



Universidad Europea de Canarias

TRABAJO FIN DE MASTER

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

**Título: Seguridad en Procesos de Gammagrafía
Industrial**

Alumno: Javier Antonio Rodríguez

Tutor: Pablo Miguel de Souza Sánchez

Buenos Aires, 2024

ÍNDICE

1	RESUMEN / ABSTRACT	5
2	INTRODUCCIÓN	6
2.1	Objetivo	7
2.2	Marco Teórico.....	10
2.3	Hipótesis	12
3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	13
4	RESULTADOS	15
5	CONCLUSIONES	17
6	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	18
7	BIBLIOGRAFÍA	19
8	ANEXOS	22

RESUMEN / ABSTRACT

Resumen

La gammagrafía industrial, una técnica vital en la inspección no destructiva de materiales, se ha convertido en un pilar fundamental en una amplia gama de sectores industriales, incluyendo la industria petroquímica, nuclear, aeroespacial, y de fabricación de productos metálicos, entre otros. Esta técnica, que implica el uso de fuentes radiactivas para obtener imágenes detalladas de la estructura interna de materiales y componentes, ofrece una capacidad única para detectar defectos y anomalías que pueden pasar desapercibidos con métodos de inspección convencionales. Sin embargo, el uso de fuentes radiactivas en la gammagrafía industrial también conlleva riesgos significativos para la seguridad y la salud de los trabajadores, así como para el medio ambiente.

Este estudio se enfoca en analizar la posible relación entre los marcos normativos que regulan la actividad y su incidencia sobre la siniestralidad laboral. Específicamente, se busca determinar si la implementación de regulaciones estrictas y efectivas en la gammagrafía industrial está correlacionada con una menor tasa de accidentes fatales por cada 100,000 trabajadores. Para ello, se ha llevado a cabo un análisis comparativo utilizando datos de diferentes países con y sin regulaciones específicas en esta área. Los datos recopilados provienen de fuentes confiables como la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Mundial de la Salud (OMS), y agencias nacionales de seguridad laboral y nuclear. Los resultados obtenidos permitirán evaluar la efectividad de las regulaciones y proporcionar recomendaciones para mejorar la seguridad laboral en el uso de la gammagrafía industrial.

El objetivo final de este estudio es contribuir al desarrollo de prácticas más seguras y responsables en el campo de la gammagrafía industrial, promoviendo la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores y la preservación del medio ambiente.

Abstract

Industrial radiography, a vital technique in non-destructive material inspection, has become a cornerstone in a wide range of industrial sectors, including petrochemical, nuclear, aerospace, and metal manufacturing industries, among others. This technique, which involves the use of radioactive sources to obtain detailed images of the internal structure of materials and components, offers a unique capability to detect defects and anomalies that may go unnoticed

with conventional inspection methods. However, the use of radioactive sources in industrial radiography also poses significant risks to worker safety and health, as well as to the environment.

This study focuses on analyzing the possible relationship between the regulatory frameworks governing the activity and their impact on occupational accident rates. Specifically, it seeks to determine whether the implementation of strict and effective regulations in industrial radiography is correlated with a lower rate of fatal accidents per 100,000 workers. To this end, a comparative analysis has been conducted using data from different countries with and without specific regulations in this area. The collected data come from reliable sources such as the International Labour Organization (ILO), the World Health Organization (WHO), and national occupational and nuclear safety agencies. The results obtained will allow the evaluation of the effectiveness of regulations and provide recommendations to improve occupational safety in the use of industrial radiography.

The ultimate goal of this study is to contribute to the development of safer and more responsible practices in the field of industrial radiography, promoting the protection of worker health and safety and the preservation of the environment.

2. INTRODUCCIÓN

La elección de este tema para el estudio surge de su relevancia en la garantía de la calidad y seguridad en procesos industriales. Con el aumento de la construcción de grandes obras la gammagrafía se ha convertido en una herramienta indispensable para asegurar la integridad de los materiales y componentes utilizados en diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, el uso de fuentes radiactivas en la gammagrafía industrial también conlleva riesgos significativos para la seguridad y la salud de los trabajadores, así como para el medio ambiente. Prueba de esto son accidentes relacionados a fuentes radiactivas para uso industrial (o en algún caso medicinal) en los que las consecuencias han sido graves y han ocasionado el fallecimiento de trabajadores y otras personas no expuestas laboralmente

Vale la pena aclarar que el título original de la investigación, “Seguridad en sistemas de gammagrafía”, aunque preciso, se enfocaba en un aspecto muy específico del campo de esta técnica no destructiva. Si bien este enfoque permitía un análisis detallado de los sistemas de gammagrafía, limitaba el alcance del estudio a una sola faceta de esta tecnología. Tras una revisión más profunda del tema, se decidió ampliar el enfoque de la investigación.

El nuevo título, “Seguridad en procesos de gammagrafía industrial”, se adoptó para reflejar un ámbito más amplio y abarcativo dentro del mismo campo. Esta modificación permite explorar no solo los sistemas individuales de gammagrafía, sino también cómo estos se integran y operan dentro de los procesos industriales en su totalidad. La gammagrafía industrial abarca una serie de aplicaciones y contextos que son esenciales para la producción y la inspección en diversas industrias, incluyendo la manufactura, la automotriz, la alimentaria, y muchas más.

Al ampliar el título, la investigación puede abordar aspectos cruciales como las normativas de seguridad aplicables en un contexto más global. Este enfoque no solo enriquecerá el contenido del estudio, sino que también ofrecerá una perspectiva más completa y relevante para los profesionales del sector.

Por lo tanto, el cambio de título responde a la necesidad de contextualizar la seguridad de los sistemas de gammagrafía dentro de un marco más amplio y representativo de su aplicación práctica en la industria, proporcionando así una contribución más significativa y aplicada al conocimiento en este campo

2.1. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es investigar la relación entre la implementación de regulaciones en la gammagrafía industrial y la incidencia de accidentes fatales en el ámbito laboral. Se pretende evaluar si los países con marcos regulatorios más estrictos y detallados presentan una menor cantidad de accidentes en comparación con aquellos que no cuentan con regulaciones específicas en este campo. A través de este análisis, se busca ofrecer una comprensión clara de cómo las políticas de seguridad y las regulaciones impactan directamente en la protección y bienestar de los trabajadores que operan en esta industria.

Además, este trabajo tiene como meta identificar los elementos clave que contribuyen a la efectividad de las regulaciones en la mejora de la seguridad laboral. Al comparar diferentes enfoques regulatorios y sus resultados en diversos países, se pretende proporcionar recomendaciones basadas en evidencia que puedan ser utilizadas por los responsables de formular políticas y las organizaciones industriales. Esto, con el fin de promover la adopción de prácticas de seguridad más efectivas que reduzcan significativamente la incidencia de accidentes fatales en la gammagrafía industrial, asegurando así un entorno de trabajo más seguro y saludable.

La gammagrafía industrial, una técnica crucial en la inspección no destructiva de materiales, se ha convertido en un pilar fundamental en una amplia gama de sectores industriales, incluyendo la industria petroquímica, nuclear, aeroespacial y de fabricación de productos metálicos, entre otros. Esta técnica, que implica el uso de fuentes radiactivas para obtener imágenes detalladas de la estructura interna de materiales y componentes, ofrece una capacidad única para detectar defectos y anomalías que pueden pasar desapercibidos con métodos de inspección convencionales.

Es importante destacar que la gammagrafía industrial se utiliza comúnmente en obras de gran porte, como construcciones de infraestructuras petroleras, gasíferas, y en proyectos de ingeniería civil. Estas obras, a menudo situadas en lugares remotos y de difícil acceso, presentan desafíos adicionales en términos de seguridad laboral debido a la alta rotación de diferentes gremios y a la complejidad de coordinar múltiples actividades en un entorno dinámico y cambiante.

Durante la investigación inicial para este estudio, se encontraron dificultades relacionadas con la disponibilidad de información detallada sobre los procedimientos de seguridad y los protocolos de gestión de riesgos asociados con el uso de sistemas de gammagrafía en obras de gran envergadura. La ocasional falta de datos específicos sobre incidentes pasados y las mejores prácticas en la industria representaron un desafío significativo al abordar este tema.

2.2. Marco Teórico

Es prácticamente imposible abordar la problemática desde el punto de vista de los riesgos asociados sin entender la naturaleza de las radiaciones ionizantes; así como sería imposible analizar los riesgos de trabajos en trabajos eléctricos sin entender cómo funciona la electricidad.

A tal efecto se explicará de forma lo más concisa posible que son las radiaciones ionizantes y sus riesgos asociados.

Para comenzar debemos saber que existen dos tipos de radiaciones las ionizantes y las no ionizantes (UNSCEAR, 2000). A grandes rasgos, las primeras, como su nombre indica, tienen la propiedad de "ionizar" es decir tienen la suficiente cantidad de energía para alterar las propiedades de la materia. Tienen suficiente energía para liberar electrones de los átomos y generar iones, lo que puede causar cambios en la estructura de las moléculas y células, incluido el ADN

Por otra parte, las radiaciones no ionizantes son relativamente más débiles en términos energéticos en comparación con la segunda y no tienen la propiedad de alterar a la materia de la forma que lo hacen la primera, como un ejemplo están los hornos a microondas. Es de destacar que el hecho de que no sean ionizantes no implica que su uso no conlleve un riesgo sobre la salud de las personas

Ahora bien, centrándonos en nuestro grupo de interés, las radiaciones ionizantes, además de estar presente en el cosmos y en nuestro entorno, se encuentra en los elementos constituyentes de nuestro cuerpo, algunos de los cuales son radiactivos, como los radioisótopos del potasio, el cesio y el radio.

Existe en esencia las radiaciones tipo alfa, beta, gamma, radiación x y neutrónica. Como su nombre indica la gammagrafía industrial emplea fuentes de radiación gamma.

Las alteraciones en las moléculas de ADN debido a la radiación ionizante pueden resultar en células biológicas mutadas. Aunque la mayoría de estas mutaciones no representan un riesgo significativo para la salud, existe una pequeña probabilidad de que algunas puedan conducir al desarrollo de cáncer. Por lo tanto, comprender la interacción entre la radiación y la materia biológica es esencial. (Alexandrov et. al., 2013)

La radiación ionizante puede penetrar profundamente en objetos sólidos, lo que es fundamental para aplicaciones médicas como la radiología de diagnóstico y la radioterapia. En el campo de la medicina nuclear, se administra a los pacientes una sustancia radiactiva que se acumula en una región específica del cuerpo humano, lo que permite a los profesionales de la salud obtener información sobre las funciones fisiológicas. En la radioterapia, la radiación se dirige hacia los tumores para destruirlos.

Las fuentes naturales representan la mayor parte de la exposición anual promedio a la radiación en la población mundial. Sin embargo, la radiación con fines médicos es la principal fuente artificial de exposición, contribuyendo significativamente a la dosis anual total. Por tanto, es crucial minimizar las exposiciones médicas injustificadas a la radiación ionizante mediante la mejora de los procesos de justificación y optimización de las exposiciones, garantizando que solo se exponga a las personas cuando el beneficio supere claramente los riesgos y reduciendo al mínimo la dosis de radiación utilizada para fines diagnósticos o terapéutico.¹

Desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales debemos saber que lo que debemos valorar es como impacta esta radiación ionizante sobre el cuerpo humano. Hablar en

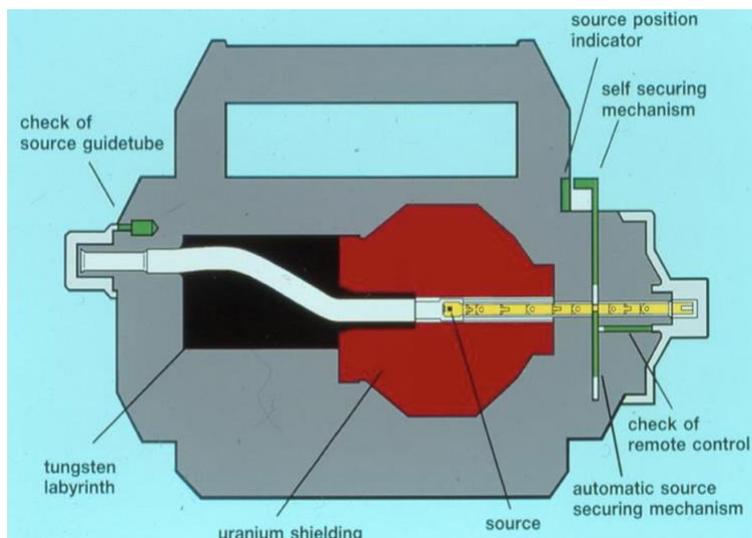
¹ <https://www.iaea.org/es/publications/14716/curso-de-ensenanza-de-posgrado-sobre-proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion>

profundidad de este tema nos llevaría páginas enteras debido a la complejidad que tiene la explicación magnitudes dosimétricas. A fin de ilustrar este punto debemos decir la dosis de radiación se mide típicamente en términos de energía impartida por unidad de masa del material irradiado. En la radiación ionizante, la unidad comúnmente utilizada para medir la dosis absorbida es el gray (Gy), que equivale a un julio de energía absorbida por kilogramo de materia. Por otra parte, dado que no todas los tipos de radiación ionizante interactúan con la materia de forma idéntica y que existe variación en como índice dicha radiación en el cuerpo humano según el tipo de órgano debido a factores biológicos, se utiliza el sievert (Sv) es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades (SI) que se utiliza para medir la dosis equivalente de radiación, es decir, la dosis de radiación ajustada por el tipo de radiación y su efecto biológico en los tejidos humanos. El sievert tiene en cuenta el tipo de radiación y la sensibilidad de los tejidos irradiados. Es importante saber que por cuestiones prácticas, es normal leer en reportes y guías dosimétricas, mili sieverts (mSv) y los micro sieverts (μ Sv) que son submúltiplos del sievert (Sv).

Gammagrafía Industrial

La gammagrafía industrial juega un papel importante en el control de calidad de diversos materiales y componentes. Está clasificado por la Agencia Internacional de Energía Atómica - OIEA como Categoría 2, debido a su riesgo de radiación provocado por el uso de fuentes radiactivas de alta actividad (Souza, 2017). Es una técnica de ensayo no destructivo ampliamente utilizada en una variedad de industrias, incluyendo la siderúrgica, naval, nuclear, petrolera, entre otras, con el propósito de controlar la calidad de los materiales. Su aplicación principal se centra en la identificación y clasificación de defectos en soldaduras, desempeñando un papel crucial en la garantía de la integridad estructural y la seguridad de diversos componentes y estructuras.

En esta técnica, se emplean fuentes selladas de radiación gamma, tales como el Iridio-192, Cobalto-60, Cesio-137, Se-75, Iterbio-169 y Tulio-170. Estas fuentes radiactivas se alojan en unidades que pueden ser fijas, móviles o portátiles, dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación. (ver fig.1)

Figura 1 Componentes de un equipo de gammagrafía industrial

Nota. La figura fue extraída de <http://www.irpabuenosaires2015.org>

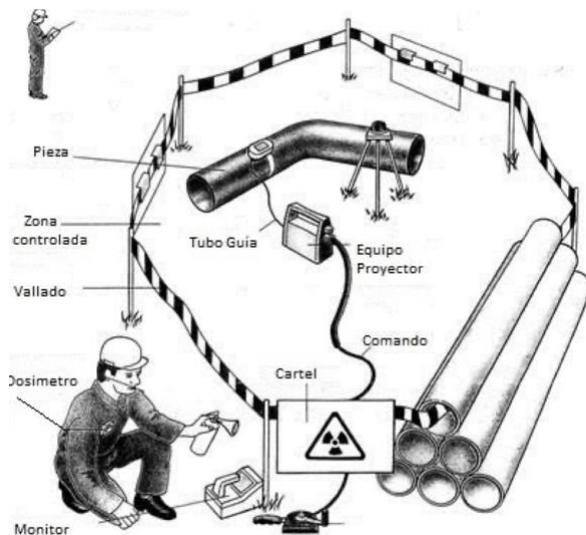
Las unidades fijas de gammagrafía están diseñadas para operar en lugares específicos, como instalaciones de fabricación o sitios de construcción, donde se realizan inspecciones de manera regular. En este tipo de equipos, la fuente radiactiva permanece dentro de su blindaje en todo momento durante el proceso de inspección, lo que minimiza los riesgos de exposición para los trabajadores y garantiza la seguridad de la fuente radiactiva.

Por otro lado, las unidades móviles o portátiles de gammagrafía se utilizan en situaciones donde la inspección se realiza en diferentes ubicaciones o en áreas de difícil acceso. Estas unidades pueden conducir a un nivel de exposición más importante para los trabajadores y presentar riesgos potenciales de sobreexposición, así como preocupaciones adicionales sobre la seguridad de la fuente radiactiva durante su manipulación y transporte.

En ambos casos, el funcionamiento de la gammagrafía implica la emisión de radiación gamma desde la fuente radiactiva hacia el material o la estructura que se va a inspeccionar, y la detección de esta radiación por parte de un detector, que genera imágenes detalladas que revelan posibles defectos internos sin dañar el material en sí. Este proceso permite una evaluación precisa de la integridad de los materiales y la detección temprana de posibles problemas, contribuyendo así a la seguridad y calidad en diversos sectores industriales (ver fig.2).²

² <https://inis.iaea.org>

Figura 2. Operación de un equipo de gammagrafía industrial



Nota. La figura fue extraída de <http://www.irpabuenosaires2015.org>

2.3. Hipótesis

La hipótesis de este estudio es que los países que implementan regulaciones en la gammagrafía industrial presentan una menor tasa de accidentes fatales por cada 100,000 trabajadores en comparación con los países que no tienen dichas regulaciones. La variable independiente en este estudio es la implementación de regulaciones, mientras que la variable dependiente es la tasa de accidentes fatales. Se espera encontrar una correlación negativa entre la existencia de regulaciones y la tasa de accidentes, lo que indicaría que las regulaciones contribuyen a mejorar la seguridad laboral en la gammagrafía industrial.

Variables

Variable Independiente: Implementación de regulaciones en la gammagrafía industrial

Definición: Presencia o ausencia de regulaciones específicas y efectivas para la seguridad en la gammagrafía industrial.

Medición: Indicador binario (Sí/No) basado en la existencia de marcos regulatorios establecidos y supervisados por agencias nacionales competentes.

Variable Dependiente: Tasa de accidentes fatales por cada 100,000 trabajadores

Definición: Número de accidentes laborales fatales relacionados con la gammagrafía industrial, normalizado por cada 100,000 trabajadores.

Medición: Datos cuantitativos obtenidos de informes oficiales, publicaciones científicas y bases de datos internacionales.

Justificación de la Hipótesis

La hipótesis propuesta se basa en la premisa de que la implementación de regulaciones estrictas y efectivas en la gammagrafía industrial puede contribuir significativamente a la reducción de accidentes fatales. Esta premisa se apoya en estudios previos y teorías de gestión de riesgos que sugieren que las regulaciones adecuadas y su cumplimiento estricto mejoran la seguridad laboral. (Erazo-Chamorro et. al., 2022)

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Diseño del Estudio

El estudio sigue un diseño observacional comparativo, donde se recopilan y analizan datos de diferentes países con el objetivo de establecer correlaciones entre la presencia de regulaciones y la tasa de accidentes fatales.

Fuentes de Datos

1. Organización Internacional del Trabajo (OIT):
 - Informes sobre seguridad laboral y estadísticas de accidentes fatales.
2. Organización Mundial de la Salud (OMS):
 - Datos sobre salud ocupacional y seguridad radiológica.
3. Agencias Nacionales de Seguridad Laboral y Nuclear:

- Informes y bases de datos de la ARN (Argentina), CNEN (Brasil), NRC (Estados Unidos), CNSC (Canadá), HSE (Reino Unido), CSN (España), ASN (Francia), ARPANSA (Australia), entre otros.

Procedimiento

1. Selección de Países:

- Se seleccionan países representativos de diferentes regiones del mundo, incluyendo aquellos con y sin regulaciones específicas en gammagrafía industrial.

2. Recopilación de Datos:

- Regulaciones: Identificación de la existencia y la efectividad de regulaciones específicas a través de documentos oficiales y publicaciones de las agencias reguladoras.
- Accidentes: Recopilación de datos sobre la tasa de accidentes fatales por cada 100,000 trabajadores, utilizando informes de la OIT, OMS y otras fuentes verificables.

3. Clasificación de Países:

- Los países se clasifican en dos grupos: aquellos con regulaciones estrictas y efectivas y aquellos sin regulaciones específicas.

4. Análisis de Datos:

- Análisis Descriptivo: Se realiza un análisis descriptivo inicial para entender la distribución de los datos. Se presentan gráficos y tablas que comparan las tasas de accidentes fatales entre los dos grupos de países.
- Comparación de Grupos: Se compara la tasa de accidentes fatales entre los países con regulaciones y los países sin regulaciones, observando las diferencias y buscando patrones que indiquen una correlación entre la implementación de regulaciones y la seguridad laboral.

Para probar esta hipótesis, se utilizarán datos cuantitativos obtenidos de fuentes verificables y confiables, tales como informes de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y agencias nacionales de seguridad laboral y nuclear. La comparación se realizará entre países con regulaciones estrictas y aquellos sin regulaciones

específicas, utilizando análisis estadísticos adecuados para determinar la significancia de las diferencias observadas.

4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados del análisis comparativo realizado entre diferentes países con respecto a la implementación de regulaciones en la gammagrafía industrial y la tasa de accidentes fatales por cada 100,000 trabajadores. Los datos recopilados y analizados provienen de diversas fuentes confiables, incluyendo la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y agencias nacionales de seguridad laboral y nuclear.

Los resultados se organizan en gráficos y tablas que muestran la tasa de accidentes fatales en países con regulaciones estrictas y efectivas en comparación con aquellos que carecen de tales regulaciones. Este análisis descriptivo busca identificar patrones y correlaciones que puedan indicar la efectividad de las regulaciones en la mejora de la seguridad laboral en el campo de la gammagrafía industrial.

A continuación (fig 3), se presentan los datos recopilados y los gráficos correspondientes, proporcionando una visión clara y detallada de las diferencias observadas entre los países con y sin regulaciones específicas

Figura 3

País	¿Posee regulaciones?	Accidentes Fatales por cada 100,000 Trabajadores
Argentina	Sí, regulado por ARN (Autoridad Regulatoria Nuclear)	3.1
Brasil	Sí, regulado por CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear)	7.4
Estados Unidos	Sí, regulado por NRC (Nuclear Regulatory Commission)	3.3
Canadá	Sí, regulado por CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission)	5.1
Nigeria	No	12
Bangladesh	No	11

Australia	Sí, regulado por ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)	1.6
Nueva Zelanda	Sí, regulado por el Ministerio de Salud	2.3
Reino Unido	Sí, regulado por HSE (Health and Safety Executive)	0.4
España	Sí, regulado por CSN (Consejo de Seguridad Nuclear)	1.9
Francia	Sí, regulado por ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire)	2.5
Myanmar	No	8.6
Azerbaiyán	No	58
Turquía	No	6.3
Letonia	No	5.0

Nota. fuente: OIT, OMS, agencias nacionales regulatorias

Figura 4

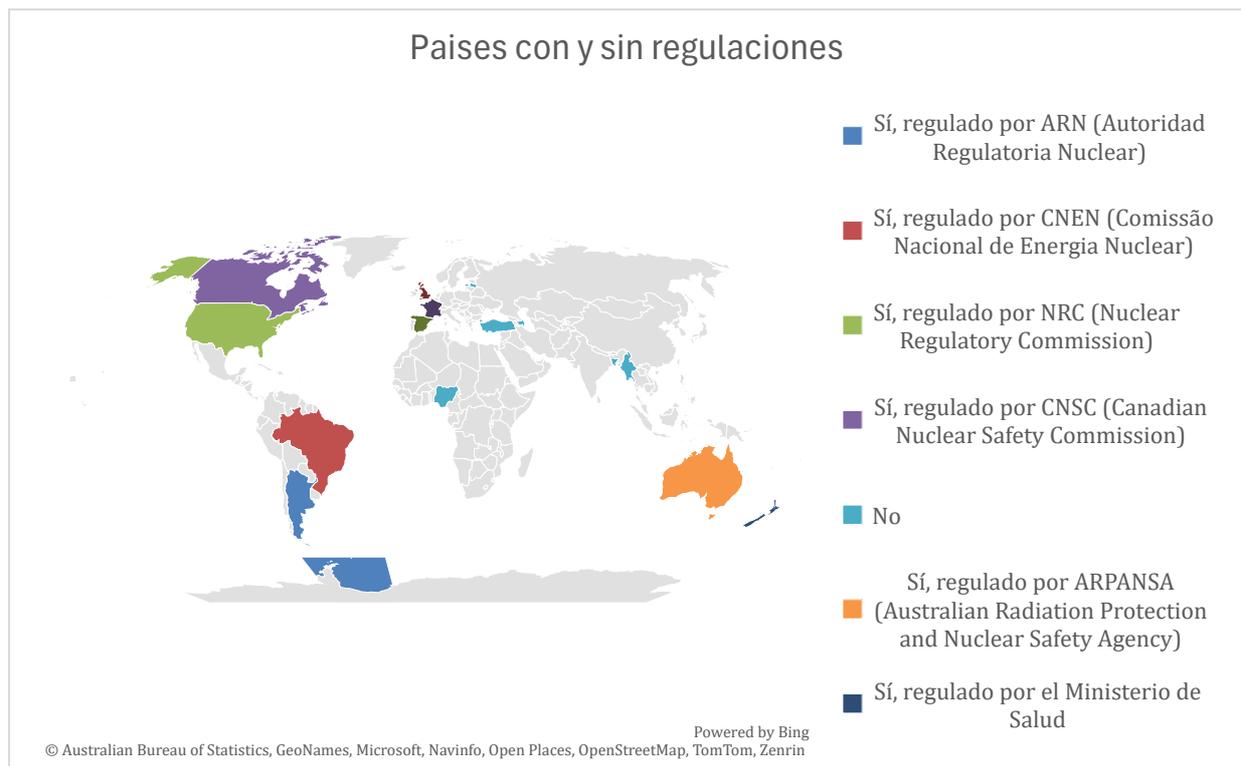
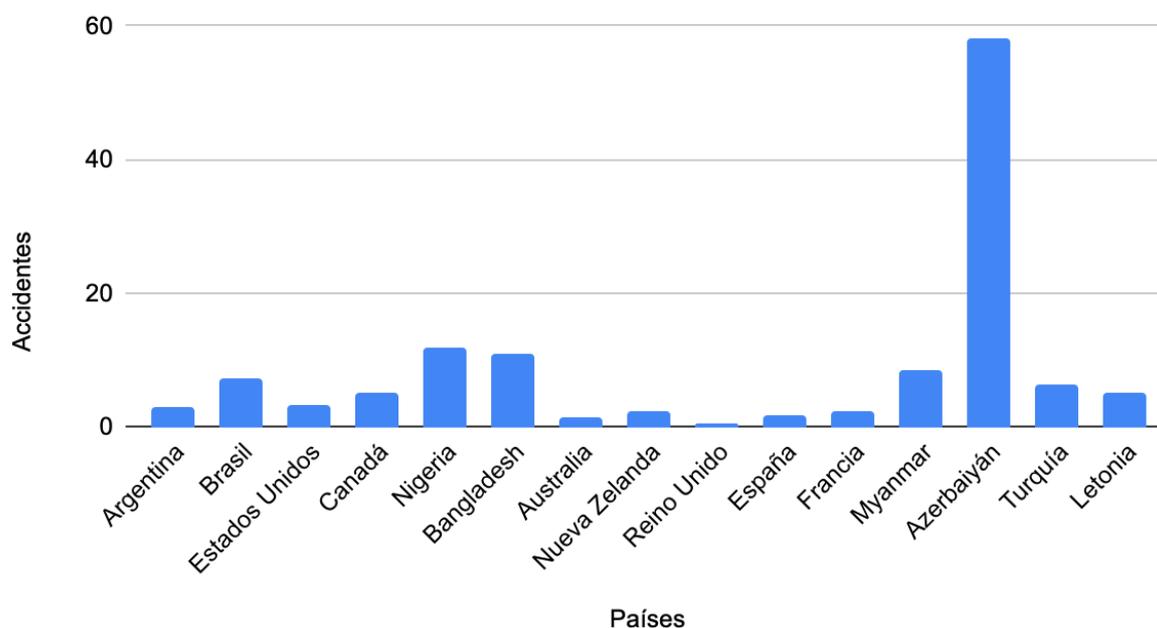


Figura 5

Accidentes Fatales por cada 100,000 Trabajadores



5. CONCLUSIONES

Aunque podría parecer obvio que mayores regulaciones resultan en una menor cantidad de accidentes, esta relación no siempre es directa ni garantizada. La efectividad de las regulaciones depende en gran medida de su implementación, cumplimiento y de las medidas complementarias que se adopten.

Un ejemplo ilustrativo de esto se puede observar en el ámbito de la seguridad vial. En países como Italia y Grecia, las regulaciones sobre la velocidad y el uso del cinturón de seguridad son estrictas. No obstante, las tasas de accidentes de tráfico siguen siendo elevadas en comparación con países como Suecia y Noruega, donde las leyes, aunque quizás menos estrictas, se complementan con campañas efectivas de concienciación pública y una infraestructura vial de alta calidad. Esto demuestra que no solo la existencia de regulaciones es crucial, sino también cómo se implementan y se hacen cumplir.

Otro ejemplo ilustrativo es el sector de la construcción en Estados Unidos. A pesar de las estrictas regulaciones establecidas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), las tasas de accidentes laborales en la construcción siguen siendo altas. En 2022, el sector de la construcción tuvo la mayor cantidad de fatalidades de cualquier industria, con una tasa de 9.6 muertes por cada 100,000 trabajadores ^(OSHA). Esto puede atribuirse a factores como

la falta de cumplimiento riguroso, la variabilidad en la implementación de las regulaciones a nivel estatal y la necesidad de una formación continua y específica para los trabajadores. Comparativamente, países como Alemania, con un enfoque más integrado en la formación y la supervisión constante, presentan mejores resultados en términos de seguridad laboral en la construcción.

Por lo tanto, en el contexto de la gammagrafía industrial, aunque se demuestra empíricamente que la presencia de regulaciones estrictas puede contribuir significativamente a la reducción de accidentes, la clave reside en una implementación efectiva y en la adopción de medidas complementarias que promuevan una cultura de seguridad robusta y sostenida. Es crucial que las regulaciones no solo existan en papel, sino que también se apliquen de manera coherente y se acompañen de programas de formación, inspecciones regulares y campañas de concienciación.

Además, es importante considerar el papel de la infraestructura y los recursos disponibles para la implementación de estas regulaciones. Países con mayores recursos y mejor infraestructura pueden facilitar el cumplimiento de las normativas y, por lo tanto, mejorar los resultados en términos de seguridad. En cambio, en países con menos recursos, aunque las regulaciones sean estrictas, la falta de infraestructura adecuada puede limitar su efectividad.

En resumen, la relación entre regulaciones y la reducción de accidentes es compleja y multifacética. No se trata solo de tener regulaciones estrictas, sino de cómo se implementan, supervisan y complementan con otras medidas. Para lograr una mejora significativa en la seguridad en la gammagrafía industrial, se necesita un enfoque integral que incluya regulaciones efectivas, implementación rigurosa, formación continua y una infraestructura adecuada. Esto subraya la importancia de una perspectiva holística en la formulación y aplicación de políticas de seguridad, asegurando así un entorno laboral más seguro y protegido para todos los trabajadores involucrados.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio ha proporcionado una visión valiosa sobre la relación entre las regulaciones en la gammagrafía industrial y la incidencia de accidentes fatales. Sin embargo, hay varias áreas que podrían beneficiarse de una investigación adicional. A continuación, se presentan algunas sugerencias para futuras investigaciones:

1. Impacto de la Formación Continua:

Investigar cómo los programas de formación continua y la educación en seguridad afectan la tasa de accidentes en la gammagrafía industrial. Evaluar la efectividad de diferentes enfoques de formación y su implementación en diversos contextos industriales.

2. Análisis Comparativo de Infraestructuras:

Realizar estudios comparativos sobre la infraestructura de seguridad en diferentes países y cómo estas afectan la implementación y efectividad de las regulaciones. Examinar cómo la disponibilidad de recursos y tecnologías avanzadas influye en la seguridad laboral.

3. Estudios Longitudinales:

Llevar a cabo estudios longitudinales para evaluar el impacto a largo plazo de las regulaciones y políticas de seguridad en la reducción de accidentes laborales. Estos estudios podrían ayudar a identificar tendencias y cambios en la seguridad laboral a lo largo del tiempo.

4. Evaluación de Medidas Complementarias:

Investigar la eficacia de medidas complementarias, como las campañas de concienciación pública, inspecciones regulares y programas de incentivos para la seguridad, en combinación con las regulaciones existentes. Analizar cómo estas estrategias adicionales pueden mejorar la seguridad en la gammagrafía industrial.

5. Impacto de las Políticas Culturales y Sociales:

Explorar cómo las diferencias culturales y sociales influyen en la implementación y efectividad de las regulaciones de seguridad. Estudiar cómo adaptar las regulaciones para que sean más efectivas en diversos contextos culturales.

Estas futuras líneas de investigación no solo ayudarán a profundizar el conocimiento existente, sino que también proporcionarán información valiosa para mejorar las políticas y prácticas de seguridad en la gammagrafía industrial y en otras áreas relacionadas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alexandrov, L. B., Nik-Zainal, S., Wedge, D. C., Aparicio, S. A., Behjati, S., Biankin, A. V., Bignell, G. R., Bolli, N., Borg, A., Børresen-Dale, A. L., Boyault, S., Burkhardt, B., Butler, A. P., Caldas, C., Davies, H. R., Desmedt, C., Eils, R., Eyfjörd, J. E., Foekens, J. A., Greaves, M., Hosoda, F., Hutter, B., Ilicic, T., Imbeaud, S., Imielinski, M., Jäger, N., Jones, D. T., Jones, D., Knappskog, S., Kool, M., Lakhani, S. R., López-Otín, C., Martin, S., Munshi, N. C., Nakamura, H., Northcott, P. A., Pajic, M., Papaemmanuil, E., Paradiso, A., Pearson, J. V., Puente, X. S., Raine, K., Ramakrishna, M., Richardson, A. L., Richter, J., Rosenstiel, P., Schlesner, M., Schumacher, T. N., Span, P. N., Teague, J. W., Totoki, Y., Tutt, A. N., Valdés-Mas, R., van Buuren, M. M., van 't Veer, L., Vincent-Salomon, A., Waddell, N., Yates, L. R., Australian Pancreatic Cancer Genome Initiative, ICGC Breast Cancer Consortium, ICGC MMML-Seq Consortium, ICGC PedBrain, Zucman-Rossi, J., Futreal, P. A., McDermott, U., Lichten, P., Meyerson, M., Grimmond, S. M., Siebert, R., Campo, E., Shibata, T., Pfister, S. M., Campbell, P. J., & Stratton, M. R. (2013). Signatures of mutational processes in human cancer. *Nature*, 500(7463), 415-421. <https://doi.org/10.1038/nature12477>

Construction Dive. (2023). Construction fatalities 2023: BLS falls safety. Recuperado de <https://www.constructiondive.com/news/construction-fatalities-2023-bls-falls-safety/702974/#:~:text=Dive%20Brief%3A,Bureau%20of%20Labor%20Statistics%20Monday>

European Commission. (2023, octubre 19). Road safety: 20,640 people died in a road crash last year, progress remains too slow. Recuperado de https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-20640-people-died-road-crash-last-year-progress-remains-too-slow-2023-10-19_en

European Commission. (2023). Road safety statistics in the EU. Recuperado de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_safety_statistics_in_the_EU#:~:text=In%202021%2C%20the%20European%20Commission,on%20European%20roads%20by%202050

International Atomic Energy Agency. (1991). INSAG SERIES No. 4: Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants. Vienna: International Atomic Energy Agency.

International Atomic Energy Agency. (2000). The radiological accident in Yanango. Vienna: International Atomic Energy Agency. (STI/PUB/1101)

International Atomic Energy Agency. (2020). Curso de posgrado sobre protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Programa tipo (IAEA-TCS-18 [Rev. 1]). Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica.

Lachos, A., & Márquez, J. F. (2014, April 13-16). Reconstrucción física del accidente radiológico de Chilca (Lima-Perú). Ponencia presentada en el Simposio Internacional de Seguridad y Salud en el Desarrollo, 13 al 16 de abril de 2014, Cusco, Perú.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2023). Commonly Used Statistics. Recuperado de <https://www.osha.gov/data/commonstats#:~:text=Worker%20deaths%20in%20America%20are,2.7%20per%20100%20in%202022>

Souza, L.S., & Silva, F.C.A. da (2017). Recommendations for prevention of radiation accident in industrial gammagraphy. International joint conference RADIO 2017: Goiania 30 years later, Brazil.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation: 2000 Report Vol. I. New York: United Nations.

Zerpa, M. E. (2010). Accidente radiológico por práctica de gammagrafía industrial: A propósito de un caso. Venezuela. Coordinación de Regulación y Control de las Radiaciones Ionizantes, Dirección de Salud Radiológica, Dirección General de Salud Ambiental, Ministerio del Poder Popular para la Salud, República Bolivariana de Venezuela.

Erazo-Chamorro, Vanessa C. & Arciniega, Ricardo & PhD. habil, Rudolf & Babos, Tibor & Szabó, Gyula. (2022). Safety Workplace: The Prevention of Industrial Security Risk Factors. Applied Sciences. 12. 10726. 10.3390/app122110726.

8. ANEXOS

ANEXO I: ANTECEDENTES

En este anexo buscaremos a través de dos casos de estudio, explicar brevemente las características que pueden tener los accidentes con fuentes de gammagrafía.

Es importante aquí señalar que el origen de todo accidente industrial como la consecuencia de una combinación de actos y/o condiciones inseguras. Si indagamos un poco más en estos hechos y o condiciones inseguras podemos concluir que el origen de todo accidente es antropogénico. Esto es, los seres humanos somos finitos e imperfectos, por lo cual todo lo que hacemos será finito e imperfecto Vale decir, todo lo que realizamos tiene un origen y un fin y es imperfecto.

Ahora bien, el hombre es un ser social. Interactúa y se relaciona con otros hombres para conseguir diferentes objetivos. Esto se da de este modo en cualquier proceso industrial y, si examinamos accidentes industriales, encontraremos que de la forma en la que las personas se relacionan, juegan un papel vital en el origen de los accidentes. Para ilustrar este punto podemos ver las conclusiones de la serie de informes del INSAG (International Safety Advisory Group) grupo creado por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) para investigar el accidente de Chernóbil (1986) en donde se introduce el concepto de Cultura de Seguridad, definida como “El conjunto de características y actitudes en organizaciones e individuos que establece que, como prioridad absoluta, las cuestiones de protección y seguridad reciben la atención que merecen por su importancia”.³

Este concepto que introduce el comité de expertos para el estudio del accidente de Chernóbil es un concepto basal en el entendimiento de cualquier accidente industrial, no solamente aquellos relacionado a gammagrafía industrial.

Basaremos este punto en los informes de dos accidentes, uno ocurrido en el Perú y otro en Venezuela, en los años 1999 y 2010 respectivamente.

El primer accidente paradigmático que basa nuestro estudio es el ocurrido en Yanango, Perú en el año 1999. En esencia se produjo un grave accidente radiológico, cuando un soldador tomó

³ https://www.iaea.org/sites/default/files/culture_for_safety_leaflet.pdf

una fuente de radiografía industrial de 192 Ir y la guardó en su bolsillo durante varias horas. Esta acción resultó en que recibiera una alta dosis de radiación que requirió la amputación de una pierna.⁴

Según podemos leer en el reporte realizado por La Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima-Perú, el accidente tuvo lugar en una empresa dedicada a la soldadura y verificación de fisuras mediante radiografía industrial en Yanango, Perú, durante la noche del 11 de enero de 2012. En este contexto, se llevaron a cabo operaciones de verificación radiográfica utilizando una fuente de Iridio-192. El equipo de trabajo estaba compuesto por tres empleados, siendo el Trabajador 1 el único autorizado para manipular el equipo radiográfico, mientras que los otros dos cumplían funciones de asistencia.

Durante la noche, se realizaron un total de 97 exposiciones radiográficas en un periodo de 150 minutos, enfocadas en tubos de diferentes diámetros. Sin embargo, al concluir las operaciones, se descubrió que la fuente radiactiva no había regresado a la cámara radiográfica como se esperaba. Tras una rápida inspección, se determinó que la fuente se había trabado en el tubo guía del equipo.

La reconstrucción física del accidente se llevó a cabo el 21 de enero de 2012, recopilando información detallada sobre la fuente radiactiva, la instalación, el personal y los procedimientos involucrados. Se definieron términos específicos para facilitar la comprensión de los eventos, como irradiación, exposición y manipuleo.

Los resultados de la reconstrucción revelaron que la fuente radiactiva se había trabado en el tubo guía al inicio de las operaciones, lo que provocó una exposición continua del Trabajador 1 a la radiación durante todo el periodo de trabajo. Se calculó que la dosis recibida por el trabajador fue de 1.7 Gy en todo el cuerpo, 50 Gy en el dedo índice de la mano izquierda y 14.7 Gy en toda la mano izquierda.

En conclusión, el accidente fue el resultado de una serie de factores, incluyendo el incumplimiento de procedimientos operativos, la falta de formación y entrenamiento adecuados, el mal funcionamiento del equipo y la falta de mantenimiento de este. La reconstrucción física del accidente proporcionó información crucial para el manejo médico de los afectados por la radiación y para la prevención de futuros incidentes similares.

El segundo accidente en el que nos basaremos es el ocurrido en Venezuela en el año 2010. Según lo observado en el reporte de la Dirección de Salud Radiológica. Dirección General de

⁴ <https://www.iaea.org/publications/6090/the-radiological-accident-in-yanango>

Salud Ambiental de la República Bolivariana de Venezuela. El accidente radiológico por práctica de gammagrafía industrial tuvo como protagonista a un paciente masculino de 55 años. Este individuo se expuso accidentalmente a una fuente sellada de Iridio-192 durante un lapso de 10 minutos mientras manipulaba la fuente entre ambas manos y la colocaba en el bolsillo trasero derecho de su pantalón. Inicialmente, el paciente no presentó signos ni síntomas consistentes con el Síndrome Agudo de Radiación, lo que sugiere una exposición relativamente breve sin manifestaciones inmediatas de toxicidad aguda.

Sin embargo, seis días después de la exposición, el paciente comenzó a experimentar un ligero dolor en ambas manos, sin evidencia de inflamación. Además, se observó una pequeña área hiperpigmentada en la región media del glúteo derecho. Los estudios clínicos y paraclínicos iniciales no revelaron ninguna alteración significativa, incluyendo lesiones en tejidos blandos u óseos, aunque se observó una conservación de la estructura muscular.

A los diez días post exposición, el paciente desarrolló eritema y signos de inflamación en ambas manos, con hipersensibilidad superficial aumentada. Seis días más tarde, las lesiones evolucionaron de una radiodermatitis seca a una fase exudativa, característica de un Síndrome Cutáneo Radioinducido. La dosimetría biológica reveló la presencia de cromosomas dicéntricos y céntricos, lo que indica una exposición significativa a la radiación.

Además, los estudios de eco doppler mostraron señales de flujo sanguíneo en los arcos superficial y profundo, con pérdida de tono y respuesta vasomotora. Este conjunto de hallazgos clínicos y paraclínicos sugiere una irradiación severa localizada en las manos del paciente, lo que desencadenó una serie de respuestas fisiológicas y celulares adversas.

Dada la gravedad de la situación, el paciente fue trasladado al hospital Percy en Francia, donde se le practicaron injertos e inyección de células mesenquimales de médula ósea. Estas intervenciones terapéuticas tuvieron una evolución satisfactoria y condujeron a una cicatrización adecuada de las lesiones cutáneas. Es importante destacar que, a pesar de las complicaciones iniciales, la respuesta médica oportuna y especializada contribuyó al éxito terapéutico del paciente.