



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

Recinto Universitario “Rubén Darío” (RURD)

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Departamento de Física

**Trabajo monográfico para optar al título de:
Licenciatura en Física con mención en Física Médica**

Título:

“Evaluación de la Contaminación Superficial por método directo e indirecto, basado en la ISO 7503:2016 en el período septiembre 2019 a noviembre 2020 en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM)”.

Elaborado por:

Br. Rosnory de los Ángeles Domínguez Cano.

Tutor:

Dr. Fredy Israel Somarriba Vanegas.

Asesor:

Dra. Norma Alejandra Roas Zúniga.

Nicaragua, noviembre 2020

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Dedicatoria:

Esta monografía está dedicada a:

DIOS en primer lugar, por ser el motor de mi vida, porque toda corona que me permite recibir se la regresare como Agradecimiento.

A mis padres Jacquelin Cano Saballos y Javier Domínguez Rojas quienes, con su amor, esfuerzo y sobre todo oraciones me han permitido cumplir un sueño más; además, por inculcarme siempre que, con ayuda y aprobación de Dios, disciplina en lo que me proponga y mentalidad positiva todo es posible. A mi hermano, Sadrac Domínguez Cano, quien es un motor para dar lo mejor de mí como ejemplo de hermana mayor.

A mis demás familiares por su cariño, apoyo y palabras de aliento; y a todas las personas que me apoyaron de distintas maneras para la culminación de mis estudios.

No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia.

Isaías 41:10

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Agradecimiento

Quiero agradecerle primeramente a Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de culminación de mis estudios universitarios; también les agradezco a mis padres por su inigualable e incondicional apoyo y todas sus oraciones; a mis demás parientes que me dieron tanto palabras de ánimo como apoyo en otros campos de mi vida, sobre todo sus oraciones.

A mis pastores por siempre mantener a mi familia y mí persona en sus oraciones. A mis amigos y conocidos por ayudarme de manera desinteresada en distintas áreas de mi vida.

A mis tutores por guiarme y apoyarme en este proceso, permitiéndome llegar a la culminación de mis estudios. A los trabajadores del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología por hacerme sentir parte del equipo de trabajo.

... Anímate y esfuérzate, y manos a la obra; no temas, ni desmayes, porque Jehová Dios, mi Dios, estará contigo; él no te dejará ni te desamparará, hasta que acabes toda la obra...

1° de Crónicas 28:20

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Carta Aval del Tutor

Managua, Nicaragua
26 de noviembre de 2020

Dr. Noel Zelaya
Director
Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ing.
UNAN-Managua, Managua

Estimado Dr. Zelaya:

Por este medio estoy haciendo llegar mi valoración como tutor de la Monografía realizada por el Br. Rosnory de los Ángeles Domínguez Cano, la cual considero un trabajo de innovación y que cumple con los requisitos establecidos con el actual reglamento estudiantil vigente. Este trabajo ha sido de gran aporte al Laboratorio de Calibración Dosimétrico del LAF-RAM, específicamente en el servicio de calibración de monitores de contaminación superficial. El trabajo tiene por título “Evaluación de la Contaminación Superficial por método directo e indirecto, basado en la ISO 7503:2016 en el período septiembre 2019 a noviembre 2020 en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM)”. Agradecería su gestión para la revisión del trabajo. Aprovecho la ocasión para saludarlo.

Atentamente,



Dr. Fredy Israel Somarriba

Tutor

Docente Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ing.
UNAN-Managua, Managua

CC. Archivo

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

I. Resumen

La calibración de los detectores de contaminación superficial se realiza utilizando un set de fuentes planas radiactivas que emiten radiación alfa (α), beta (β) y gamma (γ), un banco de calibración y la metodología establecida en la norma internacional ISO 7503-3:2016, reportándose en el certificado de calibración la eficiencia del detector para cada fuente.

Las fuentes planas de calibración o fuentes patrones están calibradas en términos de tasa de emisión superficial [s^{-1}]; por lo tanto, para determinar el factor de calibración del equipo [$s^{-1} \cdot Bq \cdot cm^{-2}$], el cual nos permite conocer la actividad de un radionúclido de interés en unidades de [$Bq \cdot cm^{-2}$], es necesario conocer las eficiencias del detector, la intensidad de emisión y el factor que determina las partículas que emergen de la fuente patrón.

Para evaluar la contaminación por el método directo es necesario realizar mediciones directamente sobre superficies lisas que se consideran contaminadas, se aplica la metodología establecida en la norma ISO 7503-1:2016 para determinar actividad superficial [$Bq \cdot cm^{-2}$] y su incertidumbre.

Cuando las superficies contaminadas son de forma irregular o zonas inaccesibles para el detector, se evalúa la contaminación superficial por el método indirecto, el cual consiste en realizar una frota en un área conocida para posteriormente evaluarlo con un monitor de contaminación superficial; la metodología aplicada está en la normativa ISO 7503-2:2016, así como el cálculo de su incertidumbre.

Con los resultados de este trabajo fue posible determinar cuantitativamente los valores de la contaminación superficial por los métodos directo e indirecto con sus respectivas incertidumbres.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Contenido

Dedicatoria:	ii
Agradecimiento	iii
Carta Aval del Tutor	iv
I. Resumen	v
II. Glosario de abreviaturas	viii
CAPÍTULO I	11
III. Introducción	11
IV. Planteamiento del problema	13
V. Justificación	14
VI. Objetivos de investigación	15
VI.1. Objetivo general	15
VI.2. Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO II	16
VII. Marco Referencial	16
VII.1. Antecedentes	16
VII.2. Marco Teórico	17
VII.2.1. Tipo de Monitores de Contaminación Superficial	17
<i>i. Monitores basados en detectores de ionización gaseosa</i>	18
<i>ii. Monitores basados en detectores de centelleo</i>	22
<i>iii. Monitores basados en detectores de semiconductor</i>	24
VII.2.2. Fuentes planas de referencia según norma ISO 8769.	24
VII.2.3. Calibración de Monitores de Contaminación Superficial según ISO 7503-3.	26
VII.2.4. Incertidumbres asociadas a calibración de los monitores	28
VII.2.5. Estimación de la respuesta del instrumento y del factor de respuesta	31
VII.2.6. Evaluación de la contaminación superficial según ISO 7503:2016.	33
<i>i. Método directo</i>	33
<i>ii. Método indirecto</i>	36
VII.2.7. Incertidumbre del cálculo de evaluación de contaminación superficial	40
<i>i. Método directo</i>	40
<i>ii. Método indirecto</i>	41
VII.3. Marco Legal	43

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

VIII. Preguntas directrices	45
CAPÍTULO III	46
IX. Diseño Metodológico	46
IX.1. Tipo de estudio	46
IX.2. Localización Geográfica	47
IX.3. Materiales	47
<i>IX.3.1. Set de fuentes planas</i>	47
<i>IX.3.2. Banco de calibración</i>	49
<i>IX.3.3. Monitor de contaminación superficial</i>	52
<i>IX.3.4. Contenedor de plomo</i>	54
<i>IX.3.5. Planillas de cálculos</i>	55
IX.4. Procedimiento de medición	61
<i>IX.4.1. Calibración de monitores</i>	61
<i>IX.4.2. Evaluación de la Contaminación Superficial</i>	63
CAPÍTULO IV	64
X. Análisis y Discusión de resultados	64
X.1. Calibración del monitor de contaminación superficial	64
X.2. Evaluación de la contaminación superficial por método directo	66
X.3. Evaluación de la contaminación superficial por método indirecto	68
X.4. Instructivo para evaluación de la contaminación superficial	71
CAPÍTULO V	73
XI. Conclusiones	73
XII. Recomendaciones	74
XIII. Bibliografía	75
XIV. Anexos	76
<i>Anexo 1. Certificado de calibración del monitor de contaminación superficial utilizado</i>	76
<i>Anexo 2. Instructivo para evaluar la contaminación superficial</i>	80

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

II. Glosario de abreviaturas

A_c : Actividad de la fuente de calibración, en Bq .

A_s : Actividad por unidad de área de contaminación, en $Bq \cdot cm^{-2}$.

$A_{s,m}$: Actividad por unidad de área de contaminación de una mezcla de radionúclidos m , en $Bq \cdot cm^{-2}$.

a_r : Actividad por unidad de área removida mediante la prueba de frotis, en Bq/cm^2 .

a_R : Actividad de los radionúclidos removida mediante la prueba, en Bq .

a_T : Actividad total removible de los radionúclidos presentes en el área muestreada, en Bq .

a_w : Actividad medida en el frotis, en Bq .

$C(A)$: Factor de calibración de la actividad, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)_n$: Factor de calibración de la actividad para el radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)_m$: Factor de calibración dado para una mezcla de radionúclidos m con una contribución de radionúclidos conocida de la mezcla, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)^{ind}$: Factor de calibración de la actividad, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)_n^{ind}$: Factor de calibración del método indirecto para un radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)_m^{ind}$: Factor de calibración para una mezcla de radionúclidos dada m con una contribución de radionúclidos conocida a la mezcla, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$E_{i,j}^{-1}$: Recíproco del factor que determina partículas que emergen de una fuente para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (alfa, beta o gamma).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

$\varepsilon = \varepsilon_{i,j}$: Eficiencia de detección para una energía i y un tipo de radiación j .

f_n : Fracción de radionúclido n en la mezcla de radionúclidos.

$I(E)$: Respuesta del instrumento (emisión), en $\text{cps}/\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

$I(A)$: Respuesta del instrumento (actividad), en $\text{cps}/\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$.

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j (alfa, beta o fotones).

MCS: Monitor de Contaminación Superficial.

P : Relación entre la tasa de generación de partículas o fotones (actividad) y la tasa de emisión desde la superficie de la fuente.

p_e : Probabilidad de emisión de partículas.

R_c : Tasa de emisión de la fuente, en s^{-1} .

$S = S_p$: Área efectiva de la ventana del detector, en cm^2 .

S_c : Área efectiva de la fuente de calibración, en cm^2 .

S_w : Área de la superficie de donde se tomó el frotis, en cm^2 .

S_ε : Incertidumbre tipo A (Calibración de monitores de contaminación superficial).

t_0 : Tiempo de duración de la medición de la tasa de conteo de fondo, en s.

t_g : Tiempo de duración de la medición de la tasa de conteo brutas, en s.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

U_{ε} : Incertidumbre expandida (Calibración de monitores de contaminación superficial).

u_{ε} : Incertidumbre tipo B (Calibración de monitores de contaminación superficial).

$\frac{u^2(\rho_c)}{(\rho_c - \rho_0)^2}$: Incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de conteo.

$\frac{u^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2}$: Incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de fondo.

$\frac{u^2(R_c)}{(R_c)^2} + \frac{u^2(S_c)}{(S_c)^2}$: Contribuciones de la actividad de la fuente por unidad de área.

$\frac{u^2(S_p)}{(S_p)^2}$: Incertidumbre aportada por el área del detector.

$u^2(R_{c0})$: Incertidumbre asociada a la actividad superficial de la fuente (certificado de calibración de la fuente).

$u^2 k_{dec}$: Incertidumbre producida por el decaimiento de la fuente.

$\frac{U(C(A)_n)}{C(A)_n}$: Incertidumbre de la variable $C(A)_n$ correspondiente a una desviación estándar.

$u(y)$: Incertidumbre de la primera medición de actividad superficial removida a_r , en Bq/cm^2 .

$u(\varepsilon_{i,j})^2$: Incertidumbre de las eficiencias del detector elevado al cuadrado.

ρ_c : Medida de la tasa de conteo desde la superficie de contaminación, en s^{-1}

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

CAPÍTULO I

III. Introducción

La peligrosidad de las radiaciones ionizantes hace necesario la implementación de medidas que garanticen la protección de los trabajadores expuestos y el público en general contra los riesgos resultantes de la exposición a las mismas. Las posibles exposiciones que pueden tener el personal ocupacionalmente expuesto son por irradiación externa debido a cualquier fuente de radiación o la probabilidad de incorporación de algún radioisótopo, este último escenario no se toma en cuenta en este estudio. Este trabajo tiene como propósito evaluar los distintos escenarios de contaminación superficial utilizando un detector calibrado en términos en tasa de emisión superficial.

La contaminación significa la presencia de sustancia radiactiva sobre una superficie, o dentro de sólido, líquidos o gases (incluidos en el cuerpo humano), donde tal presencia no es intencionada ni deseable (OIEA, 2016). La contaminación superficial puede ser ocasionada por los distintos radionúclidos que emiten varios tipos de radiación como pueden ser: partículas alfa (α), partículas betas (β) y rayos gamma (γ).

Esta contaminación puede ser transitoria o fija de acuerdo con que sea posible o no su eliminación de la superficie. Además, puede surgir de varias actividades o eventos como puede ser el uso de tratamientos médicos, aplicaciones industriales, accidentes en el transporte de material radiactivo, mal funcionamiento de equipos, actos o incidentes malévolos, accidentes nucleares, entre otros.

Según el documento de las normas de seguridad de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), se denomina contaminación a presencia de sustancias radiactivas sobre una superficie en cantidades que excedan $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ para emisores β , γ y α de baja toxicidad o $0,04 \text{ Bq/cm}^2$ para todos los otros emisores α (OIEA, Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos, 2018).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Los detectores utilizados para estimar la contaminación superficial se expresan en cuentas por segundos (cps) o cuentas por minutos (cpm), pero hay que estimar la contaminación en unidad de Bequerelio por centímetro cuadrado [Bq/cm^2] debido a que los límites de contaminación superficial están cuantificados en términos de actividad superficial [Bq/cm^2], por lo que constituye una necesidad para el usuario que el resultado final de las mediciones quede expresado en esta misma unidad de medida.

Actualmente en Nicaragua el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) es el único prestador del servicio de calibración de monitores de contaminación superficial a nivel nacional, dicho servicio fue implementado en enero del año 2020.

La calibración de los monitores de contaminación superficial está basada en la medición de la tasa de emisión superficial que emana de las fuentes planas que tiene sus propias características (semiperiodo, energía, actividad, etc.). Sin embargo, para que el usuario final estime la contaminación superficial es necesario que utilice un detector calibrado en función de la eficiencia que dependerá de cada fuente patrón, y deberá calcular un factor de calibración para el radionúclido el cual se quiere estimar la contaminación superficial ya sea por el método directo o indirecto.

En este trabajo se implementó el uso de la metodología dada por la Organización Internacional de Normalización (ISO), por sus siglas en inglés International Organization for Standardization, según su Norma ISO 7503 segunda edición emitida en 2016 para la evaluación de la contaminación superficial tanto de manera directa o indirecta utilizando un detector calibrado en términos de tasa de emisión superficial.

IV. Planteamiento del problema

En Nicaragua existen distintas instituciones donde se trabajan con fuentes abiertas y parte de los requisitos que la autoridad reguladora nacional establece para la protección radiológica que posean el equipo adecuado para el monitoreo de las zonas de trabajo y del personal, así también tener el personal que domine el conocimiento necesario para la evaluación de la contaminación superficial.

El LAF-RAM cuenta con el servicio de calibración de monitores de contaminación superficial, siguiendo lo especificado en la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense N°. *NTON 07 008-18 Dosimetría. Radiación Ionizante, Requisitos para los Laboratorios de Calibración y Usuarios*, y en el certificado de calibración que brinda el laboratorio se da a conocer los valores de la eficiencia del equipo calibrado con ayuda de las fuentes patrones creadas en función de tasa de emisión superficial [cps]. Estos valores son necesarios para poder llevar acabo la práctica, pero no todos los usuarios finales poseen el conocimiento de cómo utilizar este documento debido a que no saben la metodología a seguir después de obtener la información que se le está brindando en su certificado de calibración. Por consiguiente, surge la siguiente interrogante:

¿Cuál es la metodología para la evaluación de la contaminación superficial por método directo e indirecto basado en la ISO 7503?

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

V. Justificación

Para poder evaluar, detectar, cuantificar y determinar la extensión de contaminación es sustancial poseer un detector calibrado según lo estipulado en el reglamento nacional de la Norma Técnica N°. NTON 07 008-18, asimismo contar con el conocimiento de la metodología para el proceso de evaluación de contaminación superficial según lo determinado en la norma ISO 7503:2016. Actualmente los usuarios finales utilizan detectores para medir la contaminación superficial en unidades de cuentas por segundo [cps]; sin embargo, para determinar la actividad se debe aplicar una metodología, ya sea por el método utilizado para la toma de datos que puede ser directo o indirecto, para estimar el valor en unidades de Bq/cm^2 que es lo estipulado en las normas internacionales, esta metodología hasta el momento no es utilizada por todos los usuarios de los equipos existentes en nuestro país.

Por lo cual es importante incrementar las capacidades técnicas sobre la evaluación de la contaminación superficial en el país en vista de que aún no todos los profesionales implementan las recomendaciones de la ISO 7503:2016. Además, esto permitirá tener un impacto positivo debido a que, con el nuevo servicio de calibraciones de monitores de contaminación superficial en términos de tasa de emisión superficial y la capacitación que se brindará a los usuarios finales sobre cómo obtener sus valores de la contaminación en unidades de Bq/cm^2 , los expertos nacionales podrán dar sus reportes según lo estipulado en los reglamentos internacionales y a su vez podrán disminuir la espera de retorno de sus detectores calibrados.

VI. Objetivos de investigación

VI.1. Objetivo general

Evaluar la contaminación superficial de forma directa e indirecta basado en la ISO 7503:2016.

VI.2. Objetivos Específicos

- ✓ Realizar la calibración del monitor de contaminación superficial marca Berthold modelo LB124 SCINT según ISO 7503-3:2016.

- ✓ Calcular el factor de calibración para el radionúclido Yodo-131 (^{131}I)

- ✓ Elaborar un instructivo para los usuarios finales con la metodología a seguir para evaluar la contaminación superficial.

CAPÍTULO II

VII. Marco Referencial

VII.1. Antecedentes

En Nicaragua, a través de la cooperación del OIEA se aprobó el proyecto nacional “*Fortalecimiento de la protección radiológica ocupacional y médica mediante el mejoramiento de las capacidades y la infraestructura de los recursos humanos del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (UNAN-Managua) y el establecimiento de un Registro Nacional de Dosis*” (NIC9005), fue posible obtener un juego de fuentes planas con el fin de crear la infraestructura necesaria para la calibración de monitores de contaminación superficial, en el presupuesto del proyecto se incluyó la capacitación por parte de un experto del OIEA, para la puesta en servicio de calibración de monitores de contaminación superficial para el mes de enero del 2018.

En conjunto con el personal del Laboratorio de Calibración Dosimétrico (LCD) del LAF-RAM y el experto del OIEA, Dr. José Antonio Tamayo se implementó la metodología para la calibración de monitores de contaminación superficial; cabe mencionar que el Dr. José Antonio Tamayo tiene gran experiencia en la implementación de la metodología para la calibración de monitores de contaminación superficial, siendo este tema la publicación de su tesis en opción al título de máster en ciencias especialidad de física nuclear realizado en el 2008.

En mayo del 2019 el LCD del LAF-RAM, participó en la primera intercomparación regional del Curso Regional de Metrología de Actividad en marcos del proyecto RLA9085 efectuado en el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) ubicado en La Habana, Cuba, obteniendo resultados satisfactorios.

En el año 2020, se realizó la capacitación interna del uso de la norma ISO 7503:2016 al personal del Laboratorio de Calibración Dosimétrico (LCD) para su uso en el nuevo servicio de calibración de detectores de contaminación superficial, y al personal del Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) para su aplicación en el servicio que poseen como es la evaluación de la contaminación de ciertos isótopos utilizando el método indirecto.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Como referencias académicas se encuentran, el trabajo monográfico sobre *Evaluación de la Sensibilidad de Monitores de Contaminación Superficial para la aplicación en el monitoreo de la exposición interna de trabajadores en medicina nuclear* de Y. Meynard¹ en 2014, bajo la tutoría de MSc. Fredy Somarriba, y el trabajo de seminario de graduación sobre *Elaboración de un protocolo de calibración de monitores de contaminación superficial* de E. Rivera y J. Chavarría² en mayo de 2019, bajo la tutoría del MSc. Fredy Somarriba y la asesoría de MSc. Norma Roas.

A nivel internacional, se tiene la literatura de las distintas normas para la seguridad nuclear, las cuales están como objeto de mejora continua para los regímenes mundiales, las cuales constituyen un instrumento útil en virtud de las convenciones internacionales.

VII.2. Marco Teórico

VII.2.1. Tipo de Monitores de Contaminación Superficial

Los monitores de contaminación superficial son “instrumento de medición diseñado para medir la tasa de emisión superficial asociada a la contaminación de una superficie bajo evaluación, provisto de alarmas (visibles y audibles) para cuando la contaminación excede límites predeterminados”. (IEC, 2002)

Estos detectores son instrumentos activos³ específicamente diseñados para medir directamente la contaminación superficial y, en general, los resultados se expresan en términos de actividad superficial, siendo la unidad empleada el Bq/cm^2 .

Para la selección de monitores apropiados a esta práctica se debe de tomar en cuenta lo siguiente:

- El (los) tipo (s) de radiación que se espera encontrar (alfa, beta, gamma);
- Los niveles de contaminación que pueden esperarse;

¹ Meynard Valverde Y. A. (2014). *Evaluación de la Sensibilidad de Monitores de Contaminación Superficial para la aplicación en el monitoreo de la exposición interna de trabajadores en medicina nuclear*. UNAN.

² Rivera Cruz E.D y Chavarría Rodríguez J.d (2019). *Elaboración de un protocolo de calibración de monitores de contaminación superficial en la magnitud de Emisión Superficial*. UNAN.

³ Instrumentos que necesitan alimentación eléctrica para su funcionamiento.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

- Los límites de detección requeridos;
- La precisión requerida de las mediciones. (ISO I. O., 2016)

La calibración de estos monitores se efectúa con fuentes patrones de diversos radionúclidos siguiendo el procedimiento declarado en la ISO 7503-3:2016. Las eficiencias varían mucho dependiendo del radionúclido y en caso de que en la superficie coexistan más de uno de ellos las estimaciones con los monitores de contaminación superficial pueden ser únicamente cualitativas.

i. Monitores basados en detectores de ionización gaseosa

Como su nombre lo indica, estos detectores constan de un gas encerrado en un recipiente de paredes tan delgadas como sea posible para no interferir con la radiación que llega. Los iones positivos y negativos (electrones), producidos por la radiación dentro del gas, se recogen directamente en un par de electrodos a los que se aplica un alto voltaje.

La corriente eléctrica inducida, en general, es en forma de pulsos de corta duración; estos pulsos son contados directamente, o activan un medidor de corriente, o pueden ser conectados a una bocina, ver Figura 1.

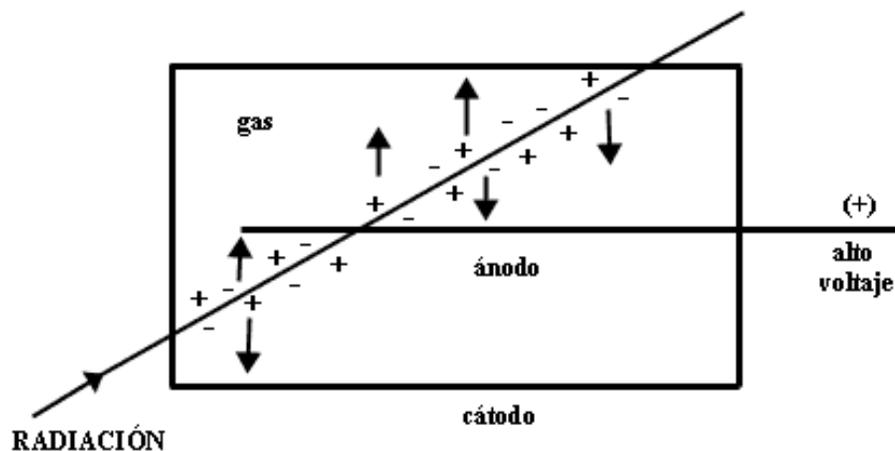


Figura 1. Funcionamiento de un detector gaseoso

Fuente: Campbell J. /Ross R. (1991). LAS RADICACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADICACIONES NUCLEARES.
[Figura 17]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

La geometría más usada para contadores gaseosos es de un cilindro metálico con un alambre central; se aplica un alto voltaje positivo al alambre, convirtiéndose éste en ánodo y el cilindro en cátodo, entonces los electrones se dirigen al alambre y los iones positivos al cilindro.

Cuando una radiación produce un cierto número de pares de iones, éstos se dirigen a los electrodos correspondientes gracias a la aplicación de un alto voltaje; sin el alto voltaje apropiado, el detector no funciona o puede dar lecturas erróneas. En su trayecto hacia los electrodos, los iones y electrones son acelerados por el campo eléctrico, y pueden a su vez producir nuevas ionizaciones, o bien pueden recombinarse (neutralizarse).

La magnitud de estos efectos depende del tipo de gas, del voltaje aplicado y del tamaño del detector. Los diferentes detectores gaseosos (cámara de ionización, proporcionales y Geiger-Müller) se distinguen por su operación en diferentes regiones de voltaje, ver Figura 2.

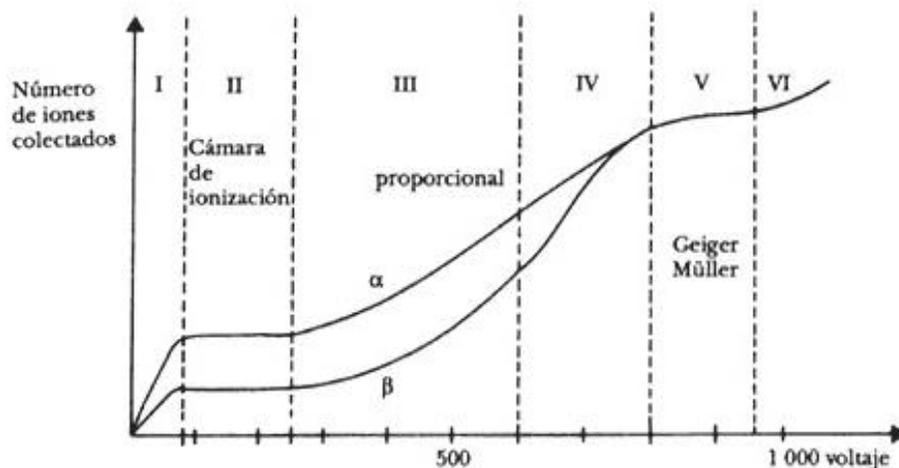


Figura 2. Regiones de operación de un detector gaseoso

Fuente: Campbell J./Ross R. (1991). LAS RADICACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADICACIONES NUCLEARES.

[Figura 18]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>

La Figura 2 muestra estas regiones para un detector típico; se grafica el número de iones colectados en los electrodos contra el voltaje aplicado, para partículas alfa y beta respectivamente.

En la *región I* el voltaje es tan bajo que la velocidad que adquieren los iones y electrones es pequeña, dando lugar a una alta probabilidad de que se recombinen. Por el peligro de perder información, esta región normalmente no se usa.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

En la *región de voltaje II*, se llama región de cámara de ionización y se usa para medir la energía de la radiación, además de indicar su presencia. En general, la corriente generada en estas cámaras es tan pequeña que se requiere de un circuito electrónico amplificador muy sensible para medirla.

En la *región III*, llamada proporcional, la carga colectada aumenta al incrementarse el voltaje. Esto se debe a que los iones iniciales (primarios) se aceleran dentro del campo eléctrico pudiendo, a su vez, crear nuevos pares de iones. Si uno sube el voltaje, la producción cada vez mayor de ionización secundaria da lugar a un efecto de multiplicación. Los pulsos producidos son mayores que en la región anterior, pero se conserva la dependencia en la energía de las radiaciones.

Los Contadores proporcionales son detectores sellados con ventanas de recubrimiento en la cara activa con espesores del orden de 5 mg/cm^2 de mylar⁴ o Titanio (Ti). Pueden fabricarse en distintas formas, una de las configuraciones más habituales es la plana con un área sensible que es igual o superior a 100 cm^2 . El gas de llenado rara vez es aire porque al funcionar en modo de impulso limitaría grandemente su respuesta, por lo cual el Xenón (Xe) y Butano son los gases más comúnmente utilizados.

Y aumentando aún más el voltaje, se llega a la *región IV*, llamada de proporcionalidad limitada, que por su inestabilidad es poco útil en la práctica. Si sigue aumentándose el voltaje, se llega a la *región V* llamada Geiger-Müller, en esta región la ionización secundaria y la multiplicación son tan intensas que se logra una verdadera avalancha de cargas en cada pulso (Figura 3); los pulsos son grandes por la gran cantidad de iones colectados, pero se pierde la dependencia en la ionización primaria.

⁴ Mineral formado por varias láminas delgadas, brillantes, blandas y flexibles que se utiliza como aislador eléctrico.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

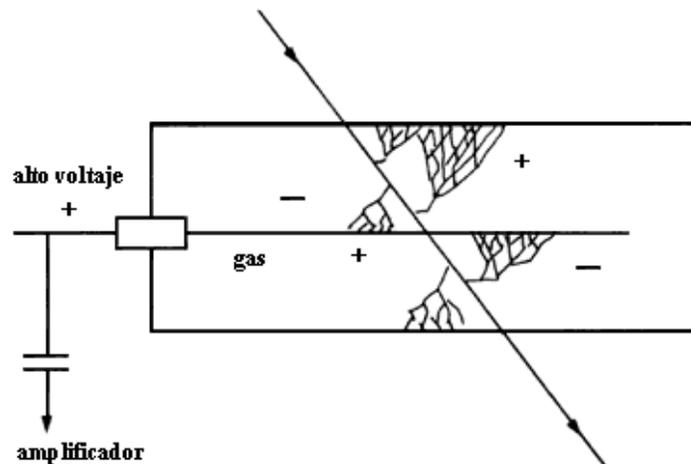


Figura 3. Avalancha producida en un detector Geiger-Müller

Fuente: Campbell J./Ross R. (1991). LAS RADICACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADICACIONES NUCLEARES.

[Figura 19]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>

En los Geiger-Müller los espesores son mucho menores del orden de $0,4 \text{ mg/cm}^2$ de mylar metalizado, pero requieren un llenado del volumen activo poco antes de la medida. Se utilizan también como sondas en los monitores de contaminación superficial, siendo su robustez y su escasa dependencia de la tensión suministrada sus principales ventajas. Su inconveniente principal reside en su incapacidad de discriminar entre los distintos tipos de radiación y suelen tener ventanas de entrada muy gruesas, normalmente de mica, con un mínimo de unos 2 a 5 mg/cm^2 .

Generalmente se fabrican en forma de sondas cilíndricas, siendo una de las caras planas la de entrada de la radiación al volumen activo y sus tamaños son muy variables entre 6 cm^2 y 10 cm^2 de área son bastante habituales. Existen también, al igual que en los detectores proporcionales, configuraciones de las llamadas "pancake" en las que el cilindro que constituye el detector tiene una altura muy inferior al diámetro de sus caras paralelas.

Debido al gran tamaño del impulso Geiger estos detectores pueden unirse al equipo de recuento mediante cables lo suficientemente largos como para permitir una gran flexibilidad en el acceso a superficies contaminadas. Pero a su vez estos equipos son pocos recomendables para la medición de radiaciones α . Si se incrementa el voltaje aún más se obtiene una descarga continua (*región VI*) no útil para conteo.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

ii. Monitores basados en detectores de centelleo

Existen muchos otros tipos de detector de radiación que no operan con la ionización de un gas, uno de los más empleados es el llamado detector de centelleo; se aprovecha el hecho de que la radiación produce pequeños destellos luminosos en ciertos sólidos, esta luz se recoge y transforma en un pulso eléctrico.

Los detectores de centelleo tienen algunas ventajas sobre los de gas:

- En primer lugar, un sólido, por su mayor densidad es más eficiente en detener la radiación que un gas. Por lo tanto, la eficiencia de un detector de centelleo es muy superior a la de uno de gas, especialmente para rayos gamma.
- En segundo lugar, el proceso de luminiscencia, o sea la absorción de radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido lo cual disminuye el tiempo muerto.

El principal inconveniente que presentan es la necesidad de disponer de una alta tensión estable en el fotomultiplicador, pues en caso contrario, pueden producirse variaciones importantes en las medidas.

El material que produce el destello se llama cristal de centelleo. Se selecciona para que tenga una alta eficiencia en absorber radiación ionizante y emitir luz (luminiscencia). Debe ser transparente para poder transmitir la luz producida, y debe estar a oscuras para que la luz ambiental no le afecte.

El material más empleado como cristal de centelleo es el yoduro de sodio activado con talio NaI (Tl) el cual es de costo bajo y es muy estable. Otro muy común es el yoduro de cesio activado con talio CsI (Tl); y hay otros materiales inorgánicos de usos especiales. Por otro lado, especialmente para detectar neutrones, suelen emplearse materiales orgánicos como plásticos.

Con objeto de transformar la pequeña cantidad de luz producida por un cristal de centelleo en una señal eléctrica que se puede manejar con más comodidad, se pone en contacto con un dispositivo llamado fotomultiplicador, ver Figura 4.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

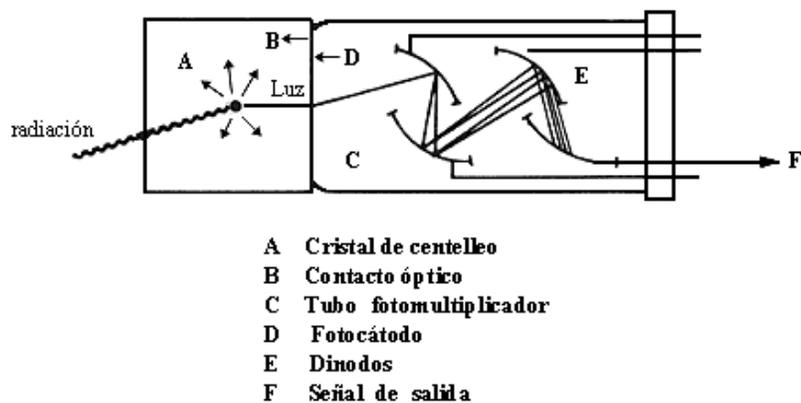


Figura 4. Detector de centelleo

Fuente: Campbell J. /Ross R. (1991). LAS RADICACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADICACIONES NUCLEARES.

[Figura 21]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>

La cara expuesta a la radiación debe protegerse de la luz, lo que se suele hacer por medio de una lámina de mylar metalizado, cuyo espesor suele ser de unos pocos mg/cm^2 . Se utiliza además una rejilla de protección para evitar el contacto directo con la superficie que se examina. Para la medida de contaminación causada por nucleídos emisores α se utilizan detectores de Sulfuro de Zinc activado por Plata ZnS(Ag) de bajo espesor ($10 mg/cm^2$), aunque también existen modelos que utilizan centelladores plásticos.

Los detectores de plástico de centelleo se utilizan como una alternativa a los contadores proporcionales en la detección de contaminaciones superficiales por radiación β porque, aunque son menos sensibles, son más robustos y no precisan recargas continuas de gas. Además, con procedimientos adecuados es posible discriminar los pulsos debidos a las radiaciones α y β en la misma medida.

Para la medida de las contaminaciones superficiales por emisores γ se prefiere el uso de cristales de NaI(Tl) de bajo espesor (1-2 mm) como detector. Sus principales ventajas son su sensibilidad y buena eficiencia de detección y es típica su aplicación a la medida de emisores γ en todo el rango de energía.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

iii. Monitores basados en detectores de semiconductor

Los detectores de radiación de semiconductores son estructuras cristalinas fabricadas básicamente con germanio y silicio. Al atravesar la radiación ionizante un semiconductor, esta puede liberar gran cantidad de portadores de carga eléctrica. Mediante la recogida de estos portadores de carga eléctrica puede detectarse el paso de la radiación y en determinadas condiciones medir su energía.

A estos dispositivos se le llama en ocasiones cámara de ionización en estado sólido. Tienen notables ventajas respecto a los detectores de ionización gaseosa, particularmente para detección de radiación γ y rayos X, por sus mejores valores de rendimiento y resolución energética; aunque también se utilizan para detectar partículas α y β .

VII.2.2. Fuentes planas de referencia según norma ISO 8769.

La tasa de emisión de superficie de una fuente es el número de partículas o fotones de un tipo dado por encima de una energía dada que emerge de la cara de la fuente o su ventana por tiempo en un entorno libre de masa (ISO I. O., 2016).

Según la norma ISO 8769: 2016 *Fuentes de referencia – Calibración de monitores de contaminación superficial – Alfa, Beta y Emisor de fotones*, las fuentes se dividen en dos clases:

Clase 1: Fuentes de referencia que han sido directamente calibradas en términos de actividad y tasa de emisión superficial en un instituto de metrología nacional o internacional.

Clase 2: Fuentes de referencia que han sido calibradas en términos de tasa de emisión superficial en un instrumento de transferencia de referencia, cuya eficiencia ha sido determinada por calibración con una fuente de referencia Clase 1 del mismo radionúclido y la misma construcción general utilizando la misma geometría, en un laboratorio que ha sido acreditado según la norma ISO 17025 para tales mediciones.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

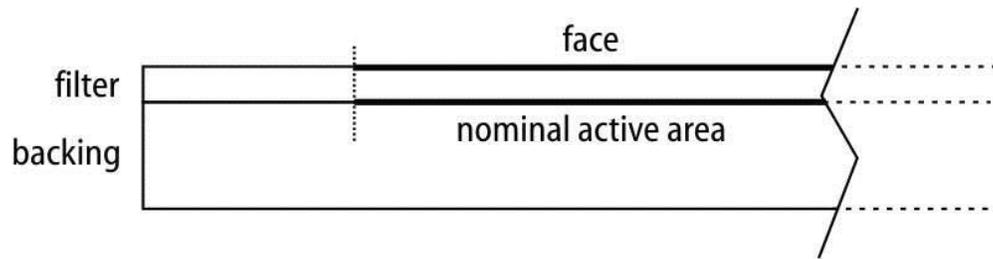


Figura 5. Dibujo transversal de una fuente plana con su filtro

Fuente: ISO (2016). ISO 8769 Reference sources - Calibration of surface contamination monitors - Alpha, beta and photon emitters. (Figura 1).

Características de las fuentes

CLASE 1

- Fuentes planas, material de respaldo de 3 mm de espesor.
- Uso de filtros (espesor $\pm 10\%$) para γ .
- Uniformidad $> 90\%$, Incertidumbre de la Actividad $\pm 10\%$.
- Tamaños: $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $10 \times 15 \text{ cm}^2$, $15 \times 20 \text{ cm}^2$.
- Radionúclido: $T_{1/2} > \text{largo}$, alta actividad específica, rango de energías típico de la práctica, pureza.
- Re-calibración cada 4 años (depende de legislación en cada país).

CLASE 2

- Fuentes planas, material de respaldo de 3 mm de espesor.
- Uso de filtros (espesor $\pm 10\%$) para γ .
- Uniformidad $> 90\%$, Incertidumbre de la Actividad $\pm 10\%$.
- Tamaños: según requerimientos del usuario.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

- Radionúclido: $T_{1/2} > largo$, alta actividad específica, rango de energías típico de la práctica, pureza.
- Re-calibración cada 4 años (depende de legislación en cada país).

VII.2.3. Calibración de Monitores de Contaminación Superficial según ISO 7503-3.

El objetivo de la calibración es confirmar que el monitor cumple con el rendimiento determinado durante la prueba de tipo y aún está en condiciones para el propósito (ISO I. O., 2016). Estos factores de calibración pueden cubrir un rango de radionúclidos individuales en un rango de diferentes superficies y en diferentes separaciones de fuente a detector.

La determinación de los factores de calibración no es factible para todos los radionúclidos, en todas las superficies y en todas las separaciones de fuente a detector. El enfoque práctico es confirmar los factores de calibración para un rango limitado de radionúclidos, en una separación de fuente-detector de 3 mm, utilizando fuentes distribuidas uniformemente en una superficie que exhibe una atenuación mínima de las radiaciones emitidas.

Estas fuentes deben cubrir un rango de energías que probablemente se encuentren en situaciones de monitoreo normales. Por lo general, para las emisiones α un radionúclido puede ser suficiente, para emisiones β son dos radionúclidos y para los emisores γ de tres o cuatro radionúclidos. Siempre que el proceso de calibración confirme la idoneidad para el propósito, esto permite que los factores de calibración se interpolen con un grado razonable de precisión para los tres tipos de emisión alfa, beta y fotón (α , β y γ).

Para determinar si el objetivo de la calibración se calcula la eficiencia del equipo en función de tasa de emisión superficial [$1/s$], la eficiencia se expresa en por ciento y la trazabilidad del certificado de calibración de la fuente generalmente está dada en tasa de emisión de un número de partículas por los fotones emitidos desde la superficie de la fuente por segundo.

Para el cálculo de la eficiencia del instrumento se toma en cuenta:

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Si $S_c \geq S_p$ entonces:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{\left(\frac{R_c}{S_c}\right) \cdot S_p} \quad \text{Ec. 1}$$

Si $S_c < S_p$ entonces:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{R_c} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

ρ_c : Medida de la tasa de conteo desde la superficie de contaminación, en s^{-1}

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

R_c : Tasa de emisión de la fuente, en s^{-1} .

S_c : Área efectiva de la fuente de calibración, en cm^2 .

S_p : Área efectiva de la ventana del detector, en cm^2 .

Métodos de calibración existentes

- ❖ *Calibración directa*, mediante la cual se prepara una fuente patrón con las soluciones radiactivas disponibles y se determina el factor de calibración en términos de actividad para la fuente del radionúclido y superficie específicas.
- ❖ Calibración simplificada con múltiples fuentes en términos de tasa de emisión superficial o actividad (uso de una limitada cantidad de fuentes α y β , datos adicionales suministrados por fabricante)
- ❖ Calibración completa con múltiples fuentes de referencia α , β y γ en términos de tasa de emisión superficial.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

VII.2.4. Incertidumbres asociadas a calibración de los monitores

El análisis de incertidumbre es un área temática en evolución, especialmente en el área de monitoreo de radiación. La incertidumbre para un estudio de radiación o resultado de un estudio de contaminación incluye el factor de calibración del instrumento y la que surge del proceso de monitoreo, por tanto, estos deben considerarse por separado.

Para calcular la incertidumbre combinada de la eficiencia ε , para un 95% de confianza, se utiliza Ec.3. Luego para obtener la incertidumbre expandida se deberá multiplicar la incertidumbre expandida u_ε por un factor de cobertura $k=2$, asumiendo una distribución normal de ε .

$$U_\varepsilon = S_\varepsilon^2 + u_\varepsilon^2 \quad \text{Ec.3}$$

Donde

U_ε : Incertidumbre expandida.

S_ε : Incertidumbre tipo A.

u_ε : Incertidumbre tipo B.

Las variables a tomar en cuenta según la ISO 7503-3:2016 se presenta en el diagrama de Ishikawa, ver Figura 6.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

FUENTES DE INCERTIDUMBRE

CALIBRACIÓN DE MONITORES DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

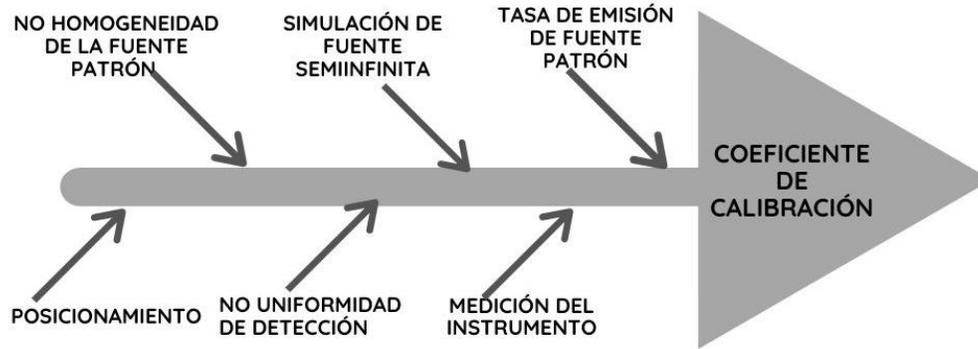


Figura 6. Variables para incertidumbre de calibración de monitores de contaminación superficial.
Fuente: Fuente propia

Por lo tanto, desglosando las contribuciones de cada tipo de incertidumbre se obtiene que:

$$\frac{u^2(\varepsilon)}{(\varepsilon)^2} = \frac{u^2(\rho_c)}{(\rho_c - \rho_0)^2} + \frac{u^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2} + \frac{u^2(R_c)}{(R_c)^2} + \frac{u^2(S_c)}{(S_c)^2} + \frac{u^2(S_p)}{(S_p)^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$\frac{u^2(\rho_c)}{(\rho_c - \rho_0)^2}$: Incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de conteo.

$\frac{u^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2}$: Incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de fondo.

$\frac{u^2(R_c)}{(R_c)^2} + \frac{u^2(S_c)}{(S_c)^2}$: Contribuciones de la actividad de la fuente por unidad de área.

$\frac{u^2(S_p)}{(S_p)^2}$: Incertidumbre aportada por el área del detector.

Luego la incertidumbre asociada al proceso de medición de la tasa de conteo neta puede ser expresada como:

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

$$u^2(\rho_c) = S^2\rho_c + u^2\rho_c \quad Ec.5$$

La incertidumbre asociada a la tasa de emisión superficial de la fuente puede interpretarse como la suma de las incertidumbres de la actividad superficial y del decaimiento de la fuente.

$$u^2(R_c) = u^2(R_{c0}) + u^2 k_{dec} \quad Ec.6$$

Donde:

$u^2(R_{c0})$: Incertidumbre asociada a la actividad superficial de la fuente (certificado de calibración de la fuente).

$u^2 k_{dec}$: Incertidumbre producida por el decaimiento de la fuente.

La incertidumbre asociada al área sensible de la ventana, posicionamiento y uniformidad del detector es como sigue:

$$u^2(s) = u^2(S)_{fab} + u^2(S)_{posic} + u^2(S)_{unif} \quad Ec.7$$

La incertidumbre asociada al área activa de la fuente, posicionamiento y uniformidad es:

$$\frac{u^2(S_c)}{S_c} = u^2(S_c)_{posic} + u^2(S_c)_{unif} \quad Ec.8$$

Sustituyendo las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 en 3 se obtienen las fuentes de incertidumbres que más aportan al proceso de calibración:

$$\frac{u^2(\varepsilon)}{(\varepsilon)^2} = S^2\rho_c + u^2\rho_c + u^2(R_c) + u^2k_{dec} + u^2(S)_{fab.} + u^2(S)_{posic.} + u^2(S)_{unif.} \quad Ec.9$$

Estas fuentes de incertidumbres identificadas son las que más contribuyen a este proceso. Dentro estas hay algunas muy pequeñas como la producida por el decaimiento de la fuente que puede despreciarse y la otra, la no uniformidad de detección del instrumento que es minimizada por el método de medición.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

VII.2.5. Estimación de la respuesta del instrumento y del factor de respuesta

Los monitores responden a las emisiones que ingresan a sus volúmenes de detección, no responden directamente a la actividad, siendo la cantidad medida la respuesta del instrumento a las emisiones incidentes en la ventana de entrada del detector; la misma actividad en dos superficies diferentes, que posea dos emisiones diferentes, puede producir dos respuestas diferentes. En la práctica, las superficies emiten radiaciones ionizantes en 2π .

El factor de respuesta básico es la respuesta del instrumento a:

- a. Emisiones por unidad de área de la superficie para una fuente dispersa
- b. Emisiones de una fuente puntual.

El factor de respuesta del instrumento puede expresarse en dos distintos términos como pueden ser de emisión o de actividad.

En término de emisión (eficiencia):

$$I(E) = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{\left(\frac{R_c}{S_c}\right)} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$I(E)$: Respuesta del instrumento (emisión), en $\text{cps}/\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

ρ_c : Medida de la tasa de conteo desde la superficie de contaminación, en s^{-1}

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

R_c : Tasa de emisión de la fuente, en s^{-1} .

S_c : Área efectiva de la fuente de calibración, en cm^2 .

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

En término de actividad:

$$I(A) = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{\left(\frac{R_c}{S_c}\right) \cdot P} = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{\left(\frac{A_c}{S_c}\right)} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$I(A)$: Respuesta del instrumento (actividad), en $\text{cps}/\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$.

ρ_c : Medida de la tasa de conteo desde la superficie de contaminación, en s^{-1}

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

R_c : Tasa de emisión de la fuente, en s^{-1} .

S_c : Área efectiva de la fuente de calibración, en cm^2 .

A_c : Actividad de la fuente de calibración, en Bq .

P : Relación entre la tasa de generación de partículas o fotones (actividad) y la tasa de emisión desde la superficie de la fuente.

Siendo P igual a:

$$P = \frac{1}{p_e} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde

p_e : Probabilidad de emisión de partículas.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

VII.2.6. Evaluación de la contaminación superficial según ISO 7503:2016.

El propósito de la medición de la contaminación superficial es en primer lugar, la detección de la contaminación en sí, es decir la determinación de su existencia, su extensión y sus características. En segundo lugar, se pretende evaluar la actividad superficial con el objetivo de verificar si excede los límites establecidos.

En términos de actividad para los tipos de superficies que se pueden encontrar en la práctica depende de las siguientes consideraciones:

- Mezcla y cantidad de los radionúclidos presentes.
- Tipo y salida de las emisiones.
- Naturaleza de la superficie.
- Perfiles de profundidad y distribución dentro de la fuente.
- Dependencia de la atenuación espectral de la ventana de entrada del monitor.
- Distancia entre la ventana del monitor y la superficie.

Según la normativa internacional *ISO 7503: 2016 Mediciones de Radiactividad- Mediciones y evaluación de superficie contaminadas*, existen dos tipos de métodos para evaluar la contaminación superficial las cuales son:

i. Método directo

El método directo es el mejor acceso para la evaluación de contaminación ya que puede ser utilizado para determinar la radiación que se está emitiendo en la superficie de interés.

Hay muchas circunstancias donde la medición no podría ser posible como, por ejemplo, una superficie compleja que no puede ser operable para controlarlo directamente, o la radiación de fuga puede ser tan alta que es imposible de obtener resultados significativos para la medición. En estas instancias, una medición indirecta puede ser hecha realizando frotis.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

a. *Cálculo de la Actividad Superficial para método directo*

$$A_S = C(A) \cdot (\rho_g - \rho_0) = \left(\frac{P}{\varepsilon \cdot S_p} \right) \cdot (\rho_g - \rho_0) \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

A_S : Actividad por unidad de área de contaminación, en $Bq \cdot cm^{-2}$.

$C(A)$: Factor de calibración de la actividad, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo del fondo, en s^{-1} .

ε : Eficiencia del instrumento.

P : Relación entre la tasa de generación de partículas o fotones (actividad) y la tasa de emisión desde la superficie.

S_p : Área efectiva de la ventana del detector, en cm^2 .

Si la indicación del instrumento es *cpm* la actividad superficial puede expresarse:

$$A_S = 0.0167 \cdot C(A) \cdot (\rho_g - \rho_0) \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

A_S : Actividad por unidad de área de contaminación fija y removible, en $Bq \cdot cm^{-2}$.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

b. Cálculo del factor de Calibración en término de actividad para un Radionúclido Determinado

Recordando que la ecuación para cuantificar la eficiencia del detector es:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{q_{2\pi,j} \cdot \left(\frac{S_p}{S_c}\right)} \quad \text{Ec. 15}$$

Teniendo el resultado de $\varepsilon_{i,j}$ se obtiene que la ecuación para determinar la actividad superficial es:

$$A_s = \frac{\rho_c - \rho_0}{S \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})} \quad \text{Ec. 16}$$

Siendo $C(A)_n$ igual a:

$$C(A)_n = \frac{1}{S \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$C(A)_n$: Factor de calibración de la actividad para el radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$\varepsilon_{i,j}$: Eficiencia de detección para una energía i y un tipo de radiación j .

S_c : Área efectiva de la fuente de calibración, en cm^2 .

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j (alfa, beta o fotones).

$S = S_p$: Área efectiva de la ventana del detector, en cm^2 .

$E_{i,j}^{-1}$: Recíproco del factor que determina partículas que emergen de una fuente para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (alfa, beta o gamma).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

c. *Cálculo del factor de Calibración en Términos de Actividad para una mezcla de radionúclido*

Para estimar la actividad superficial para una mezcla de radionúclidos se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_{s,m} = C(A)_m \cdot (\rho_c - \rho_0) \quad \text{Ec. 18}$$

En el cual

$$C(A)_m = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{f_n}{C(A)_n}} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

$A_{s,m}$: Actividad por unidad de área de contaminación fija y removible de una mezcla de radionúclidos m , en $Bq \cdot cm^{-2}$.

$C(A)_m$: Factor de calibración dado para una mezcla de radionúclidos m con una contribución de radionúclidos conocida de la mezcla, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

ρ_c : Medida de la tasa de conteo desde la superficie de contaminación, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo del fondo, en s^{-1} .

f_n : Fracción de radionúclido n en la mezcla de radionúclidos.

ii. Método indirecto

Esta metodología es aplicable cuando las superficies no son fácilmente accesibles debido a una ubicación, cuando los campos de radiación interferentes afectan negativamente a los monitores de contaminación, o cuando no se dispone de métodos de medición directa con instrumentación estándar, por ejemplo, tritio. Además, el método indirecto no puede evaluar la contaminación fija

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

y, debido a la incertidumbre asociada a la eficiencia de limpieza, la aplicación de este método da como resultado estimaciones conservadoras. (ISO I. O., 2016)

a. Evaluación de los datos de medición Eficiencia de remoción de la actividad (toma del frotis).

Relación entre la actividad de los radionúclidos removidos de la superficie por un frotis con relación a la actividad de los radionúclidos producto de la contaminación superficial removible antes de la toma del frotis.

La eficiencia se define por la siguiente relación:

$$\varepsilon_w = \frac{a_R}{a_T} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

a_R : Actividad de los radionúclidos removida mediante la prueba, en Bq.

a_T : Actividad total removible de los radionúclidos presentes en el área muestreada, en Bq.

b. Cálculo de la actividad por unidad de área para los resultados de medición usando equipos de laboratorio

$$a_r = \frac{a_w}{S_w \cdot \varepsilon_w} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

a_r : Actividad por unidad de área removida mediante la prueba de frotis, en Bq/cm².

a_w : Actividad medida en el frotis, en Bq.

S_w : Área de superficie por donde se pasó el frotis, en cm².

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

Para la eficiencia de la remoción de actividad ε_w , de forma conservadora, se utiliza un valor de 0,1 que asume que el material del frotis solo recoge el 10% de la contaminación removible existente.

c. Cálculo de la actividad por unidad de área para resultados de medición usando instrumentos portátiles

$$a_r = C(A)^{ind} \cdot (\rho_g - \rho_0) \quad Ec. 22$$

Donde:

a_r : Actividad por unidad de área removida mediante la prueba de frotis, en Bq/cm^2 .

$C(A)^{ind}$: Factor de calibración de actividad, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

d. Cálculo del factor de calibración de actividad

El factor de calibración $C(A)^{ind}$ para un radionucleido n se calcula como:

$$C(A)_n^{ind} = \frac{1}{S_w \cdot \varepsilon_w \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})} \quad Ec. 23$$

Donde:

$C(A)_n^{ind}$: es el factor de calibración del método indirecto para un radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

S_w : Área de superficie por donde se pasó el frotis, en cm^2 .

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

$\varepsilon_{i,j}$: Eficiencia de detección para una energía i y un tipo de radiación j .

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j (alfa, beta o fotones).

$E_{i,j}^{-1}$: Recíproco del factor que determina partículas que emergen de una fuente para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (alfa, beta o gamma).

e. Factor de calibración del método indirecto para la evaluación de la contaminación superficial de una mezcla de radionúclidos

El factor de calibración $C(A)^{ind}$ para una mezcla radionúclido m se calcula como:

$$C(A)_m^{ind} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{f_n}{C(A)_n^{ind}}} \quad Ec. 24$$

Donde:

$C(A)_m^{ind}$: es el factor de calibración para una mezcla de radionúclidos dada m con una contribución de radionúclidos conocida a la mezcla, en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$C(A)_n^{ind}$: es el factor de calibración del método indirecto para un radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

f_n : Fracción de radionúclido n en la mezcla de radionúclidos.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

VII.2.7. Incertidumbre del cálculo de evaluación de contaminación superficial

i. Método directo

Es una incertidumbre relativa combinada del factor de calibración obtenido, este se calcula a partir de las incertidumbres relativas, correspondientes a una desviación estándar, de los parámetros de la ecuación, utilizando:

$$\frac{U(C(A)_n)}{C(A)_n} = \sqrt{\frac{u^2(S_p)}{S_p^2} + \frac{1}{(\sum_{i,j} \varepsilon_{i,j} \eta_{i,j} E_{i,j}^{-1})^2} \cdot \sum \varepsilon_{i,j}^2 \cdot \eta_{i,j}^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot \left(\frac{u^2(\varepsilon_{i,j})}{\varepsilon_{i,j}^2} + \frac{u^2(\eta_{i,j})}{\eta_{i,j}^2} + \frac{u^2(E_{i,j}^{-1})}{(E_{i,j}^{-1})^2} \right)}$$

Ec. 25

Donde:

$\frac{U(C(A)_n)}{C(A)_n}$: Incertidumbre de la variable $C(A)_n$ correspondiente a una desviación estándar.

El resto de las variables son idénticos a los utilizados en las ecuaciones.

Para el cálculo de la incertidumbre de la actividad superficial se utiliza la ecuación

$$\frac{U(A_s)}{A_s} = \sqrt{\frac{u^2(\rho_c) + U^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2} + \frac{u^2(C(A)_n)}{(C(A)_n)^2}} \quad Ec. 26$$

Sustituyendo Ec. 25 en Ec. 26 se obtiene la fórmula general para el cálculo de la incertidumbre relativa combinada de las actividades superficial a partir de las incertidumbres de cada una de las variables que intervienen en la estimación de la actividad superficial:

$$\frac{U(A_s)}{A_s} = \sqrt{\frac{U^2(\rho_c) + U^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2} + \frac{U^2(S_p)}{S_p^2} + \frac{1}{(\sum_{i,j} \varepsilon_{i,j} \eta_{i,j} E_{i,j}^{-1})^2} \cdot \sum_j \varepsilon_{i,j}^2 \cdot \eta_{i,j}^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot \left(\frac{U^2(\varepsilon_{i,j})}{\varepsilon_{i,j}^2} + \frac{U^2(\eta_{i,j})}{\eta_{i,j}^2} + \frac{U^2(E_{i,j}^{-1})}{(E_{i,j}^{-1})^2} \right)}$$

Ec. 27

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Donde:

$\frac{u^2(\rho_c) + u^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2}$: Incertidumbres asociadas a los procesos de medición de la tasa de conteo y al fondo.

Según la norma ISO 7503-3:2016 en el Anexo E, las eficiencias del instrumento $\varepsilon_{i,j}$ generalmente se determinan utilizando una fuente de calibración con una incertidumbre estándar relativa certificada; esta información se obtiene del certificado de calibración.

Además, la incertidumbre estándar relativa del área efectiva de la ventana del detector del instrumento se evalúa para que sea igual a $\frac{u(S_p)}{S_p} = 1\%$. Y al no tener información específica sobre $E_{i,j}^{-1}$ su incertidumbre $u(E_{i,j}^{-1}) = 0$. También se considera que las incertidumbres relacionadas con los datos nucleares son insignificantes, por lo que $u(\eta_{i,j}) = 0$.

ii. Método indirecto

La incertidumbre asociada al factor de calibración es:

$$\frac{u(C(A)_n^{ind})}{C(A)_n^{ind}} = \sqrt{\frac{u^2(S_w)}{S_w^2} + \frac{u^2(\varepsilon_w)}{\varepsilon_w^2} + \frac{1}{(\sum_{i,j} \varepsilon_{i,j} \cdot n_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})^2} \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j})^2 \cdot (n_{i,j})^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot \left(\frac{u^2(\varepsilon_{i,j})}{(\varepsilon_{i,j})^2} + \frac{u^2(n_{i,j})}{(n_{i,j})^2} + \frac{u^2(E_{i,j}^{-1})}{(E_{i,j}^{-1})^2} \right)}$$

Ec. 28

La incertidumbre combinada según la Norma ISO 7503-3:2016 es:

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{S_w^2 \cdot \varepsilon_w^2 \cdot F^2} \cdot \left(\frac{\rho_g}{t_g} + \frac{\rho_0}{t_0} \right) + y^2 \cdot \left[\frac{u(S_w)^2}{S_w^2} + \frac{u(\varepsilon_w)^2}{\varepsilon_w^2} + \frac{u(F)^2}{F^2} \right]} \quad Ec. 29$$

Donde

$u(y)$: Incertidumbre de la primera medición de actividad superficial removida a_r , en Bq/cm^2 .

S_w : Área de superficie por donde se pasó el frotis, en cm^2 .

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

t_0 : Tiempo de duración de la medición de la tasa de conteo de fondo, en s.

t_g : Tiempo de duración de la medición de la tasa de conteo brutas, en s.

F : Sumatoria del producto de los valores $\varepsilon_{i,j}$, $\eta_{i,j}$ y $E_{i,j}^{-1}$.

Siendo la incertidumbre de la sumatoria F :

$$u(F) = \sqrt{\sum_{i,j} (n_{i,j})^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot u(\varepsilon_{i,j})^2 + (\varepsilon_{i,j})^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot u(n_{i,j})^2 + (n_{i,j})^2 \cdot (\varepsilon_{i,j})^2 \cdot u(E_{i,j}^{-1})^2}$$

Ec. 30

Siguiendo con lo planteado en la norma ISO 7503-3:2016 en el Anexo F, la eficiencia del instrumento se determina utilizando una fuente de calibración con una incertidumbre estándar relativa certificada; esta información se obtiene del certificado de calibración

Al no tener información específica sobre la eficiencia de la fuente $E_{i,j}^{-1}$ su incertidumbre $u(E_{i,j}^{-1}) = 0$. También se considera que las incertidumbres relacionadas con los datos nucleares

$u(\eta_{i,j}) = 0$. Para el valor de $u(\varepsilon_w)/\varepsilon_w$, la incertidumbre estándar asociada es:

$$u(\varepsilon_w) = \frac{\Delta\varepsilon_w}{\sqrt{3}}. \quad \text{Ec. 31}$$

Y la incertidumbre estándar relativa del área limpiada $u(S_w)$ se da como un 1% de la medida.

Otras variables a tomar en cuenta son:

- Material del frotis utilizado.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

- Presión aplicada por la persona que toma el frotis.
- Zona por donde se pasa el frotis.
- Distribución de la contaminación.
- Porosidad, composición química, textura y limpieza de la superficie.

VII.3. Marco Legal

Como estado miembro del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Nicaragua reconoce las recomendaciones de las distintas normas de seguridad de este organismo. En las Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente en el Registro de Seguridad Especifico N° SSR-6 manifiesta que se considera una superficie contaminada a cantidades que excedan $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ para emisores beta (β), gamma (γ) y alfa de baja toxicidad (α) o $0,04 \text{ Bq/cm}^2$ para todos los otros emisores alfa (α). (OIEA, Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos, 2018).

Por otro lado, de acuerdo con las normativas del International Standard Organization ISO 7503 (todas las partes) e ISO 8769 están dirigidas a las personas responsables de determinar la radiactividad presente en superficies sólidas. A continuación, se explica el uso de cada una:

En la ISO 7503-1:2016 se relaciona con la evaluación de la contaminación de la superficie mediante mediciones directas e indirectas y la calibración de la instrumentación asociada; se aplica a los emisores de alfa (α), beta (β) y fotones (γ). La norma también se puede utilizar en la evaluación de la actividad en camiones, contenedores, paquetes, equipos y es aplicable en cualquier organización que maneje materiales radiactivos.

Generalmente, es aplicable a superficies planas bien definidas donde los métodos directos son aplicables, sin embargo, también se puede usar para superficies que no son planas y donde serían apropiadas las pruebas indirectas de limpieza. Estas investigaciones pueden llevarse a cabo en contenedores, áreas inaccesibles, áreas no planas donde se pueden usar pruebas de limpieza.

Esta sección es útil en situaciones de emergencia, es decir, en accidentes nucleares en los que estarían involucrados profesionales de la salud física.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

En la ISO 7503-2:2016 es aplicable a superficies bien definidas, como las de equipos e instalaciones, contenedores de materiales radiactivos, fuentes selladas y edificios o terrenos.

Este segmento representa a las instituciones o autoridades que controlan el transporte de materiales nucleares, la autorización de materiales o equipos de acuerdo con los valores de las directrices de la legislación nacional o en los límites de las convenciones internacionales.

La ISO 7503-3:2016 se aplica a la evaluación de la contaminación en las superficies en términos de actividad por unidad de área por métodos de medición directos e indirectos y se ocupa de los aspectos complejos de la calibración del instrumento.

También se refiere a los laboratorios de calibración o instituciones que se ocupan de radionúclidos con características de emisión complejas o radionúclidos para los que no hay fuentes de calibración de referencia disponibles; instituciones confrontadas con la tarea de evaluar contaminaciones superficiales consistentes en una mezcla de radionúclidos; instituciones o autoridades que controlan el transporte de materiales nucleares, la autorización de materiales o equipos de acuerdo con los valores de referencia de la legislación nacional o los límites de las convenciones internacionales.

La ISO 7503: 2016 no puede ser aplicada a la evaluación de la contaminación de la piel, la ropa o el material suelto, como la grava⁵.

Mientras que la ISO 8769:2016 especifica las características de las fuentes de referencia de la contaminación radiactiva de la superficie, trazables a los estándares de medición nacionales, para la calibración de los monitores de contaminación de la superficie. Esta norma internacional se refiere a emisores alfa, emisores beta y emisores de fotones de energía máxima no mayor a 1,5 MeV.

Actualmente a nivel nacional contamos con Normas Técnicas Nicaragüenses Obligatorias (NTON) en la cual la Norma Técnica N°. NTON 07 008-18 Dosimetría. Radiación Ionizante, Requisitos para los Laboratorios de Calibración y Usuarios se especifica los requisitos

⁵ Rocas formadas por clastos de tamaño comprendido entre 2 y 64 milímetros. Pueden ser producidas por el ser humano, en cuyo caso suele denominarse «piedra partida», o resultado de procesos naturales

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

administrativos y técnicos que deben cumplir los laboratorios de calibración de equipos para llevar a cabo actividades de monitorización radiológica, así como los usuarios que demandan el servicio.

VIII. Preguntas directrices

¿Cómo se realiza la calibración del monitor de contaminación superficial marca Berthold modelo LB124 SCINT?

¿Cómo determinar el factor de calibración para el radionúclido ^{131}I ?

¿Existe algún instructivo para los usuarios finales con la metodología a seguir para evaluar la contaminación superficial?

CAPÍTULO III

IX. Diseño Metodológico

IX.1. Tipo de estudio

Se realizará un estudio cuantitativo de alcance exploratorio, descriptivo y correlacional debido a que, en un primer momento, este tema de investigación no se ha abordado antes a nivel nacional y además indaga desde un enfoque innovador. Seguidamente, se medirá y se recolectaran datos de las distintas áreas que se consideren contaminadas. Por último, se correlacionan las variables ya que, como recomienda la normativa internacional, al calibrar anualmente el detector varía la eficiencia del equipo cambiando de esta manera el valor de nuestro factor de calibración.

Es un estudio cuantitativo ya que, “es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar o eludir” pasos, el orden es riguroso, aunque, desde luego, podemos redefinir alguna fase”. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

El estudio exploratorio “se realiza cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes”. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

El estudio descriptivo “busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas”. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

El estudio correlacional “Asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población”. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

Diseño

El diseño de este estudio fue de tipo experimental: experimentos puros, ya que se manipuló las variables de estudio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Es experimental debido a que “se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula.” (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

Es experimentos puros ya que su propósito es “son aquellos que reúnen los dos requisitos para lograr el control y la validez interna:

1. Grupos de comparación (manipulación de la variable independiente);
2. Equivalencia de los grupos.

Estos diseños llegan a incluir una o más variables independientes y una o más dependientes. Asimismo, pueden utilizar prepruebas y pospruebas para analizar la evolución de los grupos antes y después del tratamiento experimental.” (Sampieri, Collado, & Lucio, 2010)

IX.2. Localización Geográfica

La calibración de los monitores se realizó en el Laboratorio de Calibración Dosimétrico (LCD) perteneciente al LAF-RAM de la Facultad de Ciencias e Ingenierías de la UNAN-Managua; y la evaluación de la contaminación superficial fue realizada por el personal del LCD en el mismo laboratorio.

IX.3. Materiales

IX.3.1. Set de fuentes planas.

El set de fuentes planas consiste en diez distintas fuentes de calibración construidas en conformidad con la norma ISO 8769. En la tabla 1 se muestra cómo se dividen según el tipo de partículas, la información fue sacada de los certificados de calibración de cada fuente y el factor de cobertura utilizado es de $k=1$. En las figuras 7 y 8 se muestran ejemplo de fuentes planas de calibración de tipo de radiación gamma (Americio-241) y tipo beta (Tecnecio-99).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Tabla 1. Fuentes planas de referencia utilizadas para la calibración de monitores

Tipo de partículas	Radionúclidos	Fecha de calibración de	Vida media	Actividad [kBq] ± U [%]	Tasa de emisión
Alfa	Americio-241 (^{241}Am)	2016/10/07	432,7	3190 ± 1,5	1520 ± 1,5
Beta	Carbono-14 (^{14}C)	2016/10/04	5730	3530 ± 2,5	1340 ± 1,5
	Cloro-36 (^{36}Cl)	2016/10/11	301000	2730 ± 2,5	1700 ± 1,5
	Estroncio-90 (^{90}Sr)	2016/10/17	28,5	3170 ± 2,5	4090 ± 1,5
	Tecnecio-99 (^{99}Tc)	2016/09/28	211232,9	2700 ± 2,5	1340 ± 1,5
Gamma	Cobalto-57 (^{57}Co)	2017/03/01	0,7441	35000 ± 7,5	11700 ± 2
	Cesio-137 (^{137}Cs)	2017/02/27	30,05	10000 ± 7,5	4200 ± 2,5
	Americio-241 (^{241}Am) (241Am)	2017/03/01	432,7	40000 ± 7,5	4700 ± 3
	Yodo-129 (^{129}I)	2017/02/28	16100000	30000 ± 7,5	9300 ± 4,5
	Plutonio-238 (^{238}Pu)	2017/04/18	87,74	200000 ± 7,5	2800 ± 4



Figura 7. Fuente plana patrón emisora de radiación gamma, Americio-241
Fuente: Fuente propia.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



*Figura 8. Fuente plana patrón emisora de radiación beta, Tecnecio-99
Fuente: Fuente Propia*

IX.3.2. Banco de calibración

Se diseñaron distintos modelos de banco de calibración creados por el personal del LCD, el primero diseño fue creado en el año 2018 bajo el proyecto nacional NIC9005 en el cual se contó, además, con la capacitación de un experto extranjero Dr. Tamayo, ver Figura 9.



Figura 9. Primer prototipo de banco de calibración

*Fuente: Mendoza, L. (2018). LAF-RAM contará con nuevo servicio [Figura]
<https://laf-ram.unan.edu.ni/2018/12/05/laf-ram-contara-con-nuevo-servicio/>*

Luego, en enero del 2109, se creó el segundo diseño para dar apertura del servicio de calibración de monitores de contaminación superficial en el LAF-RAM, ver Figura 10.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



Figura 10. Segundo modelo de banco de calibración

Fuente: Fuente Propia

Actualmente se utiliza un banco de calibración que brinda mejor estabilidad para la calibración de los monitores de contaminación superficial, ver Figura 11. Los distintos dispositivos que posee este banco de calibración son:

- a) Soporte de posicionamiento: Es uno de los elementos principales utilizados para el posicionamiento del MCS; está compuesto de una base micrométrica, un tornillo sin fin, una varilla de aluminio y dos abrazaderas. La base micrométrica, donde se ubica el tornillo sin fin, es utilizada como mecanismo de desplazamiento que permite subir o bajar el detector con ayuda de una manivela.

Una de las ventajas de este sistema es que posee dos abrazaderas, una desmontable que puede colocarse manualmente permitiendo mover el equipo a cualquier altura u orientación angular alrededor del eje de la varilla ajustando el tornillo de ajuste, y una abrazadera fija utilizada para el posicionamiento de la rótula de bola o cabezal.

- b) Rótula de bola o cabezal: Se encuentra unida a una columna central y está montada en el soporte de posicionamiento. El cabezal posee una abrazadera que sujeta la pinza que sostiene y que facilita el posicionamiento del MCS. La rótula de bola permite el movimiento del equipo en diferentes inclinaciones, ejes de giro y ángulos. Una vez que se consigue la posición deseada del equipo, se fija mediante dos tornillos que ejercen presión sobre las partes móviles.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

- c) Pinza forrada con corcho: Utilizada para sujetar el MCS.
- d) Cuadrícula de posicionamiento: utilizada para la aplicación del método del sistema de posicionamiento contiguo, ver Figura 12.

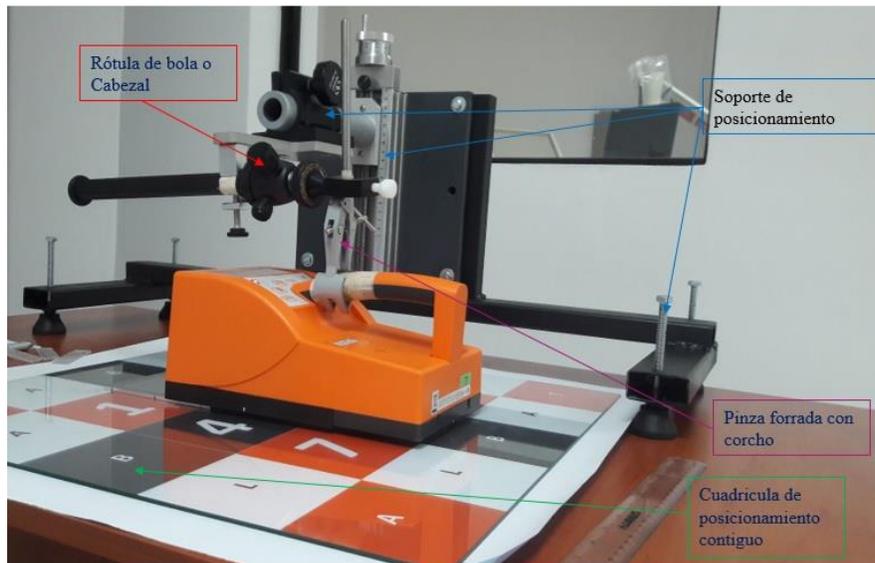


Figura 11. Banco de calibración utilizado en puesta de servicio

Fuente: Fuente propia.

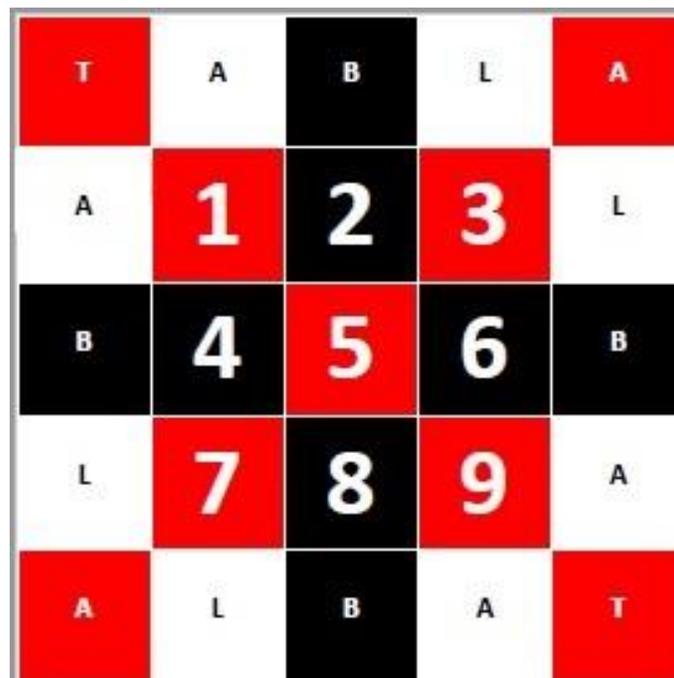


Figura 12. Cuadrícula utilizada para calibración de MCS

Fuente: Fuente propia.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Al mismo tiempo, se utilizan equipos auxiliares los cuales son:

- ✓ Mesa ajustable
- ✓ Soporte de posicionamiento adherido al banco de calibración.
- ✓ Pinza de tres puntas.
- ✓ Nivel de burbuja.
- ✓ Barómetro.
- ✓ Termómetro.
- ✓ Higrómetro

IX.3.3. Monitor de contaminación superficial

El instrumento utilizado en este trabajo será el monitor de contaminación superficial de propiedad y facilitado por LAF-RAM, marca Berthold modelo LB124 SCINT el cual se compone de una unidad de visualización con un microprocesador, una electrónica de procesamiento de señal, un centellador de ZnS con fotomultiplicador y un área de medición activa de 170 cm^2 , ver Figura 13.

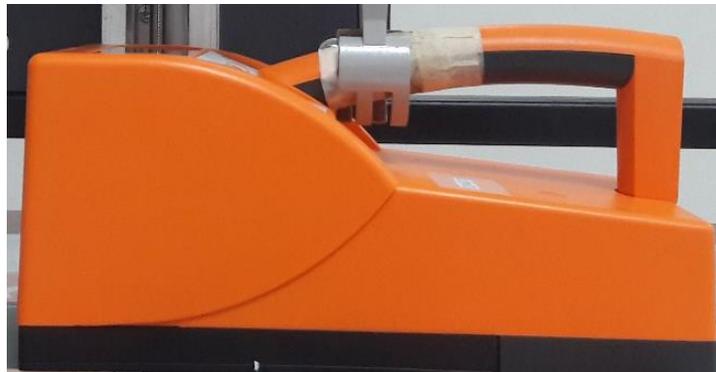


Figura 13. Monitor de contaminación superficial marca Berthold
Fuente: Fuente propia

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

También se utilizará la planilla de hoja Excel que se ocupará para recopilación de datos de la calibración de los monitores y se calculará la incertidumbre, ver Figura 14 y 15 donde se muestra ejemplo de llenado de hoja de la planilla Excel.

	Valor máximo de la escala	Valor patrón (s-1)	Medidas del cero		Medidas del campo		Valor de división de la escala
			Indicaciones	Media/s _{Mb}	Indicaciones	media/s _M	
5	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala	5.0	4.92	34.9	34.88	0.1 Resolución = 0.05
			5.0	±	35.0	±	
			4.9	0.080	34.9	0.08	
			4.8		34.8		
1	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	8.8	8.80	0.1 Resolución = 0.05
				±	8.8	±	
				0.08	8.8	0.00	
					8.8		
2	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	11.6	11.70	0.1 Resolución = 0.05
				±	11.6	±	
				0.08	11.7	0.10	
					11.8		
3	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	8.5	8.52	0.1 Resolución = 0.05
				±	8.5	±	
				0.08	8.5	0.04	
					8.6		
4	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	10.4	10.40	0.1 Resolución = 0.05
				±	10.4	±	
				0.08	10.4	0.00	
					10.4		
6	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	9.6	9.62	0.1 Resolución = 0.05
				±	9.6	±	
				0.08	9.7	0.04	
					9.6		
7	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	9.6	9.58	0.1 Resolución = 0.05
				±	9.6	±	
				0.08	9.6	0.04	
					9.5		
8	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	11.2	11.22	0.1 Resolución = 0.05
				±	11.3	±	
				0.08	11.3	0.08	
					11.2		
9	3651 cps	3915.735 107.3 % de la escala		4.92	9.5	9.48	0.1 Resolución = 0.05
				±	9.6	±	
				0.08	9.5	0.08	
					9.4		

Figura 14. Datos de calibración obtenidos para la fuente plana ¹³⁷Cs.
Fuente: Fuente Propia.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Incertidumbre del Coeficiente de Calibración				
No.	Factores	Consideraciones	Tipo A (%)	Tipo B (%)
1	Actividad superficial de la fuente patrón			2.50
2	Medición del instrumento	0.10 (valor de división de la escala del inst., 70)	0.136	0.041
3	Medición de fondo del instrumento	0.01 (valor de división de la escala)	0	0.059
4	Simulación de fuente seminfinita (bordes)		0	0.150
5	No uniformidad de detección del instrumento	(minimizada por método de medición)		0.000
6	No homogeneidad de la fuente patrón	(caso extremo 6%, según NPL report CIRM 6)	0	3.464
7	Dimensiones del área activa de la fuente	"	0	1.000
8	Posicionamiento general	(según NPL report CIRM 6)	0	2.000
9	Otras 1		0	0.000
10	Otras 2		0	0.000
11	Otras 3		0	0.000
12	Otras 4		0	0.000
13	Otras 5		0	0.000
Incertidumbre estándar combinada		4.827 (%)		
Incertidumbre global (K=2)		9.7 (%)		

Figura 15. Incertidumbres obtenidas con fuente ^{137}Cs
Fuente: Fuente Propia

IX.3.4. Contenedor de plomo

Para el transporte del radionúclido, se utilizó un contenedor de plomo, ver Figura 16, cuya configuración geométrica es de un cilindro con valor de $7,1 \text{ cm}^2$ de área para la tapa y para el lateral un valor de $61,3 \text{ cm}^2$; dichas áreas son necesarias comprobar que estén libre de contaminación radiactiva superficial, de acuerdo con los niveles de referencia establecidos.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



Figura 16. Contenedor de plomo para el transporte de ^{131}I

Fuente: Fuente propia.

IX.3.5. Planillas de cálculos

Se creó una planilla Excel en donde se anotaron los datos de las lecturas obtenidas en los distintos escenarios, esta planilla contiene dos hojas de cálculo. La hoja de cálculo número uno se utilizó para ingresar los datos obtenidos para la evaluación de la contaminación superficial por método directo; ver figura 17, en esta se ingresan la fecha y hora de medición, área de la ventana activa del detector y el área de estudio así también como los valores del fondo radiológico, los datos de la eficiencia del detector y sus incertidumbres dados en el certificado de calibración, los valores de la intensidad de emisión para el radionúclido a medir y el recíproco del factor que determina las partículas que emergen de la fuente, y las lecturas obtenidas en la zona supuestamente contaminada. Además, se ingresa el dato de la vida media del radioisótopo a medir y las distintas ecuaciones de trabajo.

Para el cálculo del factor de calibración, el valor de la actividad y sus incertidumbres se realiza de forma automática; cabe recalcar que para este estudio se utilizó el mismo detector para ambas prácticas.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF- RAM)



Práctica 1. Determinación de la Contaminación Superficial por el Método Directo

Fecha y Hora:	28/08/2020 16:00											
Integrantes:	MSc. Fredy Somarriba, Br. Rosnory Dominguez											
Detector												
Fabricante:	BERTHOLD TECHNOLOGIES			Certificado:	NIC/2020/MC/04							
Modelo:	LB 124 SCINT-D			N° Serie:	20-1058							
Área de ventana activa del detector (cm ²):	170											
Distancia ventana activa - zona contaminada (cm):	0.3											
Superficie contaminada (cm ²):	37.8			Forma geométrica:	rectangular							
Radionucleido contaminante:	I-131											
Fecha y Hora:	29/05/2020 16:10											
Fondo (Bq cps):	12.0	32.4	14.4	12.6	11.2	11.9	14.2	12.8	13.8	13.4	Promedio (Bq cps)	12.9

I-131											
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016											
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137		
	α	β & e- 40-70 keV	β & e- 70-140 keV	β & e- 140-400 keV	β & e- >400 keV	5-15 keV	15-90 keV	90-300 keV	>300 keV		
ε _i del certificado	0.984	0.180	0.480	0.543	0.531	0.082	0.118	0.012	0.011		
η _i	0	0.0564	0.0913	0.9228	0.000455	0	0.0261	0.0641	0.913		
E _i ²	0.05	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5		
ε _i * η _i * E _i ²	0	0.0025	0.0110	0.2505	0.00012	0	0.0015	0.00038	0.0050		
F = Σ(ε _i * η _i * E _i ²)	0.271										
C(A) ₀ [s Bq cm ²]	0.0217										
lecturas de contam. Sup. [cps]	11250	11280	11330	11280	11270	11240	11300	11280	11220	11220	
Promedio de lecturas de contam. Sup. [cps]	11267										
A _s [Bq/cm ²]	244.2										

Tomado del certificado de calibración del detector
Tomado de norma ISO 7503-3:2016 anexo E tabla E.2 y E.3
Tomado de norma ISO 7503-3:2016 anexo E tabla E.1

ECUACIONES DE TRABAJO

$$\epsilon_{i,j} = \frac{(\rho_c - \rho_0)}{q_{2\pi n_{i,j}} \cdot \left(\frac{S_p}{S_c}\right)}$$

$$C(A)_n = \frac{1}{S \cdot \sum_{i,j} (\epsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})}$$

$$A_s = C(A) \cdot (\rho_g - \rho_0)$$

$$\frac{U(A_s)}{A_s} = \sqrt{\frac{u^2(\rho_c) + U^2(\rho_0)}{(\rho_c - \rho_0)^2} + \frac{u^2(C(A)_n)}{(C(A)_n)^2}}$$

$$u(F) = \sqrt{\sum_{i,j} (\eta_{i,j})^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot u(\epsilon_{i,j})^2 + (\epsilon_{i,j})^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \cdot u(\eta_{i,j})^2 + (\eta_{i,j})^2 \cdot (\epsilon_{i,j})^2 \cdot u(E_{i,j}^{-1})^2}$$

$$\frac{U(C(A)_n)}{C(A)_n} = \sqrt{\frac{u^2(S_p)}{S_p^2} + \frac{1}{(\sum_{i,j} \epsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})^2} \cdot \sum_{i,j} \epsilon_{i,j}^2 \cdot \eta_{i,j}^2 \cdot (E_{i,j}^{-1})^2 \left(\frac{u^2(\epsilon_{i,j})}{\epsilon_{i,j}^2} + \frac{u^2(\eta_{i,j})}{\eta_{i,j}^2} + \frac{u^2(E_{i,j}^{-1})}{(E_{i,j}^{-1})^2} \right)}$$

T _{1/2} de I-131 (días)	8.0207
----------------------------------	--------

Fecha de la contaminación:	27/08/2020 12:00
Tiempo transcurrido:	116667 días
Actividad Sup Inicial [Bq/cm ²]:	270.096

RESULTADOS
A_s = 244.192 Bq/cm² ± 0.445 Bq/cm² (k=2)
C(A)₀ = 0.022 s-Bq/cm² ± 0.222 s-Bq/cm² (k=2)

En el experimento	
Act sup	244.19 Bq/cm ²
Actividad de sup. inicial	266.08 Bq/cm ²
Actividad inicial	7588.7 Bq/cm ²

D A T O S	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
(ε _i) ²	0.147	0.032	0.230	0.295	0.282	0.007	0.014	0.00014	0.00012
(η _i) ²	0	0.003	0.008	0.852	0.00000021	0	0.00068	0.004	0.834
(E _i) ⁻²	0.0025	0.0625	0.0625	0.25	0.25	0.0625	0.25	0.25	0.25
u(ε _i) ²	0.0110	0.0077	0.0077	0.0077	0.0077	0.0149	0.0132	0.0085	0.0094
(ε _i) ² * (η _i) ² * (E _i) ⁻²	0	0.000006	0.00012	0.06277	0.000000015	0	0.0000024	0.0000015	0.000025
F ² = Σ(ε _i * η _i * E _i) ²	0.073496								
(ε _i) ² * (η _i) ² * u(ε _i) ²	0.000000	0.000002	0.000004	0.001649	0.000000	0.000000	0.000002	0.000009	0.001961
u ² (F) = Σ(ε _i) ² * (η _i) ² * u(ε _i) ²	0.003626								
Σ(ε _i) ² * (η _i) ² * (E _i) ⁻²	0.063								
u ² (ε _i)/ε _i ²	0.09								
u ² (η _i)/η _i ²	0								
u ² (E _i)/E _i ²	0								
u ² (S _p)/S _p ²	0.0001								
u(C(A) ₀)/C(A) ₀	0.22234								
U(ρ ₀)	1.056								
U(ρ _c)	34.976								
u(A _s) con k=1	0.222								
u(A _s) con k=2	0.445								

Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4

Figura 17. Planilla de cálculo, hoja de cálculo número uno-evaluación de la contaminación superficial por método directo.
Fuente: Fuente propia

En la figura 18 se muestra con mayor detalle la parte de la hoja donde se ingresa la fecha y hora de realización de la práctica, los datos del detector de contaminación superficial y los valores del fondo radiológico.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Práctica 1. Determinación de la Contaminación Superficial por el Método Directo

Fecha y Hora:	28/08/2020 16:00										
Integrantes:	MSc. Fredy Somarriba; Br. Rosnory Domínguez										
Detector											
Fabricante:	BERTHOLD TECHNOLOGIES				Certificado:	NIC/2020/MC/04					
Modelo:	LB 124 SCINT-D				N° Serie:	20-1058					
Área de ventana activa del detector (cm ²):	170										
Distancia ventana activa - zona contaminada (cm):	0.3										
Superficie contaminada (cm ²):	37.8			Forma geométrica:	rectangular						
Radionucleido contaminante:	I-131										
Fecha y Hora:	Fondo (By cps):										Promedio (By cps)
29/05/2020 16:10	12.0	12.4	14.4	12.6	11.2	11.9	14.2	12.8	13.8	13.4	12.9

Figura 18. Parte de la hoja de cálculo utilizada para la evaluación de la contaminación superficial por método directo

Fuente: Fuente propia

En la figura 19 se muestra el cuadro donde se ingresan los datos de la eficiencia del detector, los valores de la intensidad de emisión para el radionucleido de interés y los datos del factor que determina las partículas que emergen de la fuente para que se realice de forma automática el cálculo del valor de factor de calibración. También se ingresan las lecturas obtenidas en la zona de interés y se efectúa el cálculo de la actividad superficial.

I-131										
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016										
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137	
	α	β & e- 40-70 keV	β & e- 70-140 keV	β & e- 140-400 keV	β & e- >400 keV	fotones 5-15 keV	fotones 15-90 keV	fotones 90-300 keV	fotones >300 keV	
ϵ_{ij} del certificado	0.384	0.180	0.480	0.543	0.531	0.082	0.118	0.012	0.011	Tomado del certificado de calibración del detector
η_{ij}	0	0.0564	0.0913	0.9228	0.000455	0	0.0261	0.0641	0.913	Tomado de norma ISO 7503-3:2016 anexo E tabla E.2 y E.3
E_{ij}^{-1}	0.05	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5	Tomado de norma ISO 7503-3:2016 anexo E tabla E.1
$\epsilon_{ij} * \eta_{ij} * E_{ij}^{-1}$	0	0.0025	0.0110	0.2505	0.00012	0	0.0015	0.00038	0.0050	
$F = \sum (\epsilon_{ij} * \eta_{ij} * E_{ij}^{-1})$	0.271									
$C(A)_n [s Bq cm^{-2}]$	0.0217									
Lecturas de contam. Sup. [cps]	11250	11280	11330	11280	11270	11240	11300	11280	11220	11220
Promedio de lecturas de contam. Sup. [cps]	11267									
$A_s [Bq/cm^2]$	244.2									

Figura 19. Cálculo del factor de calibración y del valor de la actividad superficial

Fuente: Fuente propia

En la figura 20 se puede apreciar la tabla en donde se realiza de forma automática la elevación al cuadrado de las distintas variables y el cálculo de las incertidumbres, para la fila de las incertidumbres de las eficiencias del detector elevadas al cuadrado $u(\epsilon_{i,j})^2$ los datos se tienen que ingresar y elevar al cuadrado de forma manual.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

D A T O S C U A 		Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137		
		α	β & e- 40-70	β & e- 70-140	β & e- 140-400	β & e- >400	fotones 5-15	fotones 15-90	fotones 90-300	fotones >300		
	$(\epsilon_{ij})^2$	0.147	0.032	0.230	0.295	0.282	0.007	0.014	0.00014	0.00012		
	$(\eta_{ij})^2$	0	0.003	0.008	0.852	0.00000021	0	0.00068	0.004	0.834		
	$(E_{ij}^{-1})^2$	0.0025	0.0625	0.0625	0.25	0.25	0.0625	0.25	0.25	0.25		
	$u(\epsilon_{ij})^2$	0.0110	0.0077	0.0077	0.0077	0.0077	0.0149	0.0132	0.0085	0.0094		
	$(\epsilon_{ij})^2 * (\eta_{ij})^2 * (E_{ij}^{-1})^2$	0	0.000006	0.00012	0.06277	0.000000015	0	0.000024	0.0000015	0.000025		
	$F^2 = \sum (\epsilon_{ij} * \eta_{ij} * E_{ij}^{-1})^2$	0.073496										
	$(\epsilon_{ij})^2 * (\eta_{ij})^2 * u(\epsilon_{ij})^2$	0.000000	0.000002	0.000004	0.001649	0.000000	0.000000	0.000002	0.000009	0.001961		
	$u^2(F) = \sum (\epsilon_{ij})^2 * (\eta_{ij})^2 * u(\epsilon_{ij})^2$	0.003626										
$\sum (\epsilon_{ij})^2 * (\eta_{ij})^2 * (E_{ij}^{-1})^2$	0.063											
I N C E R T I D U M B R E	$u^2(\epsilon_{ij})/\epsilon_{ij}^2$	0.09										Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
	$u^2(\eta_{ij})/\eta_{ij}^2$	0										Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
	$u^2(E_{ij}^{-1})/(E_{ij}^{-1})^2$	0										Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
	$u^2(S_p)/S_p^2$	0.0001										Valor tomado de ISO 7503-3:2016 anexo E.9.4
	$u(C(A)_n)/C(A)_n$	0.22234										
	$U(\rho_0)$	1.056										
	$U(\rho_j)$	34.976										
	$u(A_j)$ con $k=1$	0.222										
$u(A_j)$ con $k=2$	0.445											

Figura 20. Cálculo de variables al cuadrado e incertidumbres
Fuente: Fuente propia

En la hoja de cálculo número dos se utilizó para ingresar los datos obtenidos para la evaluación de la contaminación superficial por método indirecto; ver figura 21, en esta se ingresan la fecha y hora de medición, área de la ventana activa del detector y el área de la zona donde se realiza el frotis, eficiencia de remoción así también como los valores del fondo radiológico, los datos de la eficiencia del detector y sus incertidumbres dados en el certificado de calibración, los valores de la intensidad de emisión para el radionúclido a medir y el recíproco del factor que determina las partículas que emergen de la fuente, y las lecturas obtenidas en la zona donde se aplicó la frotis. Además, se ingresa el dato de la vida media del radioisótopo a medir y las distintas ecuaciones de trabajo.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Práctica 2. Determinación de la Contaminación Superficial por el Método Indirecto

Fecha y Hora: 28/08/2020 16:15
Integrantes: MSc. Fredy Somarrriba; Br. Rosnory Domínguez

Detector			
Fabricante:	BERTHOLD TECHNOLOGIES	Certificado:	NIC/2020/MC/04
Modelo:	LB 124 SCINT-D	N° Serie:	20-1058
Área de ventana activa detector (cm ²):	1.70		
Distancia ventana activa - Frotis (cm):	0.3		
Superficie barrida por frotis tapa (cm ²):	7.1	Forma geométrica:	Cilindro
Superficie barrida por frotis lateral (cm ²):	61.3	Forma geométrica:	Cilindro
Eficiencia de remoción ϵ_w :	1.0		
Radionucleido contaminante:	I-131		
t_1 [s]:	60		
t_2 [s]:	60		

Fecha y Hora:	Fondo (Bq cps):									Promedio	
29/05/2020 16:10	0.50	0.70	0.70	0.70	0.65	0.60	0.45	0.35	0.55	0.69	0.59

I-131									
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016									
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
α	β & e- 40-70 keV	β & e- 70-140 keV	β & e- 140-400 keV	β & e- >400 keV	5-15 keV	15-90 keV	90-300 keV	>300 keV	>300 keV
ϵ_{ij}	0.394	0.380	0.480	0.943	0.531	0.082	0.118	0.012	0.011
η_{ij}	0	0.0564	0.0913	0.9228	0.000455	0	0.0101	0.0641	0.913
ϵ_{ij}^{-1}	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5
$\epsilon_{ij}^{-1} \eta_{ij}^{-1} \epsilon_{ij}^{-1}$	0	0.002538	0.010956	0.2305402	0.0001208	0	0.0013399	0.0003846	0.0050215
$F = \sum \epsilon_{ij}^{-1} \eta_{ij}^{-1} \epsilon_{ij}^{-1}$	0.2711								
$C(A)_{sup}^{ind}$ [Bq cm ⁻²]	0.5218								
$C(A)_{lateral}^{ind}$ [Bq cm ⁻²]	0.0602								

	Frotis [cps]										Promedio [cps]	a, [Bq/cm ²]	Limite actividad= 0,4 Bq/cm ²
Tapa frotis 1	266.00	276.00	271.00	273.00	278.00	275.00	274.00	269.00	267.00	264.00	271.30	141.26	Contaminado
Tapa frotis 2	3.18	2.97	3.30	3.68	3.38	3.88	3.93	3.53	2.57	---	3.38	1.45	Contaminado
Tapa frotis 3	11.80	12.90	13.10	13.10	13.40	13.20	12.50	12.30	11.90	---	12.61	6.26	Contaminado
Tapa frotis 4	15.30	15.10	14.90	15.20	15.40	16.70	16.90	17.10	17.20	16.60	16.04	8.05	Contaminado
Lateral frotis 1	0.45	0.50	0.45	0.60	0.60	0.60	0.65	0.45	0.30	0.40	0.50	-0.01	No contaminado
Lateral frotis 2	0.55	0.50	0.35	0.35	0.50	0.50	0.55	0.60	0.65	0.55	0.51	-0.01	No contaminado

$T_{1/2}$ de I-131 (días): 8.0207

Fecha de la contaminación:	27/08/2020 11:30
Tiempo Transcurrido:	1.39792 días
Actividad Sup Inicial Tapa [Bq/cm ²]	1566.66
Actividad Sup Inicial Lateral [Bq/cm ²]	0.00

Bq/cm²

D A T O S	$(S_{w, sup})^2$	49.96487228								
	$(S_{w, lateral})^2$	3752.917074								
C U L D A D O S	ϵ_w^{-2}	1								
	α	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
E L E M E N T A L	$(\epsilon_{ij})^2$	0.147456	0.032400	0.230400	0.294849	0.281961	0.009724	0.013924	0.000144	0.000121
	$(\eta_{ij})^2$	0	0.0031810	0.0083357	0.85156	0.000002070	0	0.000681	0.004109	0.831569
A L T I T U D I N A	$(\epsilon_{ij}^{-1})^2$	0.0625	0.0625	0.0625	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
	$u(\epsilon_{ij})^2$	0.0110	0.0077	0.0077	0.0077	0.0077	0.0149	0.0132	0.0085	0.0094
S I S T E M A T I C O	$(\epsilon_{ij}^{-1} \eta_{ij}^{-1} \epsilon_{ij}^{-1})^2$	0	0.000006	0.00012	0.06277	0.000000015	0	0.0000024	0.00000015	0.000025
	$F^2 = \sum \epsilon_{ij}^{-1} \eta_{ij}^{-1} \epsilon_{ij}^{-1}$	0.073496								
A L T I T U D I N A	$\sum \epsilon_{ij}^{-1} \eta_{ij}^{-1} \epsilon_{ij}^{-1} u(\epsilon_{ij})^2$	0.063								
	$(\eta_{ij})^2 (\epsilon_{ij}^{-1})^2 u(\epsilon_{ij})^2$	0	0.0000015	0.0000040	0.0015486	0.0000000040	0	0.0000023	0.0000087	0.0019608
I N C E R T I D U D I N A	$u(S_{w, sup})^2$	0.004								
	$u(S_{w, lateral})^2$	0.005								
E L E M E N T A L	$u(\epsilon_w)$	0.375								
	$u(\epsilon_w)/\epsilon_w$	0.029								
I N C E R T I D U D I N A	$u(\eta_{ij})$	0.029								
	$u(\eta_{ij})/\eta_{ij}$	0								
E L E M E N T A L	$u(\epsilon_{ij}^{-1})$	0								
	$u(F)$	0.0036								
R E S U L T A D O	$u(C(A)_{sup}^{ind})/C(A)_{sup}^{ind}$	0.2751								
	$u(C(A)_{lateral}^{ind})/C(A)_{lateral}^{ind}$	0.2751								
E L E M E N T A L	$u(y)_{sup}$	31.6905								
	$u(y)_{lateral}$	0.0082								

RESULTADOS
 $(a, \sim y)_{sup} = 141.26 \text{ Bq/cm}^2 \pm 31.69 \text{ Bq/cm}^2$
 $(a, \sim y)_{lateral} = -0.01 \text{ Bq/cm}^2 \pm 0.01 \text{ Bq/cm}^2$

Figura 21. Planilla de cálculo, hoja de cálculo número dos-evaluación de la contaminación superficial por método indirecto
Fuente: Fuente propia

En la figura 22 se muestra con mayor detalle la parte de la hoja donde se ingresa la fecha y hora de realización de la práctica, los datos del detector de contaminación superficial, las áreas de las superficies donde se realizaron los frotis, la eficiencia de remoción y los valores del fondo radiológico.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Práctica 2. Determinación de la Contaminación Superficial por el Método Indirecto

Fecha y Hora:	28/08/2020 16:15										
Integrantes:	Msc. Fredy Somarriba; Br. Rosnory Dominguez										
Detector											
Fabricante:	BERTHOLD TECHNOLOGIES			Certificado:		NIC/2020/MC/04					
Modelo:	LB 124 SCINT-D			N° Serie:		20-1058					
Área de ventana activa detector (cm ²):	170										
Distancia ventana activa - frotis (cm):	0.3										
Superficie barrida por frotis tapa (cm ²):	7.1			Forma geométrica:		Cilindro					
Superficie barrida por frotis lateral (cm ²):	61.3			Forma geométrica:		Cilindro					
Eficiencia de remoción ϵ_a :	1.0										
Radionucleido contaminante:	I-131										
t_1 [s]:	60										
t_2 [s]:	60										
Fondo (Bq cps):											
29/05/2020 16:10	0.50	0.70	0.70	0.70	0.65	0.60	0.45	0.35	0.55	0.69	Promedio
											0.59

Figura 22. Toma de datos de realización de la práctica, características del detector, área a estudiar y fondo radiológico
Fuente: Fuente propia

En la figura 23 se muestra el cuadro donde se ingresan los datos de la eficiencia del detector, los valores de la intensidad de emisión para el radionucleido de interés y los datos del factor que determina las partículas que emergen de la fuente para que se realice de forma automática el cálculo de los valores de los factores de calibración a utilizar.

I-131									
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016									
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
	α	β & e- 40-70 keV	β & e- 70-140 keV	β & e- 140-400 keV	β & e- >400 keV	fotones 5-15 keV	fotones 15-90 keV	fotones 90-300 keV	fotones >300 keV
ϵ_{ij}	0.384	0.180	0.480	0.543	0.531	0.082	0.118	0.012	0.011
η_{ij}	0	0.0564	0.0913	0.9228	0.000455	0	0.0261	0.0641	0.913
E_{ij}^{-1}	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5
$\epsilon_{ij} \eta_{ij} E_{ij}^{-1}$	0	0.002538	0.010956	0.2505402	0.0001208	0	0.0015399	0.0003846	0.0050215
$F = \sum \epsilon_{ij} \eta_{ij} E_{ij}^{-1}$									0.2711
$C(A)_{tapa}^{ind} [s Bq cm^{-2}]$									0.5218
$C(A)_{lateral}^{ind} [s Bq cm^{-2}]$									0.0602

Tomado del certificado de calibración del detector
Tomado de norma ISO 7503-3:2016 anexo E tabla E.2 y E.3
Tomado de norma ISO 7503-3:2016 tabla F.1

Figura 23. Cálculo de los factores de calibración
Fuente: Fuente propia

En la figura 24 se encuentra la tabla en la que se ingresa los valores de los distintos frotis realizados en ambas áreas de interés, a su vez se realiza el cálculo de la actividad de remoción de forma automática.

	Frotis [cps]										Promedio [cps]	$a_r [Bq/cm^2]$	Límite actividad= 0.4 Bq/cm ²
Tapa frotis 1	266.00	276.00	271.00	273.00	278.00	275.00	274.00	269.00	267.00	264.00	271.30	141.26	Contaminado
Tapa frotis 2	3.18	2.97	3.30	3.68	3.38	3.88	3.93	3.53	2.57	---	3.38	1.45	Contaminado
Tapa frotis 3	11.80	12.90	13.10	13.10	13.40	13.20	12.50	12.30	11.90	11.90	12.61	6.26	Contaminado
Tapa frotis 4	15.30	15.10	14.90	15.20	15.40	16.70	16.90	17.10	17.20	16.60	16.04	8.05	Contaminado
Lateral frotis 1	0.45	0.50	0.45	0.60	0.60	0.60	0.65	0.45	0.30	0.40	0.50	-0.01	No contaminado
Lateral frotis 2	0.55	0.50	0.35	0.35	0.50	0.50	0.55	0.60	0.65	0.55	0.51	-0.01	No contaminado

Figura 24. Lecturas obtenidas y cálculo de la actividad de remoción
Fuente: Fuente propia

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

En la figura 25 se puede apreciar la tabla en donde se realiza de forma automática la elevación al cuadrado de las distintas variables y el cálculo de las incertidumbres, para la fila de las incertidumbres de las eficiencias del detector elevadas al cuadrado $u(\varepsilon_{i,j})^2$ los datos se tienen que ingresar y elevar al cuadrado de forma manual.

D A T O S C U A D R A D O S A L	$(S_{w,tapa})^2$	49.96487228								
	$(S_{w,lateral})^2$	3752.917074								
	ε_w^2	1								
		Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
	α	β & e- 40-70 keV	β & e- 70-140 keV	β & e- 140-400 keV	β & e- >400 keV	fotones 5-15 keV		fotones 15-90 keV	fotones 90-300 keV	fotones >300 keV
	$(\varepsilon_{i,j})^2$	0.147456	0.032400	0.230400	0.294849	0.281961	0.006724	0.013924	0.000144	0.000121
	$(\eta_{i,j})^2$	0	0.0031810	0.0083357	0.85156	0.0000002070	0	0.000681	0.004109	0.833569
	$(E_{i,j})^2$	0.0625	0.0625	0.0625	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
	$u(\varepsilon_{i,j})^2$	0.0110	0.0077	0.0077	0.0077	0.0077	0.0149	0.0132	0.0085	0.0094
	$(\varepsilon_{i,j})^2 + (\eta_{i,j})^2 + (E_{i,j})^2$	0	0.000006	0.00012	0.06277	0.000000015	0	0.0000024	0.00000015	0.000025
	$F^2 = \sum(\varepsilon_{i,j} + \eta_{i,j} + E_{i,j})^2$	0.073496								
	$\sum(\varepsilon_{i,j})^2 + (\eta_{i,j})^2 + (E_{i,j})^2$	0.063								
	$(\eta_{i,j})^2 + (E_{i,j})^2 + u^2(\varepsilon_{i,j})$	0	0.0000015	0.0000040	0.0016486	0.00000000040	0	0.0000023	0.0000087	0.0019608
	$\sum(\eta_{i,j})^2 + (E_{i,j})^2 + u^2(\varepsilon_{i,j})$	0.004								
	I n c e r t i d u m b r e	$u(S_w)_{tapa}^2$	0.005							
$u(S_w)_{lateral}^2$		0.375								
$u(\varepsilon_w)$		0.029								
$u(\varepsilon_w)/\varepsilon_w$		0.029								
$u(\eta_{i,j})$		0								
$u(E_{i,j})$		0								
$u(F)^2$		0.0036								
$u(C(A)^{ind})/C(A)^{ind}_{TAPA}$		0.2751								
$u(C(A)^{ind})/C(A)^{ind}_{LATERAL}$		0.2751								
$u(y)_{tapa}$		31.6905								
$u(y)_{lateral}$	0.0082									

Figura 25. Datos elevados al cuadrado y cálculo de las incertidumbres
Fuente: Fuente propia

IX.4. Procedimiento de medición.

IX.4.1. Calibración de monitores

El posicionamiento del monitor con respecto a la fuente es generalmente tomado como la superficie de la fuente a la cara frontal del detector. El área mínima recomendada en la de la fuente de calibración es de 10 cm x 10 cm. (ISO I. O., 2016)

En el caso de que el área de la ventana del detector sea mayor a el tamaño de la fuente de referencia se utilizará el método de las posiciones contiguas, con ayuda de la cuadrícula de posicionamiento, el cual consiste en determinar la respuesta del detector con respecto a una fuente de calibración colocada en posiciones adyacentes debajo del detector del monitor, sin superponerse, hasta que toda el área del detector sea barrida (ver Figura 26); en el posicionamiento la distancia de separación de la fuente con respecto a la ventana activa del detector es de 3 mm.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

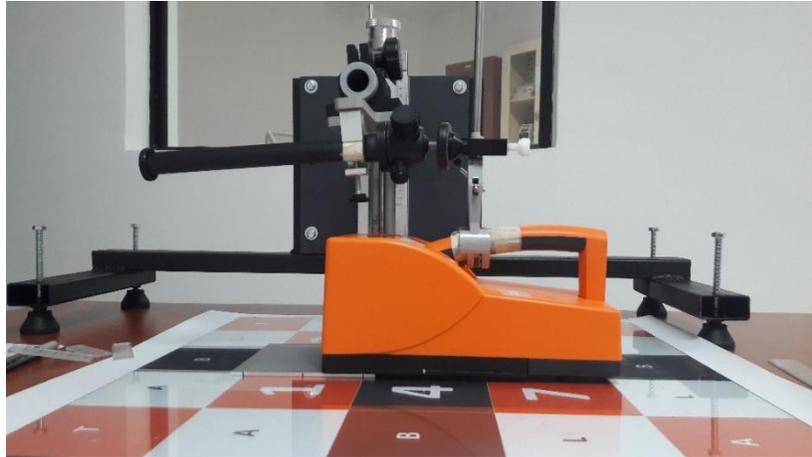


Figura 26. Posicionamiento de un MCS cuya área de la ventana activa del detector es mayor que la fuente patrón

Fuente: Fuente propia.

Para casos en el que el área de la ventana sea menor a la fuente también se utiliza un sistema de posicionamiento continuo, pero a diferencia el caso anterior, se considera como posicionamiento fijo debido a que la fuente y el detector se coloca en una posición cuales quiera, se recomienda en la posición central de la cuadrícula (posición 5), de manera fija (ver Figura 27).



Figura 27. Posicionamiento de un MCS cuya área de la ventana activa del detector es menor que la fuente patrón

Fuente: Fuente propia.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

IX.4.2. Evaluación de la Contaminación Superficial

i. Método directo

Siguiendo con lo planteado con la norma ISO 7503-1, el monitor o sonda del detector se mueve por toda la superficie, con la parte de la ventana activa a una distancia mínima de 3 mm de la superficie a medir, la ventana activa del monitor de contaminación superficial debe permanecer estacionario para poder obtener una buena precisión en la evaluación.

ii. Método indirecto

Los pasos a seguir para la realización de la frotis según las recomendaciones de la ISO7503-2 son:

- ✓ El nivel de radiación de fondo en del área de medición debe ser bajo y constante.
- ✓ Antes de medir la muestra de frotis debe medirse el fondo del lugar
- ✓ La tasa de conteos de fondo se debe verificar periódicamente para detectar posibles cambios en los niveles de fondo.
- ✓ El instrumento de medición a emplear debe estar calibrado apropiadamente y sujeto a un programa de control periódico del estado de la calibración.
- ✓ Deben estar disponibles los factores de calibración del instrumento para los radionúclidos a medir.
- ✓ La geometría de medición empleada debe ser idénticas a la utilizada durante calibración del instrumento. Para los instrumentos portátiles, deben ser lo más cercana posible.
- ✓ El área sensible del detector deberá ser más grande que la muestra de frotis.
- ✓ Si se debe medir una muestra de frotis donde coexistan emisores alfa o beta, se requiere usar contadores que permitan la discriminación de pulsos alfa-beta.

Luego se ubica el monitor a una distancia detector-muestra de frotis de 3 mm para obtener las tasas de emisión superficial [s^{-1}] de la frotis realizada en las distintas zonas que se considera contaminada.

CAPÍTULO IV

X. Análisis y Discusión de resultados

X.1. Calibración del monitor de contaminación superficial

La calibración del equipo a utilizar se realizó el día 11 de marzo de 2020 a través del método de comparación de las indicaciones del instrumento con los valores convencionalmente verdadero de las fuentes planas patrones, según como se recomienda en la norma ISO 7503-3:2016. Los valores de fondo obtenidos en el proceso de calibración se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de fondo radiológico

Fondo medido [cps]			
¹³⁷ Cs	4,92±0,08	¹²⁹ I	4,92±0,08
³⁶ Cl	4,92±0,08	²³⁸ Pu	4,92±0,08
¹⁴ C	4,92±0,08	²⁴¹ Am-γ	4,92±0,08
²⁴¹ Am-α	0,10±0,01	⁵⁷ Co	4,92±0,08
⁹⁰ Sr	4,92±0,08	⁹⁹ Tc	4,92±0,08

Para el cálculo de la eficiencia se utilizó la Ec.4. En la Tabla 3 se muestran los valores de la tasa de emisión superficial en unidades de s^{-1} de las fuentes patrones a la fecha de calibración, los valores medidos por el detector en unidades de cps, la eficiencia del detector en por ciento [%] y su incertidumbre combinada para un factor de cobertura $k=2$.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Tabla 3. Valores obtenidos en la calibración

Fuentes-Código-Tipo	Tasa de Emisión Superficial [1/s]	Valor Medido [cps]	Eficiencia del Detector	Incertidumbre $\pm U_E$ [%]
$^{137}\text{Cs-AI-8914-}\gamma$	3915,7	69,9	1,1%	9,7
$^{36}\text{Cl-AI-8953-}\beta$	1700,0	1570,3	54,3%	8,8
$^{14}\text{C-AI-8954-}\beta$	1339,4	410,8	18,0%	8,8
$^{241}\text{Am-AI-8956-}\alpha$	1511,7	987,9	38,4%	10,5
$^{90}\text{Sr-AI-8952-}\beta$	3765,5	3398,9	53,1%	8,8
$^{129}\text{I-AI-8911-}\gamma$	9300,0	1297,5	8,2%	12,2
$^{238}\text{Pu-AI-8912-}\gamma$	2736,7	549,5	11,8%	11,5
$^{241}\text{Am-AI-8910-}\gamma$	4677,3	288,1	3,6%	10,2
$^{57}\text{Co-AI-8913-}\gamma$	697,5	14,8	1,2%	9,2
$^{99}\text{Tc-AI-8955-}\beta$	1340,0	1092,4	48,0%	8,8

En el Anexo 1 se muestra a más detalle el certificado de calibración emitido, la reproducción de este documento es de manera representativa y se autorizó por el responsable del laboratorio LCD y la Dirección; se prohíbe la reproducción del mismo sin la autorización del personal a cargo.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

X.2. Evaluación de la contaminación superficial por método directo.

En la práctica de la evaluación de la contaminación superficial por método directo se utilizó las recomendaciones establecidas en la Norma ISO 7503-1:2016, se consideró una zona supuestamente contaminada de 37,8 cm² con un escenario considerando como radionúclido el Yodo-131 (¹³¹I); los resultados obtenidos como fondo radiológico se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de fondo radiológico

Fondo [$\beta\gamma$ cps]										Promedio [$\beta\gamma$ cps]
12,0	12,4	14,4	12,6	11,2	11,9	14,2	12,8	13,8	13,4	12,9

Luego se procedió a realizar los cálculos para encontrar el factor de calibración, se utilizó la Ec.17 y los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo del factor de calibración

I-131									
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016									
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
	α	β & e^- 40-70 keV	β & e^- 70-140 keV	β & e^- 140-400 keV	β & e^- >400 keV	fotones 5-15 keV	fotones 15-90 keV	fotones 90-300 keV	fotones >300 keV
$\epsilon_{i,j}$ del certificado	0,384	0,180	0,480	0,543	0,531	0,082	0,118	0,012	0,011
$\eta_{i,j}$	0,000	0,0564	0,0913	0,9228	0,0005	0,0000	0,0261	0,0641	0,9130
$E_{i,j}^{-1}$	0,050	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5
$\epsilon_{i,j} * \eta_{i,j} * E_{i,j}^{-1}$	0,000	0,003	0,011	0,251	0,000	0,000	0,002	0,000	0,005
$F = \Sigma(\epsilon_{i,j} * \eta_{i,j} * E_{i,j}^{-1})$	0,271								
$C(A)_n [s \cdot Bq \cdot cm^{-2}]$	0,0217								

Los datos de los valores de la eficiencia $\epsilon_{i,j}$ son tomados del certificado de calibración y los datos de las variables $\eta_{i,j}$ y $E_{i,j}^{-1}$ se presentan en la tabla 6 y 7.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Tabla 6. Datos de $\eta_{i,j}$ para el radionúclido de ^{131}I

Radionuclide ^{131}I								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$	2,11E-02	8,00E-02	8,98E-01		3,53E-02	1,13E-02	2,48E-02	4,55E-04
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$		2,61E-02	6,41E-02	9,13E-01		5,42E-02		

Nota: Tomado de ISO 7503-3:2016, anexo E, tabla E.3

Tabla 7. Valores conservadores razonables utilizados para el método directo

Radiación tipo j	Alfa	Electrones				fotones			
Región energética i en keV	todos	40 a 70	70 a 140	140 a 400	>400	5 a 15	15 a 90	90 a 300	>300
Eficiencia de la fuente $E_{i,j}^{-1}$	0.05	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5

Nota: Tomado de ISO 7503-3:2016, anexo E, tabla E.1

Posteriormente se realizaron las mediciones de la tasa de emisión superficial de la supuesta zona contaminada, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Lecturas obtenidas en zona supuestamente contaminada

Valor medido [cps]										Promedio [cps]
11250	11280	11330	11280	11270	11240	11300	11280	11220	11220	11267

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Por último, con la Ec.16 se encontró el valor de la actividad superficial y se calcularon sus respectivas incertidumbres con la ecuación 27 dando como resultado:

$$C(A)_n = 0.02 \text{ s} \cdot \text{Bq}/\text{cm}^2$$

$$A_S = 244,19 \text{ Bq}/\text{cm}^2 \pm 0.45 \text{ Bq}/\text{cm}^2 \quad (k = 2)$$

X.3. Evaluación de la contaminación superficial por método indirecto.

En la práctica de la evaluación de la contaminación superficial por método indirecto se utilizó las recomendaciones establecidas en la Norma ISO 7503-2:2016, se consideró como objeto supuestamente contaminada un contenedor cilíndrico de 7,1 cm² para el área de la tapa y 61,3 cm² para el área lateral con un escenario considerando como radionúclido el Yodo-131 (¹³¹I); los resultados obtenidos como fondo radiológico se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Fondo Radiológico

Fondo [$\beta\gamma$ cps]:										Promedio [$\beta\gamma$ cps]
0,50	0,70	0,70	0,70	0,65	0,60	0,45	0,35	0,55	0,69	0,59

Luego se procedió a calcular el valor del factor de calibración utilizando la Ec.23, obteniendo como resultados lo que se muestra en la Tabla 10, teniendo en cuenta que el valor de ϵ_w es de 1.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Tabla 10. Cálculo del factor de calibración

I-131									
Grupos de radiaciones según ISO 7503:2016									
	Am-241	C-14	Tc-99	Cl-36	Sr-90	I-129	Pu-238	Co-57	Cs-137
	α	β & e^- 40-70 keV	β & e^- 70-140 keV	β & e^- 140-400 keV	β & e^- >400 keV	fotones 5-15 keV	fotones 15-90 keV	fotones 90-300 keV	fotones >300 keV
$\varepsilon_{i,j}$ del certificado	0,384	0,180	0,480	0,543	0,531	0,082	0,118	0,012	0,011
$\eta_{i,j}$	0,000	0,0564	0,0913	0,9228	0,0005	0,0000	0,0261	0,0641	0,913
$E_{i,j}^{-1}$	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5
$\varepsilon_{i,j} * \eta_{i,j} * E_{i,j}^{-1}$	0,000	0,003	0,011	0,251	0,000	0,000	0,002	0,000	0,005
$F = \Sigma(\varepsilon_{i,j} * \eta_{i,j} * E_{i,j}^{-1})$	0,2711								
$C(A)_n^{ind}_{tapa} [s \cdot Bq \cdot cm^{-2}]$	0,5218								
$C(A)_n^{ind}_{lateral} [s \cdot Bq \cdot cm^{-2}]$	0,0602								

Los datos de los valores de la eficiencia $\varepsilon_{i,j}$ son tomados del certificado de calibración, los datos de las variables $\eta_{i,j}$ se muestran en Tabla 6 y los valores de $E_{i,j}^{-1}$ se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores conservadores razonables utilizados para el método indirecto

Radiation type j	Alpha	Electrons				Photons			
Energy region i in keV	all	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
Source efficiency $1/E_{i,j}^a$	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5
Wiping efficiency ε_w	0,1								

Nota: Tomado de ISO 7503-3:2016, anexo F.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

De cada parte de contenedor se tomaron muestras de frotis secos en dos distintas zonas (tapa, lateral del contenedor) para tratar de eliminar la posible contaminación removible, se tomaron un total de diez frotis para cada zona. Las muestras se colocaron en una funda para evitar la contaminación del equipo de medición o del operador. Posteriormente se ubicó el detector a una distancia de 0,3 cm de las muestras de frotis y como resultado obtuvimos lo que se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores obtenidos de las mediciones de frotis

	Frotis [cps]										Promedio [cps]
Tapa frotis 1	266,00	276,00	271,00	273,00	278,00	275,00	274,00	269,00	267,00	264,00	271,30
Tapa frotis 2	3,18	2,97	3,30	3,68	3,38	3,88	3,93	3,53	2,57	-----	3,38
Tapa frotis 3	11,80	12,90	13,10	13,10	13,40	13,20	12,50	12,30	11,90	11,90	12,61
Tapa frotis 4	15,30	15,10	14,90	15,20	15,40	16,70	16,90	17,10	17,20	16,60	16,04
Lateral frotis 1	0,45	0,50	0,45	0,60	0,60	0,60	0,65	0,45	0,30	0,40	0,50
Lateral frotis 2	0,55	0,50	0,35	0,35	0,50	0,50	0,55	0,60	0,65	0,55	0,51

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Por último, con la Ec.22 se encontró el valor de la actividad de remoción para las distintas áreas y su incertidumbre se calculó con la Ec.29 dando como resultado:

- Tapa del contenedor

$$C(A)_n^{ind} = 0,52 \text{ s} \cdot Bq/cm^2$$

$$a_r = 141,26 \text{ Bq/cm}^2 \pm 31,69 \text{ Bq/cm}^2 \quad (k = 2)$$

- Lateral del contenedor

No se realizaron las mediciones debido a que se observó que los valores medidos eran prácticamente fondo radiológico.

X.4. Instructivo para evaluación de la contaminación superficial.

Este primer modelo de instructivo, ver anexo 2, fue creado para apoyar a los distintos profesionales en el procedimiento a seguir según lo determinado en la normativa internacional, asimismo también se muestran las ecuaciones de trabajo a utilizar para el cálculo de los distintos valores, según el método de medición y los radionúclidos que se detectan en la zona de interés. El instructivo contiene lo siguiente:

1. En el encabezado muestra el nombre del laboratorio en el cual se diseñó (LAF –RAM).
2. En la parte central de la portada se encuentra el título de “Instructivo para la evaluación de la contaminación superficial según ISO 7503:2016”.
3. La Dirección del LAF-RAM ubicado en pie de página y también contiene una nota en donde se especifica la prohibición de copia o divulgación a terceros de este documento, sin la autorización del LAF-RAM.
4. La página número dos se muestra el contenido del documento.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

5. En la página número tres se determina el objetivo del manuscrito y la descripción de las actividades.
6. A partir de la página número cuatro se dan a conocer como calcular las variables de interés.
7. La página número nueve se exponen algunas recomendaciones para los usuarios finales.
8. La página número diez contiene las referencias bibliográficas a emplear.
9. Por último, en la página número once inician los anexos en lo cual se pueden observar los valores de $\eta_{i,j}$ para distintos radionúclidos y los datos de $E_{i,j}^{-1}$ razonablemente utilizados para los distintos métodos.

NOTA: La norma ISO 7503:2016 no posee los todos los valores para los isotopos conocidos, solo muestran algunos radionúclidos.

CAPÍTULO V

XI. Conclusiones

Se evaluó la contaminación superficial por método directo e indirecto según la metodología que se estipula en la ISO 7503:2016, teniendo en cuenta que el límite estipulado por el OIEA es de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, dando como resultado para la determinación por el método directo una actividad superficial de $244,19 \text{ Bq/cm}^2$ con una incertidumbre de $\pm 0,45 \text{ Bq/cm}^2$; para la evaluación por método indirecto se detectó como zona contaminada únicamente la tapa del contenedor con una actividad de $141,26 \text{ Bq/cm}^2$ con una incertidumbre de $\pm 31,69 \text{ Bq/cm}^2$.

Asimismo se realizó la calibración del detector ocupado para esta práctica el día 11 de marzo de 2020, marca Berthold modelo LB124 SCINT, obteniendo como resultado para la fuente patrón alfa ^{241}Am una eficiencia de 38,4% con una incertidumbre de $\pm 8,8\%$, para la fuente patrón beta ^{36}Cl una eficiencia de 54,3% con una incertidumbre de $\pm 8,8\%$, y para la fuente patrón ^{129}I una eficiencia de 8,2% con una incertidumbre de $\pm 12,2\%$.

También se calcularon los valores de los factores de calibración utilizados para ambos métodos para el radionúclido conocido de ^{131}I , los resultados para el método directo fue de $0,02 \text{ s} \cdot \text{Bq/cm}^2$; para el método indirecto se obtuvo para el área de la tapa $0,52 \text{ s} \cdot \text{Bq/cm}^2$, y para el área lateral al observarse que los valores medidos eran fondo radiológico se determinó no efectuar los cálculos correspondiente.

Además, se siguieron correctamente con las indicaciones establecidas en la normativa internacional para la evaluación de la contaminación superficial y se elaboró un instructivo para los usuarios finales con la metodología a seguir para evaluar la contaminación superficial según ISO 7503:2016, ver anexo 2.

XII. Recomendaciones

Se le recomienda al usuario final siempre tomar en cuenta las medidas de protección radiológicas que son establecidos por OIEA para la realización de las prácticas de la evaluación de contaminación superficial ya sea por método directo o indirecto, las cuales son:

1. Utilizar instrumentos de protección (chaleco plomado, gafas plomadas, guantes, protector de tiroides, dosímetros personales, etc.)
2. Utilizar detectores de contaminación superficial cuyo certificado de calibración se encuentre vigente.
3. Recordar tomar siempre las mediciones de fondo radiológico antes de efectuar las lecturas en la zona supuestamente contaminada.
4. Se debe de tener conocimiento del factor de calibración antes de efectuar las mediciones en las áreas que se consideran contaminadas.
5. Cuando se utiliza la metodología de frotis, el área de la ventana del detector debe ser mayor que el área del material con el que se realizó el frotis.

XIII. Bibliografía

- Cambell, J. R., & Ross, R. C. (1995). V. DETECCIÓN Y MEDIDA DE LA RADIACIÓN. En J. R. ROSS, *LAS RADICACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADICACIONES NUCLEARES*. México: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>.
- Curso de Supervisores de Instalaciones radiactivas (IR)*. (2013). Obtenido de Módulo Básico IR-SP-BA-TX-T05: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1173720303_1572009113416.pdf
- IEC, I. E. (2002). *Radiation Protection Instrumentation - Alpha, Beta and Alpha/Beta (Beta Energy >60 keV) Contamination Meters and Monitors*.
- ISO, I. O. (2016). *ISO 7503-1 Measurement of radioactivity — Measurement and evaluation of surface contamination — Part 1: General principles*. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyright office.
- ISO, I. O. (2016). *ISO 7503-2 Measurement of radioactivity - Measurement and evaluation of surface contamination - Part 2: Test method using wipe-test samples*. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyright office.
- ISO, I. O. (2016). *ISO 7503-3 Measurement of radioactivity — Measurement and evaluation of surface contamination — Part 3: Apparatus calibration*. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyright office.
- ISO, I. O. (2016). *ISO 8769 Reference sources — Calibration of surface contamination monitors — Alpha-, beta- and photon emitters*. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyright office.
- OIEA, O. I. (2016). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*. Viena, Austria: OIEA.
- OIEA, O. I. (2018). *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos*. Viena, Austria: OIEA, 2019.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

XIV. Anexos

Anexo 1. Certificado de calibración del monitor de contaminación superficial utilizado.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Código: VR-LCD-FT-14
Versión: 01
Emisión: 2020-03-02
Página 1/4

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
DOSIMÉTRICA
LAF-RAM

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
NIC/2020/MC/04

LA CALIBRACIÓN DE ESTE INSTRUMENTO ES VÁLIDA EN LAS CONDICIONES
ESPECIFICADAS EN ESTE CERTIFICADO

Es prohibido cualquier tipo de copia o divulgación a terceros de este documento, solo con la autorización del Laboratorio es posible reproducirlo

¡A la libertad por la Universidad!

Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100 metros al Oeste.
Cod. Postal 663 - Managua, Nicaragua | Telf.: 2278 6764, 2278 6769 Ext 5175 / Telefax: 22774943 | www.unan.edu.ni

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA (LAF-RAM)



Código: VR-LCD-FT-14
Versión: 01
Emisión: 2020-03-02
Página 2/4

LCD-LAF-RAM

1. INSTITUCIÓN

Razón Social: Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM)
Dirección: Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100m al
Representante legal: MSc. Marlon Díaz Zúniga
Ciudad: Managua
Departamento: Managua
Fecha de recepción: 2020-03-06
Fecha de Calibración: 2020-03-11
Fecha de emisión: 2020-03-12

2. ESPECIFICACIONES DEL INSTRUMENTO

Tipo: Monitor de Contaminación Superficial
Fabricante: BERTHOLD TECHNOLOGIES
Modelo: LB 124 SCINT-D
Serie: 20-1058
Orden de servicio No. LCD-MC-MGA09-04-2020

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Método de comparación de las indicaciones del instrumento con los valores convencionalmente verdaderos de la tasa de emisión superficial de las fuentes planas de referencia de 10 x 10 cm² de área, según la norma ISO 7503-3 (2016) y al reporte técnico No. 16 del OIEA. Se simula una fuente semi-infinita siguiendo las recomendaciones del reporte CIRM 6 de la NPL. La ventana del detector es de 170 cm² de área y se posicionó a 3 mm de altura en las 9 posiciones contiguas.

4. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Fondo medido [cps]			
¹²⁷ Cs	4,92±0,08	¹²⁹ I	4,92±0,08
³⁶ Cl	4,92±0,08	²³⁸ Pu	4,92±0,08
¹⁴ C	4,92±0,08	²⁴¹ Am-γ	4,92±0,08
²⁴¹ Am-α	0,10±0,01	⁵⁷ Co	4,92±0,08
⁹⁰ Sr	4,92±0,08	⁹⁹ Tc	4,92±0,08

¡A la libertad por la Universidad!

Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100 metros al Oeste.
Cod. Postal 663 - Managua, Nicaragua | Telf: 2278 6764, 2278 6769 Ext 5175 / Telefax: 22774943 | www.unan.edu.ni

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Código: VR-LCD-FT-14
Versión: 01
Emisión: 2020-03-02

Página 3/4

Fuentes-Codigo-Tipo	Tasa de Emisión Superficial [1/s]	Valor Medido [cps]	Eficiencia del Detector	Incertidumbre $\pm U_E$ [%]
¹³⁷ Cs-AI-8914- γ	3915,7	69,9	1,1%	9,7
³⁶ Cl-AI-8953- β	1700,0	1570,3	54,3%	8,8
¹⁴ C-AI-8954- β	1339,4	410,8	18,0%	8,8
²⁴¹ Am-AI-8956- α	1511,7	987,9	38,4%	10,5
⁹⁰ Sr-AI-8952- β	3765,5	3398,9	53,1%	8,8
¹²⁹ I-AI-8911- γ	9300,0	1297,5	8,2%	12,2
²³⁸ Pu-AI-8912- γ	2736,7	549,5	11,8%	11,5
²⁴¹ Am-AI-8910- γ	4677,3	288,1	3,6%	10,2
⁵⁷ Co-AI-8913- γ	697,5	14,8	1,2%	9,2
⁹⁹ Tc-AI-8955- β	1340,0	1092,4	48,0%	8,8

5. CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

5.1 Condiciones ambientales

Temperatura[°C]: 19.8

Presión Atmosférica [mbar]: 993

Humedad relativa [%]: 57.0

5.2 Geometría de Calibración

Simulación de fuente semi-infinita, utilizando un set de 10 fuentes planas de (10 x10) cm² que emiten radiación α , β y γ , la ventana sensible del detector calibrado es de 170 cm².

5.3 Punto de referencia

Distancia fuente - ventana del detector 3mm

6. INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida de la medición aquí declarada es la incertidumbre estándar multiplicada por el factor de cobertura $k=2$, para un nivel de confianza del 95%, asumiendo una distribución t-Student con n_{eff} grados de libertad.

La incertidumbre estándar fue determinada por medio de la Guía para la Expresión de las Incertidumbres en las mediciones GUM ISO 2008 (Versión del Centro Español de metrología, CEM) y NPL reporte CIRM 6.

7. TRAZABILIDAD

Las fuentes patrones alfa y beta fueron calibradas en el período 28/09/2016-17/10/2016 por Deutschen Kalibrierdienst (DKD), trazable al laboratorio primario Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) de Alemania. Las fuentes patrones gamma fueron calibradas en el período 27/02/2017-18/04/2017 por Atomic Weapons Establishment (AWE), trazable al laboratorio primario National Physical Laboratory (NPL) del Reino Unido.

¡A la libertad por la Universidad!

Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100 metros al Oeste.
Cod. Postal 663 - Managua, Nicaragua | Telf.: 2278 6764, 2278 6769 Ext 5175 / Telefax: 22774943 | www.unan.edu.ni

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Código: VR-LCD-FT-14
Versión: 01
Emisión: 2020-03-02

Página 4/4

8. INFORMACIÓN ADICIONAL

Se recomienda una nueva calibración cada año.

MSc. Fredy Somarriba Vanegas
Resp. de LCD / LAF-RAM

MSc. Norma Roas Zúniga
Directora del LAF-RAM

Lic. Joselin Meza
Técnico LCD / LAF-RAM

Última Línea

¡A la libertad por la Universidad!

Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100 metros al Oeste.
Cod. Postal 663 - Managua, Nicaragua | Telf.: 2278 6764, 2278 6769 Ext 5175 / Telefax: 22774943 | www.unan.edu.ni

NOTA: La divulgación de este documento fue autorizado por el laboratorio LCD/LAF-RAM (UNAN-Managua).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

Anexo 2. Instructivo para evaluar la contaminación superficial



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 1 de 13

INSTRUCTIVO PARA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL SEGÚN ISO 7503:2016

¡A la libertad por la Universidad!

Recinto Universitario "Rubén Darío", de la biblioteca central Salomón de la Selva 100 metros al Oeste.
Cod. Postal 663 - Managua, Nicaragua | Telf.: 2278 6764, 2278 6769 Ext 5175 / Telefax: 22774943 |
www.unan.edu.ni

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 2 de 13

Contenido

OBJETIVO	3
DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES.....	3
Factor de calibración en términos de actividad.....	4
Evaluación de la contaminación superficial por método directo.....	6
Evaluación de la contaminación superficial por método indirecto.....	7
RECOMENDACIONES	9
REFERENCIAS NORMATIVAS Y BIBLIOGRAFÍA	10
ANEXO	11

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 3 de 13

OBJETIVO

Establecer los pasos a seguir para realizar los cálculos de la actividad superficial por los métodos establecido en la Norma ISO 7503:2016.

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

La calibración de los monitores de contaminación superficial se realiza en el laboratorio de calibración dosimétrico (LCD) del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) con ayuda de un set de diez fuentes planas patrones que emiten radiación alfa (α), beta (β) y gamma (γ) las cuales fueron diseñadas según la norma ISO 8769, las mismas permiten caracterizar la respuesta del detector en términos de tasa de emisión superficial en un amplio rango de energías; también se utiliza un banco de calibración diseñado según lo indicado en la norma ISO 7503-3:2016.

En el certificado de calibración, emitido por el LCD al usuario final, se muestra la eficiencia del instrumento ε en función de tasa de emisión superficial [$cps = s^{-1}$], debido a que nuestras fuentes patrones están calibradas en términos de tasa de emisión superficial; además de la incertidumbre de cada valor. Pero el laboratorio no es responsable de realizar los cálculos de las variables necesarias para evaluar la contaminación superficial [Bq/cm^2].

Por lo tanto, el usuario final una vez que ya se conoce los valores de ε se puede proceder a calcular el factor de calibración apropiado, según el método a utilizar, para poder saber la actividad de la zona que se considera contaminada y determinar si se encuentra por encima de los límites establecidos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (estos datos se encuentra en el Reglamento para el Transporte Seguro de Material Radioactivo de la OIEA), a continuación se mencionan las ecuaciones de trabajo a utilizar.

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

Factor de calibración en términos de actividad

Para calcular el factor de calibración $C(A)$ $\left[Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1} \right]$ primeramente hay que identificar si se va a evaluar una contaminación en presencia de un radionúclido n o la mezcla de distintos radionúclidos m , además de tomar en cuenta la metodología a seguir para evaluar la contaminación superficial.

Para el método directo con la presencia de un solo radionúclido se utiliza la ecuación de trabajo que se encuentra en la norma ISO 7503-3:2016 Anexo A.6 *Cálculo del factor de calibración de actividad y respuesta del instrumento de actividad*, la cual es:

$$C(A)_n = \frac{1}{S \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})} \quad Ec. 1$$

Donde:

$C(A)_n$: Factor de calibración de la actividad de método directo para el radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2} / s^{-1}$.

$\varepsilon_{i,j}$: Eficiencia de detección para una energía i y un tipo de radiación j . (información dada en el certificado de calibración del monitor de contaminación superficial).

S : Área de la ventana del detector, en cm^2 .

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j .

$E_{i,j}^{-1}$: Eficiencia de la fuente de calibración para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (radiación alfa o beta o gamma).

Para un ejemplo del cálculo del factor de calibración $C(A)_n$ se puede consultar el que se encuentra en la ISO 7503-3:2016 Anexo B.6

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 5 de 13

En el caso de seguir el método indirecto se utiliza la ecuación que se presenta en el Anexo D.5 *Factor de calibración del método indirecto para la evaluación de contaminaciones superficiales* de la norma ISO 7503-3:2016:

$$C(A)_n^{ind} = \frac{1}{S_w \cdot \varepsilon_w \cdot \sum_{i,j} (\varepsilon_{i,j} \cdot \eta_{i,j} \cdot E_{i,j}^{-1})} \quad Ec. 2$$

Donde:

S_w : Área de superficie por donde se pasó el frotis, en cm^2 .

ε_w : Eficiencia de la remoción de actividad.

$\varepsilon_{i,j}$: Eficiencia de detección para una energía i y un tipo de radiación j .

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j (alfa, beta o fotones).

$E_{i,j}^{-1}$: Eficiencia de la fuente de calibración para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (radiación alfa o beta o gamma).

Para las situaciones en donde la zona se encuentre contaminada por una mezcla de radionúclidos utilizamos para cuando se pone en práctica el método directo la ecuación que se presenta en la norma ISO 7503-3:2016 Anexo C.2.3 *Factor de calibración para la evaluación de la contaminación superficial de una mezcla de radionúclidos*:

$$C(A)_m = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{f_n}{C(A)_n}} \quad Ec. 3$$

Donde:

$C(A)_m$: Factor de calibración dado para una mezcla de m con una contribución conocida de la mezcla, en $Bq \cdot cm^{-2}/s^{-1}$.

f_n : fracción de radionúclido n en la mezcla de radionúclidos.

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 6 de 13

$C(A)_n$: Factor de calibración de la actividad de método directo para el radionúclido n , en $Bq \cdot cm^{-2}/s^{-1}$.

Y en el caso del método indirecto se utiliza lo planteado en ISO7503-3:2016 Anexo D.6 *Factor de calibración del método indirecto para la evaluación de la contaminación superficial de una mezcla de radionúclidos*:

$$C(A)_m^{ind} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{f_n}{C(A)_n^{ind}}} \quad Ec. 4$$

Donde:

$C(A)_m^{ind}$: es el factor de calibración para una mezcla de radionúclidos dada m con una contribución de radionúclidos conocida a la mezcla y para un área de fuente de calibración igual al área del material de la frota, en $Bq \cdot cm^{-2}/s^{-1}$.

$C(A)_n^{ind}$: es el factor de calibración del método indirecto para un radionúclido n dado y para un área de fuente de calibración igual al área del material de la frota, en $Bq \cdot cm^{-2}/s^{-1}$.

f_n : fracción de radionúclido n en la mezcla de radionúclidos.

En el Anexo B.6.2 de la normativa que se está mencionando anteriormente se encuentra un ejemplo del cálculo del factor de calibración, así como también la estructura de la tabla de trabajo a utilizar para ingresar los datos de interés.

Evaluación de la contaminación superficial por método directo

El método directo es el mejor acceso para la evaluación de contaminación ya que puede ser utilizado para determinar la radiación que se está emitiendo en una superficie lisa de interés. El procedimiento a seguir se encuentra en la norma ISO 7503-1:2016, dentro de esta norma se encuentra la ecuación de trabajo, se explica en el capítulo 9, la cual se expresa como:

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 7 de 13

$$A_s = C(A) \cdot (\rho_g - \rho_0) = \left(\frac{P}{\varepsilon \cdot S_p} \right) \cdot (\rho_g - \rho_0) \quad Ec. 5$$

Donde:

A_s : Actividad por unidad de área de contaminación fija y removible, en $Bq \cdot cm^{-2}$.

$C(A)$: Factor de calibración de la actividad, en $Bq \cdot cm^{-2}/s^{-1}$.

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo del fondo, en s^{-1} .

ε : Eficiencia del instrumento.

P : Relación entre la tasa de generación de partículas o fotones (actividad) y la tasa de emisión desde la superficie.

S_p : Área efectiva de la ventana del detector, en cm^2 .

$\eta_{i,j}$: Intensidad de emisión para una región de energía i y una radiación de tipo j (alfa, beta o fotones).

$E_{i,j}^{-1}$: Eficiencia de la fuente de calibración para una determinada energía o región energética i y para el tipo de radiación j (radiación alfa o beta o gamma).

NOTA: Los valores de la intensidad de emisión $\eta_{i,j}$ y el recíproco del factor de emergencia $E_{i,j}^{-1}$ ya se encuentran tabuladas en la normativa internacional. Ver Anexo, Tabla 1 y 2.

Para observar un ejemplo de cálculo consultar la norma ISO 7503-3:2016 Anexo E.

Evaluación de la contaminación superficial por método indirecto

Esta metodología es aplicable cuando las superficies no son fácilmente accesibles debido a una ubicación, cuando los campos de radiación interferentes afectan negativamente a

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 8 de 13

los monitores de contaminación o cuando no se dispone de métodos de medición directa con instrumentación estándar, por ejemplo, tritio.

Los pasos a seguir para la realización de esta metodología se explican en la norma ISO7503-2:2016, en este método se utiliza lo que conocemos como frotis y las orientaciones para el levantamiento de la frota son:

- ✓ El nivel de radiación de fondo en del área de medición debe ser bajo y constante.
- ✓ Antes de medir la muestra de frotis debe medirse el fondo del lugar
- ✓ La tasa de conteos de fondo se debe verificar periódicamente para detectar posibles cambios en los niveles de fondo.
- ✓ El instrumento de medición a emplear debe estar calibrado apropiadamente y sujeto a un programa de control periódico del estado de la calibración.
- ✓ Deben estar disponibles los factores de calibración del instrumento para los radionúclidos a medir.
- ✓ La geometría de medición empleada debe ser idénticas a la utilizada durante calibración del instrumento. Para los instrumentos portátiles, deben ser lo más cercana posible.
- ✓ El área sensible del detector deberá ser más grande que la muestra de frotis.
- ✓ Si se debe medir una muestra de frotis donde coexistan emisores alfa o beta, se requiere usar contadores que permitan la discriminación de pulsos alfa-beta.

Para el cálculo de la actividad por unidad de área se utiliza la ecuación de la norma ISO 7503-2:2016 el cual se explica en el capítulo 13 *Evaluación de datos de medición*, siendo:

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 9 de 13

$$a_r = C(A)^{ind} \cdot (\rho_g - \rho_0) \quad Ec.7$$

Donde:

a_r : Actividad por unidad de área removida mediante la prueba de frotis, en Bq/cm^2 .

$C(A)^{ind}$: Factor de calibración de actividad, en $(Bq \cdot cm^{-2}) / s^{-1}$.

ρ_g : Tasa de conteo brutas, en s^{-1} .

ρ_0 : Tasa de conteo de fondo, en s^{-1} .

NOTA: Los valores de la intensidad de emisión $\eta_{i,j}$ y el recíproco del factor de emergencia $E_{i,j}^{-1}$ ya se encuentran tabuladas en la normativa internacional. Ver Anexo, Tabla 1 y 3.

Para un ejemplo del cálculo de la actividad de remoción consultar Anexo F de la norma ISO7503-3:2016.

RECOMENDACIONES

1. Renovar vigencia de calibración de los monitores de contaminación superficial cada año.
2. Al momento de realizar la medición de en las zonas de interés recordar siempre utilizar los materiales de protección radiológica.
3. Recordar siempre medir primeramente el fondo radiológico del área de interés.
4. Si se llega a realizar el procedimiento de frotis, ejercer la misma presión utilizada en el primer levantamiento de muestra para todos los casos.

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 10 de 13

5. Evitar el contacto directo de la zona contaminada con la ventana activa del detector para así evitar contaminación del instrumento.

Si se tiene alguna duda o se cree necesaria una asesoría contactarse con el laboratorio.

REFERENCIAS NORMATIVAS Y BIBLIOGRAFÍA

International Standard Organization (2016), "ISO 7503-1:2016 Measurement of radioactivity - Measurement and evaluation of surface contamination — Part 1: General principles", Vernier, Geneva, Switzerland.

International Standard Organization (2016), "ISO 7503-2:2016 Measurement of radioactivity — Measurement and evaluation of surface contamination — Part 2: Test method using wipe-test samples", Vernier, Geneva, Switzerland.

International Standard Organization (2016), "ISO 7503-3:2016 Measurement of radioactivity — Measurement and evaluation of surface contamination — Part 3: Apparatus Calibration", Vernier, Geneva, Switzerland.

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 11 de 13

ANEXO

Tabla 1. Datos nucleares $\eta_{i,j}$ para distintos radionúclidos

Radionuclide ¹⁴ C								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$	1,00E+00							
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$								
Radionuclide ⁶⁰ Co								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$		9,99E-01	2,00E-05	1,20E-03			4,15E-07	2,92E-04
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$				2,00E+00	1,10E-04			
Radionuclide ¹³⁷ Cs/ ^{137m} Ba								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$			1,00E+00					9,05E-02
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$			5,80E-06	8,52E-01		6,88E-02		
Radionuclide ¹⁶⁹ Er								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$		1,00E+00			3,02E-05	5,28E-06		
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90-300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$	2,00E-03		1,40E-05		6,98E-06	2,72E-05		
Radionuclide ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
$\eta_{i,j}$			1,00E+00	1,00E+00				1,15E-04
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
$\eta_{i,j}$				1,40E-08		7,47E-05		

NOTA: Valores tomados de la norma ISO 7503-3:2016, Tabla E.3

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 12 de 13

Tabla 1. Continuación

Radionuclide ¹⁸F								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
η_{ij}			9,69E-01					
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
η_{ij}								1,94E+00
Radionuclide ¹²⁵I								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
η_{ij}								
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
η_{ij}		6,67E-02				1,40E+00		
Radionuclide ¹³¹I								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
η_{ij}	2,11E-02	8,00E-02	8,98E-01		3,53E-02	1,13E-02	2,48E-02	4,55E-04
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
η_{ij}		2,61E-02	6,41E-02	9,13E-01		5,42E-02		
Radionuclide ¹⁵³Sm								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
η_{ij}	1,27E-03		9,97E-01		4,75E-01	8,82E-02	6,31E-05	
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
η_{ij}		5,28E-02	3,02E-01	2,06E-03	1,18E-01	6,04E-01		
Radionuclide ^{99m}Tc								
Radiation type j	beta				electron			
Energy interval i in keV	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400
η_{ij}					1,22E-05	1,08E-01	7,75E-04	
Radiation type j	gamma				X			
Energy interval i in keV	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
η_{ij}		1,04E-05	8,91E-01	9,69E-07		7,32E-02		

NOTA: Valores tomados de la norma ISO 7503-3:2016, Tabla E.3

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA D
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
LABORATORIO DE FÍSICA DE RADIACIONES Y METROLOGÍA
(LAF-RAM)



Página: 13 de 13

Tabla 2. Valores conservadores razonables utilizados para el método directo

Radiación tipo j	Alfa	Electrones				fotones			
Región energética i en keV	todos	40 a 70	70 a 140	140 a 400	>400	5 a 15	15 a 90	90 a 300	>300
Eficiencia de la fuente $E_{i,j}^{-1}$	0.05	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.5

NOTA: Datos tomados de la ISO 7503-3:2016, Tabla E.1

Tabla 3. Valores conservadores razonables utilizados para el método indirecto

Radiation type j	Alpha	Electrons				Photons			
Energy region i in keV	all	40 to 70	70 to 140	140 to 400	>400	5 to 15	15 to 90	90 to 300	>300
Source efficiency $1/E_{i,j}^a$	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5
Wiping efficiency ε_w	0,1								

NOTA: Datos tomados de la ISO 7503-3:2016, Tabla F.1

Se prohíbe la reproducción sin autorización del laboratorio.