



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA

**ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS
RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO
ENERGÉTICAS EN MÉXICO**

T E S I N A

**QUE PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD EN
GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS**

P R E S E N T A:

LIC. EN C.A. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN

DIRECTOR DE TESINA:

DRA. MA. LAURA ORTIZ HERNANDEZ

CODIRECTOR:

DR. HUEMANTZIN BALAN ORTIZ OLIVEROS

Cuernavaca, Morelos

Octubre 2019

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

- Albert Einstein

DEDICATORIA:

A Osiris por ser mi compañera de viaje a lo largo de estos ya casi 6 años, por tu apoyo, comprensión y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A Kiria y Saideth, por ser siempre mi motor, por motivarme a dar siempre lo mejor de mí, por su cariño y su amor.

A ti Mamá porque a pesar de tu ausencia a lo largo de estos 10 años, siempre han estado presentes en mí tus consejos y tus enseñanzas y sobre todo tu amor de madre.

A ti abuelita Jerónima por siempre cuidarme y estar pendiente de mí, por tus consejos y tu apoyo constante, de corazón mil gracias.

A mis tíos, Miguel Ángel y Ricardo, por todo su apoyo incondicional.

A ti Padre porque a pesar de las diferencias, siempre te voy a estar agradecido, por haberme sacado adelante, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca para realizar los estudios de la especialidad en Gestión Integral de Residuos.

A la Dra. Ma. Laura Ortiz, por fungir como Tutora de este trabajo, por sus atinados consejos, recomendaciones y nivel de compromiso, muchas gracias.

Al Dr. Huemantzin Balan Ortiz por ser el codirector de este trabajo, por su asesoría técnica, consejos y experiencia.

Al Maestro Enrique Sánchez Salinas, por sus consejos y asesorías para la formación de este trabajo de investigación.

Al Biólogo Hugo Suarez, por su apoyo, su amistad y las pláticas tan amenas, durante los trayectos a la estancia profesional.

Al Dr. Alexis Rodríguez Solís, coordinador de la Especialidad en Gestión Integral de Residuos, por sus asesorías.

A cada uno de los profesores de la Especialidad en Gestión Integral de Residuos, muchas gracias por cada una de las lecciones aprendidas, por compartir sus conocimientos y experiencia.

RESUMEN

La generación de desechos radiactivos constituye un problema de índole específica para la humanidad, principalmente en lo relativo a su manejo y disposición final. Los avances tecnológicos en la industria nuclear, medicina, ciencia e investigación, han permitido al ser humano alcanzar mejoras significativas en su calidad de vida. No obstante, la cantidad de desechos radiactivos que se generan en tales procesos, desencadenan impactos ligados a la disposición de este tipo de desechos (Molina, 2006).

El objetivo general de este trabajo, fue llevar a cabo el análisis del estado del arte de la gestión de los desechos radiactivos generados a partir de actividades no energéticas en México. Para la realización del presente trabajo, se revisaron fuentes de información de manera teórica, a partir de la consulta de fuentes de información fidedignas, que hayan abordado el tema del manejo de los desechos radiactivos. Se consultaron datos de generación para un período de tiempo comprendido entre el año 2000 al 2018. Las fuentes de los datos fueron el INFOMEX e INAI.

La generación de desechos radiactivos en México muestra una disminución asociada a los nuevos avances tecnológicos; es una actividad que ha desarrollado desde los años 60s. Con respecto a la gestión de los desechos radiactivos, es una etapa que aún está en proceso de conformación, pues hace falta un esquema de mejora continua, así como de voluntad política y económica. Finalmente, la legislación actual está basada en cumplir cabalmente con las disposiciones y acuerdos internacionales en la materia, pero no existe un programa nacional para la gestión de desechos radiactivos.

Palabras clave: gestión, desechos radiactivos y México.

ABSTRACT

Radioactive waste generation constitutes a problem of a specific nature for humanity, mainly in relation to its management and final disposal. Technological advances in the nuclear industry, medicine, science and research, have allowed human beings to achieve significant improvements in their quality of life. However, the amount of radioactive waste generated in such processes, triggers impacts linked to the final disposal of this type of waste (Molina, 2006).

The general objective of this work was to carry out the analysis of the state of the art of radioactive waste management generated from non-energy activities in Mexico. For the realization of this work, sources of information were reviewed theoretically, based on the consultation of reliable sources of information, which have addressed the issue of radioactive waste management. Generation data were consulted for a period of time from 2000 to 2018. The sources of the data were INFOMEX and INAI.

The generation of radioactive waste in Mexico shows a decrease associated with new technological advances; is an activity that has been developed since the 60s. With regard to the radioactive waste management, it is a stage that is still in the process of being formed, since a continuous improvement scheme is needed, as well as political and economic will. Finally, current legislation is based on fully complying with international provisions and agreements on the subject, but there is no national program for the management of radioactive waste.

Keywords: management, radioactive waste, México.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
GLOSARIO	12
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO I.....	18
MARCO TEÓRICO	18
I.1. El contexto internacional.....	18
I.2 Origen de los desechos radiactivos	19
I.3 Clasificación de los desechos radiactivos	19
I.3.1 Clasificación de los desechos radiactivos de acuerdo al organismo internacional de energía atómica (OIEA)	20
I.3.2 Desechos radiactivos de origen militar	23
I.4 ¿Qué se hace con los desechos radiactivos?.....	23
I.4.1 Gestión de desechos radiactivos	24
I.4.2 Principios básicos para la gestión de desechos radiactivos	24
I.4.3 Etapas de la gestión de desechos radiactivos.....	26
I.4.3.1 Pretratamiento	26
I.4.3.2 Clasificación.....	27
I.4.3.3 Tratamiento	27
I.4.3.4 Acondicionamiento	28
I.4.3.5 Inmovilización.....	28
I.4.3.6 Almacenamiento	29
I.4.3.7 Disposición	29
I.5 Procedimientos para la gestión final de desechos radiactivos	31
I.5.1 Dispensa de desechos contaminados con material radiactivo	32
I.5.2 Dispensa	32
I.5.3 Exclusión y exención	33
I.5.4 Eliminación de desechos radiactivos de alto nivel.....	33
I.6 Historia de los desechos radiactivos en México.....	34
I. 7 El contexto nacional.....	38
I.8 Tecnologías de gestión de desechos radiactivos implementadas en la PATRADER	42

I.8.1. Compactación	42
I.8.2 Decaimiento	42
I.8.3 Inmovilización.....	42
I.8.4 Precipitación	43
I.8.5 Perspectivas.....	43
I.9 Clasificación de los desechos radiactivos de acuerdo a la NOM-004-NUCL-2013 ..	44
I.9.1 Criterios de clasificación de los desechos radiactivos	45
I.9.2 Tipo de radiación emitida	47
I.9.3 Periodos de semidesintegración	47
I.9.4 Actividad específica	47
I.9.5 Radiotoxicidad.....	48
I.9.6 Desechos radiactivos de origen hospitalario	48
CAPITULO II	50
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	50
II.1. Antecedentes	50
CAPÍTULO III.....	53
JUSTIFICACIÓN.....	53
CAPITULO IV.....	54
OBJETIVOS.....	54
IV.1. Objetivo General	54
IV.2. Objetivos específicos	54
CAPITULO V.....	55
PROPUESTA A IMPLEMENTAR.....	55
V.1 Delimitación.....	55
V.2. Alcance	56
V.3. Tipo de investigación	56
V.4. Enfoque	57
V.5. Técnicas de recolección de datos	57
CAPÍTULO VI.....	59
RESULTADOS.....	59
VI.1. Generación de desechos radiactivos en México.....	59
VI.2 Manejo de desechos radiactivos en México.....	64
VI.2.1 Licencias ante la CNSNS.....	67

VI.3 Estructura de la gestión de los desechos radiactivos en México.....	68
VI.3.1 Planta de tratamiento de desechos radiactivos (PATRADER)	68
VI.3.2 Laboratorio de desechos radiactivos (LDR)	73
VI.3.3 Centro de almacenamiento de desechos radiactivos (CADER)	73
VI.4 Legislación en México en materia de desechos radiactivos.....	75
VI.4.1 Leyes y reglamentos	75
VI.4.2 Normas oficiales mexicanas.....	79
CAPITULO VII	83
CONCLUSIONES	83
CAPITULO VIII	85
REFERENCIAS	85
ANEXO I	89
TRATADOS INTERNACIONALES FIRMADOS POR MÉXICO EN MATERIA NUCLEAR.....	89
ANEXO II.....	92
COMPENDIO DE NORMAS OFICIALES MEXICANAS APLICABLES A LAS INSTALACIONES NUCLEARES	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Principales desechos y su clasificación (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004)	21
Tabla I.2 Principios básicos para la gestión de desechos radiactivos (OIEA, 2011)	25
Tabla I.3 Radionúclidos encontrados en los desechos gestionados por la PATRADER (ININ, 2005)	41
Tabla I.4 Concentraciones de actividad de referencia para la clasificación de desechos radiactivos que contengan radionúclidos de vida media larga (NOM-004-NUCL-2013) ...	45
Tabla I.5 Concentraciones de actividad de referencia para la clasificación de desechos radiactivos que contengan radionúclidos de vida media corta (NOM-004-NUCL-2013) ...	46
Tabla VI.1 Datos de desechos sólidos, desechos líquidos y fuentes gastadas recibidas en la PATRADER. Bidones y contenedores, recibidos en el CADER del año 2000 al 2018 (Elaboración propia con base en datos obtenidos del INFOMEX e INAI)	60
Tabla VI.2 Tipos de licencias para el manejo de los desechos radiactivos y su descripción	69
Tabla VI.3 Leyes y reglamentos en materia de desechos radiactivos en México.....	76
Tabla VI.4 Normas Oficiales Mexicanas que aplican a los desechos radiactivos en México	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura V.1 Vista aérea del ININ.....	55
Figura VI.1 Volumen de desechos radiactivos recibidos en la PATRADER en el periodo del 2000 al 2013 (Elaboración propia con datos del INAI, INFOMEX, 2019)	61
Figura VI.2 Bidones y contenedores recibidos en el CADER en el periodo 2000-2018 (Elaboración propia con datos del INAI, INFOMEX, 2019)	63
Figura VI.3 Esquema de manejo de los desechos radiactivos en México	66
Figura VI.4 Estructura jerárquica de la gestión de los desechos radiactivos en México (Elaboración propia con datos del INFOMEX e INAI, 2019)	72

GLOSARIO

A

AIEA: Agencia Internacional de Energía Atómica.

C

CADER: Centro de Almacenamiento de Desechos Radiactivos.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

CNEN: Comisión Nacional de Energía Nuclear.

CNLV: Central nuclear laguna verde

CNSNS: Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

CPEUM: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

D

DOF: Diario Oficial de la Federación.

E

EW: Desechos Exentos.

ESR: Encargado de Seguridad Radiológica.

H

HLW: Desechos de actividad alta.

I

ILW: Desechos de actividad intermedia.

INEN: Instituto Nacional de Energía Nuclear.

INFOMEX: Sistema de Información Mexicano.

INAI: Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales.

ININ: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

L

LLW: Desechos de Actividad muy Baja.

N

NOM: Norma Oficial Mexicana.

O

OECD: Organisation for Economic Co-Operation and Development.

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica.

P

PATRADER: Planta de Tratamiento de Desechos Radiactivos.

PEMEX: Petróleos Mexicanos.

PNT: Plataforma Nacional de Transparencia del Gobierno Federal.

R

RAA: Desechos de alta actividad.

RBBA: Desechos de muy baja actividad.

RBMA: Desechos de baja y media actividad.

REDALYC: Revistas y producción científica de América Latina y el Caribe.

RPBI: Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos.

S

SEMIP: Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

SENER: Secretaría de Energía.

SEPR: Sociedad Española de Protección Radiológica.

SCOPUS: Base de datos bibliográfica que contiene resúmenes y citas para artículos

STPS: Secretaría de Trabajo y Previsión Social.

U

URAMEX: Uranio Mexicano.

V

VLLW: Desechos de actividad muy baja.

VLSW: Desechos de periodo muy corto.

W

WoS: Web of Science.

INTRODUCCIÓN

El hombre siempre ha estado expuesto a la radiactividad de muchas maneras, tanto naturales como antropogénicas, ejemplo de esto son los viajes en avión a elevadas altitudes, la televisión a color y relojes digitales. Estos son ejemplos bastante comunes y nos indican la estrecha relación del hombre con la radiactividad, sobre todo la de tipo antropogénico (Osores, 2008).

La radiactividad puede llegar al hombre también a través de los alimentos, el viento y del agua. Independientemente de que la radiactividad se haya originado por una explosión nuclear de prueba, como resultado de una emisión de vapores radiactivos por un accidente en una planta nuclear o de cualquier otro modo, pueden viajar con el viento hasta zonas muy alejadas de la fuente de emisión y descender con los mismos vientos, las lluvias, la nieve o el polvo de la superficie terrestre; una vez ahí, puede pasar a los mantos freáticos, a las corrientes subterráneas o permanecer en el suelo de donde pasa a las plantas, que más tarde consumirán los animales herbívoros, concentrando el material radiactivo en sus tejidos (Osores, 2008).

Se define a la contaminación como el cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas del aire, suelo y agua, que puede afectar o afectara nocivamente la vida humana y de las especies beneficiosas; estos cambios se deben a la incorporación de cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños irreversibles o no, en el medio receptor. En este medio, la contaminación radiactiva ambiental se considera como la incorporación de energía ionizante o de elementos radiactivos, llamados radionúclidos, en un componente ambiental determinado (biológico, hidrológico, geológico o atmosférico (Odum, 1983).

Se calcula que el 68% de la radiactividad total que recibe la tierra es natural. Por otro lado, mediante diferentes técnicas de activación o fisión nuclear, existen alrededor de 65 elementos que el hombre puede volver radiactivos, como, por ejemplo, calcio, cobre, cadmio, yodo, níquel, fosforo, azufre entre otros. La gran mayoría de estos radionúclidos son utilizados en aplicaciones industriales, agropecuarias y médicas. Uno de los usos más importantes del material radiactivo es la generación de energía en los reactores nucleares (Osores, 2008).

La contaminación radiactiva ambiental es producida principalmente por el uso de sustancias radiactivas naturales o artificiales, el uso de la energía nuclear y de armas nucleares, constituyendo un gran peligro de contaminación para la naturaleza y la humanidad; ya que se han esparcido por toda la tierra muchos desechos de estos materiales contaminantes. Los riesgos de la contaminación radioactiva para las personas y el medio ambiente dependen de la naturaleza del contaminante radiactivo.

La generación de desechos radiactivos constituye un problema de índole específica para la humanidad, debido a la atención que se le tiene que dar a este tipo de desechos, principalmente en lo que atañe a su manejo y disposición. Los avances tecnológicos de la industria nuclear, tanto en medicina, ciencia, investigación y procesos, han permitido al ser humano alcanzar mejoras significativas en cuanto a su calidad de vida, desgraciadamente la parte negativa de esto es la cantidad de desechos radiactivos que se generan en tales procesos, desencadenando una serie de problemáticas ligadas en cuanto a cuál es la forma indicada y más segura de disponer de este tipo de desechos.

Al tratar de una temática tan delicada y de tan importante medida, la primera reacción es asociarla a los accidentes nucleares que han ocurrido a lo largo de la historia, como es el caso de Chernóbil en Ucrania en el año de 1986, Fukushima en

Japón en el año de 2011, por mencionar algunos, uno derivado de un mal manejo de un reactor nuclear y el otro ocasionado por un desastre natural, que demostró que, ante la fuerza implacable de la naturaleza, no podemos hacer nada.

Es indispensable una revisión de las actividades de disposición de desechos radiactivos en otros países para analizar las tendencias no solamente desde el punto de vista tecnológico, sino también desde la perspectiva de su aceptación social, en los países democráticos se debe convencer a la opinión de la conveniencia de las actividades aludidas.

La primera vez que se dispuso de desechos radiactivos fue en 1944 en Oak Ridge, Tennessee, EE.UU., fue una vidriera de laboratorio contaminada; se utilizó para ello una simple trinchera. Esta misma experiencia fue realizada en otros lugares del mundo. Actualmente los sitios de disposición para desechos radiactivos de nivel bajo e intermedio van desde instalaciones superficiales a repositorios geológicos con barreras de ingeniería (Molina, G. 2016).

Actualmente el tema de los desechos radiactivos que se producen en nuestro país, por actividades que van de las energéticas a las no energéticas, es un tema que ha sido poco abordado debido a que este tema se asocia principalmente a accidentes nucleares o al uso de la bomba atómica, sin saber que la radiación es algo con lo que estamos en contacto día con día, por ello es necesario abordar esta temática para saber bajo que contexto se rigen y si se les aplica un sistema de gestión integral, que tenga un enfoque multidisciplinar.

A razón de esto surge el siguiente cuestionamiento, bajo que esquema se gestionan este tipo de desechos, cuál es su marco normativo, cuáles son las principales actividades económicas que los generan. Que cantidad y que tipo de desechos radiactivos son los que más se generan en nuestro país.

Saber cuáles son las posibles estrategias que se han generado, tanto desde la academia, las instituciones y la sociedad, para afrontar mejoras en el sistema de gestión de los mismos.

CAPÍTULO I.

MARCO TEÓRICO

I.1. El contexto internacional

El Organismo internacional de energía atómica (OIEA, 2015) define a los desechos radiactivos como: cualquier material que contenga o este contaminado con radionúclidos, concentraciones o niveles de radiactividad superiores a las cantidades establecidas por las autoridades competentes, y para los que no se les prevé uso alguno.

Según la definición de la Agencia internacional de energía atómica, residuo o desecho radiactivo es toda materia que contiene radionúclidos con una concentración superior a los valores que las autoridades competentes consideran admisibles en los materiales adecuados para ser utilizados sin ningún control y para la que no está previsto ningún uso (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004).

Para entender los problemas de la eliminación de los desechos radiactivos se debe comenzar por el concepto de desintegración radiactiva, que es cuando los isótopos inestables emiten partículas y radiación, se estabilizan y dejan de ser radiactivos. Si los materiales radiactivos se aíslan de los seres humanos y otros organismos, la desintegración procede sin causar daños.

El ritmo de desintegración radiactiva es tal que la mitad de la cantidad inicial del isótopo decae en cierto tiempo. En el siguiente lapso igual, se desintegra la mitad del resto (la mitad de la mitad, es decir, un cuarto del original). El tiempo necesario para que se desintegre la mitad de la cantidad del isótopo radiactivo se llama vida media, que es siempre la misma para cada elemento radiactivo, cualquiera que sea la cantidad inicial (Nebel y Wriqth, 1999).

La desintegración de un radioisótopo nunca llega a ciento por ciento; la radiactividad disminuye a la mitad en cada ciclo, de modo que siempre queda una parte sin desintegrar. Se dice que la radiación se reduce a niveles insignificantes después de 10 ciclos de vida media. Cada radioisótopo radiactivo tiene una vida media característica, que va de fracciones de segundo a muchos miles de años.

I.2 Origen de los desechos radiactivos

La energía nuclear se obtiene mediante la fisión nuclear (rompimiento del núcleo), así como mediante la fusión nuclear (unión de núcleos). La fisión es la que se emplea actualmente en las centrales nucleares. El descubrimiento del uranio como el combustible de los reactores nucleares impulsó la prospección y, en su caso, la extracción del uranio natural en todo el mundo. Los desechos radiactivos también provienen de las aplicaciones de los isotopos radiactivos en medicina e industria, así como de los laboratorios de investigación científica y tecnológica. Se trata de residuos de actividad baja o mediana y de vida media inferior a 30 años, emisores de radiaciones beta o gamma. Los desechos radiactivos generados por las instituciones y empresas de investigación y aplicaciones comprenden fuentes radiactivas selladas y gastadas, desechos sólidos (guantes, filtros y resinas intercambiadoras de iones), piezas metálicas utilizadas en laboratorios o provenientes del reprocesamiento del combustible nuclear, así como otros materiales (cables, aparatos diversos, tierras, entre otros) (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004).

I.3 Clasificación de los desechos radiactivos

A diferencia de los residuos tóxicos industriales, los desechos radiactivos se pueden clasificar en categorías bien definidas, además de que las cantidades implicadas son mucho menores que las de los residuos industriales tóxicos.

Los desechos radiactivos se caracterizan esencialmente por la naturaleza de los elementos que contienen y por su actividad por unidad de volumen o de masa (expresada en becquerels: número de desintegraciones espontáneas por segundo). A cada uno de estos radionúclidos corresponde un tiempo de vida media radiactiva, el cual indica el tiempo necesario para que su actividad disminuya a la mitad (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004).

La clasificación de los desechos radiactivos difiere en los distintos países, pero de manera general se clasifican, según su naturaleza, el nivel de radiactividad y la vida media de los radionúclidos que los constituyen, en diferentes categorías: a) muy baja actividad, b) baja actividad, c) mediana actividad y d) actividad elevada. Se les llama desechos de vida media larga cuando su periodo de desintegración es superior a 30 años y de vida media corta en el caso contrario (NOM-004-NUCL-2013).

Los desechos líquidos comprenden soluciones acuosas producidas en los laboratorios de investigación, en los reactores y en las instalaciones de reprocesamiento del combustible quemado (soluciones que contienen diferentes sales, nitratos, boratos, fosfatos, sulfatos), así como líquidos orgánicos (aceites o líquidos de centelleo) con isotopos de actividad muy baja y totalmente decaídos.

En la tabla I.1 se muestra cuáles son los principales desechos y su clasificación de acuerdo con su nivel de actividad y su periodo de vida.

I.3.1 Clasificación de los desechos radiactivos de acuerdo al organismo internacional de energía atómica (OIEA)

El OIEA tiene la facultad para establecer normas de seguridad, cuyo principal objetivo se centra en facilitar la gestión de los desechos radiactivos.

Tabla I. 1 Principales desechos y su clasificación (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004).

Actividad	Tipo de desechos	Vida media larga
Muy baja actividad	Desechos orgánicos (aceites o líquidos de centelleo).	Residuos del mineral de uranio natural.
Baja actividad	Desechos orgánicos (aceites o líquidos de centelleo).	Residuos del mineral de uranio natural.
Mediana actividad	Desechos que provienen de las aplicaciones de los isótopos radiactivos en medicina e investigación.	Distintos materiales que contenían al elemento combustible (trozos del encamisado, tapones), diversas matrices sólidas (cementos, asfalto).
Actividad elevada	¹³⁷ Cesio y ⁹⁰ Estroncio	Productos derivados de la fisión nuclear (¹²⁹ Yodo, ⁹⁹ Tecnecio, actínidos menores (neptunio, americio y curio) y actínidos mayores (uranio y plutonio).

Tal es el caso de la guía de seguridad titulada *classification of radioactive waste (2009)*, la cual contiene normas generales para clasificar los desechos radiactivos; cuyo sistema de clasificación se centra en la seguridad a largo plazo para el manejo de los distintos tipos de desechos, en ella se definen seis tipos de estos.

- Desechos exentos (EW): contienen pequeñas concentraciones de radionúclidos que cumplen con los criterios necesarios para la dispensa, exención o exclusión del control reglamentario y tampoco se requiere establecer disposiciones para la protección radiológica, independientemente de que los desechos se sometan a disposición final en vertederos convencionales o se reciclen; no se requiere ninguna consideración adicional desde una perspectiva de control reglamentario.
- Desechos de periodo muy corto (VLSW): los desechos de periodo muy corto contienen radionúclidos con periodos de semidesintegración muy breves cuyas concentraciones de la actividad están por encima de los niveles de dispensa y posteriormente sean autorizados para gestionarlos como residuos convencionales. Ejemplos de estos son los procedentes de fuentes que emplean ¹⁹²Ir y ^{99m}Tc y los desechos que contienen otros radionúclidos con

periodos de semidesintegración cortos procedentes de aplicaciones industriales y médicas. Los principales criterios para clasificar los desechos como VLSW son los periodos de semidesintegración de los radionúclidos predominantes. En general la opción de gestión de almacenamiento con fines de desintegración se aplica a los desechos que contienen radionúclidos con periodos de semidesintegración del orden de 100 días o menos.

- Desechos de actividad muy baja (VLLW): son aquellos desechos que presentan un riesgo tan limitado y que de todos modos se encuentra por encima o cerca de los niveles correspondientes a los desechos exentos. Suelen formar parte de esta clase de desechos la tierra y los escombros con baja concentración de actividad.
- Desechos de actividad baja (LLW): son los que se encuentran por encima de los niveles de dispensa, pero que contienen cantidades limitadas de radionúclidos de periodo largo. Estos desechos requieren un aislamiento y contención durante periodos de hasta algunos cientos de años y son adecuados para la disposición final en instalaciones cerca de la superficie.
- Desechos de actividad intermedia (ILW): contienen radionúclidos de periodo largo en cantidades que requieren un mayor grado de contención y aislamiento de la biosfera, que el que ofrece la disposición final cerca de la superficie. Los ILW pueden contener radionúclidos de periodo largo, en particular radionúclidos emisores de radiación alfa, por ello es conveniente que la disposición se lleve a cabo en una instalación a una profundidad de entre algunas decenas y varios cientos de metros. La disposición final a esas profundidades tiene el potencial de ofrecer un aislamiento del medio ambiente accesible durante un largo periodo de tiempo, siempre que se proceda a la selección adecuada de las barreras, tanto naturales como artificiales.
- Desechos de actividad alta (HLW): son desechos que contienen concentraciones tan grandes de radionúclidos de periodo corto y largo que

requieren de un mayor grado de contención y aislamiento del medio ambiente accesible para garantizar la seguridad a largo plazo. Esta contención y aislamiento normalmente se realiza utilizando el almacenamiento geológico profundo en su concepto multibarrera (barrera geológica, más barreras de ingeniería). La disposición final en formaciones geológicas profundas y estables, normalmente a varios cientos de metros o más por debajo de la superficie, es la opción aceptada para la disposición final de los HLW (OIEA, 2009).

I.3.2 Desechos radiactivos de origen militar

Algunas de las peores fallas en el manejo de los desechos radiactivos han ocurrido en instalaciones militares, dedicadas a la fabricación de armas nucleares. Desechos líquidos de alto nivel almacenados en plantas se han escurrido al ambiente y han contaminado la fauna, los sedimentos, las aguas freáticas y el suelo. Las actividades en esos sitios se desenvuelven en secreto; sólo hasta hace pocos años salieron a la luz pública documentos que revelan accidentes y escapes radiactivos. Se conocen emisiones deliberadas de ¹³³Xenón, ¹³¹Yodo y Tritio (Nebel y Wrigth, 1999).

I.4 ¿Qué se hace con los desechos radiactivos?

Al preguntarse qué hacer con los desechos radiactivos, cada país responde con una solución muy particular. Desde hace varios años, algunos países, han optado por el ciclo cerrado del combustible nuclear (un conjunto de etapas de uranio), desde la extracción del mineral, pasando por la fabricación del elemento combustible, el tratamiento del combustible quemado hasta el almacenamiento de desechos, después de su utilización en el reactor. Se llama cerrado luego que el combustible se reprocesa con fines de recuperar el uranio y el plutonio para su

posible reutilización. En estos países se desarrollan procesos industriales para confinar las soluciones acuosas radiactivas que provienen del tratamiento de desechos y se realizan numerosos estudios para seleccionar materiales aptos para confinar e inmovilizar los radionúclidos y reducir de esta forma el volumen de desechos. El objetivo de confinar los desechos es hacer que pierdan toda su nocividad y garantizar una inmovilidad efectiva y durable de los radionúclidos que contienen (Badillo-Almaraz y Pérez, 2004).

I.4.1 Gestión de desechos radiactivos

Se entiende por gestión de desechos radiactivos a todas las actividades administrativas y operativas, necesarias para la manipulación, tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, transporte y eliminación de los desechos radiactivos (OIEA, 2003).

I.4.2 Principios básicos para la gestión de desechos radiactivos

El OIEA menciona que los principios básicos sobre energía nuclear proporcionan un enfoque amplio y holístico para el uso de la energía nuclear y para ser aplicables a todos los elementos esenciales de los sistemas de energía nuclear, incluidos los aspectos humanos, técnicos, de gestión y económicos; tomando en cuenta la protección de las personas y el medio, la no proliferación y la seguridad.

En la tabla I.2 se presentan los principios de la energía nuclear, aplicados a la gestión de desechos radiactivos.

Tabla I.2 Principios básicos para la gestión de desechos radiactivos (OIEA, 2011).

PRINCIPIOS BÁSICOS	OBJETIVOS
Beneficios	<p>Minimización y optimización de la generación de desechos radiactivos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mejorando el diseño y operaciones de las actividades de minería y enriquecimiento del uranio. • Mejorando el diseño de los reactores nucleares que reduzcan la generación de desechos radiactivos y descargas al ambiente. • Optimizando las operaciones de las plantas nucleares. • Aumentando el reusó y reciclado de los materiales radiactivos. • Mejorando los métodos de gestión y seguridad para el manejo de las fuentes radiactivas. • Mejorando las técnicas de descontaminación y reduciendo el volumen de los desechos generados.
Transparencia	<p>Establecimiento de métodos y enfoques para generar confianza entre personas implicadas y afectadas por la gestión de los desechos radiactivos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apertura y transparencia en relación con la planificación y la toma de decisiones. • Coherencia en el discurso y la acción. • La confianza en el operador y el órgano regulador. • Desarrollo de un marco regulatorio eficaz y un organismo regulador independiente y digno de confianza.
Protección a las personas y al ambiente	<p>Instalación de sistemas de protección física en las instalaciones que están dentro del ciclo de gestión de los desechos radiactivos</p>
Seguridad	<p>Instalación de sistemas de protección física en las instalaciones que están dentro del ciclo de gestión de los desechos radiactivos</p>
No proliferación	<p>Incorporación de requerimientos de salvaguardas de material nuclear en el diseño y operación de instalaciones que manejan desechos radiactivos</p>
Compromiso a largo plazo	<p>Desarrollo de soluciones que permitan la gestión de los desechos radiactivos a largo plazo</p>
Eficiencia de los recursos	<p>Promoción de métodos y planes de gestión de desechos radiactivos que permita utilizar los recursos económicos de forma eficiente</p>
Mejora continua	<p>Mejorar constantemente los métodos y tecnologías de gestión de los desechos radiactivos</p>

I.4.3 Etapas de la gestión de desechos radiactivos

El objetivo de llevar a cabo la gestión de estos desechos radica en proteger la salud humana y el ambiente; esto podría lograrse mediante el desarrollo y la aplicación efectiva del sistema de gestión de desechos radiactivos (Abdel, 2012). Las actividades a considerar para la gestión de desechos radiactivos, previo a su disposición final, son las siguientes.

I.4.3.1 Pretratamiento

Es el primer paso de la gestión y se lleva a cabo posteriormente a la generación de desechos. El pretratamiento abarca las actividades de recolección, segregación, ajuste químico y descontaminación; aplicables tanto a desechos radiactivos líquidos como sólidos (OIEA, 1987).

Los principales objetivos del pretratamiento son:

- Segregación o separación de los desechos en flujos activos y no activos, para reducir el volumen de los desechos radiactivos.
- Separar el flujo activo en componentes o para convertir el desecho en una forma tal, que sea más fácil el tratamiento, acondicionamiento, empaquetado y transporte fuera del sitio o eliminarse de la manera más adecuada.
- Recuperar productos para el reciclaje.

Para realizar estas operaciones se debe de hacer una caracterización adecuada de los desechos que permita la clasificación correcta de los procesos de tratamiento y acondicionamiento. Esta etapa es muy importante, pues en muchos casos constituye la mejor oportunidad para segregar los desechos en los diferentes flujos.

Durante el pretratamiento también se incluye el embalado de los desechos radiactivos, es necesario de manera correcta, ya que permite la minimización del volumen de desechos, además de dar una concentración confiable durante el almacenamiento, facilitando el manejo y simplificando el tratamiento subsiguiente.

I.4.3.2 Clasificación

Es esencial que los desechos radiactivos una vez generados se clasifiquen y caractericen; ya que la eficacia del tratamiento y acondicionamiento depende en gran medida del conocimiento de la naturaleza y composición del desecho a ser tratado. La caracterización puede servir para diferentes fines, tales como percatarse de los riesgos potenciales inherentes a ciertos tipos de desechos, diferenciar los que son adecuados para almacenamiento hasta que decaigan, almacenamiento o disposición final, planificar y diseñar las instalaciones de gestión. La clasificación permite seleccionar la opción más adecuada para la gestión de desechos, la cual se ve influenciada por el periodo de semidesintegración radiactiva (OIEA, 2009).

I.4.3.3 Tratamiento

El tratamiento de los desechos radiactivos abarca las operaciones destinadas a obtener mayor seguridad o eficiencia económica, modificando sus características físicas o inclusive químicas. Los tratamientos básicos que se aplican son: reducción del volumen, eliminación de radionúclidos y el cambio en la composición (OIEA, 2009).

Entre los métodos de tratamiento se encuentran: la compactación, la incineración de los desechos sólidos secos, así como la evaporación y precipitación química de los desechos líquidos. Así mismo, se pueden combinar varios de estos procesos para lograr la descontaminación eficaz de los flujos de desechos (Balek, 2004).

I.4.3.4 Acondicionamiento

El acondicionamiento consiste en las operaciones realizadas con el fin de convertir los desechos en una forma adecuada para su empaquetamiento y su posterior manejo, transporte, almacenamiento y disposición final (OIEA, 2009).

Generalmente en el acondicionamiento la conversión de un desecho es a una forma sólida, así mismo se puede incluir condicionalmente la inmovilización del desecho, empaquetándolo en un contenedor y de ser necesario implementar un embalaje adicional (OIEA, 2009).

En la selección del proceso de acondicionamiento, se debe tomar en cuenta la compatibilidad del desecho radiactivo con la matriz en la que se acondicionara y la compatibilidad de la matriz con las condiciones ambientales del futuro emplazamiento donde se almacenara (Qafmolla, 2000).

Las matrices más comunes son el cemento, el betún, los polímeros y el vidrio. Debiéndose evaluar la durabilidad de las matrices que contengan desechos y el comportamiento a largo plazo en condiciones de evaluación (Balek, 1994).

I.4.3.5 Inmovilización

La inmovilización de los desechos radiactivos es un paso importante para la gestión de desechos y consiste en incorporar el desecho a una matriz sólida y estable; reduciendo el potencial de dispersión de los radionúclidos a la geosfera. Generalmente la inmovilización, ya sea de forma solidificada o encapsulado, permite que el desecho sea más estable, facilitando que las operaciones de manejo, transporte y disposición se realicen de manera segura.

I.4.3.6 Almacenamiento

El almacenamiento de los desechos radiactivos se debe de realizar de tal manera que se garantice su aislamiento y la protección de los trabajadores, el público y el medio ambiente. El almacenamiento de desechos se emplea en los siguientes casos:

- Para que decaigan los radionúclidos antes de liberarlos del control reglamentario.
- Antes del pretratamiento, tratamiento y acondicionamiento.
- Antes de la disposición final o el traslado a otra instalación autorizada.

En particular los radionúclidos empleados en la investigación y la medicina son de un periodo de semidesintegración corto (horas o días), por lo cual el almacenamiento temporal para el decaimiento es una etapa importante en el proceso de gestión, antes de que estos se consideren exentos del control reglamentario. En este sentido el OIEA, 2009 menciona que el almacenamiento temporal con fines de decaimiento suele ser adecuado para los desechos radiactivos que contengan radionúclidos con periodos de semidesintegración no superiores a 100 días.

Por otro lado, también se generan desechos con largos periodos de semidesintegración, para los cuales el almacenamiento solo es una etapa más de la gestión, en la cual se asegura su aislamiento en lo que se trasladan al sitio de disposición final (OIEA, 2009).

I.4.3.7 Disposición

Buena parte de la radiactividad de los desechos de la fisión se disipa al cabo de meses o unos pocos años porque se desintegran los isótopos de vida media más corta. Pero

los isótopos longevos requieren almacenamiento hasta por 240,000 años; así el problema de la eliminación es doble.

- Almacenamiento a corto plazo mientras se desintegran los isótopos de vida corta. Así en 10 años los desechos de la fisión pierden más del 97% de su radiactividad. Después de ese tiempo, son mucho más fáciles de manejar.
- Almacenamiento a largo plazo (la agencia de protección ambiental de EE.UU recomienda como mínimo 10,000 años) para aislar los isótopos de vida prolongada.

Las normas gubernamentales exigen aislamiento para 20 ciclos de vida media, para este tipo de desechos radiactivos (OIEA, 2009).

En cuanto a la disposición a corto plazo, el combustible gastado se almacena en las instalaciones de las plantas en tanques profundos llenos de agua. El agua disipa el calor residual, que aún se genera y actúa como escudo contra la radiación. Luego de algunos años de desintegración, para ahorrar espacio se colocan en toneles enfriados por aire.

La expansión y la dedicación a la energía nuclear avanzaron sin haber resuelto el almacenamiento a largo plazo. Los defensores de la energía atómica suponían que los desechos se solidificarían, se colocarían en contenedores sellados y se enterrarían en estructuras rocosas sólidas y profundas (entierro geológico). Mientras tanto, los desechos de los reactores comerciales de todo el mundo se han acumulado a un ritmo de 9500 toneladas al año, toneladas almacenadas en las instalaciones de las plantas. Además, a causa del bombardeo de neutrones a las paredes de los reactores, todas las plantas acabarán entre los desechos radiactivos. La comunidad científica calcula que desmantelar una planta desautorizada generará más desechos radiactivos que los produjo en toda su vida útil (Nebel y Wrigth, 1999).

La disposición final es la última etapa de la gestión de desechos radiactivos (con largos periodos de semidesintegración), esta consiste en colocar los desechos en una instalación para su almacenamiento definitivo.

Para la contención o confinamiento de los desechos, las instalaciones de disposición deben de contar con barreras que proporcionen un grado de aislamiento a largo plazo, y que no representen riesgos para la población y el ambiente. Así mismo, para realizar el confinamiento final de desechos radiactivos, estos deben cumplir con ciertos requisitos de aceptación previamente definidos por el órgano regulador (OECD, 2000).

Hay dos tipos de barreras las cuales son:

- Hechas por el hombre (acero u hormigón).
- Barreras naturales (geológicas: gruesas capas de arcilla o metros de roca).

Las barreras pueden estar en:

- Enterramientos próximos a la superficie.
- Formaciones geológicas a media profundidad.
- Formaciones geológicas profundas.

I.5 Procedimientos para la gestión final de desechos radiactivos

La evacuación de desechos radiactivos con periodos de semidesintegración corto o medio es la etapa final del proceso de gestión, para esta etapa de evacuación se pueden distinguir dos vías (SEPR, 2002).

- Gestión convencional: se aplica cuando el desecho no requiere de consideración alguna desde el punto de vista de riesgo radiológico. En esta vía es importante distinguir los desechos que pueden evacuarse directamente por rutas convencionales y los que han de esperar un tiempo para su decaimiento, ya que se denomina como desechos convencionales a aquellos que tengan niveles de actividad y concentración por debajo de los niveles de dispensa.
- Gestión a través de una empresa autorizada: aquellos desechos radiactivos que por sus características no son susceptibles de una evacuación convencional deben de ser gestionados por una empresa autorizada para la gestión.

I.5.1 Dispensa de desechos contaminados con material radiactivo

Así como se generan desechos que están por encima del nivel establecido, también se producen desechos que contienen material radiactivo, pero por debajo de los niveles establecidos. En estos casos estos desechos no representan riesgos para la salud y medio ambiente y por lo tanto se considera impráctico su regulación.

La gestión de este tipo de desechos se realiza por las vías usuales, a menos que presenten características químicas o biológicas que impliquen un peligro, de ser así se trataran de acuerdo a la normatividad correspondiente (OIEA, 2007).

I.5.2 Dispensa

La dispensa de desechos o materiales radiactivos consiste en la superación de cualquier control regulador en materia nuclear, la finalidad de la dispensa es establecer que material del que ya está bajo control reglamentario, puede retirarse del mismo (OIEA, 2007).

De acuerdo con el OIEA, para que una práctica o fuente quede exenta de las consideraciones reglamentarias debe de cumplir con los siguientes criterios:

- Equivalente de dosis efectiva para el público inferior a 10 $\mu\text{Sv}/\text{año}$.
- Equivalente de dosis efectiva colectiva en un año, sea inferior a 1 Sv-hombre.

I.5.3 Exclusión y exención

Para el caso de la exclusión, se considera excluida del ámbito de las normas toda exposición esencialmente no controlable, ya que resulta imposible controlar el grado de exposición a la radiación.

La exposición por ^{40}K presente en el organismo, la radiación cósmica en la superficie terrestre o la concentración no modificada de los radionúclidos presentes en la mayor parte de las materias primas (OIEA, 2007).

La exención como lo señala el OIEA se aplica, para el caso de prácticas y fuentes adscritas al órgano regulador, que estén debidamente justificadas y cuyo riesgo radiológico es suficientemente bajo, para lo cual resulta impráctico emplear recursos para su control; es decir se exime del cumplimiento de ciertos requisitos administrativos al usuario, siempre y cuando los desechos cumplan con ciertos requerimientos, el concepto de exención se puede aplicar tanto a los radionúclidos de origen natural como artificial (OIEA, 2007).

I.5.4 Eliminación de desechos radiactivos de alto nivel

Casi todas las naciones que aprovechan la energía atómica han optado por los entierros geológicos para deshacerse de los desechos nucleares, pero ninguna ha dado pasos concretos para ponerlo en práctica y muchas ni siquiera han encontrado

lugares adecuados para ello. Cuando hay sitios elegidos, surgen muchas preguntas acerca de la seguridad. El problema básico es que de ninguna formación rocosa es posible asegurar que se mantendrá estable y seca durante decenas de miles de años. Dondequiera que los científicos buscan, encuentran huellas de actividad volcánica o sísmica o bien de lixiviación de las aguas freáticas en los últimos 10,000 años, lo que equivale a decir que ocurrirá de nuevo en un lapso igual. Si se diera tal acontecimiento, los desechos aun radiactivos escaparían y contaminarían el agua, el aire o el suelo, con los efectos subsecuentes en los seres humanos y el medio ambiente. La necesidad de encontrar y acondicionar un depósito permanente se ha vuelto crítica, con la falta de apoyo de la opinión pública, resulta muy difícil proponer un lugar de almacenamiento duradero y aceptable para los desechos radiactivos, el problema es más político que técnico. Es preciso solucionar el problema de los desechos, tal vez disminuyendo la exigencia política, que algunos juzgan poco realista, de garantizar que el sitio sea seguro durante 10,000 años (Nebel y Wrigth, 1999).

I.6 Historia de los desechos radiactivos en México

En el año de 1956 se crea el primer organismo gubernamental con funciones reguladoras en materia nuclear en México: la comisión nacional de energía nuclear (CNEN). En 1960 la CNEN lanza su programa de actividades, donde ya se menciona un laboratorio de desechos radiactivos encargado de recolectar, tratar y almacenar desechos radiactivos producidos exclusivamente por la CNEN. En ese entonces la CNEN confinaba sus desechos en un almacén provisional que se tenía en Tlalnepantla, Estado de México (Reyes, 1999., Trujillo, 2002 y Vélez, 1997).

En 1964 se inicia la construcción del centro nuclear en Salazar, Estado de México y para 1968 el centro ya contaba con el reactor nuclear TRIGA Mark III y con la planta de tratamiento de desechos radiactivos (PATRADER), diseñada originalmente para

tratar los desechos radiactivos generados solamente en las instalaciones del centro nuclear (Vélez, 1997).

La operación del reactor conllevó a la implementación de un programa de recolección y tratamiento de los desechos líquidos y sólidos de nivel bajo que fueron gestionados en la PATRADER. Los desechos líquidos originados por la operación del reactor podían ser almacenados hasta su completo decaimiento, diluidos para su posterior evacuación, evaporados y concentrados o almacenados en botellas especiales de plástico y posteriormente enterrados en el cementerio de desechos.

Los desechos sólidos (papel, hule, vidrio, telas, resinas entre otros) eran compactados en bidones metálicos de 200 litros. Los concentrados eran mezclados con cemento, arena y grava para formar bloques de concreto para posteriormente ser depositados en el centro de almacenamiento de desechos. Este tipo de tratamiento era aplicado a prácticamente todos los desechos generados en el centro nuclear (Morales y otros, 1970., Reyes, 1999).

En 1970 la CNEN realizó estudios técnicos, económicos, administrativos y jurídicos sobre la base de la normatividad de los años sesenta, para seleccionar un sitio de almacenamiento de desechos radiactivos. Se eligió un predio de 14.7 hectáreas, ubicado en el Km 18.5 de la carretera Tizayuca-Otumba en el municipio de Temascalapa, Estado de México, para construirse el centro de almacenamiento de desechos radiactivos (CADER), constituido por un almacén que ya no existe y casetas para oficinas, que aún se encuentran en la instalación. Los desechos radiactivos que se encontraban en Tlalnepantla se trasladaron entonces al CADER (Reyes, 1998., Reyes, 1999).

En 1972 el Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN) sustituyó a la CNEN y en 1979 de acuerdo con la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia nuclear se establecieron tres instituciones (DOF, 1985):

- Uranio Mexicano (URAMEX): a cargo de los procesos de extracción y beneficio de uranio, incluyendo la contratación de servicios de enriquecimiento.
- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS): responsable de la seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias.
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ): responsable de la investigación, desarrollo y entrenamiento en el campo nuclear, incluyendo el almacenamiento, manejo, transporte y tratamiento de desechos radiactivos.

A partir de esta fecha la PATRADER empezó a recibir y recolectar los desechos radiactivos generados en otras instituciones del país y el CADER pasa a formar parte del patrimonio del ININ.

En el año de 1985, la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia nuclear, fracción VII, le confiere al ejecutivo federal, por conducto de la entonces Secretaría de energía, minas e industria paraestatal (SEMIP), ahora Secretaria de energía (SENER), la responsabilidad del almacenamiento, transporte y depósito de desechos radiactivos cualquiera que sea su origen y a la CNSNS vigilar la aplicación de las normas de seguridad nuclear, radiológica, física y de salvaguardias (DOF, 1985., Trujillo, 2002 y Vélez, 1997).

En julio de 1989, la SEMIP establece un acuerdo con el ININ para que éste efectúe las actividades de recolección, transporte y tratamiento de desechos radiactivos, previa autorización de la CNSNS (Escofet, 1989).

En 1985 se realizaron varias obras en el CADER para dotarlo de mejores instalaciones, construyéndose un edificio y dos de los almacenes ya existentes, así como la readecuación de la barda perimetral.

De 1981 a 1989, parte de los desechos radiactivos tratados en la PATRADER se depositaron en el CADER, que poseía cinco trincheras controladas de 190 metros de longitud por 1.5 a 2.5 metros de profundidad. El enterramiento de bultos con desechos radiactivos fue suspendido en 1989 para cumplir con las normas establecidas por la CNSNS; a partir de esta fecha los desechos son depositados en los almacenes de superficie del CADER (Reyes y otros, 1998).

En 1992 la CFE realizó un estudio de caracterización del CADER, a petición del ININ, para cumplir con la normatividad establecida en ese entonces por la CNSNS; se perforaron tres pozos en el predio de hasta 330 m de profundidad, encontrándose alrededor de los 150 m basalto con cavidades y fracturas abiertas, la presencia de agua subterránea a una profundidad de 300 m emplazada en rocas basálticas y el nivel estático del manto freático a 260 m. Estos estudios revelaron que el CADER no cumplía con la normatividad de la CNSNS y pasa a ser un almacén temporal de desechos radiactivos que deberá transferir los desechos a una instalación adecuada para su almacenamiento definitivo y deberá ser recuperado el predio para su uso irrestricto (Reyes y Peregrina, 1998., Reyes, 1998).

En 1993, el ININ adquirió un terreno adicional de 1.7 hectáreas para el CADER con la finalidad de mejorar el control perimetral del centro. En el período de 1999-2000 se efectúa el proyecto de recuperación del CADER, se elige el sitio de Villa Aldama Chihuahua para recibir la tierra contaminada con jales de uranio, sin embargo, hubo oposición por parte del estado (población y autoridades) y las góndolas con dichos jales tuvieron que ser finalmente estacionadas en uno de los caminos internos del ININ. Hasta la fecha no se ha determinado el lugar de almacenamiento definitivo de estos desechos.

A mediados de los 90's se emiten Normas oficiales mexicanas que regulan el manejo, clasificación, caracterización, tratamiento y almacenamiento de desechos radiactivos, las cuales fueron implementadas en la PATRADER, ya que, la gestión de los desechos radiactivos realizada en la planta no había sido modificada sustancialmente desde los sesentas (DOF, 1994., DOF, 1995., DOF, 1996., Peregrina y otros, 1998).

I. 7 El contexto nacional

En nuestro país la industria nuclear y sus aplicaciones, tanto en la medicina, como en la misma industria, generan desechos, que por ser radiactivos deben de ser aislados y confinados a fin de limitar su dispersión en la biosfera. Este tipo de desechos son generados en hospitales, industrias, centros de investigación, centrales nucleares y durante el ciclo del combustible nuclear (Emeterio, M., y otros, 2016).

Los desechos radiactivos requieren de un manejo y resguardo no convencional, que debe de estar a cargo de personal capacitado y acorde con los reglamentos y normas dictadas por organismos nacionales; así como recomendaciones de organismos internacionales.

Dentro del contexto nacional, los principales generadores de desechos radiactivos son: la central nuclear laguna verde en Veracruz (CNLV), los hospitales del sector público (Siglo XXI, Juárez de México, entre otros) y del privado: los centros de investigación del sector salud, como los institutos nacionales de cancerología, epidemiología o nutrición, además del Instituto nacional de investigaciones nucleares (ININ) y algunos institutos y facultades de universidades públicas y empresas como PEMEX y altos hornos de México por mencionar algunas.

En el caso de México el órgano regulador en materia nuclear es la Comisión nacional de seguridad nuclear y salvaguardias (CNSNS) la cual es responsable de generar y

garantizar el cumplimiento de las normas referentes al uso de radiación y radionúclidos. La entidad encargada de llevar a cabo todo lo referente al manejo y disposición de los desechos radiactivos es el Instituto nacional de investigaciones nucleares (ININ). Para el caso de nuestro país, los desechos radiactivos se clasifican conforme a la NOM-004-NUCL-2013, que define que la clasificación de los desechos radiactivos es necesaria para establecer criterios y requisitos, con el fin de efectuar de manera segura las operaciones de manejo, tratamiento, acondicionamiento, transporte y almacenamiento temporal y definitivo de los mismos. La NOM-004-NUCL-2013, define como desecho radiactivo: cualquier material para el que no se tenga previsto uso alguno y que contenga o este contaminado con radionúclidos a concentraciones o niveles de actividad mayores a los establecidos por la NOM-035-NUCL-2013. En cuanto a la reglamentación mexicana, el pretratamiento se contempla en la NOM-028-NUCL-2009 (DOF, 2013).

En México está permitido que en aquellas instalaciones en las cuales hacen uso de radionúclidos con vidas menores a 1 año, tengan un valor exclusivo para el almacenamiento temporal, esto debido a que la normatividad responsabiliza al permisionario del manejo de este tipo de desechos, antes de que estos sean liberados al ambiente.

Para el caso específico de México la entidad gestora de los desechos radiactivos es el ININ a través de la PATRADER y el centro de almacenamiento de desechos radiactivos (CADER).

El departamento de desechos radiactivos del ININ, está capacitado y autorizado para gestionar los desechos radiactivos de origen no energético. En promedio el ININ recibe anualmente 15m³ de desechos radiactivos sólidos y 4.5m³ de desechos radiactivos líquidos de diversas composiciones químicas. Además, recibe desechos radiactivos de origen inorgánico (sales inorgánicas, arcillas, jales de uranio, torio,

entre otros) y orgánico desde papel, guantes, botellas de plástico, algodón, ropa, líquidos orgánicos utilizados en equipo de centelleo líquido, hasta sólidos biológicos (cuerpos de animales) contaminados con diversos radionúclidos cuyas vidas medias varían desde unos cuantos días hasta miles de años (Emeterio y otros, 2005).

En el caso de los desechos radiactivos líquidos, únicamente el 12% recibe tratamiento para reducir su volumen. El restante 88% no recibe ningún tratamiento ni para almacenarlos definitivamente ni para reducir su volumen. Adicionalmente se debe considerar que ya se encuentran almacenados 45m³ de desechos líquidos, esperando se desarrolle una metodología adecuada para su gestión.

La capacidad de almacenamiento de la PATRADER está limitada a 50m³ de desechos líquidos, anualmente se suman 4m³, esto significa que en un año llegaría al límite de su capacidad, ocasionando problemas de seguridad radiológica, licenciamiento de instalaciones y la posibilidad de una dispersión de estos materiales a la biosfera (Emeterio, M., y otros, 2005).

A pesar de las limitaciones en la gestión de desechos radiactivos de la PATRADER en él se utilizan diversas tecnologías de tratamientos de desechos radiactivos, las cuales se describen a continuación brevemente.

En la tabla I.3 se muestra una relación de cuáles son los radionúclidos encontrados en los desechos radiactivos que gestiona la PATRADER, así como cuál es su símbolo y su periodo de vida media que puede ser en horas, días, meses o años, según corresponda.

Tabla I.3 Radionúclidos encontrados en los desechos gestionados por la PATRADER (ININ, 2005).

Radioisótopo	Símbolo	Vida media
Tritio	³ H	12.33 años
¹⁴ Carbonó	¹⁴ C	5730 años
³⁵ Azufre	³⁵ S	87.4 días
²² Sodio	²² Na	2.6 años
³² Fósforo	³² P	14.28 días
⁴⁵ Calcio	⁴⁵ Ca	165 días
⁵¹ Cromo	⁵¹ Cr	27.7 días
⁶⁰ Cobalto	⁶⁰ Co	5.27 años
⁶⁵ Zinc	⁶⁵ Zn	244.1 años
⁶⁷ Galio	⁶⁷ Ga	78.3 horas
⁸² Bromo	⁸² Br	35.34 horas
⁸⁶ Rubidio	⁸⁶ Rb	18.8 días
⁹⁹ Molibdeno	⁹⁹ Mo	66 horas
^{99m} Tecnecio	^{99m} Tc	6.02 horas
¹²⁵ Yodo	¹²⁵ I	60.2 días
¹³¹ Yodo	¹³¹ I	8 días
¹³⁴ Cesio	¹³⁴ Cs	2.06 años
¹⁵³ Samarario	¹⁵³ Sm	46.8 horas
²⁰⁴ Talio	²⁰⁴ Tl	3.77 años
²³⁵ Uranio natural	²³⁵ U	7x10 ⁸ años
²⁴¹ Americio	²⁴¹ Am	433 años

I.8 Tecnologías de gestión de desechos radiactivos implementadas en la PATRADER

Las tecnologías aplicadas en la PATRADER a la gestión de desechos radiactivos pueden clasificarse en cuatro categorías: 1) compactación, 2) decaimiento, 3) inmovilización y 4) precipitación (Emeterio, M., y otros, 2005).

I.8.1. Compactación

La compactación como su nombre lo indica únicamente se aplica a materiales que pueden ser prensados como papel, plástico, entre otros. En la PATRADER se cuenta con una compactadora con capacidad de 100 toneladas, que es utilizada para reducir el volumen de este tipo de desechos, que se reduce en un 50%. Los desechos radiactivos compactados son finalmente almacenados en bidones y transferidos al CADER, ubicado en Maquixco, Estado de México.

I.8.2 Decaimiento

Esta técnica se aplica únicamente a materiales contaminados con radionúclidos, cuyas vidas medias son menores a 1 año. Una vez que dichos materiales se encuentran debajo de lo establecido por la NOM-035-NUCL-2013, son considerados como desechos comunes y pueden ser depositados en la basura común.

I.8.3 Inmovilización

Esta técnica se aplica para inmovilizar fuentes selladas de 60 cobalto, 137 cesio, 226 radio, 241 americio o 91 estroncio, todos ellos radionúclidos con vidas medias de varios años. En general son inmovilizadas estas fuentes mediante su cementación en bidones, los cuales son enviados finalmente al CADER.

I.8.4 Precipitación

En este caso se trata de desechos radiactivos líquidos, a los cuales se les adiciona un agente floculante para inducir la precipitación de los radionúclidos contenidos en ellos.

I.8.5 Perspectivas

Es de vital importancia aplicar nuevas técnicas de gestión de desechos radiactivos que permitan su tratamiento, para disminuir su volumen y poder ser aislados y confinados en un lugar adecuado que evite su dispersión incontrolada hacia la biosfera. Desde el punto de vista de la reducción de volumen de los desechos, una de las opciones más viables es su incineración, dado que se disminuye hasta en un 95% o más su volumen total. En particular existe interés por montar un equipo de degradación térmica que permita resolver el problema del tratamiento de desechos radiactivos de nivel bajo e intermedio a corto plazo, motivando así a las instituciones responsables de su gestión y a las generadoras de estos desechos, a invertir en la construcción de una planta de tratamiento a escala industrial que permita solucionar de manera definitiva el problema de la gestión y almacenamiento de estos desechos (Emeterio, M., y colaboradores, 2016).

En México los criterios para la dispensa se establecen en la NOM-035-NUCL-2013, en la cual se definen dos tipos de dispensa:

- Dispensa incondicional, donde los desechos sólidos que contengan radionúclidos deben ser gestionados de manera segura considerando solo otras propiedades peligrosas que pudieran contener. Cuando el desecho contenga un solo radionúclido de origen artificial. Cuando el desecho contenga una mezcla de radionúclidos de origen artificial.

- **Dispensa condicional:** cuando se pretendan usar niveles de dispensa superiores a los establecidos para la dispensa incondicional. Cuando el equivalente de dosis efectivo resultante de todas las situaciones razonablemente previsibles a las que se someterá el desecho dispensado no será superior a 10 $\mu\text{Sv/año}$. Cuando el equivalente de dosis efectivo resultante de considerar escenarios de baja probabilidad que puedan presentarse para el desecho dispensado, no implique un valor superior a 1 mSv/año .

I.9 Clasificación de los desechos radiactivos de acuerdo a la NOM-004-NUCL-2013

Con base en dicha norma se hace una clasificación de los desechos radiactivos de acuerdo con la concentración, la actividad y la vida media de los radionúclidos presentes y su origen en el siguiente orden:

- **Desechos radiactivos de nivel bajo:** Clase A, Clase B y Clase C. Que son aquellos que contienen cantidades despreciables de radionúclidos de vida media larga; producidos generalmente de la aplicación de radionúclidos en medicina, industria e investigación (Hernández, 2005).
- **Desechos radiactivos de nivel intermedio:** se generan durante la operación de centrales nucleares de potencia. No generan suficiente calor para requerir enfriamiento, pero su nivel de radiactividad hace necesario el uso de blindajes para su manipulación.
- **Desechos radiactivos de nivel alto:** provenientes del reprocesamiento de combustibles gastados, estos desechos contienen elementos transuránicos y productos de fisión altamente radiactivos, generan calor y tienen vida media larga por lo que se requiere blindaje y enfriamiento.
- **Desechos mixtos:** son aquellos que por sus características no se les tiene previsto uso alguno, debido a que contienen o están contaminados con

radionúclidos a concentraciones o niveles de actividad mayores a los establecidos en la NOM-035-NUCL-2013 o la que la sustituya.

- Jales de uranio y torio: son los desechos radiactivos resultantes del procesamiento de la mena, en el caso del uranio los remanentes sólidos y líquidos del proceso de concentración es a lo que se les conoce como jales, en los cuales el material remanente es el uranio y el torio (DOF, 2013).

I.9.1 Criterios de clasificación de los desechos radiactivos

Existen ciertos criterios que sirven de base al momento de establecer las clasificaciones de los desechos radiactivos; tales como: su estado físico, el tipo de radiación emitida, el periodo de semidesintegración, la actividad específica y la radiotoxicidad.

De acuerdo con la NOM-004-NUCL-2013, existen criterios de clasificación basados en las concentraciones de actividad de referencia para desechos radiactivos que contengan radionúclidos de vida media, en la tabla I.4 se muestra esta clasificación.

Tabla I.4 Concentraciones de actividad de referencia para la clasificación de desechos radiactivos que contengan radionúclidos de vida media larga (NOM-004-NUCL-2013).

RADIONÚCLIDOS	CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD 10^{10} Bq/m ³
¹⁴ C	29.6
¹⁴ C en metal activado	296.0
⁵⁹ Ni en metal activado	814.0
⁹⁴ Nb en metal activado	0.74
⁹⁹ Tc	11.1
¹²⁹ I	0.296

Radionúclidos emisores alfa con una vida media mayor de 5 años, excepto el uranio	3.7 ^a
²⁴¹ Pu	129.5 ^a
²⁴² Cm	740.0 ^a

^a Las unidades son 10³ Bq por gramo.

Así como existen criterios de clasificación de desechos radiactivos de vida media larga, de acuerdo con la NOM-004-NUCL-2013, hay concentraciones de actividad de referencia para desechos que contengan radionúclidos de vida media corta, en la tabla I.5 se presenta esta clasificación.

Tabla I.5 Concentraciones de actividad de referencia para la clasificación de desechos radiactivos que contengan radionúclidos de vida media corta (NOM-004-NUCL-2013).

RADIONÚCLIDO	CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD 10 ¹⁰ Bq/m ³		
	COLUMNA 1	COLUMNA 2	COLUMNA 3
Todos los radionúclidos con vida media menor de 5 años	2590.0	*	*
³ H	148.00	*	*
⁶⁰ Co	2590.0	*	*
⁶³ Ni	12.95	259.0	2590.0
⁶³ Ni en metal activado	129.5	2590.0	25900.0
⁹⁰ Sr	0.148	555.0	25900.0
¹³⁷ Cs	3.7	162.8	17.020.0

(*) No existen límites establecidos para estos radionúclidos de Nivel Bajo Clase B o C. Consideraciones prácticas tales como el efecto de la radiación externa y generación de calor interno para el transporte, manejo y disposición, limitan la concentración de actividad de estos desechos. Estos desechos radiactivos deben clasificarse radiactivos de Nivel Bajo Clase B, a menos que la concentración de actividad de otros radionúclidos en la Tabla 2 determine que el desecho radiactivo pertenece al Nivel Bajo Clase C, independientemente de estos radionúclidos.

Con base a estos criterios se determinará el tratamiento o acondicionamiento que recibirá el desecho.

I.9.2 Tipo de radiación emitida:

Los radionúclidos contenidos en los desechos radiactivos se desintegran emitiendo partículas, las cuales se clasifican en alfa α , beta β y gamma γ .

I.9.3 Periodos de semidesintegración

En base al periodo de semidesintegración (tiempo para que la radiactividad se reduzca a la mitad) de los radionúclidos de un desecho radiactivo, se hace la clasificación siguiente:

- Desechos radiactivos de vida muy corta: son desechos cuyos radionúclidos se desintegran en un periodo de 90 días.
- Desechos radiactivos de vida corta: son desechos cuyos radionúclidos tienen periodos de semidesintegración máximos de unos 200 a 300 años, coincidiendo con los valores del ^{137}Cs y ^{90}Sr .
- Desechos radiactivos de vida larga: radionúclidos cuyo periodo de semidesintegración es superior a 300 años (Foro nuclear, 2009).

I.9.4 Actividad específica

Si la clasificación se hace en base a la actividad específica (actividad por unidad de masa o unidad de volumen), los desechos líquidos, sólidos o gaseosos se distinguen en:

- Desechos de muy baja actividad (RBBA): por su bajo contenido radiactivo, precisan de menores requisitos para su gestión. Decaen suficientemente tras un periodo temporal de almacenamiento inferior a 5 años, después del cual son declarados exentos.

- Desechos de baja y media actividad (RBMA): son materiales contaminados con radionúclidos que en menos de 30 años habrán reducido su radiactividad a la mitad y provienen de la operación de las centrales nucleares en los procesos de limpieza y purificación de sus sistemas y componentes, así como los servicios de medicina nuclear de hospitales, de otras industrias y de centros de investigación.
- Desechos de alta actividad (RAA): presentan problemas de generación de calor para su almacenamiento temporal y definitivo, están formados principalmente por el combustible irradiado de los reactores nucleares y otros materiales con niveles elevados de radiactividad, normalmente con un contenido apreciable de radionúclidos de vida larga.

I.9.5 Radiotoxicidad

La Radiotoxicidad es una propiedad de los desechos radiactivos que define su peligrosidad desde el punto de vista biológico. La radiotoxicidad de un radionúclido engloba varios parámetros como el tipo de radiación, el periodo de semidesintegración, la rapidez con que es expulsado del organismo y también depende de si tiende a fijarse selectivamente en determinados órganos o tejidos. Este criterio sirve de base para fijar los requisitos de protección y seguridad que han de cumplir las instalaciones en las que se manipule sustancias radiactivas, a fin de reducir adecuadamente el riesgo de irradiación interna (García y Romero, 2012).

I.9.6 Desechos radiactivos de origen hospitalario

Los desechos hospitalarios en México son considerados en general como residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI), incluyendo entre ellos los desechos de radionúclidos generados en medicina nuclear, los cuales requieren tratamientos

especiales. De acuerdo a los registros de la CNSNS, existen 139 laboratorios de medicina nuclear en México (Manrique y otros, 2015).

Los desechos radiactivos son regulados para su manejo, control y disposición final por la CNSNS, quien, a su vez, se rige por las normas internacionales expedidas por el OIEA. Un desecho radiactivo es una sustancia en forma líquida, sólida o gaseosa no reutilizable ni reciclable que contiene una cantidad de radionúclidos tal que su vertido o dispersión pueden tener repercusiones en la salud humana y el medio ambiente.

Por disposición de la CNSNS cada laboratorio establece su propia metodología para su informe anual de actividades (CNSNS, 2007).

El uso de la radiación en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades se ha convertido en una herramienta básica en medicina. Con ella se ha podido realizar exploraciones del cerebro y los huesos, tratar el cáncer, estudios renales y marcaje de anticuerpos, dar seguimiento a hormonas y otros compuestos químicos (Baró y colaboradores., 2000; Seoáñez y colaboradores., 2000).

En los laboratorios de medicina nuclear los radionúclidos se adquieren en presentaciones precalibradas y el proveedor es el ININ (Manríquez y colaboradores., 2015).

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La principal problemática que aborda la gestión de los desechos radiactivos es la posibilidad de que ocurran incidencias que pudieran ocasionar impactos negativos en el medio ambiente que pudieran afectar las características originales de los recursos bióticos que están próximos a alguna de las etapas de la gestión de los mismos como son: la generación, el manejo, tratamiento, transporte y disposición, así como impactos a la salud del ser humano. Por esta razón, la temática de la presente investigación se centra en hacer una revisión metodológica y teórica de cuál es el estado del arte de la gestión de los desechos radiactivos en México, provenientes de actividades no energéticas.

II.1. Antecedentes

En la bibliografía actual existe un número limitado de trabajos que abordan de manera directa la gestión integral de desechos radiactivos, debido a que la mayoría de la literatura disponible se centra en abordar la problemática desde un punto de vista de los accidentes nucleares como el de Chernóbil y Fukushima y sus consecuencias a la salud y al entorno natural; así como cuales han sido las consecuencias que ha ocasionado este tipo de incidentes tanto en el lugar donde ocurre la contingencia y sus afectaciones a las zonas aledañas, así como a la migración de elementos radiactivos de un entorno a otro, debido a la dinámica atmosférica, entre otro tipo de factores. Algunos otros se enfocan en tratar la serie de problemáticas que se generan por la mala gestión de este tipo de desechos principalmente los de origen hospitalario, que van desde la exposición accidental del personal que trabaja con este tipo de fuentes, hasta la contaminación accidental de la biosfera.

Con base a los lineamientos del OIEA, cada uno de los estados miembros contempla diferentes necesidades y responsabilidades, debido a que no todas se rigen bajo los mismos esquemas normativos y no generan ni el mismo tipo, ni la cantidad de desechos radiactivos, es por ello que la gestión de los desechos radiactivos es muy diversa, dependiendo de la región, así como de otros factores que van desde los políticos, económicos y sociales.

Ya en un entorno más local los trabajos de investigación se centran en determinar las consecuencias que se originan por la mala gestión de los desechos radiactivos, debido a la falta de comunicación de la entidad generadora, como de la entidad encargada de llevar a cabo la gestión y disposición de tales desechos.

Del 100% de los desechos radiactivos que se generan en nuestro país, el 80% de estos se generan por actividades energéticas, estos desechos se encuentran en la central nuclear de laguna verde (CNLV), Veracruz. El restante 20% se originan por actividades no energéticas, en aplicaciones de medicina, industria e investigación, de estos el 70% de su composición se origina en hospitales en el área de medicina nuclear. Todos estos desechos requieren ser gestionados, por lo cual son trasladados al CADER de forma segura, de manera que no se conviertan en un problema de salud o seguridad para las personas y el medio ambiente.

La problemática a abordar durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, y de acuerdo con la literatura consultada para la elaboración del marco teórico, en México existen una cantidad de variables que determinan la eficiencia del manejo integral de los desechos radiactivos entre las que destacan la cantidad de estudios limitados sobre la gestión de los mismos y que hay poca información disponible, ya que se considera un tema con cierto grado de sensibilidad por el tipo de desechos que se manejan y por la perspectiva social que se tiene en torno a estos.

La razón por la cual surge el interés de abordar la temática de este tipo de desechos es por tratar de dar a conocer cuál es el estado actual en el que se encuentra México, en cuanto a la gestión de este tipo de desechos, cuál es su principal problemática y cuáles son las perspectivas a futuro que se pueden generar, que requieren especial atención con base al ciclo de vida media de los radionúclidos que los conforman.

La importancia de abordar este tema radica en hacer una mayor difusión sobre el estado del arte de la gestión de los desechos radiactivos, es decir tocar las siguientes temáticas: que es un desecho radiactivo, procedencia de este tipo de desechos, clasificación de los desechos radiactivos, modelos de gestión de los desechos radiactivos y legislación en materia nuclear. Y tratar de hacer que se genere una mayor cantidad de información sobre la gestión y manejo integral de los mismos.

CAPÍTULO III

JUSTIFICACIÓN

El correcto desarrollo de este proyecto de investigación es importante porque se necesita hacer una mayor concientización sobre los impactos que genera la incorrecta gestión de este tipo de desechos.

Se necesita saber cuáles son las principales problemáticas a las que se enfrenta la entidad encargada de llevar a cabo la gestión de los desechos radiactivos. La principal contribución del presente trabajo es proponer una estrategia metodológica, que permita dar a conocer el diagnóstico situacional sobre el estado del arte de los desechos radiactivos en México.

CAPITULO IV

OBJETIVOS

IV.1. Objetivo General

Llevar a cabo el análisis del estado del arte de la gestión de los desechos radiactivos generados a partir de actividades no energéticas en México.

IV.2. Objetivos específicos

- Conocer la cantidad total de desechos radiactivos que han sido generados en México del año 2000 al 2018.
- Elaborar un diagnóstico del manejo de los desechos radiactivos, en nuestro país.
- Describir la legislación que rige el manejo de los desechos radiactivos en México.

CAPITULO V. PROPUESTA A IMPLEMENTAR

V.1 Delimitación

La delimitación territorial y temporal del presente proyecto de investigación sobre el estado del arte de los desechos radiactivos generados a partir de actividades no energéticas en México, está en función de las actividades que involucra la gestión de los desechos radiactivos a nivel nacional.

La ubicación territorial, del proyecto de investigación comprende a toda la república mexicana, debido a que el ININ, es la entidad gestora de los desechos radiactivos de actividades no energéticas en nuestro país, en la figura I.1 se puede observar una vista aérea del ININ. Dentro de la escala de tiempo el presente estudio toma como referencia los datos de generación, gestión y almacenamiento de desechos radiactivos que llegan al ININ, en un periodo comprendido entre el año 2000 al 2018.



Figura I.1. Vista aérea del ININ.

V.2. Alcance

Para el desarrollo de una manera correcta y adecuada del proyecto de investigación que se fundamenta en llevar a cabo el análisis del estado del arte de la gestión de los desechos radiactivos generados a partir de actividades no energéticas en México, se abordara solamente de manera teórica, fundamentando la investigación en la consulta de fuentes de información fidedignas que hayan abordado el tema de la gestión y el manejo integral de los desechos radiactivos en nuestro país.

Respecto a la determinación de la cantidad total de desechos radiactivos que han sido generados en México, comprende un periodo entre el año 2000 al 2018, los datos se buscaran en consultas en el INFOMEX y el INAI.

Para la realización del diagnóstico del manejo de los desechos radiactivos en nuestro país, se realizará de manera teórica, al recurrir a diversas fuentes de consulta como es el caso de artículos de revisión y algunos trabajos de tesis que han abordado el tema de los desechos radiactivos, desde diferentes perspectivas tanto sociales, políticas, ambientales y de impactos a la salud.

La descripción de la legislación que rige a cada una de las etapas de la gestión de los desechos radiactivos en México se hará conforme a la consulta del Diario oficial de la federación para el caso de leyes, reglamentos y normas oficiales mexicanas que se relacionan de manera directa con el tema de la gestión de los desechos radiactivos.

V.3. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se va a llevar a cabo durante la realización del presente trabajo será del tipo documental que consiste en revisar artículos que describan la

metodología de investigación, que va a ser de tipo cualitativa, al realizar una recopilación teórica de la gestión de los desechos radiactivos.

Y del tipo cuantitativo al relacionarlo con uno de los objetivos particulares que es dar a conocer la cantidad total de desechos radiactivos que han sido generados a partir de actividades no energéticas en México dentro del periodo 2000 al 2018.

V.4. Enfoque

La realización del presente trabajo de investigación va a tomar primero un enfoque cuantitativo que hace referencia al estudio a partir del análisis de las cantidades de desechos radiactivos que son gestionados por la entidad correspondiente, tanto en la PATRADER, como en el caso del CADER, así como a la recolección de datos.

Así como de un enfoque multidisciplinario al relacionar de manera directa, cuáles son los factores tanto sociales, económicos y políticos que influyen en la correcta gestión y manejo integral de los desechos radiactivos.

V.5. Técnicas de recolección de datos

Para cumplir con el objetivo general de esta investigación, como primer punto se consultarán motores de búsqueda como Google Académico, WoS (web of science), SCOPUS, Science Direct, Redalyc, por mencionar algunos, dentro de un periodo comprendido entre los años 2010 al 2018, con la búsqueda de las siguientes palabras clave: gestión, desechos, radiactivos, México.

Así como información de las diferentes dependencias tanto internacionales, como nacionales, que se relacionan de manera directa con el tema de los desechos radiactivos, para dar a conocer el sistema de gestión integral de los desechos

radiactivos en México y cuáles son los principales problemas o limitaciones a los que se enfrentan las entidades que intervienen en la gestión de los desechos radiactivos generados en actividades no energéticas.

Cuáles son las fuentes de los desechos radiactivos, en qué tipo de actividades se generan, cual es la clasificación que se hace de estos, conocer la cantidad de desechos radiactivos que se generan en nuestro país, para generar un diagnóstico de estos y saber cuáles son las principales estrategias que se han generado para hacer frente a los impactos generados por la mala gestión de este tipo de desechos.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

VI.1. Generación de desechos radiactivos en México

Los datos que aquí se reportan, provienen de las cantidades que ingresan a la PATRADER y el CADER del año 2000 al 2018. Tanto en la PATRADER como en el CADER se lleva en estricto apego el registro, control y seguimiento de los desechos radiactivos que son recibidos en sus instalaciones, razón por la cual se generó la siguiente tabla con base a datos obtenidos a través del INAI, en el 2018 y 2019.

En la tabla VI.1 se muestran los datos de generación de desechos radiactivos en un periodo comprendido entre el año 2000 y 2018, provenientes del centro de almacenamiento temporal de desechos radiactivos donde solamente se muestran la cantidad de bidones y contenedores almacenados. En cuanto a la planta de tratamiento de desechos radiactivos se muestran los datos de desechos radiactivos recibidos que van desde desechos sólidos, líquidos y fuentes gastadas.

México cuenta con una planta de tratamiento de desechos radiactivos, que es operada y administrada por el ININ, donde se realizan actividades de recolección, transporte, segregación, acondicionamiento, caracterización entre otras técnicas, en esta planta se reciben desechos radiactivos de las siguientes categorías: líquidos, sólidos y fuentes gastadas, los datos recabados son del año 2000 al 2018 y se muestra en la Figura VI.1

Tabla VI.1 Datos de desechos sólidos, desechos líquidos, fuentes gastadas, bidones y contenedores del año 2000 al 2018 (Elaboración propia con base en datos obtenidos del INFOMEX e INAI).

AÑO	RECIBIDOS EN LA PATRADER			RECIBIDOS EN CADER	
	SOLIDOS (kg)	LIQUIDOS (L)	FUENTES GASTADAS (UNIDADES)	BIDONES	CONTENEDORES
2000	6770	6600	198	0	6
2001	8058.5	4846	278	0	0
2002	6963.25	4019	144	0	11
2003	8578	5097	189	0	0
2004	7284.9	3080	220	0	1
2005	4326.8	3035	215	0	3
2006	3530.5	1470.5	257	0	41
2007	3500	2121	293	45	1
2008	4558	1880	146	0	1
2009	2865	1650.4	125	0	1
2010	1617	879.8	101	185	5
2011	594	371	136	0	15
2012	590.3	732.1	222	0	16
2013	2619.5	77.7	269	0	13
2014	2600	600	173	0	3
2015	700	190	360	0	4
2016	100	100	300	0	1
2017	100	200	168	6	2
2018	1000	100	346	19	4

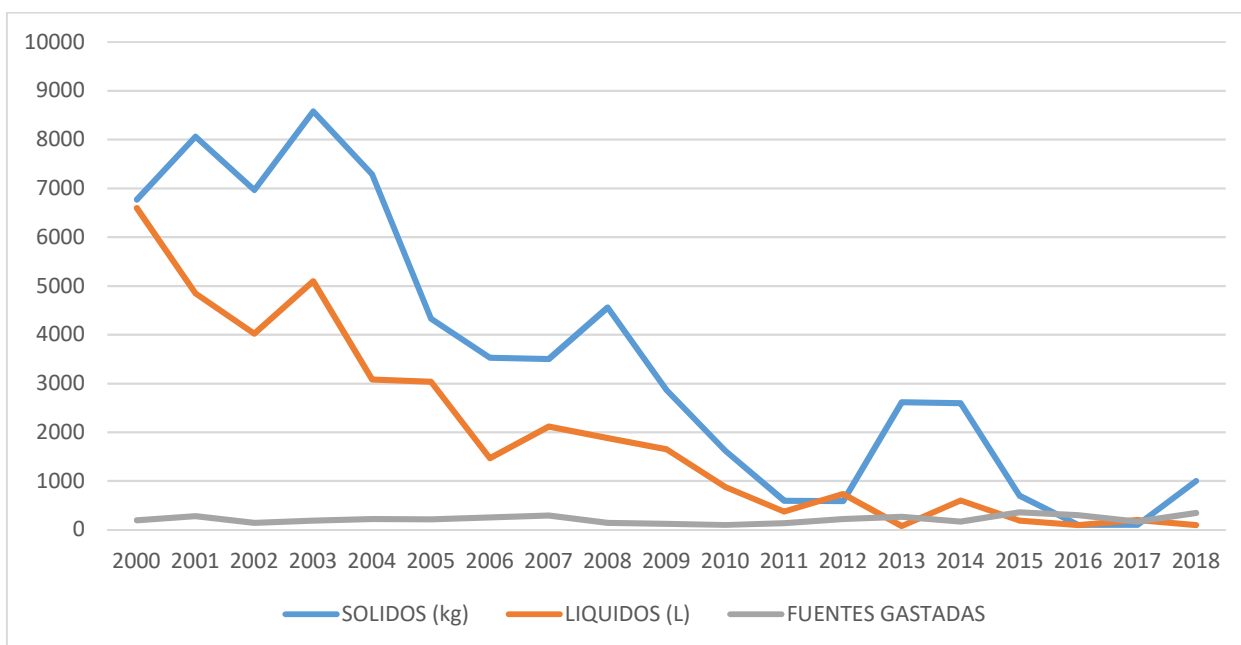


Figura VI.1 Volumen de desechos radiactivos recibidos en la PATRADER en el periodo del 2000 al 2018 (Elaboración propia con datos del INAI, INFOMEX, 2019)

Tal y como se aprecia en el grafico anterior, los años en los que se recibió una mayor cantidad de desechos radiactivos en estado sólido, fueron en el 2001 y 2003, para los desechos en estado líquido los años en los que se recibieron mayores cantidades correspondieron a los años 2000 y 2003, en cuanto a la recepción de fuentes selladas los años con mayor afluencia fueron en el 2015 y 2018. Como se puede apreciar en la figura VI.1 existe una distribución uniforme entre la cantidad de fuentes gastadas del año 2000 al 2018, lo que manifiesta que la generación de este tipo de desechos radiactivos se mantiene constante y no tiene variaciones, como es en el caso de los desechos radiactivos en estado sólido y líquido.

Para el caso de los desechos radiactivos en estado sólido y líquido, a pesar de presentar un patrón de distribución casi semejante, existen diferencias significativas en cuanto a la cantidad de desechos que se genera de cada una de estas corrientes,

destacando los desechos en estado sólido como aquellos que más se han generado desde el año 2000 al 2018.

Con base a los convenios ratificados por México como estado miembro del OIEA y tomando como referencia la figura VI.1, se puede asegurar que hasta la fecha nuestro país, está comprometido en mejorar la gestión de los desechos radiactivos, al llevar a cabo un estricto control en cuanto a la cuantificación de las diversas corrientes de desechos radiactivos que se generan y que son recibidas en la PATRADER.

De los convenios ratificados por México destacan los siguientes:

- Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos, ratificado en el 2017
- Principios para la gestión de desechos radiactivos (Colección seguridad N° 111-F) 1996
- Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa (Guía de seguridad RS-G-1.7) 2007
- Control reglamentario de las descargas radiactivas al medio ambiente (Guía de seguridad WS-G-2.3)2007

La generación de desechos radiactivos ha disminuido con el paso de los años, tal como lo establecen las directrices de la convención, en la cual nuestro país se compromete de manera conjunta a disminuir la generación de desechos radiactivos, implementar las mejoras tecnológicas y brindar las facilidades administrativas que permitan la optimización continua de los procesos de gestión de los desechos radiactivos en cada una de las etapas correspondientes.

De acuerdo con información disponible a través de la Plataforma Nacional de Transparencia del Gobierno Federal (INFOMEX, PNT) y del Instituto Nacional de

Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI), solamente se encontraron registros sobre la cantidad de bidones y contenedores recibidos en el centro de almacenamiento temporal del año 2000 al 2018 (Figura VI.2).

En la figura VI.2, se muestra la cantidad de bidones y contenedores que han sido llevados al CADER desde el año 2000 al 2018, a pesar de existir un patrón de distribución similar entre la cantidad de bidones y contenedores del año 2000 al 2009, en el 2010 se refleja una diferencia considerable al existir una recepción mayor de bidones, posteriormente en el 2011 se observa una disminución y una distribución uniforme en la cantidad de bidones almacenados en el CADER.

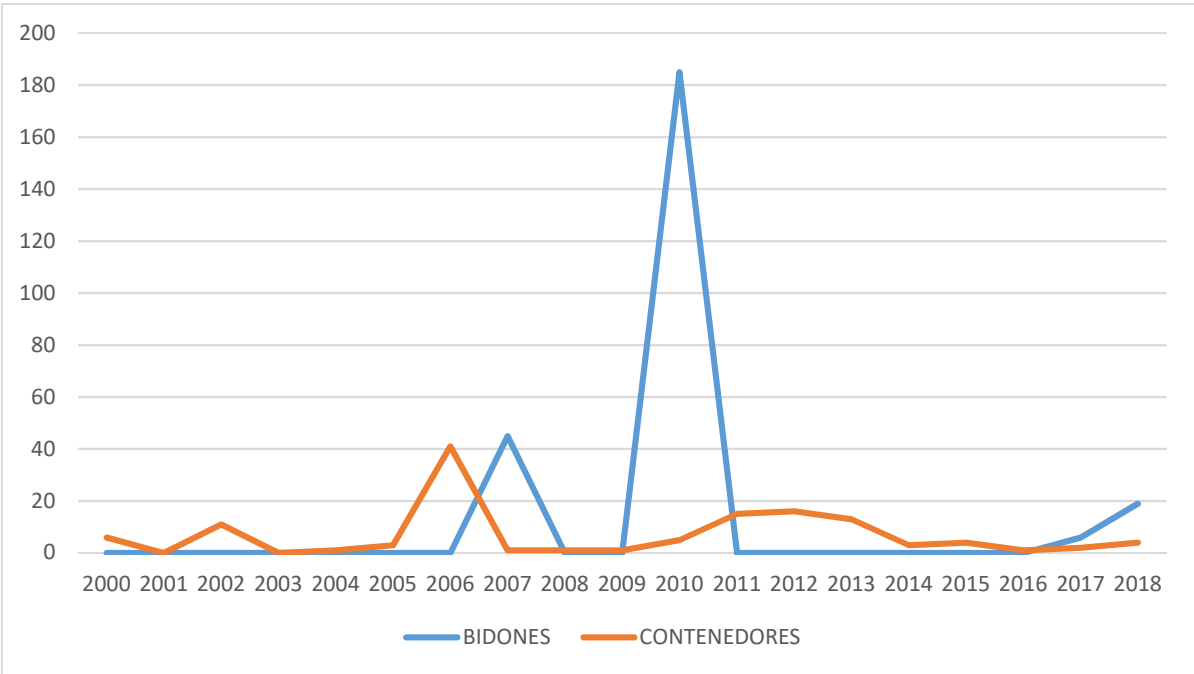


Figura VI.2 Bidones y contenedores recibidos en el CADER en el periodo 2000-2018 (Elaboración propia con datos del INAI, INFOMEX, 2019)

Para justificar este comportamiento de la cantidad de bidones y contenedores que son llevados al CADER, se necesita recurrir al análisis de la figura VI.1 de las diferentes corrientes de desechos radiactivos que llegan a la PATRADER, la razón por la cual hay una diferencia significativa es porque la mayoría de los desechos que llegan a la planta de tratamiento son desechos radiactivos sólidos y el tratamiento que se les aplica es la reducción de volumen, que posteriormente son colocados en bidones, es por este motivo por el cual hay un comportamiento constante en la cantidad de contenedores que llegan al CADER y una distribución anormal en la cantidad de bidones.

Como dato particular cabe aclarar que tanto los bidones y los contenedores no son llenados al total de su capacidad, por ejemplo, cada bidón que es caracterizado es juntado en un solo, donde contenga el mismo radionúclido, la caracterización se hace en base de no mezclar el mismo isótopo, pero con diferente compuesto químico.

VI.2 Manejo de desechos radiactivos en México

Como se ha mencionado anteriormente la entidad gestora de los desechos radiactivos a nivel nacional es el ININ, que cuenta con tres programas de vigilancia radiológica ambiental implementados en: PATRADER, CADER y Peña Blanca o la Piedrera. Respecto a la infraestructura con la que cuenta el ININ, para llevar a cabo el manejo integral de los desechos radiactivos se puede citar lo siguiente:

- PATRADER: instalaciones y equipo para la gestión de desechos radiactivos que implica procesos de segregación, caracterización, tratamiento, acondicionamiento y almacenamiento de los desechos.
- CADER: es donde se almacenan de forma temporal los desechos previamente acondicionados.

- LABORATORIO DE DESECHOS RADIATIVOS: donde se caracterizan los desechos y se llevan a cabo trabajos de investigación y desarrollo de procesos dirigidos exclusivamente a la gestión de desechos radiactivos.

Los servicios que ofrece el ININ, están dirigidos a cualquier organización o empresa que maneje materiales radiactivos o produzca desechos radiactivos durante su uso en la industria, la medicina y la investigación, excepto la producción de energía.

En la figura VI.3 se muestra el esquema organizacional del manejo de los desechos radiactivos que incluye la generación que puede ser por parte de uno de los tres sectores de actividades no energéticas (salud, industria e investigación), transporte que puede ser por parte de la entidad gestora o por medio de una empresa dedicada al transporte de desechos radiactivos que cumpla con todas las reglamentaciones requeridas por la ley, el tratamiento y acondicionamiento de los desechos radiactivos y el almacenamiento temporal.

Desde su generación hasta su disposición final, los desechos radiactivos son llevados a la planta de tratamiento de desechos radiactivos en donde se realizan actividades de tratamiento que incluyen la segregación y el acondicionamiento de estos desechos, así como la descontaminación de equipos y materiales. Los cuales son:

- Reducción del volumen (sólidos compactables): los desechos sólidos son compactados para reducir su volumen y embalados en bidones de acero de 200 litros, los cuales son almacenados transitoriamente, en áreas designadas en la PATRADER.
- Segregación: los desechos líquidos, en general, son segregados por isótopo en recipientes de plástico de 180 litros y éstos en envase metálico de 55 galones, los que posteriormente se rotulan y almacenan en esta misma instalación.

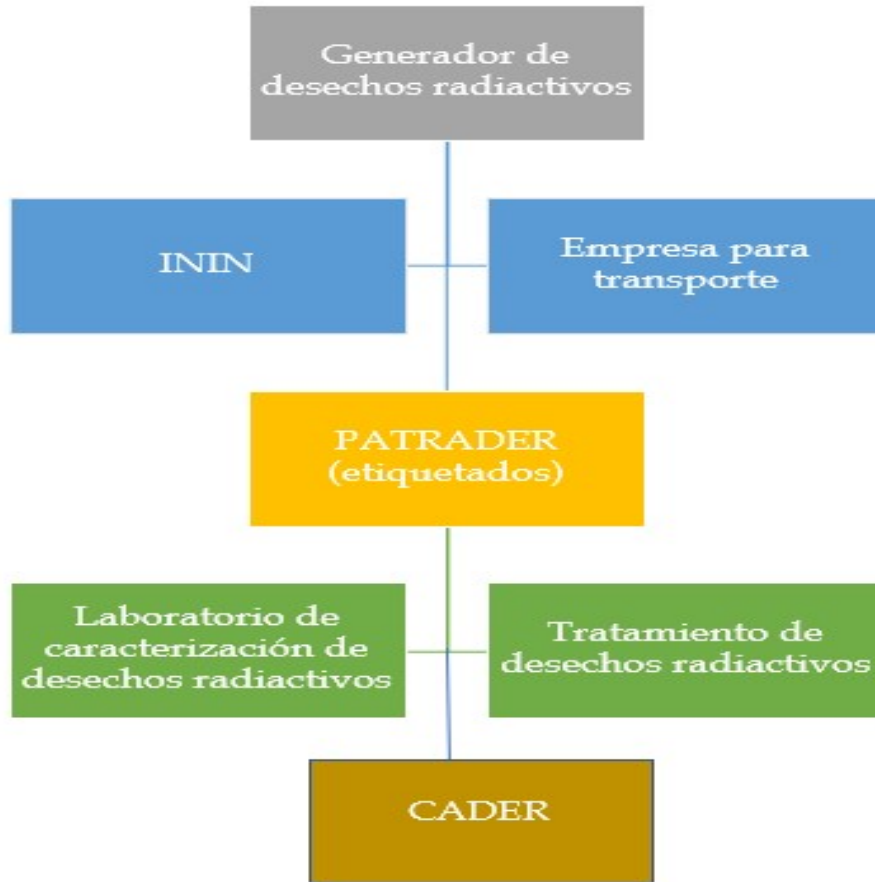


Figura VI.3 Esquema de la estructura organizacional del manejo de los desechos radiactivos en México.

- Colección: en algunos casos los desechos líquidos son acondicionados por evaporación o precipitación y cementados en bidones del mismo tipo.
- Transportación: las fuentes radiactivas selladas gastadas, en su mayoría, son trasvasadas de sus contenedores originales a contenedores que alojan varias fuentes de un solo radionúclido, cumpliendo con las condiciones de transporte y actividad.
- Preparación: los generadores de desechos radiactivos tienen como obligación, la preparación de éstos de acuerdo con las especificaciones que establece el ININ.

- **Inmovilización:** esta técnica se aplica para inmovilizar fuentes selladas, con radionúclidos con vidas medias de varios años. En general son inmovilizadas estas fuentes mediante su cementación en bidones, los cuales son enviados finalmente al CADER.
- **Almacenamiento temporal:** el CADER tiene como única función, el confinar temporalmente los desechos radiactivos provenientes de la PATRADER. El CADER es una instalación de almacenamiento transitorio de desechos de nivel bajo (Lizcano, 2004).

VI.2.1 Licencias ante la CNSNS

Dentro de su marco legal, cada Estado miembro del OIEA debe establecer un sistema de licencias que permitan a sus titulares la explotación de instalaciones nucleares y al mismo tiempo atribuyan a dichos titulares la responsabilidad de la seguridad de las instalaciones.

El titular de la licencia debe notificar al órgano regulador; que se analice y recopile la experiencia operacional con fines regulatorios y de cooperación, así como que los desechos radiactivos se reduzcan al mínimo y su almacenamiento y tratamiento se efectúen con apego a los requisitos de seguridad existentes.

El ININ, como permisionario para llevar a cabo la gestión y el manejo de los desechos radiactivos originados por actividades no energéticas, tiene la obligación de dar cumplimiento en lo conducente y aplicable a lo que establece la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, el Reglamento General de Seguridad Radiológica, algunas Normas Oficiales Mexicanas y demás que aplique la CNSNS.

Para llevar a cabo cada una de las etapas de la gestión de los desechos radiactivos (transporte, tratamiento, acondicionamiento y almacenamiento temporal), el ININ requiere de la previa autorización por parte de la CNSNS, que es la entidad encargada de emitir tales licenciamientos, para llevar a cabo la gestión de los desechos radiactivos, para tales efectos las licencias deben ser renovadas cada dos años, en virtud de lo estipulado por la CNSNS y de esta manera cumplir con lo estipulado en la normatividad vigente. Las licencias vigentes y sus descripciones se muestran en la tabla VI.2.

VI.3 Estructura de la gestión de los desechos radiactivos en México

Con base en las consultas literarias de la producción científica y tecnológica del ININ, en el acervo del centro de documentación, el entonces SEMIP (Secretaría de energía, minas e industria paraestatal) ahora SENER, en el año de 1985 le confiere al ININ la responsabilidad del almacenamiento, transporte y depósito de desechos radiactivos, con base en la figura VI.4 se da conocer como está integrada la estructura jerárquica que rige la gestión de los desechos radiactivos a nivel nacional.

VI.3.1 Planta de tratamiento de desechos radiactivos (PATRADER)

El volumen anual promedio de los desechos radiactivos recolectados y recibidos en la PATRADER asciende a 15 m³, este volumen corresponde a: 10 m³ de desechos sólidos (compactables: papel, guantes, botellas de plástico, algodón, ropa, entre otros), 4 m³ de desechos líquidos orgánicos, 0.6 m³ de líquidos acuosos, 0.4 m³ de desechos biológicos, 0.1 m³ de resinas de intercambio iónico agotadas y alrededor de 200 fuentes selladas gastadas en desuso. Estos desechos se encuentran contaminados con diversos radionúclidos cuyas vidas medias varían desde unos cuantos días hasta miles de años.

Tabla VI.2 Tipos de licencias para el manejo de los desechos radiactivos y su descripción.

TIPO DE LICENCIA	NÚMERO	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
<p>Licencia de transporte de material radiactivo</p>	<p>A00.200/1179 /2018</p>	<p>Autorización para transporte de material radiactivo</p>	<p>El Material radiactivo se transporta bajo las siguientes condiciones: Modalidad de transporte: uso exclusivo Tipo de bultos: exceptuado; tipo A, tipo B; y bultos industriales tipo BI-1, BI-2 y BI-3 El transporte se efectuará bajo la modalidad de uso exclusivo, cumpliendo con lo establecido en el Reglamento para el transporte seguro de material radiactivo (DOF, 2017), y el reglamento para transporte seguro de materiales radiactivos, editado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, SSR-6, 2012).</p> <p>Al término de algún transporte de material radiactivo realizado, se debe informar a la CNSNS lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fecha de transporte • Para cada bulto transportado indicar: <ul style="list-style-type: none"> ○ El remitente ○ Categoría ○ El material radiactivo (N° de serie, radionúclido, propiedades físicas y químicas, y si es un desecho radiactivo o no) ○ Tipo de bulto ○ La actividad ○ El índice de transporte ○ El destinatario • El número de licencia o autorización, para el uso y posesión del material radiactivo, y/o la autorización de importación o exportación correspondiente • El lugar de inicio y destino final del material transportado <p>Los vehículos autorizados para el transporte de las fuentes de radiación ionizante pueden ser de cabina, pick up, camión caja, y cada uno de éstos deberá contar con un equipo detector, al alcance del POE, adecuado al tipo de radiación que emita la fuente transportada. Los bultos deben llevar la inscripción “radiactivo” y la descripción del material radiactivo que contiene, así como las etiquetas de categoría de transporte que correspondan.</p>

<p>Licencia para el tratamiento y acondicionamiento de desechos radiactivos</p>	<p>A00.400/025/2019</p>	<p>Tratamiento y/o acondicionamiento de desechos radiactivos</p>	<p><u>Autoriza el desarrollo de las siguientes actividades:</u> Descontaminación de herramientas, equipos y accesorios; y el acondicionamiento y tratamiento de desechos radiactivos. Los desechos tratados y/o acondicionados al amparo de la presente licencia no podrán ser emplazados en una instalación para su almacenamiento definitivo en tanto no se demuestre que reúnen los requerimientos establecidos por la CNSNS y por el receptor de los mismos.</p> <p><u>De las fuentes abiertas</u> Las concentraciones de material radiactivo en los líquidos a descargar deben cumplir con lo requerido en la NOM-041-NUCL-2013. Debe presentarse como parte del informe anual de actividades relevantes de protección radiológica, el análisis de las diferentes corrientes de desechos radiactivos presentes en la instalación, en conformidad con el programa de control de proceso requerido en la NOM-036-NUCL-2001. Durante la recepción de material radiactivo en la instalación, el permisionario debe verificar el cumplimiento con el reglamento para el transporte de material radiactivo (DOF, 2017); en cuanto al embalado, etiquetado y documentación de soporte, se debe notificar a la CNSNS, cualquier anomalía al respecto. El permisionario y el encargado de seguridad radiológica deben realizar una evaluación anual y presentar el informe anual de actividades.</p> <p><u>Del encargo de seguridad radiológica (ESR)</u> Debe establecer controles en conformidad con lo establecido en la NOM-088-NUCL-2011 y en la NOM-028-NUCL-2009.</p> <p><u>De las actividades autorizadas</u> Los manifiestos de embarque de desechos radiactivos que se reciban en la instalación y que son requeridos por la NOM-018-NUCL-1995, deberán ser incluidos dentro de la documentación relacionada con el bulto con los desechos radiactivos, para identificar en todo momento el destino de los desechos radiactivos que se reciban en la instalación.</p> <p><u>De la instalación de las fuentes de radiación ionizante y de los desechos radiactivos</u> En ningún punto accesible en las partes externas de las áreas de almacenamiento de desechos radiactivos deben existir niveles de exposición mayores a 0.75 µSv/hr. Las superficies de los contenedores, con desechos radiactivos acondicionados, no deben presentar niveles de exposición a contacto mayores de 50 mR/hr (500 µSv/hr).</p> <p>El almacenamiento de los desechos radiactivos se efectuará en áreas exclusivas, separadas de las de tránsito del personal y de las donde se efectúen actividades rutinarias ajenas al almacenamiento de los desechos. En las situaciones donde los líquidos a descargar contengan otros residuos peligrosos, debe obtenerse el permiso de la autoridad correspondiente. Los</p>
--	-------------------------	--	--

			desechos radiactivos acondicionados no deben generar o contener gases tóxicos, vapores o humos; los materiales pirofóricos contenidos en el desecho deben ser tratados, preparados y envasados de forma tal que no sean inflamables. Los desechos radiactivos gaseosos deben ser contenidos a una presión que no exceda 0.152 MPa (1.5 atmósfera) y el contenido no debe exceder de 3.7 TBq. Por ningún motivo se permite que los desechos radiactivos y los equipos contaminados que reciba la planta sean utilizados en procesos o actividades diferentes a las autorizadas.
Licencia para el sitio de almacenamiento temporal de desechos radiactivos	A00.400/044/2019	Licencia de operación del CADER	<p><u>Descripción de las actividades autorizadas</u> Autoriza el almacenamiento temporal de los desechos radiactivos provenientes del uso de materiales radiactivos en la medicina, la industria y la investigación en los almacenes I, II, III.</p> <p><u>Del permisionario</u> Durante la recepción de material radiactivo en la instalación, el permisionario debe verificar el cumplimiento con el reglamento para el transporte seguro de material radiactivo (DOF, 2017), en cuanto al embalado, etiquetado y documentación de soporte. El permisionario debe enviar a la CNSNS, el programa anual de monitoreo radiológico ambiental del centro de almacenamiento de desechos radiactivos, correspondiente al siguiente año calendario.</p> <p><u>Del encargado de seguridad radiológica (ESR)</u> El encargado de seguridad radiológica debe estar presente en las instalaciones del CADER, cuando se realicen actividades de recepción, reacomodo y manejo de material radiactivo, entre otros.</p> <p><u>De la instalación de las fuentes de radiación ionizante y de los desechos radiactivos</u> Se ampara el almacenamiento temporal de desechos radiactivos generados por la utilización de material radiactivo en las prácticas de medicina, industria e investigación. No se autoriza el almacenamiento de desechos radiactivos generados por la operación de centrales nucleares ni desechos nucleares provenientes del ciclo de combustible. Queda prohibido que en la instalación se reciban desechos radiactivos que no estén debidamente acondicionados o caracterizados., además de que se reciban desechos radiactivos que posean propiedades explosivas, pirofóricas o corrosivas, así como desechos radiactivos en estado líquido. El permisionario debe llevar un registro de los desechos radiactivos recibidos y almacenados en el CADER. Estos registros deben mantenerse durante toda la vida útil de la instalación, se debe enviar el inventario de desechos radiactivos recibidos, así como el inventario acumulado en los diferentes almacenes.</p>

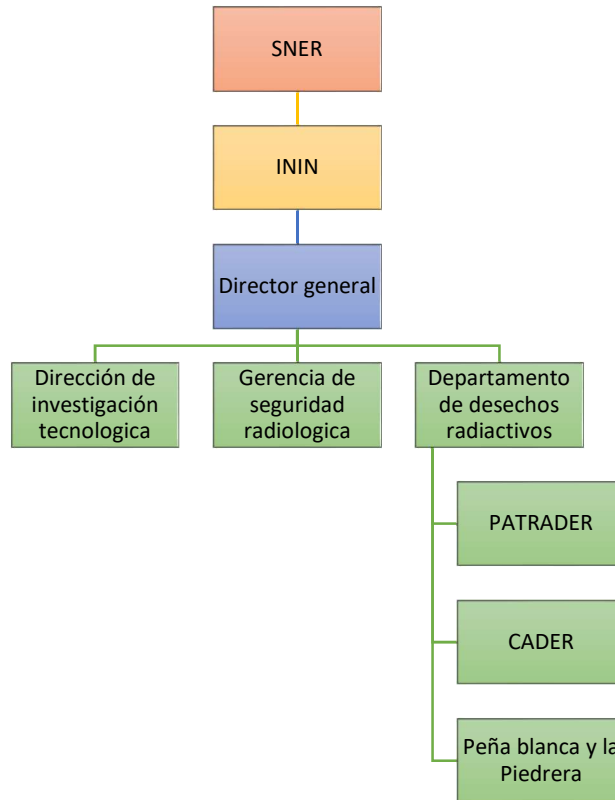


Figura VI.4 Estructura jerárquica de la gestión de los desechos radiactivos en México (Elaboración propia con datos del INFOMEX e INAI, 2019).

Estos desechos son llevados a la PATRADER en donde se realizan las actividades de tratamiento que incluyen la segregación y el acondicionamiento de estos desechos, así como la descontaminación de equipos y materiales (Lizcano, 2004).

Los desechos sólidos son compactados para reducir su volumen y embalados en bidones de acero de 200 litros, los cuales son almacenados transitoriamente, en áreas designadas en esta misma instalación.

Los desechos líquidos, en general, son segregados por isótopo en recipientes de plástico de 180 litros y éstos en envase metálico de 55 galones, los que posteriormente se rotulan y almacenan en esta misma instalación. En algunos casos

los desechos líquidos son acondicionados por evaporación o precipitación y cementados en bidones del mismo tipo.

Los desechos biológicos conteniendo material radiactivo (cuerpos de animales de experimentación, además de excretas) son tratados con calhidra en bidones metálicos de 55 galones.

Las fuentes radiactivas selladas gastadas, en su mayoría, son trasvasadas de sus contenedores originales a contenedores que alojan varias fuentes de un solo núcleo, cumpliendo con las condiciones de transporte y actividad.

VI.3.2 Laboratorio de desechos radiactivos (LDR)

El LDR es el área del ININ dedicada al estudio, investigación y desarrollo de procesos y metodologías para el tratamiento de desechos radiactivos, también lleva a cabo la caracterización radiológica y físico química de desechos radiactivos de todo tipo en cada una de las etapas de su gestión, así como el desarrollo tecnológico de procesos para la gestión de los mismos.

VI.3.3 Centro de almacenamiento de desechos radiactivos (CADER)

El CADER tiene como única función, el confinar temporalmente los desechos radiactivos provenientes de la PATRADER. El CADER es una instalación de almacenamiento transitorio de desechos de nivel bajo, que recibe actualmente alrededor de 10 m³ anuales de desechos radiactivos y cuenta con 3 almacenes: I (300 m³), II (750 m³) y III (750 m³), y cinco trincheras de 190 m de longitud por 1.5 m de ancho y 2.5 m de profundidad.

En las trincheras se tienen depositados: varilla contaminada con 60 cobalto, mineral de uranio, jales de uranio, fuentes agotadas de 60 cobalto, 137 cesio, 241 americio/berilio, 252 californio y desechos varios. Todas las fuentes agotadas se encuentran depositadas en “pitch’s” de concreto (pozos). Al final de cada trinchera se tiene colectores de escurrimientos de agua de lluvia, que se muestran periódicamente para verificar que no exista contaminación (Anguiano y otros, 2004).

La varilla contaminada con 60 cobalto que se tiene en el CADER fue consecuencia del accidente ocurrido en Ciudad Juárez Chihuahua, en 1983, la cual fue utilizada en construcciones en varias partes del país, entre ellas en edificaciones en el Estado de Hidalgo, que fueron derrumbadas para recuperar el material contaminado. La varilla contaminada fue enterrada en las cercanías de Tula, Hidalgo. En 1985, las autoridades decidieron que los materiales recuperados de desenterraran y se trasladaran al CADER para su confinamiento. Los minerales y jales de uranio proceden de plantas desmanteladas del entonces CNEN (Reyes y Peregrina, 1998).

Los desechos radiactivos acondicionados en la PATRADER, generados por aplicaciones de los materiales radiactivos en investigación, industria y medicina, con vida medias de hasta 30 años, son trasladados al CADER y depositados en sus tres almacenes, para su confinamiento temporal. Los siguientes materiales se encuentran almacenados en esta instalación: tierra contaminada con jales de uranio y 137 cesio, mineral de uranio, sólidos compactados contaminados con: ^3H (tritio), 14 carbono, 35 azufre, 45 calcio, 137 cesio, 60 cobalto, 238 uranio, 226 radio, líquidos contaminados con (^3H) tritio, 14 carbono, 35 azufre, 60 cobalto, 238 uranio, varilla contaminada con 60 cobalto, lodos residuales, equipos, piezas y resinas contaminadas del reactor Triga Mark III, desechos biológicos y fuentes gastadas de 60 cobalto, 85 kriptón, 90 estroncio, 137 cesio, 226 radio, 241 americio, 252 californio (Torres y otros, 2003).

El ingreso de los desechos radiactivos al CADER se realiza llevando un registro riguroso del número de bidones o fuentes radiactivas selladas gastadas, contenido, procedencia y rapidez de exposición a contacto (Reyes y Peregrina, 1998., Reyes, 1998).

VI.4 Legislación en México en materia de desechos radiactivos

La generación de desechos radiactivos implica posibles impactos a la salud pública y al ambiente; por ello es fundamental regular cada una de las actividades que involucra el manejo integral de los desechos radiactivos en nuestro país. A continuación, se presenta el marco regulatorio en materia nuclear, así como la forma en que se articulan las reglas para el uso pacífico de la energía nuclear y la gestión de los desechos generados por las actividades nucleares en México.

VI.4.1 Leyes y reglamentos

En la tabla VI.3 se presenta un resumen sobre el marco jurídico (leyes y reglamentos) en materia de desechos radiactivos; así como una breve descripción que complementa la tabla.

De acuerdo con la información que se presenta en la tabla VI.3, se puede llegar a la conclusión de que la parte concerniente a la legislación y reglamentación en materia de desechos radiactivos es bastante amplia, debido a que se fundamenta en la CPEUM, como toda ley vigente en nuestro país, así como en la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional y en los reglamentos de seguridad radiológica y el reglamento para el transporte de materiales radiactivos, así como con otras leyes y reglamentos complementarios que se relacionan de manera directa con el tema de los desechos radiactivos.

Tabla VI.3 Leyes y reglamentos en materia de desechos radiactivos en México.

Ley	Reglamento	Descripción
<p>Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) Artículos 27 y 73</p>	<p>--</p>	<p>Art. 27: Establece en sus párrafos sexto y séptimo que, tratándose de minerales radiactivos, no se otorgarán concesiones o contratos, ni subsistirán los que en su caso, se hayan otorgado y la nación llevará a cabo la explotación de esos productos, en los términos que señala la ley reglamentaria respectiva, y que corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos, disponiendo terminantemente que el uso de la energía nuclear sólo podrá tener fines pacíficos.</p> <p>Art. 73: reserva en su fracción X a los poderes federales, amplias facultades para legislar sobre energía nuclear.</p> <p>Art. 89: Fracción I, faculta al Presidente de la Republica para “promulgar y ejecutar leyes que expida el Congreso de la Unión proveyendo en la esfera administrativa a su exacta observancia”. En este sentido es que el Ejecutivo Federal, a través de la Secretaría de Energía (SENER), reglamenta y vigila el cumplimiento con las disposiciones en materia de seguridad nuclear y salvaguardias.</p>
<p>Ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia nuclear (DOF, 1985)</p>	<p>Reglamento general de seguridad radiológica (DOF, 1988)</p>	<p>Regula la exploración y el beneficio de minerales radiactivos, el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear, la investigación de la ciencia y técnicas nucleares, la industria nuclear y todo lo relacionado con la misma. Define términos aplicados en el área nuclear y delimita las atribuciones y facultades de los entes encargados y vinculados en el aspecto nuclear, así como la capacidad de intervenir antes, durante y después del uso de materiales radiactivos y de la gestión de los desechos radiactivos. En el reglamento se establecen los requerimientos técnicos que debe cumplir el permisionario, las funciones y las responsabilidades referente a la protección radiológica, de igual manera se establecen los criterios para el diseño, construcción, operación, sistemas y equipos de las instalaciones radiactivas, como los procedimientos para el uso seguro de las fuentes de radiación, incluyendo el entrenamiento del personal expuesto y la forma de actuar en caso de emergencias</p>
	<p>Reglamento para el transporte seguro de</p>	<p>Tiene por objeto proveer lo relativo a la transportación segura del material radiactivo por vía terrestre o acuática. Incluye las actividades relacionadas al diseño, fabricación, pruebas y mantenimiento de envases, bultos y embalajes utilizados en el transporte del</p>

	material radiactivo (DOF, 2017)	material radiactivo, y de aquel material que se presente en forma especial. Y la preparación, expedición, manejo, almacenamiento en tránsito y recepción en el destino final de bultos que contengan material radiactivo.
Ley de responsabilidad civil por daños nucleares (DOF, 1974)		Tiene por objeto regular la responsabilidad civil por daños que puedan causarse por el empleo de reactores nucleares y la utilización de sustancias y combustibles nucleares y desechos de estos. Las disposiciones de la presente ley son de interés social y de orden público y rigen en todo el país, dicha ley legisla la forma más adecuada posible en el ámbito de responsabilidad civil, donde se vincula la gestión del combustible nuclear gastado y los desechos radiactivos.
Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Artículo 11. Fracción III, Inciso D Artículo 28. Fracción IV Artículo 154
Ley General de Salud	Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la salud (DOF, 1987)	Capítulo III de la investigación con isótopos radiactivos y dispositivos y generadores de radiaciones ionizantes y electromagnéticas. Artículo 89 Artículo 91-sección II Artículo 92
	Reglamento de la Ley General en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios	Capítulo IV. Vehículos, Artículo 88 Capítulo V. Responsables Sanitarios y Auxiliares; Artículos 94, 104, 105,106 Capítulo IX. Permisos Sanitarios; Artículos 146, 149, Capítulo X. Registro Sanitario; Artículos 164, 167. Título Vigésimo Quinto. Efectos del Ambiente en la Salud; Capítulo I. Fuentes de radiación; Artículos 1296, 1297, 1299, 1300, 1302, 1306, 1311, 1314, 1319, 1320, 1321, 1322, 1323, 1324, 1325, 1326.
Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas (DOF, 2014)	Reglamento para Prevenir y Controlar la	Anexo I-apartado número 6 Anexo II-Inciso D

	Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias	
Ley Federal del Trabajo	Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo	Establece las medidas necesarias de prevención de los accidentes y enfermedades de trabajo, tendientes a lograr que la prestación del trabajo se desarrolle en condiciones de seguridad, higiene y medio ambiente adecuados para los trabajadores, conforme a lo dispuesto en la Ley Federal del Trabajo y los Tratados Internacionales celebrados y ratificados por los Estados Unidos Mexicanos en dichas materias.
Ley de Vías Generales de Comunicación	Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos	Tiene por objeto regular el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos. Para transportar materiales y residuos peligrosos por las vías generales de comunicación terrestre, es necesario que la Secretaría así lo establezca en el permiso otorgado a los transportistas, sin perjuicio de las autorizaciones que otorguen otras dependencias del Ejecutivo Federal Capítulo I. Clasificación de las sustancias peligrosas; Título Segundo. Del Envase y Embalaje; Capítulo I. Características, Artículo 18. Sección I Título Quinto. Del Tránsito en Vías de Jurisdicción Federal; Capítulo I. Del Autotransporte, Artículo 61
Ley Orgánica de la Administración Pública Federal	Reglamento de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal	Artículo 17: se autoriza a las Secretarías de Estado, contar con órganos administrativos desconcentrados que les estarán jerárquicamente subordinados y que tendrán facultades específicas para resolver sobre la materia y dentro del ámbito territorial que se determine en cada caso. Artículo 33, fracción XIII
Ley Federal sobre Metrología y Normalización	Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización	Establece un procedimiento uniforme para la elaboración de normas oficiales mexicanas por las dependencias de la Administración Pública Federal.

Lo anterior al tocar temáticas como la responsabilidad civil por daños nucleares, el control de vertimientos y derrames al medio ambiente de desechos radiactivos, la seguridad en los centros de trabajo donde se generen o manejen desechos radiactivos; así como el estado de salud del personal ocupacionalmente expuesto que está directamente relacionado en alguna de las etapas del manejo de los desechos radiactivos.

Para dar un mayor soporte a la parte concerniente a las leyes y reglamentaciones en materia de desechos radiactivos, se incluye en el texto el anexo I, integrado por un listado de los tratados internacionales firmados por México en materia nuclear, ratificados ante el OIEA.

VI.4.2 Normas oficiales mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas que aplican a los desechos radiactivos se presentan en la tabla VI.4, la cual también especifica su título y su descripción.

A la conclusión que se puede llegar con base en la información presentada en la tabla VI.4, es que las normas oficiales mexicanas aplicables al tema de los desechos radiactivos abarcan diferentes temáticas que van desde lo que son criterios de clasificación de los desechos radiactivos con base a su ciclo de vida, criterios de exposición al personal ocupacionalmente expuesto, el manejo de fuentes abiertas y selladas gastadas, aspectos relacionados al manejo de los desechos radiactivos como son el transporte, criterios de exención; así como la dispensa de los mismos. Razón por la cual se determinó que la parte referente a las normas oficiales mexicanas es complementaria a la parte que tiene que ver con leyes y sus reglamentaciones en materia de desechos radiactivos.

Tabla VI.4 Normas Oficiales Mexicanas que aplican a los desechos radioactivos en México.

NOM	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
NOM-004-NUCL-2013	CLASIFICACIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS	Esta norma tiene por objetivo establecer los criterios y requisitos para la clasificación de los desechos radioactivos para su almacenamiento definitivo, con el fin de efectuar de manera segura cada una de las etapas de la gestión de los desechos. La norma clasifica los desechos radioactivos según su concentración, su actividad, la vida media de los radionúclidos y su origen en: a) desechos radioactivos de nivel bajo (clase A, clase B y clase C. b) desechos radioactivos de nivel intermedio. c) desechos radioactivos de nivel alto. d) desechos mixtos. e) jales de uranio y torio.
NOM-026-NUCL-2011	VIGILANCIA MÉDICA DEL PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO A RADIACIONES IONIZANTES	El personal ocupacionalmente expuesto tiene el derecho a una protección y vigilancia médica eficaz en materia de seguridad radiológica y salud en el trabajo, en función de los riesgos inherentes a la exposición ocupacional a la radiación ionizante. Esta norma establece el contenido y periodicidad de los exámenes médicos que deben ser practicados al personal ocupacionalmente expuesto, a fin de que el personal médico cuente con los elementos para evaluar su estado de salud; asimismo, establece los requisitos para el registro de la vigilancia médica.
NOM-028-NUCL-2009	MANEJO DE DESECHOS RADIATIVOS EN INSTALACIONES RADIATIVAS QUE UTILIZAN FUENTES ABIERTAS	En esta norma se establecen los requerimientos para la segregación, recolección, manejo y almacenamiento temporal de los desechos radioactivos; de manera que coadyuven a minimizar la generación de residuos, reducir las dosis de exposición, así como a reducir las liberaciones al ambiente. Los requerimientos generales implican: a) previsiones para evitar acciones que conduzcan a una generación innecesaria de desechos radioactivos. b) establecer controles para que, durante la recepción y almacenamiento del material radiactivo, no se generen desechos radioactivos. c) registro actualizado de entradas y salidas del material radiactivo; así como los desechos. d) establecimiento de un programa para la gestión de los desechos radioactivos. El cumplimiento de estos, son responsabilidad del permisionario, de manera que él envió a las instalaciones de gestión o bien la descarga al drenaje o al ambiente, se tenga la certeza de que la opción correspondiente cumpla con las prescripciones legales del reglamento general de seguridad radiológica.
NOM-031-NUCL-2011	REQUISITOS PARA EL ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL	Los titulares de una autorización, permiso o licencia para llevar a cabo actividades o prácticas con fuentes de radiación ionizante tienen la responsabilidad de que su personal cumpla con el entrenamiento apropiado para realizarlas. Esta norma tiene

	OCUPACIONALMENTE EXPUESTO A RADIACIONES IONIZANTES	<p>por objetivo establecer los requisitos de entrenamiento y su periodicidad, para el encargado de seguridad radiológica, auxiliar del encargado de seguridad radiológica y personal ocupacionalmente expuesto.</p> <p>Los requisitos de la norma se aplican, según corresponda, al encargado de seguridad radiológica, auxiliar del encargado de seguridad radiológica y personal ocupacionalmente expuesto. Queda excluido el personal ocupacionalmente expuesto que labore en centrales nucleoelectricas y en los establecimientos de diagnóstico médico con rayos X.</p>
NOM-035-NUCL-2013	CRITERIOS PARA LA DISPENSA DE RESIDUOS CON MATERIAL RADIOACTIVO	<p>La presente norma tiene por objetivo, establecer los límites y condiciones para identificar aquellos desechos con material radiactivo, los cuales sean viables para la dispensa. Esta norma queda excluida para aquellos desechos sólidos como son: fuentes selladas agotadas, edificios contaminados con material radiactivo, materiales de consumo, residuos generados como resultado de un accidente o incidente y NORM (naturally occurring radioactive materials). La presente establece las siguientes disposiciones para la dispensa de desechos con material radiactivo: a) dispensa incondicional. b) dispensa condicional. c) dispensa de aceites contaminados con material radiactivo. d) criterios de dispensa para el reciclado de residuos metálicos contaminados. e) criterios de dispensa para la reutilización de componentes metálicos contaminados</p>
NOM-039-NUCL-2011	ESPECIFICACIONES PARA LA EXENCIÓN DE PRÁCTICAS Y FUENTES, ADSCRITAS A ALGUNA PRÁCTICA, QUE UTILIZAN FUENTES DE RADIACION IONIZANTE, DE ALGUNA O DE TODAS LAS CONDICIONES REGULADORAS	<p>Se establecen las especificaciones para exentar algunos o todos los controles reguladores establecidos por la CNSNS; para las prácticas y fuentes cuya cantidad de material radiactivo o nivel de radiación no representan riesgos para la población o ambiente. Ya que se considera impráctico regular la seguridad radiológica para este tipo de fuentes. Los puntos a tratar en la norma son: a) criterios de exención. b) exención incondicional. c) exención de fuentes que utilicen desechos dispensados. d) exención condicional</p>
NOM-040-NUCL-2016	REQUISITOS DE SEGURIDAD RADIOLOGICA PARA LA PRACTICA DE MEDICINA NUCLEAR	<p>Tiene el objetivo de establecer los requisitos de protección y seguridad radiológica que se deben cumplir en las instalaciones donde se realiza la práctica de medicina nuclear, con el propósito de mantener las dosis al personal ocupacionalmente expuesto y al público tan bajas como razonablemente sea posible. Los puntos a tratar en la norma son: a) requisitos de la instalación. b) requisitos para los equipos de protección radiológica del personal ocupacionalmente expuesto. c) control del material radiactivo</p>

En el anexo II, se agrega un compendio de las normas oficiales mexicanas aplicables a las instalaciones nucleares, que están relacionadas directamente con las directrices que son emitidas por la STPS, a fin de garantizar que se cumpla con las condiciones seguras estipuladas por la ley, en aquellos sitios de trabajo en los que se manejen o se generen desechos radiactivos.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

De acuerdo con la información obtenida se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- La generación de desechos radiactivos actualmente muestra un detrimento con respecto a datos de principios de milenio, asociado a los nuevos avances tecnológicos y científicos en el área de salud, industria e investigación.
- La gestión de los desechos radiactivos es una actividad que México ha estado desarrollando desde la década de 1960.
- México siempre ha estado comprometido en cumplir con la reglamentación a nivel internacional en materia de gestión y manejo de desechos radiactivos, al ser miembro del OIEA y ratificar la convención conjunta sobre el manejo de desechos radiactivos en el 2017.
- La gestión integral de los desechos radiactivos aún está en proceso de conformación, debido a que solamente se contempla el factor político y ambiental, hace falta una vinculación con la parte económica y social, para que la gestión integral de desechos radiactivos sea vista como esquema de mejora continua y multidisciplinaria.
- Hace falta un mayor nivel de conciencia, educación y difusión hacia la población, sobre el manejo integral de los desechos radiactivos, debido a la asociación directa con riesgos y afectaciones a la población.
- Los problemas de contaminación radiactiva que se han presentado a lo largo de la historia de México han sido originados en los comienzos de la industria nuclear en nuestro país, periodo en el cual estaba en fase de desarrollo la infraestructura para llevar el manejo integral de los desechos radiactivos.
- Hace falta voluntad política y económica para seguir haciendo mejoras en la gestión integral de desechos radiactivos, en virtud de algunas deficiencias

tecnológicas, logísticas y de infraestructura que tiene que enfrentar la entidad gestora de los desechos radiactivos.

- La gestión de los desechos radiactivos conlleva cumplir cabalmente con todas las disposiciones que marca la ley y los acuerdos internacionales, a fin de garantizar el correcto manejo integral de los mismos a fin de evitar externalidades negativas hacia el ambiente y la sociedad.
- El marco jurídico con el que cuenta México para la gestión de desechos radiactivos es bastante amplio y este ha sido modificado en virtud de las nuevas disposiciones y reglamentaciones que surgen a nivel internacional.
- A pesar de existir leyes, reglamentos y normas oficiales en materia de desechos radiactivos, se conoce el antecedente de que han existido dos propuestas de implementación de un programa nacional para la gestión de desechos radiactivos, desgraciadamente ambos no fueron aprobados en virtud de no cumplir o estar diseñados de acuerdo a las condiciones económicas y políticas del país.

CAPITULO VIII

REFERENCIAS

- Abdel, R. (2012). Radiactive Waste. Croatia: In Tech
- Anguiano, J., Jiménez, J., Ángeles, A., Reyes, J. (2004). Muestreo de las trincheras del CADER, Informe Técnico SR-04-47, ININ.
- Badillo-Almaraz, V., y Pérez, J (2004). Los desechos nucleares: ¿de dónde vienen y hacia dónde van?, *Revista Ciencia*, Universidad Autónoma de Zacatecas, México, 63-70.
- Diario oficial de la federación (1985). *Ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia nuclear.*
- Diario Oficial de la Federación (2013). NOM-004-NUCL-2013, *Clasificación de los desechos radiactivos.*
- Diario oficial de la federación (1995). Norma oficial mexicana NOM-019-NUCL-1995. *Requerimientos para bultos de desechos radiactivos de nivel bajo para su almacenamiento definitivo cerca de la superficie.*
- Diario oficial de la federación (1995). Norma oficial mexicana NOM-020-NUCL-1995. *Requerimientos para instalaciones de incineración de desechos radiactivos.*
- Diario oficial de la federación (1996). Norma oficial mexicana NOM-021-NUCL-1996. *Pruebas de lixiviación para especímenes de desechos radiactivos solidificados.*
- Escofet, A. (1989). Oficio del subsecretario Alberto Escofet Artigas dirigido al Director General de ININ, Dr. Carlos Vélez Ocón. 12 de Julio.
- Foro nuclear (2009). La gestión de los residuos radiactivos en España.
- García, J. y Romero, C. (2012). Congreso nacional de medio ambiente. Residuos radiactivos. Consultoría de Técnicas Ambientales, S.L. España.
- Hernández, M (2005). Gestión de desechos radiactivos en México.
- Hernández, J (2015) Estudio de la degradación de desechos líquidos orgánicos radiactivos, mediante métodos electroquímicos (Estadía de investigación que para obtener el título de ingeniero en biotecnología). Universidad Politécnica del

- Valle de Toluca, División de Ingeniería en Biotecnología, Almoloya de Juárez, Estado de México.
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (2005). Gestión de desechos radiactivos en la planta de tratamiento de desechos radiactivos (PATRADER), *Revista contacto nuclear*, 41-44.
- Lizcano, D. (2004). Informe anual de actividades relevantes de protección radiológica de la PATRADER, Informe Técnico SR-04-04, ININ.
- Manrique, W., Rodríguez, E., Cabañas, D., y Basulto, Y. (2015). Cuantificación de yodo-131 en descargas de aguas residuales de laboratorios de medicina nuclear en Mérida, Yucatán, México, *Ingeniería*, 19 (3) 137-146.
- Monroy-Guzmán, F., Quintero, E., y Anguiano, J (2012). Cuantificación de H-3 y C-14 en desechos radiactivos tratados, *Memorias del XLVII Congreso Mexicano de Química, SQN*, Cancún, Quintana Roo, México.
- Monroy-Guzmán, F., Emeterio, J., y Jiménez, J. (2008). Gestión de desechos radiactivos, *Actividad científica y tecnológica en el instituto nacional de investigaciones nucleares ININ*, México.
- Morales, A., Ley-Koo, V., Gómez, E., Ávila, E. (1970). Desechos radiactivos en el centro nuclear de México: manejo, tratamiento y control. *Rev. Mex. Fis.* 19, S99-S105.
- Nebel, B., y Wriqth, R. (1999). Ciencias Ambientales, *Ecología y desarrollo sostenible*. Pp.553-577. En: Pearson y Prentice Hall (Eds). E.E.U.U. 698 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-NUCL-2013, Clasificación de los desechos radiactivos, *Diario Oficial de la Federación*, 7 de mayo de 2013.
- Odum, E (1983). *The scope of ecology*. In *Basic Ecology*, Cap.1 Saunders College Publishing, Philadelphia.
- OECD., (2000). *Geological Disposal of Radioactive Waste in Perspective*. OECD, Paris.
- OIEA., (1987). *Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Waste*. Technical Report Series No. 272. OIEA, Viena.

- OIEA., (1988). Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research. OIEA-TECDOC-1000. Viena.
- OIEA., (2003). Radioactive waste management glossary. OIEA, Viena.
- OIEA., (2007). Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa. Colección de Normas de Seguridad del OIEA No. RS-G-1.7. OIEA, Viena.
- OIEA., (2009). Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide No. WS-G-2.7. OIEA, Viena.
- OIEA., (2009). Gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación. Colección de Normas de Seguridad del OIEA No. WS-G-2.7. OIEA, Viena.
- OIEA., (2011). Radioactive waste management objectives, *Nuclear energy series*, NW-0, Viena.
- Osores, J. (2008). Contaminación ambiental en el neotrópico. *Biologist*, 6, 2,155-165.
- Peregrina, A., Reyes, J., Jiménez, J. (1998). Análisis de la normatividad aplicable al almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo. Parte I, Aspectos generales, Informe técnico SR-98-47, ININ.
- Qafmolla, L. (2000). Conditioning of low level radioactive waste, spent radiation sources and their transport at the interim storage building of Institute of Nuclear Physics in Albania. "International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management. Córdoba, Spain, Contributed Papers". IAEA, Vienna.
- Reyes, J. (1998). Almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo (segunda etapa), Informe general SR-98-209, ININ.
- Reyes, J. (1999). Gestión de desechos radiactivos en México. Conferencia Universidad Iberoamericana, CADER17.DOC 19/05/99, ININ.
- Reyes, J., Peregrina, A. (1998). Centro de almacenamiento de desechos radiactivos, informe general SR-98-206, ININ.
- Reyes, J. Peregrina, A., García, U., Reglero, R. (1998). Centro de almacenamiento de desechos radiactivos, Informe general SR-98-208, ININ.

- SEPR., (2002). Guía técnica de gestión de materiales residuales con contenido radiactivo en centros de investigación y docencia. SEPR, España.
- Solís, E. (1998) Repositorio de residuos radiactivos en Temascalapa, Estado de México, Opinión Pública. Determinación de Efectos en la Salud (Tesis que para obtener mención honorífica en el Título de Médico Cirujano). Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México.
- Torres, C., Jiménez, D., Reyes, J. (2003). Inventario de desechos radiactivos del centro de almacenamiento de desechos radiactivos. Informe técnico SR-03-06, ININ.
- Torres, M (2017) Diagnóstico de la gestión de residuos radiactivos de origen hospitalario en México (Tesis profesional que para obtener el título de licenciada en ciencias ambientales) Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de planeación urbana y regional, Toluca, Estado de México.
- Trujillo, V. (2002). El proceso de institucionalización de la investigación científica y tecnológica: Estudio de caso del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Tesis de Doctorado, UAM.
- Valdovinos, V (2014) Estudio de la viabilidad técnica para el tratamiento electroquímico de desechos radiactivos (Tesis para obtener el grado de maestra en ciencia y tecnología en la especialidad de ingeniería ambiental) Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, S.C., Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
- Velez, C. (1997). Cincuenta años de energía nuclear en México 1945-1955, UNAM.

ANEXO I.

TRATADOS INTERNACIONALES FIRMADOS POR MÉXICO EN MATERIA NUCLEAR ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

Nombre	Fecha de firma	Fecha de entrada en vigor	Comentario
Estatuto del Organismo Internacional de Energía Atómica	7/12/1956	7/04/1958	La firma de este Estatuto hace a México Estado Miembro del OIEA
Acuerdo sobre privilegios e inmunidades del Organismo Internacional de Energía Atómica	1/7/1959	19/10/1983	Los representantes de los Estados Miembros aceptarán los privilegios e inmunidades para los funcionarios y expertos del OIEA.
Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina	14/2/1967	20/9/1967	En virtud de lo señalado por el artículo 14, México se compromete a presentar informes semestrales sobre la aplicación de salvaguardias a los materiales nucleares en el país.
Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares	1/7/1968	21/1/1969	Este Tratado obliga a México a llevar a cabo el sistema de contabilidad y control de materiales nucleares sujetos a salvaguardias del OIEA.
Acuerdo para la aplicación de salvaguardias con relación al Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y el Tratado de No proliferación de Armas Nucleares	27/9/1972	14/9/1973	El artículo 7 obliga a México a establecer y mantener un sistema de contabilidad y control de todos los materiales nucleares sometidos a salvaguardias. El artículo 63 obliga a México a presentar informes de cambios en el inventario de los materiales nucleares e informes de balance de materiales nucleares.
Arreglos subsidiarios relativos al Acuerdo para la Aplicación de salvaguardias en relación con el Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina	17/9/1972	14/9/1973	Bajo estos arreglos, México está obligado a proporcionar información sobre las instalaciones y los materiales nucleares situados fuera de estas, informes contables y de cambios en el inventario, balance de materiales, aunado al correspondiente

y el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.			informe de inventario físico y el traslado de materiales nucleares fuera de México o hacia nuestro país.
Protocolo Adicional a los Acuerdos entre México y el OIEA para la aplicación de salvaguardias	29/3/2004	4/3/2011	México debe presentar información al OIEA acerca de las instalaciones nucleares y de aquellas que se encuentran fuera de éstas. Así como un informe sobre las actividades del desarrollo e investigación relacionadas con el ciclo del combustible nuclear, actividades operacionales de salvaguardias en instalaciones y localizaciones fuera de las instalaciones donde se use en forma rutinaria material nuclear, hacer declaraciones anuales sobre exportaciones e importaciones de material nuclear de salvaguardias (materiales básicos que no hayan alcanzado la composición adecuada para la fabricación de combustible) y material que ha sido exentado de salvaguardias y equipo y material no nuclear de uso dual.
Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares	25/4/1989	25/7/1989	Obliga a nuestro país a cubrir los daños causados por un accidente nuclear que ocurra en una instalación nuclear en el país.
Convención sobre Protección Física de los Materiales Nucleares	4/4/1988	4/5/1988	Obliga a México a adoptar medidas apropiadas en el marco de su legislación nacional y de conformidad con el derecho internacional para asegurar que durante el transporte, utilización y almacenamiento los materiales nucleares quedan protegidos.
Enmiendas a la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares	No aplica	1/8/2012	Estas enmiendas actualizan diversos temas reflejados en la convención, ampliando la cobertura a las instalaciones nucleares y al transporte de material nuclear.
Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares	26/9/1986	10/6/1998	Este convenio obliga a México a estar preparado para atender las emergencias radiológicas y nucleares, para facilitar el intercambio de información con el OIEA y los países signatarios; además de proporcionar información al OIEA de cualquier accidente radiológico o nuclear. Establecer puntos de

			contacto para esta ayuda, además de participar en los ejercicios que programe el OIEA.
Convención sobre Asistencia Recíproca en caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica	26/9/1986	10/6/1998	Proporcionar y/o recibir asistencia en caso de un accidente nuclear o radiológico. Establecer puntos de contacto para esta ayuda, además de participar en los ejercicios que programe el OIEA.
Convención sobre Seguridad Nuclear	9/11/1994	24/10/1996	Elaborar el informe trienal sobre la seguridad nuclear adoptada en los reactores de potencia de México, participar en las reuniones de las Partes Contratantes y dar respuesta a los cuestionamientos planteados por otras Partes Contratantes.
Tratado de Prohibición completa de los Ensayos Nucleares	24/9/1996	27/9/1999	La CNSNS fue designada como la contraparte técnica nacional para este tratado, lleva el control sobre la instalación de las sismográficas, de detección de radionúclidos e hidroacústicas. Además, en el futuro cercano la administración del centro nacional de datos.
Acuerdo de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe	11/5/1999	5/9/2005	Mediante este acuerdo los países latinoamericanos desarrollan proyectos de cooperación técnica, con los auspicios del Organismo Internacional de Energía Atómica
Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear	12/1/2006	7/7/2007	Se establecen los delitos nucleares, obliga a los Estados a establecer jurisdicción sobre estos delitos, así como al intercambio de información y asistencia entre las Partes.

ANEXO II

COMPENDIO DE NORMAS OFICIALES MEXICANAS APLICABLES A LAS INSTALACIONES NUCLEARES

Norma	Título	Fecha de publicación
NOM-002-STPS-2010	Condiciones de seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo	9/12/2010
NOM-005-STPS-1998	Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas	2/2/1999
NOM-010-STPS-2014	Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral-Reconocimiento, evaluación y control	28/4/2014
NOM-011-STPS-2001	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido	17/4/2002
NOM-012-STPS-2001	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiación ionizante	31/10/2012
NOM-017-STPS-2008	Equipo de protección personal-selección uso y manejo en los centros de trabajo	9/12/2008
NOM-018-STPS-2015	Sistema Armonizado para la Identificación y Comunicación de Peligros y Riesgos por Sustancias Químicas Peligrosas en los Centros de Trabajo	9/10/2015
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	23/6/2006
NOM-053-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.	22/10/1993
NOM-054-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993	22/10/1993
NOM-133-SEMARNAT-2000	Protección ambiental-Binefilos policlorados (BPC's)-Especificaciones de manejo	10/12/2001



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CEIB
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN BIOTECNOLOGÍA

Centro de Investigación en Biotecnología

“1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar”

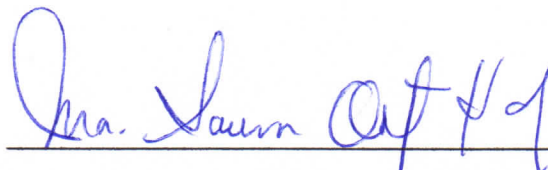
CUERNAVACA, MORELOS, 14 DE AGOSTO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10022681**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **“ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGÉTICAS EN MÉXICO”**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
**POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA**



DRA. MA. LAURA ORTIZ HERNÁNDEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CEIB
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN BIOTECNOLOGÍA

Centro de Investigación en Biotecnología

“1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar”

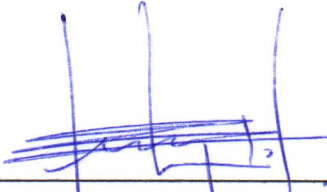
CUERNAVACA, MORELOS, 14 DE AGOSTO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10022681**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **“ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGÉTICAS EN MÉXICO”**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA



M. EN C. ENRIQUE SÁNCHEZ SALINAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CEIB
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN BIOTECNOLOGÍA

Centro de Investigación en Biotecnología

“1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar”

CUERNAVACA, MORELOS, 14 DE AGOSTO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10022681**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **“ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGÉTICAS EN MÉXICO”**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
**POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA**

DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CEIB
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN BIOTECNOLOGÍA

Centro de Investigación en Biotecnología

"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

CUERNAVACA, MORELOS, 14 DE AGOSTO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10022681**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **"ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGÉTICAS EN MÉXICO"**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA

DRA. PATRICIA MUSSALI GALANTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CEIB
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN BIOTECNOLOGÍA

Centro de Investigación en Biotecnología

“1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar”

CUERNAVACA, MORELOS, 14 DE AGOSTO DE 2019

**COMISIÓN DE SEGUIMIENTO DE LA
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS
PRESENTE**

COMO MIEMBRO DEL JURADO DEL ALUMNO **C. ROBERTO VÁZQUEZ MORAN** CON NÚMERO DE MATRÍCULA **10022681**, ASPIRANTE AL GRADO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y DESPUÉS DE HABER EVALUADO LA TESINA TITULADA **“ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS GENERADOS EN ACTIVIDADES NO ENERGÉTICAS EN MÉXICO”**, CONSIDERO QUE EL DOCUMENTO REÚNE LOS REQUISITOS ACADÉMICOS PARA SU DEFENSA ORAL EN EL EXAMEN DE GRADO. POR LO TANTO, EMITO MI **VOTO APROBATORIO**.

AGRADEZCO DE ANTEMANO LA ATENCIÓN QUE SE SIRVA PRESTAR A LA PRESENTE.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
UNA UNIVERSIDAD DE EXCELENCIA

DRA. CONSTANZA MACHÍN RAMÍREZ