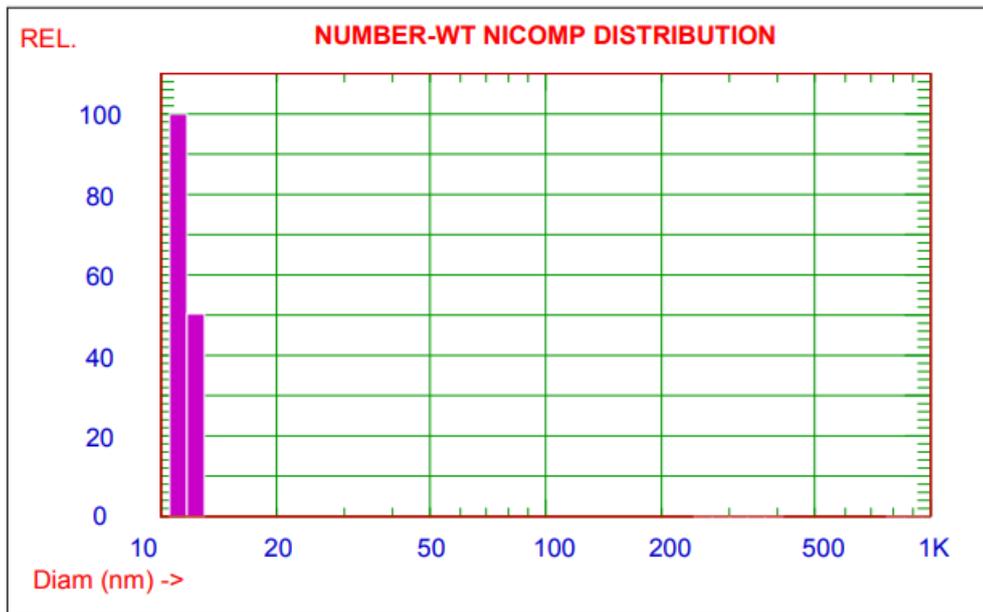
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-5nm-02-08-2 13:46:35 8/2/2019

**NUMBER-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 11.5 nm, S.Dev.= 0.8 nm (7.08%) Num= 99.92 %  
 Peak #2: Mean Diam.= 344.0 nm, S.Dev.= 35.1 nm (10.19%) Num= 0.03 %  
 Peak #3: Mean Diam.= 898.6 nm, S.Dev.= 57.1 nm (6.36%) Num= 0.05 %



AI2O3-5nm-02-08-2

Mean Diameter = 12.6 nm Fit Error = 26.350 Residual = 27.395

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45  
 Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 128.2 nm	Variance (P.I.)	= 0.383
Std. Deviation	= 79.4 nm (61.9%)	Chi Squared	= 0.847
Norm. Std. Dev.	= 0.619	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 7.72E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 12 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 23 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 5.9 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 66.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333

Muestra M2

**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

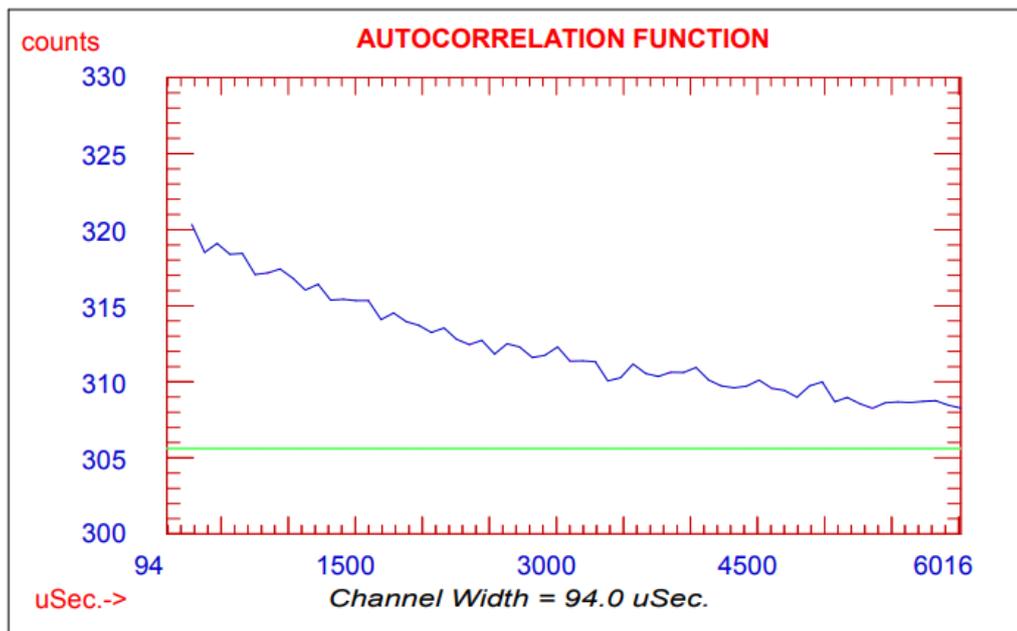
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-05nm-02-17-10-19 19:44:19 10/17/2019

**Autocorrelation Function**

**GAUSSIAN SUMMARY:**

<i>Mean Diameter</i>	= 950.0 nm	<i>Variance (P.I.)</i>	= 0.342
<i>Std. Deviation</i>	= 555.7 nm (58.5%)	<i>Chi Squared</i>	= 2.263
<i>Norm. Std. Dev. (Coeff. of Var'n)</i>	= 0.585	<i>Baseline Adj.</i>	= 0.000 %
<i>Run Time</i>	= 0 Hr 5 Min 1 Sec	<i>Z-Avg. Diff. Coeff.</i>	= 4.89E-009 cm <sup>2</sup> /s
<i>Count Rate</i>	= 5 KHz	<i>Wavelength</i>	= 632.8 nm
<i>Channel #1</i>	= 0.3 K	<i>Temperature</i>	= 23 deg C
<i>Channel Width</i>	= 94.0 uSec	<i>Viscosity</i>	= 0.933 cp
		<i>Index of Ref.</i>	= 1.333



**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

Sample

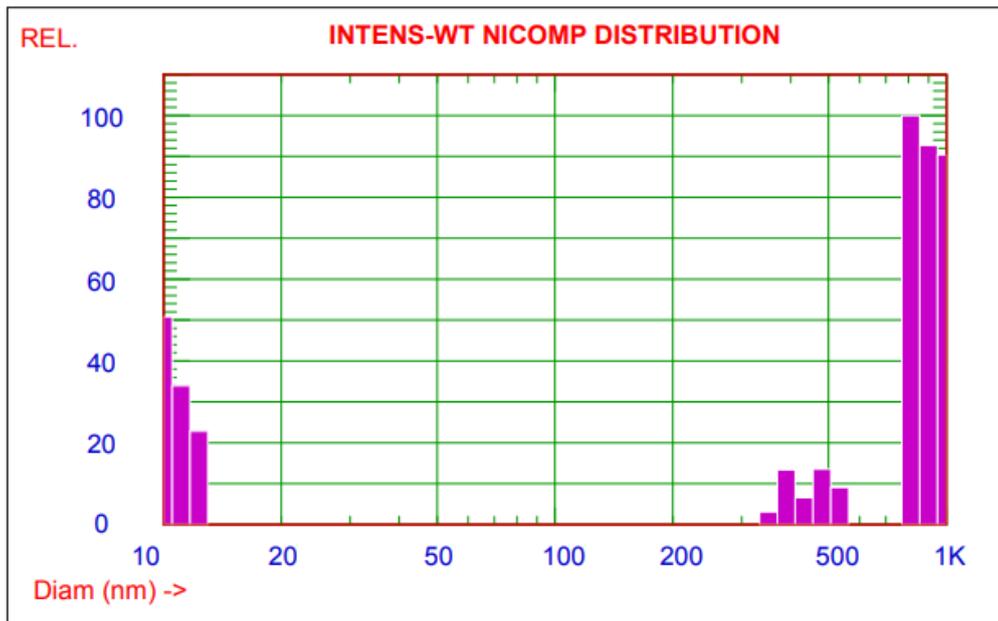
Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-05nm-02-17-10-19 19:44:19 10/17/2019

**INTENSITY-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 10.8 nm, S.Dev.= 0.8 nm (7.19%) Intens.= 33.69 %

Peak #2: Mean Diam.= 900.7 nm, S.Dev.= 99.3 nm (11.02%) Intens.= 66.31 %



AI2O3-05nm-02-17-10-19

Mean Diameter = 634.1 nm Fit Error = 308.083 Residual = 33.666

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45  
Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 950.0 nm	Variance (P.I.)	= 0.342
Std. Deviation	= 555.7 nm (58.5%)	Chi Squared	= 2.263
Norm. Std. Dev.	= 0.585	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 4.89E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 1 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 5 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 0.3 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 94.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

Sample

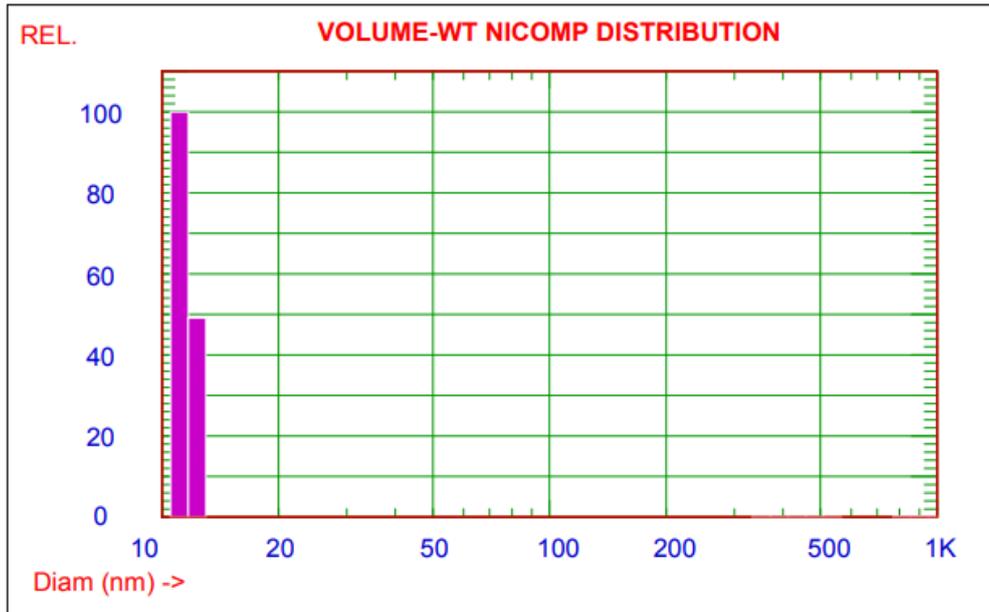
Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-05nm-02-17-10-19 19:44:19 10/17/2019

**VOLUME-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 11.5 nm, S.Dev.= 0.8 nm (7.14%) Vol= 99.80 %

Peak #2: Mean Diam.= 907.4 nm, S.Dev.= 81.7 nm (9.00%) Vol= 0.20 %



AI2O3-05nm-02-17-10-19

Mean Diameter = 15.1 nm Fit Error = 308.083 Residual = 33.666

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 1335.3 nm

Std. Deviation = 781.1 nm (58.5%)

Norm. Std. Dev. = 0.585

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 1 Sec

Count Rate = 5 KHz

Channel #1 = 0.3 K

Channel Width = 94.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.342

Chi Squared = 2.263

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 4.89E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

Sample

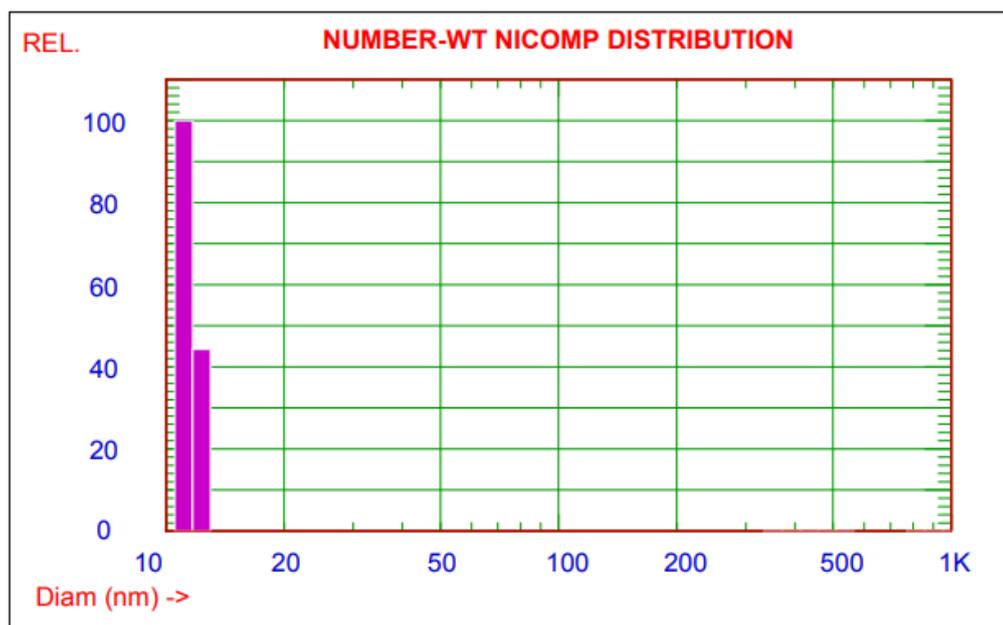
Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-05nm-02-17-10-19 19:44:19 10/17/2019

**NUMBER-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 11.5 nm, S.Dev.= 0.8 nm (7.40%) Num= 100.00 %

Peak #2: Mean Diam.= 900.7 nm, S.Dev.= 99.3 nm (11.02%) Num= 0.00 %



AI2O3-05nm-02-17-10-19

Mean Diameter = 11.5 nm Fit Error = 308.083 Residual = 33.666

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 387.5 nm

Std. Deviation = 226.7 nm (58.5%)

Norm. Std. Dev. = 0.585

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 1 Sec

Count Rate = 5 KHz

Channel #1 = 0.3 K

Channel Width = 94.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.342

Chi Squared = 2.263

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 4.89E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

Muestra M3

**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

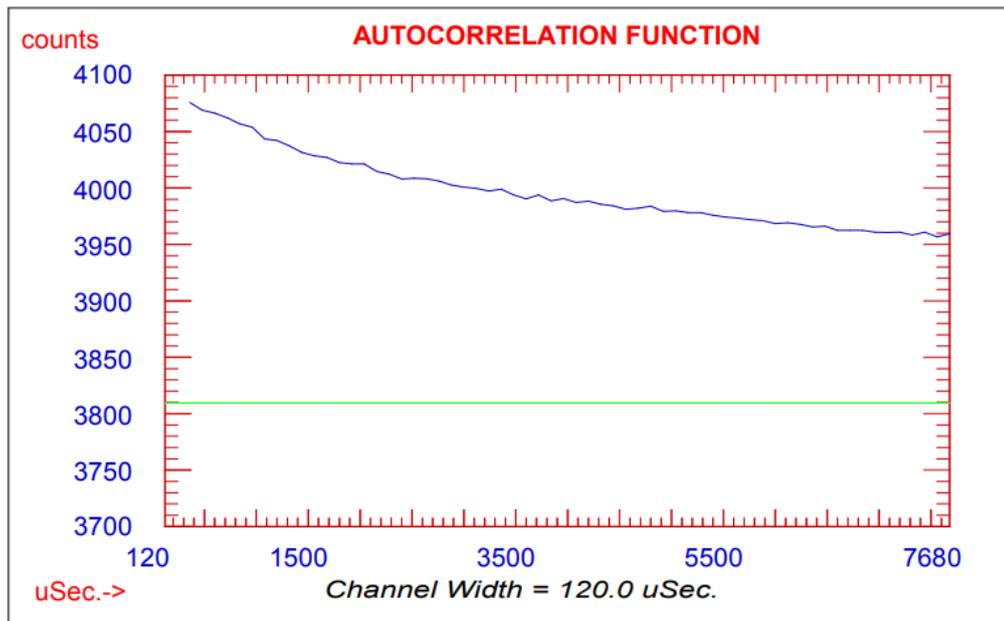
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08 13:9:2 8/2/2019

**Autocorrelation Function**

**GAUSSIAN SUMMARY:**

<i>Mean Diameter</i>	= 2480.2 nm	<i>Variance (P.I.)</i>	= 1.674
<i>Std. Deviation</i>	= 3209.3 nm (129.4%)	<i>Chi Squared</i>	= 3.599
<i>Norm. Std. Dev.</i>	= 1.294	<i>Baseline Adj.</i>	= 0.000 %
<i>(Coeff. of Var'n)</i>		<i>Z-Avg. Diff. Coeff.</i>	= 1.87E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 11 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 10 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 4.1 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 120.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333



Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

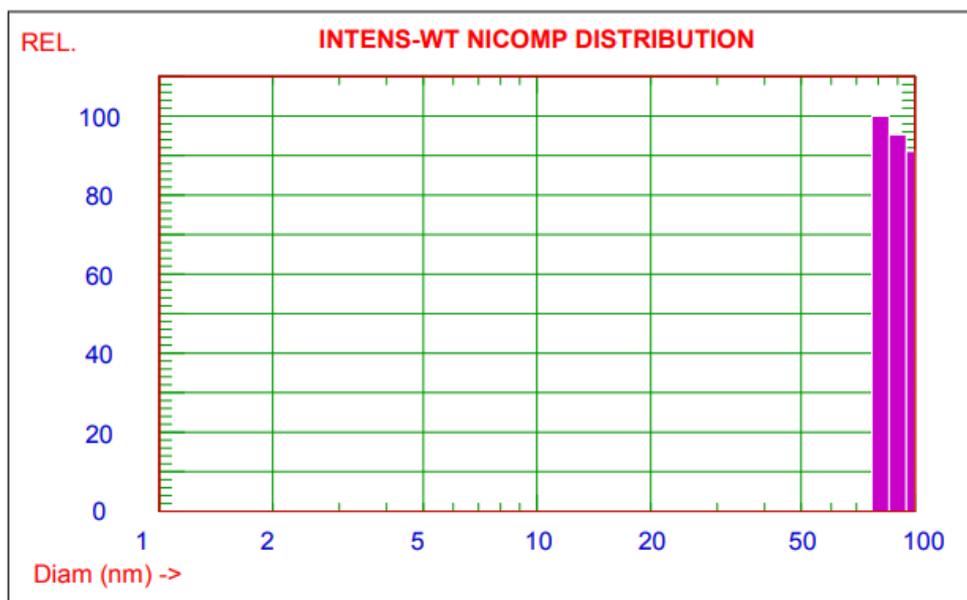
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08 13:9:2 8/2/2019

**INTENSITY-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam. = 90.1 nm, S.Dev. = 9.9 nm (10.99%) Intens. = 100.00 %



AI2O3-80nm-02-08

Mean Diameter = 90.1 nm Fit Error = 507.343 Residual = 125.163

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 1 nm Plot Size = 45  
Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 2480.2 nm	Variance (P.I.)	= 1.674
Std. Deviation	= 3209.3 nm (129.4%)	Chi Squared	= 3.599
Norm. Std. Dev.	= 1.294	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 1.87E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 11 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 10 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 4.1 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 120.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

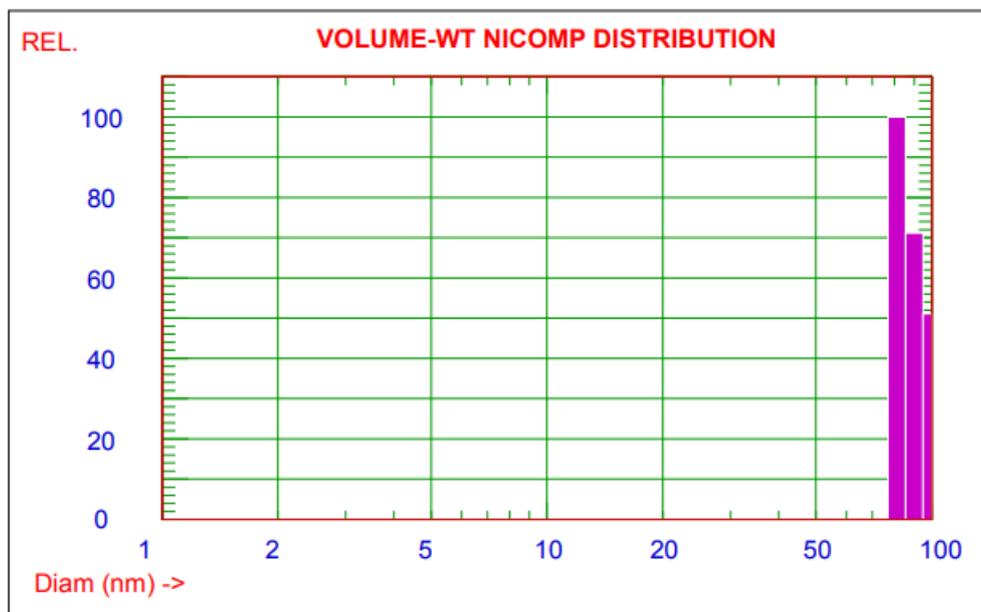
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08 13:9:2 8/2/2019

**VOLUME-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 88.3 nm, S.Dev.= 6.2 nm (7.00%) Vol= 100.00 %



AI2O3-80nm-02-08

Mean Diameter = 88.3 nm Fit Error = 507.343 Residual = 125.163

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 1 nm Plot Size = 45  
Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 6914.1 nm	Variance (P.I.)	= 1.674
Std. Deviation	= 8946.9 nm (129.4%)	Chi Squared	= 3.599
Norm. Std. Dev.	= 1.294	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 1.87E-009 cm2/s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 11 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 10 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 4.1 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 120.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

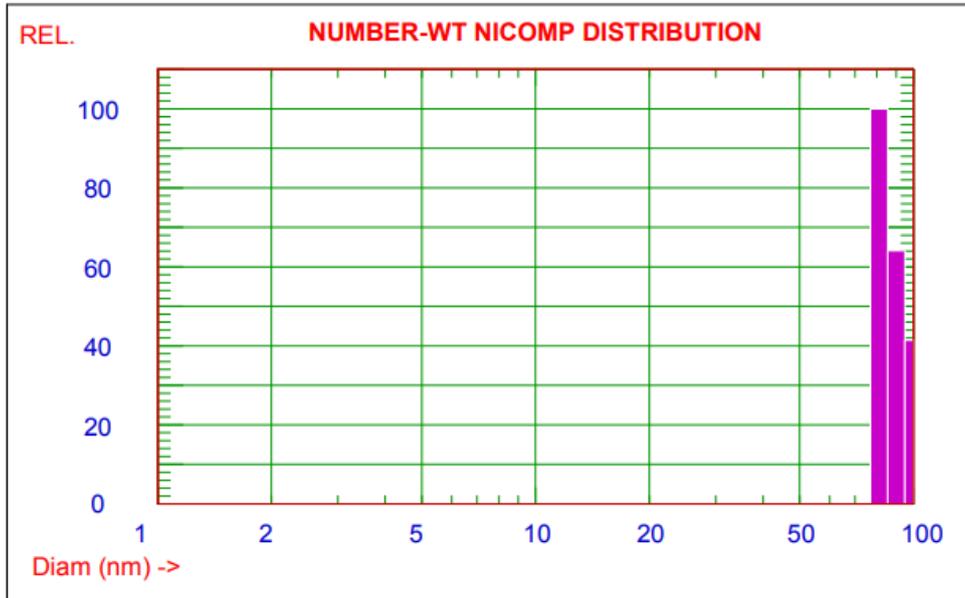
Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08 13:9:2 8/2/2019

**NUMBER-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 87.7 nm, S.Dev.= 6.4 nm (7.31%) Num= 100.00 %



AI2O3-80nm-02-08

Mean Diameter = 87.7 nm Fit Error = 507.343 Residual = 125.163

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 1 nm Plot Size = 45  
Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 498.0 nm	Variance (P.I.)	= 1.674
Std. Deviation	= 644.4 nm (129.4%)	Chi Squared	= 3.599
Norm. Std. Dev.	= 1.294	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 1.87E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 11 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 10 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 4.1 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 120.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333

Muestra M4

**Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA**

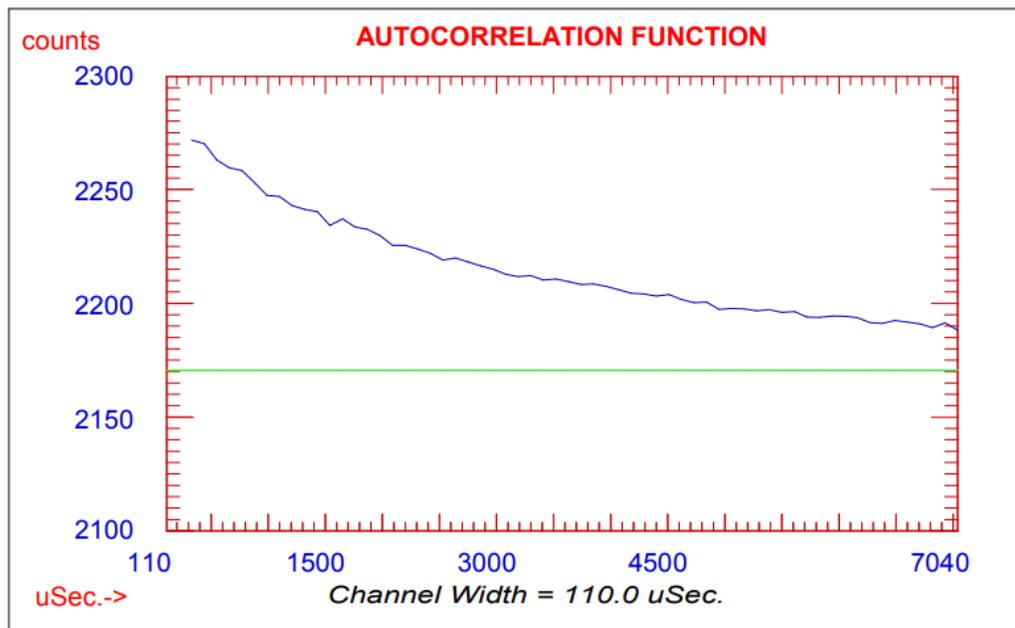
Sample

Data File: C:\2019\IPENEMILY\AI2O3-80nm-02-08-2 13:25:36 8/2/2019

**Autocorrelation Function**

**GAUSSIAN SUMMARY:**

<i>Mean Diameter</i>	= 979.7 nm	<i>Variance (P.I.)</i>	= 0.442
<i>Std. Deviation</i>	= 651.5 nm (66.5%)	<i>Chi Squared</i>	= 1.555
<i>Norm. Std. Dev.</i>	= 0.665	<i>Baseline Adj.</i>	= 0.000 %
<i>(Coeff. of Var'n)</i>		<i>Z-Avg. Diff. Coeff.</i>	= 4.74E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 7 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 11 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 2.3 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 110.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333



Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08-2 13:25:36 8/2/2019

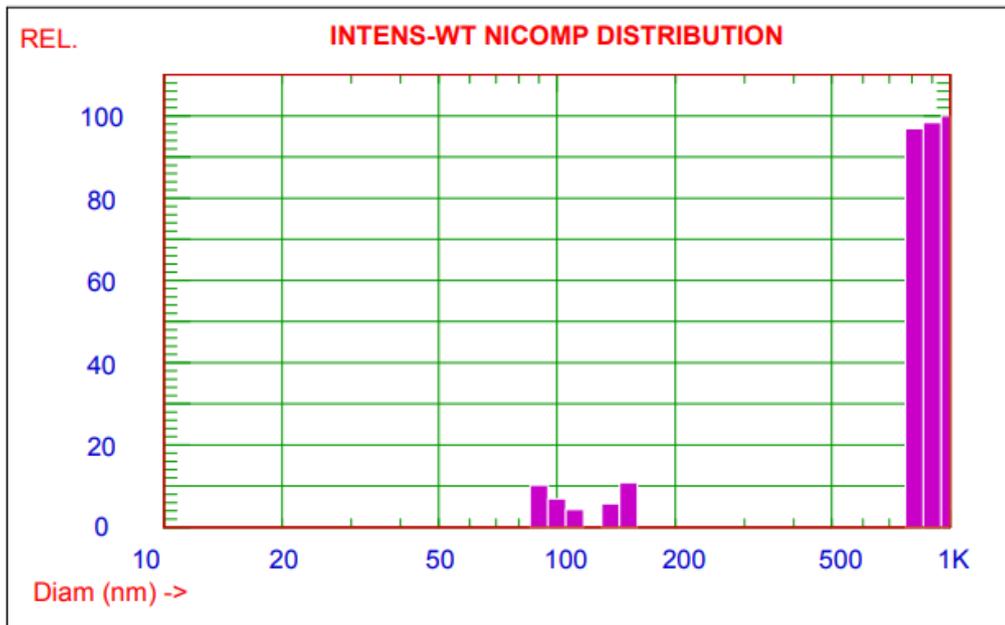
**INTENSITY-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 97.5 nm, S.Dev.= 7.0 nm (7.14%) Intens.= 8.43 %

Peak #2: Mean Diam.= 146.8 nm, S.Dev.= 6.5 nm (4.41%) Intens.= 8.93 %

Peak #3: Mean Diam.= 904.9 nm, S.Dev.= 82.1 nm (9.07%) Intens.= 82.64 %



AI2O3-80nm-02-08-2

Mean Diameter = 815.5 nm Fit Error = 120.036 Residual = 42.671

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 979.7 nm

Std. Deviation = 651.5 nm (66.5%)

Norm. Std. Dev. = 0.665

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 7 Sec

Count Rate = 11 KHz

Channel #1 = 2.3 K

Channel Width = 110.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.442

Chi Squared = 1.555

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 4.74E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

Sample

Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08-2 13:25:36 8/2/2019

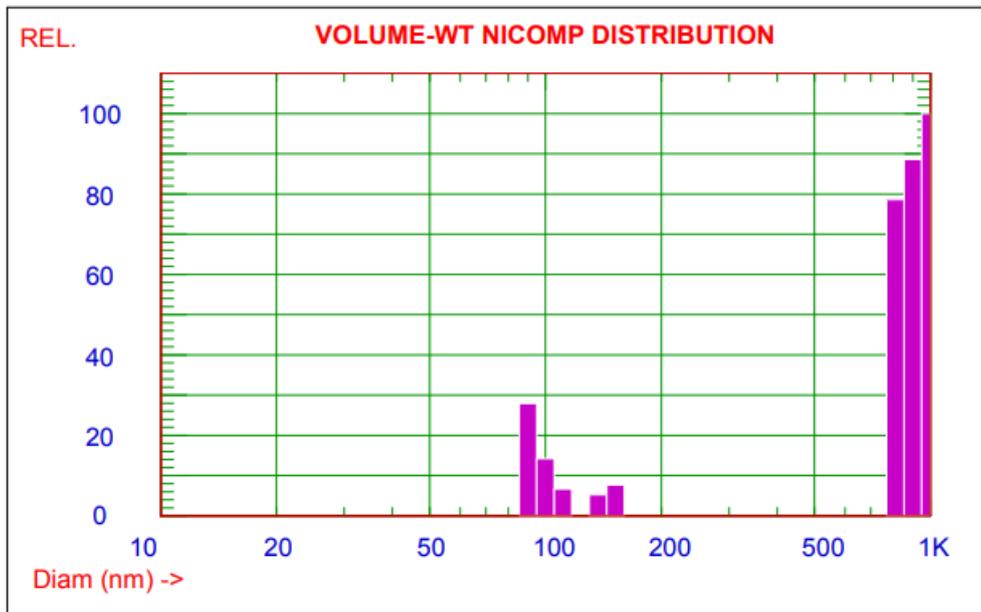
**VOLUME-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 95.8 nm, S.Dev.= 7.6 nm (7.96%) Vol= 20.62 %

Peak #2: Mean Diam.= 145.9 nm, S.Dev.= 6.9 nm (4.76%) Vol= 5.66 %

Peak #3: Mean Diam.= 911.5 nm, S.Dev.= 80.3 nm (8.81%) Vol= 73.72 %



AI2O3-80nm-02-08-2

Mean Diameter = 760.4 nm Fit Error = 120.036 Residual = 42.671

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45

Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter = 1508.2 nm

Std. Deviation = 1002.9 nm (66.5%)

Norm. Std. Dev. = 0.665

(Coeff. of Var'n)

Run Time = 0 Hr 5 Min 7 Sec

Count Rate = 11 KHz

Channel #1 = 2.3 K

Channel Width = 110.0 uSec

Variance (P.I.) = 0.442

Chi Squared = 1.555

Baseline Adj. = 0.000 %

Z-Avg. Diff. Coeff. = 4.74E-009 cm<sup>2</sup>/s

Wavelength = 632.8 nm

Temperature = 23 deg C

Viscosity = 0.933 cp

Index of Ref. = 1.333

Particle Sizing Systems, Inc.  
Santa Barbara, Calif., USA

Sample

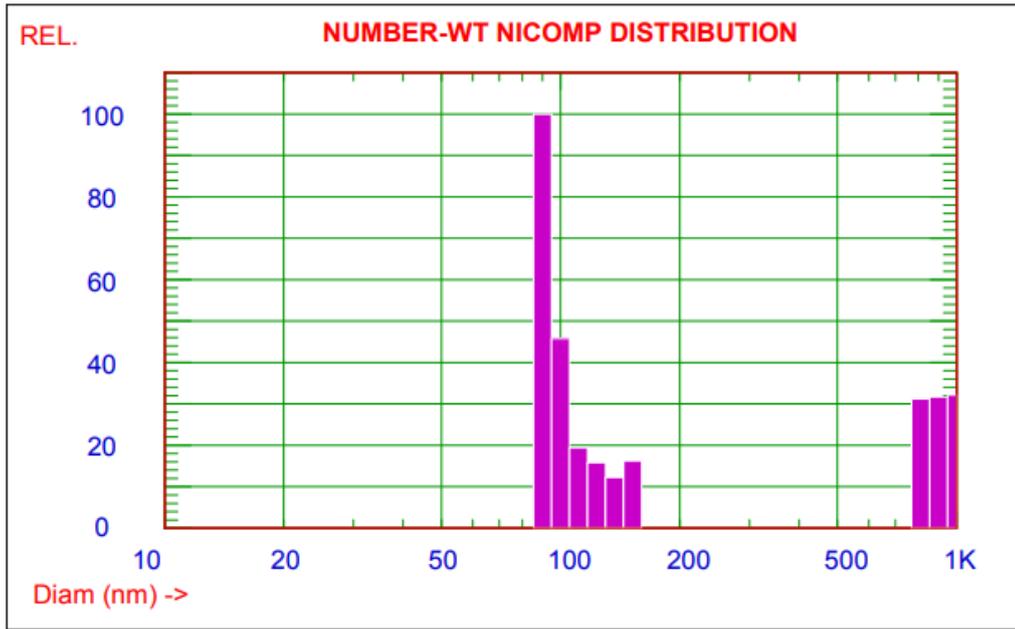
Data File: C:\2019\IPEN\EMILY\AI2O3-80nm-02-08-2 13:25:36 8/2/2019

**NUMBER-Weighted NICOMP DISTRIBUTION Analysis (Solid Particle)**

**NICOMP SUMMARY:**

Peak #1: Mean Diam.= 95.3 nm, S.Dev.= 7.9 nm (8.25%) Num= 75.64 %

Peak #2: Mean Diam.= 904.9 nm, S.Dev.= 82.1 nm (9.07%) Num= 24.36 %



AI2O3-80nm-02-08-2

Mean Diameter = 366.9 nm Fit Error = 120.036 Residual = 42.671

**NICOMP SCALE PARAMETERS:**

Min. Diam. = 10 nm Plot Size = 45  
Smoothing = 3 Plot Range = 100

**GAUSSIAN SUMMARY:**

Mean Diameter	= 283.7 nm	Variance (P.I.)	= 0.442
Std. Deviation	= 188.6 nm (66.5%)	Chi Squared	= 1.555
Norm. Std. Dev.	= 0.665	Baseline Adj.	= 0.000 %
(Coeff. of Var'n)		Z-Avg. Diff. Coeff.	= 4.74E-009 cm <sup>2</sup> /s
Run Time	= 0 Hr 5 Min 7 Sec	Wavelength	= 632.8 nm
Count Rate	= 11 KHz	Temperature	= 23 deg C
Channel #1	= 2.3 K	Viscosity	= 0.933 cp
Channel Width	= 110.0 uSec	Index of Ref.	= 1.333