

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, MANAGUA (UNAN-
Managua)

RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA DE GESTIÓN AMBIENTAL



Tesis de Maestría

**EVALUACIÓN DE DOSIMETRÍA AMBIENTAL EN 6
PUESTOS FRONTERIZOS DEL PAÍS UTILIZANDO
DOSÍMETROS TERMOLUMINISCENTES DE
FEBRERO A DICIEMBRE 2016**

Autora: Norma Alejandra Roas Zúniga

Asesor: MSc. Fredy Israel Somarriba V

Managua, Nicaragua 2016

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia: Mi madre Velia Zúniga Bojorge por ser la persona que me trajo a este mundo, a mi hijo Norman Martínez Roa, mi nieto Elián Alejandro Martínez Solórzano, hermano Cándido Eliseo Zúniga y especialmente a mi esposo Elías Rene Ramírez, todo ellos han sido fundamentales en mi vida, por tanto la han llenado de momentos especiales y por ende aportado a mi crecimiento como persona y profesionalmente.

A la Virgen de Guadalupe que estoy segura en ningún me ha dejado sola sean buenos o difíciles.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todo el personal del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología por todo el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo principalmente a Joselin Meza Martínez, a Edith Natalia González, Ricardo Pérez Zeledón, Andrea Castillo que de una u otra manera contribuyeron a la realización del mismo

A la Empresa EBCO SYSEM S.A. por prestar las condiciones para las mediciones y su anuencia que estas sean publicadas, en especial atención a Zelma Vázquez por su disponibilidad y colaboración incondicional

Un Agradecimiento con mucho cariño y respeto a mi tutor el MSc. Freddy Somarriba por sus orientaciones, revisión, aportes al documento y a la realización de la investigación en su conjunto.

Por último pero no menos importantes a las autoridades de esta Alma Mater por haberme permitido y apoyado para realizar los estudios e incluirme en el Programa de Maestría de Gestión Ambiental.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| I.- INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| III.- ANTECEDENTES | 4 |
| IV.- JUSTIFICACION | 6 |
| V.- OBJETIVOS..... | 7 |
| V.1 Objetivo General | 7 |
| V.2 Objetivos Específicos: | 7 |
| VI.- MARCO TEORICO..... | 8 |
| VI.1 Introducción | 8 |
| VI.2 Magnitudes Dosimétricas | 10 |
| VI.3 Magnitudes de Protección Radiológica..... | 12 |
| VI.4 Magnitud Operacional para la Vigilancia Radiológica Individual | 13 |
| VI.5 Magnitudes para la Vigilancia Radiológica del Lugar de Trabajo | 14 |
| VI.6 Límites de dosis | 16 |
| VI.7 Programas de Vigilancia | 16 |
| VI.7.1 Vigilancia radiológica individual | 17 |
| VI.7.2 Elección del dosímetro personal | 17 |
| VI.7.3 Vigilancia radiológica del lugar trabajo | 19 |
| VI.8 Caracterización de Dosímetros para medir equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$ | 20 |
| VI.8.1 Proceso de Termoluminiscencia | 20 |
| VI.8.2 Dosímetro termoluminiscente y sus características | 22 |
| VI.9 Análisis de Incertidumbre..... | 25 |
| VII. METODOLOGIA | 27 |
| VII.1 Procedimientos técnicos para la calibración del sistema | 27 |
| VII.1.1 Puesta en Cero de Dosímetros Termoluminiscentes | 27 |
| VII.1.2 Calibración del Factor de Dosis Cero de Dosímetros Termoluminiscentes | 27 |
| VII.1.3 Calibración del Factor de Sensibilidad del Lector RADOS TLD Reader 2000 para Nuevos Lotes de Dosímetros Termoluminiscentes | 28 |
| VII.1.4 Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de los Dosímetros Asignados para Calibración del Lector | 29 |
| VII.1.5 Calibración del Factor de Sensibilidad del Irradiador Local de ^{90}Sr | 29 |
| VII.1.6 Rutinaria del Factor de Sensibilidad del Lector RADOS TLD Reader 2000 | 30 |
| VII.1.7 Irradiación de Dosímetros en el Irradiador Local de ^{90}Sr | 31 |

| | |
|---|----|
| <i>VII.1.8 Calibración del Factor del Sistema</i> | 32 |
| <i>VII.1.9 Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de Nuevos Dosímetros</i> | 32 |
| <i>VII.1.10 Pruebas de Pérdida de Información (Fading) de un lote de dosímetros</i> | 33 |
| <i>VII.1.11 Determinación del Límite de Detección de un Sistema de Dosimetría Termoluminiscente</i> | 34 |
| VII.1.12 Realizar las Pruebas de Dependencia Angular | 34 |
| VII.2. Proceso de medición | 36 |
| VIII.- RESULTADOS | 38 |
| VIII.1 Calibración del sistema | 38 |
| VIII.2 Mediciones en los 6 sitios | 44 |
| IX.- CONCLUSIONES | 50 |
| X.- RECOMENDACIONES | 51 |
| XI.- BIBLIOGRAFÍA | 52 |
| XII.-ANEXO | 53 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Relación de magnitudes con fines de protección radiológica | 10 |
| Figura 2. Esquema del mecanismo de la Termoluminiscencia | 21 |
| Figura 3 Principio de medición del lector de TLD RADOS | 21 |
| Figura No. 4 Muestra la Distribución del sitio en general | 36 |
| Figura No. 5 Posicionamiento de los dosímetros en el sitio | 37 |
| Gráfica No.1 Dosis Equivalente Personal máxima acumulada en cada uno de los sitios en todo el periodo de medición | 47 |
| Gráfica No.2 Dosis Equivalente Personal mínima acumulada en todo el periodo de medición en cada sitio..... | 47 |
| Gráfica No.3 Muestra resumen de la Dosis Equivalente Ambiental acumulada en todo el periodo de medición por cada sitio | 48 |
| Gráfica No.4 Muestra resumen de la Dosis Equivalente Ambiental acumulada por cada periodo de medición y por cada sitio | 49 |
| Gráfica No. 5 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio A..... | 66 |
| Gráfica No. 6 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio B | 66 |
| Gráfica No. 7 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio C | 67 |
| Gráfica No. 8 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio D..... | 67 |
| Gráfica No. 9 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio E | 68 |
| Gráfica No.10 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio F | 68 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| CUADRO 1 FACTORES DE PONDERACIÓN DE LA RADIACIÓN..... | 11 |
| CUADRO 2. RELACIONES Q–L ESPECIFICADAS | 12 |
| CUADRO 3 RESUMEN DE PRUEBAS PARA DOSÍMETROS INDIVIDUALES | 24 |
| | |
| Tabla No. 1 Muestra los valores obtenidos para el factor de dosis cero | 38 |
| Tabla No. 2 Muestra los valores obtenidos para el factor de sensibilidad individual. | 40 |
| Tabla No. 3 muestra el Factor del irradiador de mesa local..... | 41 |
| Tabla No. 4 Verificación del factor de irradiador de mesa con la fuente de cesio..... | 41 |
| Tabla No. 5 Obtención del Reader para la magnitud ambiental..... | 41 |
| Tabla No. 6 Muestra la obtención del Fading o pérdida de información del dosímetro | 42 |
| Tabla No. 7 Muestra la obtención de la homogeneidad del lote de dosímetros | 43 |
| Tabla No. 8 Muestra la codificación que se utilizó para representar cada uno de los sitios | 44 |
| Tabla No. 9 Resumen de todos los periodos y la dosis equivalente personal acumulada por usuario | 45 |
| Tabla No. 10 Resumen de la Dosis Equivalente Ambiental $H^*(10)$ por periodo y acumulada obtenida en cada uno de los sitios | 48 |
| Tabla No. 11 Clasificación de Componentes de la incertidumbre | 54 |
| Tabla No. 12 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 1 y 2 (febrero – Abril) | 61 |
| Tabla No. 13 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 3 y 4 (Abril – junio) | 62 |
| Tabla No. 14 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 5 y 6 (junio – Agosto) | 63 |
| Tabla No. 15 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 7 y 8 (Agosto – Octubre).... | 64 |
| Tabla No. 16 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 9 y 10 (octubre–Diciembre)65 | |
| Tabla No. 17 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 1 de febrero a marzo..... | 69 |
| Tabla No. 18 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 2 de marzo a abril..... | 70 |
| Tabla No. 19 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 3 de Abril a Mayo | 71 |
| Tabla No. 20 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 4 de Mayo a Junio | 72 |
| Tabla No. 21 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 5 de Junio a Julio..... | 73 |
| Tabla No. 22 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 6 de Julio a agosto | 74 |
| Tabla No. 23 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 7 de agosto a septiembre | 75 |
| Tabla No. 24 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 8 de Septiembre a octubre | 76 |
| Tabla No. 25 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 9 de octubre a noviembre | 77 |
| Tabla No. 26 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 10 de noviembre a diciembre | 78 |

RESUMEN

Como es de nuestro conocimiento los seres humanos estamos expuestos a radiación ionizante desde siempre, forma parte de nuestra vida cotidiana ya que está presente en los componentes de la tierra y en los rayos cósmicos, por otro lado también hay exposición a las mismas debido a las distintas prácticas desarrolladas por el hombre como industrias, medicina actividades académicas e investigación donde se utilizan ya sea equipos generadores de rayos X o fuentes radiactivas, por otro lado también estamos conscientes del riesgo a la exposición a las radiaciones ionizantes, lo cual hace necesario el establecimiento de medidas que garanticen la protección de los trabajadores expuestos y el público en general.

Lo anteriormente expuesto implica que a nivel mundial se cuenta con leyes y reglamentos para la utilización de las mismas, Nicaragua no es la excepción y cuenta con su marco legal el cual sustenta el uso pacífico de las radiaciones ionizantes por medio del Reglamento Técnico de Protección Contra las Radiaciones Ionizantes, en su última revisión de 27 de junio de 2011, el cual es instrumento de apoyo de la Ley No. 156 Sobre Radiaciones Ionizantes.

En el 2015 se introduce una nueva tecnología al país producto de un proyecto de Gobierno el cual consiste en colocar escáner con energías de 4 MeV en los puestos fronterizos de mayor relevancia a nivel nacional, practica no desarrollada anteriormente.

Por tanto debido a que no se tenía conocimiento de cuanta es la contribución de la dosis alrededor de dichos escáner tanto para el personal como para el medio ambiente y público en general, es que se decide calibrar el servicio de dosimetría termoluminiscente del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) en la magnitud correspondiente, dosis equivalente ambiental $H^*(10)$. Las mediciones $H^*(10)$ se realizaron en siete puntos estratégicos en cada uno de los seis sitios donde fueron instalados los escáner en el periodo comprendido de febrero a diciembre del 2016, de igual manera se evaluó la dosis equivalente personal $H_p(10)$ para el mismo periodo, es importante mencionar que el servicio de dosimetría para la magnitud $H_p(10)$ ya estaba calibrado, debido a que el LAF-RAM brinda este servicio a los diferentes usuarios que trabajan con radiaciones ionizantes desde hace 23 años, por tanto solo se realizó la re-calibración del sistema para dicha magnitud, dosis equivalente personal.

En el presente trabajo se describe la metodología utilizada por el LAF-RAM de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la UNAN-Managua para calibrar su sistema dosimétrico para el monitoreo ambiental en función la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, según las recomendaciones establecidas en las recomendación ISO 4037-1, ISO 4037-2, ISO 4037-3 y IEC 1066 el cual consiste en un lector termoluminiscente TLD RADOS 2000, un lote de dosímetros, con material de los Pellets TLD MCP-N (LiF: Mg, Cu, P), un irradiador de mesa RadPro IR-200 (^{90}Sr), Software RADOS, Slides y porta slides, Pinza de vacío, de igual

manera se utilizó el Banco de Calibración dosimétrico el cual consta de fuente patrón de $^{137}\text{Cesio}$.

Se realizó la calibración del sistema del Servicio de Dosimetría Termoluminiscentes y se caracterizó un lote de 100 dosímetros para la medición de la magnitud dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, obteniéndose los factores de: Cero dosis, Sensibilidad individual, calibración del irradiador de mesa local respecto al banco del calibración, pérdida de información (fading) y homogeneidad del lote, se hizo el cálculo de la incertidumbre para todo el sistema obteniendo un valor de 30% con un nivel de confianza del 95% ($k=2$). Según la bibliografía estos sistemas deben estar calibrados para que la respuesta este en un rango de (-33% hasta +50%).

Se realizaron mediciones en los puestos de trabajo alrededor de los scanner en los puestos fronterizos de: Peñas Blancas (A), Puerto Corinto (B), Las manos (C), El Espino (D), Guasaule (E), San Pancho (F), durante el período comprendido entre febrero a diciembre de 2016. Se evaluó la dosis de 59 usuarios en los seis sitios de manera mensual esto implica que se realizaron 590 lecturas solamente para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y 420 en lo que respecta a dosis equivalente ambiental, en total fueron procesados 1010 datos.

La dosis equivalente ambiental acumulada esta alrededor de 1mSv en todo el periodo de evaluación, siendo en Peñas Blancas (A) donde se obtuvo la mayor dosis acumulado de 1.10 mSv y la segunda mayor en el Guasaule (E) con un valor de 1.01mSv. Según las normas nacionales la restricción de dosis es de 5mSv al año, esto implica que los valores obtenidos están por debajo de dicho límite.

En lo que respecta a la dosimetría personal en el sitio E se dio la mayor acumulación de dosis equivalente personal en todo el transcurso de las mediciones (1.99mSv), la segunda mayor dosis equivalente personal acumulada fue en el sitio C de 1.87mSv por los portadores declarados como E13 y C2 respectivamente. Es importante destacar que en el caso del portador C2 las dosis fueron recibidas de manera constante en el transcurso del periodo, sin embargo para el portador E13 se dio un incremento significativo de la dosis en el último periodo de la medición.

I.- INTRODUCCIÓN

Las radiaciones ionizantes de origen natural están presentes en la naturaleza que nos rodea. Además de la radiación cósmica, se producen radiaciones ionizantes como consecuencia de la presencia de materiales radiactivos existentes en la corteza terrestre. Tres cuartas partes de la radiactividad que hay en el medio ambiente proceden de los elementos naturales.

No todos los lugares de la tierra tienen el mismo nivel de radiactividad natural. En algunas zonas de la India, por ejemplo, la radiactividad es 10 veces mayor que la media europea. La razón está en las arenas de la India, que tienen torio, un elemento radiactivo natural. Los Alpes y otras cordilleras también tienen un nivel de radiactividad relativamente elevado, debido a la composición de sus granitos. Además de esta variabilidad geográfica, determinadas actividades como, por ejemplo, la fabricación de cerámica, la producción de fertilizantes, o la extracción de gas y de petróleo, pueden aumentar las dosis debidas a estos radionúclidos de origen natural, no sólo para los trabajadores sino también para el resto de ciudadanos.

Por otro lado tenemos la exposición ocupacional a la radiación ionizante la cual puede ocurrir en una diversidad de industrias, instituciones médicas, establecimientos de enseñanza e investigación e instalaciones del ciclo del combustible nuclear. Por tanto la protección radiológica adecuada de los trabajadores es esencial para el uso seguro y aceptable de la radiación ionizante, los materiales radiactivos y la energía nuclear.

En el contexto anterior es que se hace relevante un marco legal que sustente el uso pacífico de las radiaciones ionizantes por tanto el Reglamento Técnico de Protección Contra las Radiaciones Ionizantes, en su última revisión de 27 de junio de 2011, es el instrumento de apoyo de la Ley No. 156 Sobre Radiaciones Ionizantes en el cual se recogen las recomendaciones de 1990 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP-60), las Normas Básicas de Seguridad del OIEA, Requisitos de Seguridad Generales, Parte 3 N° GSR Part.3

En el citado reglamento, los titulares de autorización deberán establecer, conservar y mantener bajo revisión un programa de vigilancia radiológica de los puestos de trabajo, con la supervisión de un experto cualificado y de un encargado de protección radiológica (EPR) si así lo prescribe la autoridad reguladora.

La naturaleza y frecuencia de la vigilancia radiológica de los puestos de trabajo deberá ser suficiente para permitir: La evaluación de las condiciones radiológicas existentes en todos los puestos de trabajo; la evaluación de la exposición en las zonas controladas y en las zonas supervisadas; el examen de la clasificación de las zonas en controladas y supervisadas.

Los programas de vigilancia radiológica de los puestos de trabajo deberán especificar: las magnitudes que han de medirse; donde y cuando han de efectuarse las mediciones y con qué frecuencia; los métodos y procedimientos de medición más apropiados; los niveles de referencia y las medidas a adoptar, si son rebasados.

Por tanto para cumplir con la reglamentación nacional se debe contar con un sistema dosimétrico para la Vigilancia Radiológica Ambiental lo cual exige que los mismos cumplan con dos características fundamentales:

- Alta reproducibilidad en el rango de bajas dosis.
- Estabilidad del Sistema Dosimétrico completo durante un período prolongado (1-12 meses). En ese sentido los métodos dosimétricos por Termoluminiscencia han demostrado un comportamiento adecuado en relación con ambas características.

Por las razones antes mencionadas se realizó un estudio considerando la medición de la dosis equivalente ambiental en seis puestos fronterizos del país utilizando dosímetros termoluminiscentes MCP-N (LiF:Mg,Cu,P), más especificaciones de los mismos en anexo II, en dichos puestos se cuenta con escáner (equipos generadores de rayos X) con una energía de 4MeV para supervisar los contenedores de salen o ingresan al país. Es importante mencionar que esta nueva tecnología se ha adquirido recientemente hace aproximadamente un año.

En el presente trabajo se describe la metodología utilizada por el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) del Facultad de Ciencias e Ingenierías de la UNAN-Managua para calibrar su sistema dosimétrico para el monitoreo ambiental en función la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, según la recomendación ISO 4037-1, ISO 4037-2, ISO 4037-3, IEC 1066 y ICRU 47 el resultado de la utilización de dichos dosímetros para realización de las mediciones alrededor de los scanner en los puestos fronterizos de: Peñas Blancas (A), Puerto Corinto (B), Las manos (C), El Espino (D), Guasaule (E), San Pancho (F).

II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La exposición a las radiaciones ionizantes puede producirse como consecuencia de diversas actividades llevadas a cabo por el hombre, incluido el trabajo asociado a las diferentes etapas del ciclo del combustible nuclear, el uso de fuentes radiactivas y equipos generadores rayos X en medicina, la investigación científica, la educación, la agricultura y la industria y las ocupaciones que implican el manejo de materiales que contienen concentraciones elevadas de radionúclidos de origen natural. Para controlar esta exposición es necesario poder evaluar la magnitud de la dosis según la actividad desarrollada.

Por otro lado en Nicaragua, hasta hace un año se había trabajado con equipos que contienen fuentes radiactivas de ^{60}Co , ^{92}Ir , ^{137}Cs , entre otros y equipos generadores de rayos X con energías de 20 hasta 400kV especialmente en el campo de la medicina, no así en las fronteras, en el año 2015 el Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional con el objetivo de mantener limpias nuestras fronteras de contrabando y estupefacientes, se llevó a cabo el proyecto de colocar en los puestos fronterizos más relevantes un escáner o equipo generador de rayos X con una energía de 4Mev, esta práctica nunca antes fue desarrollada en el país.

Debido a que no se tenía conocimiento de cuanta es la contribución de la dosis alrededor de dichos escáner tanto para el personal como para el medio ambiente y público en general, es que se decide calibrar el servicio de dosimetría termoluminiscente del LAF-RAM en la magnitud correspondiente, dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ y realizar mediciones de la misma en siete puntos estratégicos en cada uno de los sitios donde fueron instalados los mismos en el periodo comprendido de febrero a diciembre del 2016

III.- ANTECEDENTES

La proliferación de fuentes artificiales de radiación en el ambiente, ha estimulado el interés en, y creado la necesidad de, el monitoreo de los niveles de exposición de radiación en el ambiente. Este monitoreo debe contemplar el relevamiento de los “valores índices” de dosis equivalente ambiental de suficientes puntos y durante periodos parciales que cubran todo el año.

Para ello se hace necesario las mediciones de fondo natural lo cual debe abarcar distintos puntos que sean representativos del área de interés ya que existen variaciones debido a la estructura geológica y composición del suelo de cada área. Se espera que dicha exposición sea producida solamente por fuentes naturales de radiación. Posteriormente medir la dosis ambiental total y comprobar si hay una contribución debida a la instalación de fuentes artificiales de radiación.

En los últimos años se han llevado a cabo un intenso programa a nivel internacional para conocer los niveles de la radiación natural a la cual la población está expuesta y determinar su posible riesgo. Esto ha sido impulsado en parte por la expansión de la industria y las nuevas tecnologías

Esto ha implicado que en la región también se lleven a cabo estudios de este tipo para mencionar algunos ejemplo en Venezuela se ha determinado los niveles de radiación ambiental utilizando diferentes técnicas incluyendo los dosímetros pasivos y la espectrometría alfa y gamma además del conteo alfa/beta total obteniendo como resultado valores comparables con los reportados en la literatura. En Córdoba, Argentina también se realizó “Mapa Dosimétrico de Radiaciones Ionizantes Ambientales” en el marco del Programa de Investigación y Desarrollo en Gestión Ambiental obteniendo como resultado valores de alrededor de 0,09- 0,15 $\mu\text{Gy/h}$ los que hasta el momento se encuentran dentro valores normales (alrededor de 0.10 $\mu\text{Gy/h}$).

En Costa Rica, en diferentes localidades, se realizó un estudio de la evaluación de la dosis ambiental al aire libre y dentro de residencias utilizando dosímetros termoluminiscentes, encontrando valores por debajo de los límites internacionales.

En Nicaragua en el I Congreso sobre Cáncer y Ciencias Afines (2005), se presentó un trabajo “Estimación del fondo de radiación natural en Managua, utilizando dosímetros TLD (LiF)” por el Lic. López Gonzales del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología de la Universidad Autónoma de Nicaragua, Managua. En el mismo se evaluó la contribución de la componente de radiación gamma originada tanto por la radiación cósmica como por la radiación terrestre debida a materiales de alto peso atómico.

Lo antes mencionado son trabajos que de una u otro manera se relacionan con la presente investigación ya que en este caso además de considerar la radiación de fondo de los sitios se analiza la posible contribución o no que pueda tener el hecho de instalar estos nuevos equipos con una energía de 4MeV, esto implica por tanto considerar la variable en protección y seguridad radiológica que es la evaluación de los puestos de trabajo.

IV.- JUSTIFICACION

Con el objetivo de brindar un servicio eficiente y más ágil al transporte de carga internacional, el Gobierno de Unidad y Reconciliación Nacional a través de la Dirección General de Aduana (DGA) instaló un sistema de escáner en siete puestos fronterizos, donde a diario ingresa una gran cantidad de unidades de transporte de carga procedentes de países de la región. El nuevo sistema de escáner forma parte del modelo de modernización del sistema aduanero de nuestro país, ya que cuenta con una tecnología de punta. Así mismo, el nuevo modelo de inspección garantiza la seguridad sanitaria y posiciona al país como uno de los mejores en la región.

Los modernos equipos de inspección móvil, instalados y operados por la empresa Alvimer Internacional y Cía., garantiza que la mercancía que ingresa y sale de nuestro país cumpla con los parámetros establecidos por la Organización Mundial de Aduanas, esto implica que Nicaragua cuenta con los equipos más modernos del mundo en este ámbito, dando un gran salto tecnológico, por tanto es importante hacer mención que el funcionamiento de los mismos se basa en la emisión de rayos X y placas detectoras que electrónicamente reflejan una imagen en la pantalla que permite que los agentes de la DGA vean el contenido de los vehículos, verificando de manera rápida la mercadería declarada.

En otro contexto el objetivo general de los programas de vigilancia radiológica operacional es la evaluación de las condiciones del lugar de trabajo y de las exposiciones individuales. La evaluación de las dosis a los trabajadores con exposición rutinaria o potencial a fuentes externas de radiación constituye una parte integrante de cualquier programa de protección radiológica y contribuye a asegurar condiciones radiológicas satisfactorias y aceptablemente seguras en el lugar de trabajo.

Según la documentación y las normas una institución debe diseñar un programa de vigilancia radiológica en aquellos lugares donde se realice la vigilancia radiológica individual de los trabajadores, (significa que cada trabajador debe poseer un dosímetro integrador diariamente). Cuando al realizar mediciones de la tasa de dosis equivalente ambiental en el lugar de trabajo estas varíen en un factor superior a diez, como medida debe entregarse un dosímetro adicional de lectura directa y/o un dispositivo de alerta para controlar las dosis.

Por tanto y debido al ingreso de esta nueva tecnología y ya que su principal funcionamiento es por medio de generación de rayos X de alta energía se deben considerar las normativas nacionales e internacionales en estos casos, en este contexto es que se considera la iniciativa de realizar mediciones en 7 puntos diferentes alrededor de los escáner, en seis puestos fronterizos donde están instalados, con el objetivo de obtener datos que nos permita recomendar o no a la empresa encargada el diseño de un programa de vigilancia radiológica.

V.- OBJETIVOS

V.1 Objetivo General

Realizar mediciones de la dosis ambiental y personal en seis puntos fronterizos del país, en donde se utilizan escáner de alta tecnología con energías de 4MeV para visualizar la mercadería que entra y sale a nivel nacional, para compararlas con los límites nacionales e internacionales.

V.2 Objetivos Específicos:

- Describir la metodología utilizada por el servicio de Dosimetría por Termoluminiscencia (TLD) del Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) de la Facultad de Ciencias e Ingenierías de la UNAN-Managua para calibrar su sistema de monitoreo ambiental en función de la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$.
- Caracterización de un lote de dosímetros para la medición de la dosis equivalente ambiental.
- Realizar la dosimetría ambiental y personal individual mediante la utilización de dosímetros Termoluminiscentes suministrado por el servicio de dosimetría del LAF-RAM.
- Evaluar los valores de las dosis ambientales y personales obtenidas y comprar con los límites establecidos.

VI.- MARCO TEORICO

VI.1 Introducción

La radiactividad es un fenómeno natural y las fuentes naturales de radiación son una característica del medio ambiente. Las radiaciones y las sustancias radiactivas tienen muchas aplicaciones beneficiosas, que van desde la generación de electricidad hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Los riesgos asociados a las radiaciones que estas aplicaciones pueden entrañar para los trabajadores y la población y para el medio ambiente deben evaluarse y, de ser necesario, controlarse.

Para ello es preciso que actividades tales como los usos de la radiación con fines médicos, industriales, la explotación de instalaciones nucleares, la producción, el transporte y la utilización de material radiactivo y la gestión de los desechos radiactivos estén sujetas a normas de seguridad.

Por tanto las normas internacionales de seguridad ayudan a los Estados a cumplir sus obligaciones dimanantes de los principios generales del derecho internacional, como las que se relacionan con la protección del medio ambiente. Las mismas también promueven y afirman la confianza en la seguridad, y facilitan el comercio y los intercambios internacionales.

Existe un régimen mundial de seguridad nuclear que es objeto de mejora continua. Las normas de seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que apoyan la aplicación de instrumentos internacionales vinculantes y la creación de infraestructuras nacionales de seguridad, son una piedra angular de este régimen mundial. Las normas de seguridad del OIEA constituyen un instrumento útil para las partes contratantes en la evaluación de su desempeño en virtud de esas convenciones internacionales.

Las normas de seguridad del OIEA, complementadas por convenios internacionales, normas de la industria y requisitos nacionales detallados, forman una base coherente para la protección de las personas y el medio ambiente. Existen también algunos aspectos de la seguridad especiales que se deben evaluar a nivel nacional. Por ejemplo, muchas de las normas de seguridad del OIEA, en particular las que tratan aspectos relativos a la seguridad en la planificación o el diseño, se conciben con el fin de aplicarlas principalmente a nuevas instalaciones y actividades.

El Escaneo de contenedores en las fronteras del país es una nueva practica que utiliza generación de rayos X, esto es de suma relevancia debido a que las tecnologías avanzadas y de inspección no intrusiva, que asocian equipos de alta calidad y servicios eficientes proporcionados por entidades independientes, experimentadas y confiables, pueden considerarse la respuesta más adecuada a las necesidades de los sectores involucrados en los puestos fronterizos tales como:

Autoridades aduaneras, las soluciones de escaneo ayudan a agilizar el proceso de despacho, combatir mejor el fraude y el contrabando, mejorar la seguridad y, al mismo tiempo, optimizar los recursos y la recaudación de ingresos. Además, la inspección no intrusiva puede ayudar a descongestionar las aduanas en los puestos fronterizos.

Autoridades portuarias, los principales beneficios son la descongestión del puerto y un ciclo de carga y descarga de los barcos más rápido.

Autoridades de seguridad nacional, las tecnologías de inspección no intrusiva mejoran considerablemente el grado de protección de las fronteras y ayudan a luchar contra el terrorismo.

Importadores, el escaneo ayuda a reducir el tiempo de despacho en aduanas y evita los inconvenientes y los riesgos relacionados con la inspección física.

Exportadores, los servicios de escaneo, en el marco de acuerdos de seguridad del comercio, contribuyen a facilitar el proceso de exportación.

Por otro lado, el uso de la inspección no intrusiva permite cumplir cabalmente con los requisitos establecidos en las normas y legislaciones vigentes, como el Marco Normativo para Asegurar y Facilitar el Comercio Mundial o como se le conoce mundialmente El Marco SAFE de la organización Mundial de Aduana (OMA) para proteger y facilitar el comercio mundial.

En el contexto anterior teniendo en cuenta la importancia de la actividad, pero también considerando que una nueva tecnología ingresando al país es que se deben hacer los controles pertinentes y realizar mediciones para la caracterización de estos equipos generadores de Rayos X y determinar si cumplen con el blindaje adecuado para su utilización segura tanto del personal que lo opera como para el público y el medio ambiente. Por tal razón es que se realizaron los monitoreos correspondientes tanto del personal como ambiental.

Una de las maneras más utilizada en el mundo para realizar el monitoreo de radiaciones ionizantes ambientales y personales es la dosimetría termoluminiscente. Para ello se aprovecha la termoluminiscencia (TL) de ciertos cristales para determinar la dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ en el campo de radiaciones ambiental. Esto requiere el desarrollo, control y calibración de dosímetros que permitan correlacionar de manera confiable la respuesta TL de dichos cristales con la Dosis en las condiciones de campo (sol, humedad, temperatura, etc.).

VI.2 Magnitudes Dosimétricas

Las magnitudes dosimétricas recomendadas con fines de protección radiológica, y en las cuales se expresan los límites de dosis en las Normas Básicas de Seguridad (NBS), son la dosis efectiva E y la dosis equivalente H_T en un tejido u órgano T . Las magnitudes físicas básicas incluyen la fluencia de partículas ϕ , el Kerma K y la dosis absorbida D .

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (CIUMR) introdujo magnitudes operacionales de uso práctico en protección radiológica en lo que se refiere a exposición a fuentes externas (CIUMR, 1985), que se definieron posteriormente en el Informe 51 de la CIUMR (CIUMR, 1985). Las magnitudes operacionales para la vigilancia radiológica de área son la dosis equivalente ambiental $H^*(d)$ y la dosis equivalente direccional $H'(d, \Omega)$, y para la vigilancia radiológica individuales la dosis equivalente individual $H_p(d)$. Dichas magnitudes se analizan brevemente en la mencionada Guía de seguridad (OIEA, 2004) y se definen formalmente en las NBS (NBS, 1997). La evaluación detallada de la relación numérica entre las magnitudes físicas, de protección y operacionales, ha sido realizada por un grupo de trabajo conjunto de la Comisión Internacional de Protección Radiológica ICRP, por sus siglas en inglés y la CIUMR (ICRP, 1997). La relación conceptual entre esas magnitudes se ilustra en la Fig. 1. (ICRU, 1997)

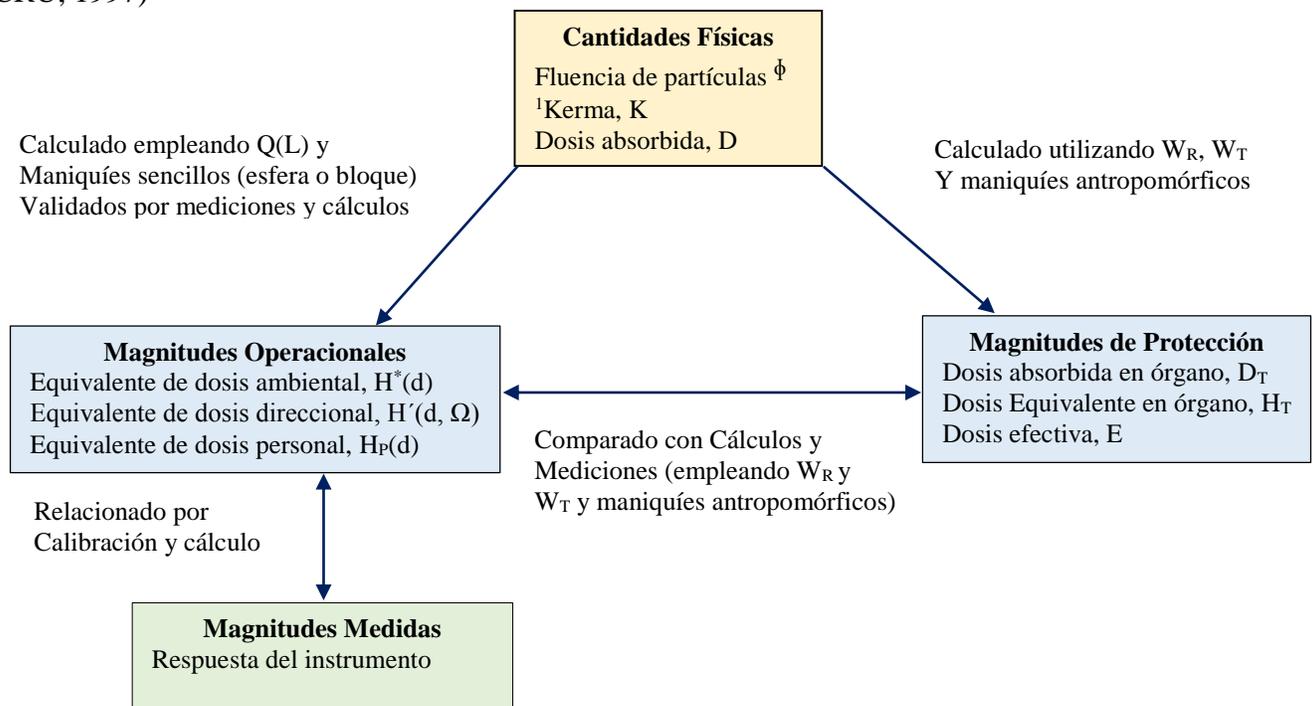


Figura. 1. Relación de magnitudes con fines de protección radiológica

¹El nombre de esta magnitud radiológica, deriva de las iniciales de la definición breve inglesa (*Kinetic Energy Released per unit Mass*: energía cinética transferida por unidad de masa)

La determinación de la dosis equivalente, y por tanto de la dosis efectiva, entraña el uso de factores de ponderación de las radiaciones W_R como multiplicadores de la dosis absorbida, para reflejar el mayor detrimento resultante de una dosis absorbida determinada cuando es producida por una radiación de alta transferencia lineal de energía (TLE) en lugar de una radiación de baja TLE. Los valores recomendados de W_R se basan en un examen de la información biológica publicada y se incluyen en el cuadro 1.

CUADRO 1 FACTORES DE PONDERACIÓN DE LA RADIACIÓN

| Tipo y escala de energía ^b | Factor de ponderación de la radiación, W_R |
|--|---|
| Fotones, todas las energías | 1 |
| Electrones y muones, todas las energías ^c | 1 |
| Neutrones ^d de energía: | |
| <10keV | 5 |
| 10keV a 100 keV | 10 |
| >100 keV a 2 MeV | 20 |
| >2 MeV a 20MeV | 10 |
| >20MeV | 5 |
| Protones, distintos a los protones de retroceso, energía >2MeV | 5 |
| Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados | 20 |

^a Todos los valores se relacionan con la radiación incidente sobre el cuerpo o, en el caso de las fuentes internas, emitida por la fuente.

^b La elección de valores para otras radiaciones se incluye en el Anexo A de la Publicación No. 60 de la ICRP.

^c Se excluyen los electrones Auger emitidos por los radionucleidos ligados al ADN, para los cuales se aplican consideraciones micro-dosimétricas especiales.

^d Para que haya mayor coherencia en los cálculos, se da una expresión matemática uniforme para los valores W_R en función de la energía: $W_R = 5 + 17e^{-[\ln(2\varepsilon)]^{2/6}}$ donde ε es la energía en MeV

Los factores de calidad de la radiación Q se utilizan para determinar las magnitudes operacionales y se basan en la relación Q-TLE. Los factores de calidad se emplean también como valores aproximados de W_R para los tipos de radiación no incluidos en el Cuadro 1. La relación Q-TLE recomendada se incluye en el cuadro 2

CUADRO 2. RELACIONES Q-L ESPECIFICADAS

| Transferencia lineal de energía no restringida, L en agua (keV/ μm) | $Q(L)$ |
|---|----------------|
| <10 | 1 |
| 10–100 | $0,32L - 2,2$ |
| >100 | $300/\sqrt{L}$ |

VI.3 Magnitudes de Protección Radiológica

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU) por sus siglas en inglés, desarrolla definiciones formales de cantidades y unidades de radiación y radiactividad que tienen aceptación internacional. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) también establece normas para la definición y utilización de diversas cantidades y unidades empleadas en seguridad radiológica. A continuación se da la descripción de algunas cantidades, unidades y definiciones que se suelen emplear en Protección Radiológica

Dosis absorbida en órgano, D_T : Magnitud dosimétrica fundamental D , definida por la expresión:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1)$$

En la que $d\bar{\epsilon}$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen y dm es la masa de la materia existente en el elemento de volumen.

- En el SI, la unidad de la dosis absorbida es el julio por kilogramo (J/kg), denominado gray (Gy).
- Se puede promediar la energía con respecto a cualquier volumen definido, siendo la dosis media igual a la energía total impartida en el volumen dividido por la masa del volumen.
- La dosis absorbida se define en un punto; la dosis absorbida media en un tejido u órgano, especificado del cuerpo humano se denomina dosis en un órgano.

Dosis Equivalente en órgano, H_T : Definida como:

$$H_{T,R} = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (2)$$

Donde $D_{T,R}$ es la *dosis absorbida* debida a la radiación de tipo R, promediada sobre un tejido u órgano T, y W_R es el *factor de ponderación de la radiación* de tipo R. Cuando el campo de radiación se compone de varios tipos de radiación con diferentes valores de W_R , la dosis equivalente es:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (3)$$

- En el SI, la unidad de dosis equivalente es el julio por kilogramo (J/kg), denominado Sievert (Sv).
- La dosis equivalente es una medida de la dosis en un tejido u órgano concebida para reflejar la cuantía del daño causado.
- Los valores de la dosis equivalente en un tejido u órgano especificado de cualquier tipo de radiación pueden compararse directamente.

Dosis efectiva, E: Magnitud E , definida por la sumatoria de las dosis equivalentes en el tejido u órgano, multiplicada cada una por el factor de ponderación de un tejido correspondiente:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (4)$$

Donde H_T es la dosis equivalente recibida por el tejido u órgano T y w_T el factor de ponderación de un tejido correspondiente al tejido u órgano T. De la definición de dosis equivalente se sigue que:

$$E = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (5)$$

Donde W_R es el factor de ponderación de la radiación para la *radiación* de tipo R y $D_{T,R}$ es la dosis absorbida promedio en el tejido u órgano T administrada por la radiación de tipo R.

- En el SI, la unidad de la dosis efectiva es el julio por kilogramo (J/kg), denominado Sievert (Sv).
- La dosis efectiva es una medida de la dosis ideada para reflejar la cuantía del detrimento por la radiación que es probable que se derive de la dosis recibida.
- Los valores de la dosis efectiva por exposición a cualquier tipo de radiación y cualquier modo de exposición pueden compararse directamente.

VI.4 Magnitud Operacional para la Vigilancia Radiológica Individual

La magnitud dosimétrica operacional recomendada en las NBS para la vigilancia radiológica individual es el equivalente de dosis individual $Hp(d)$ [9–10], que es el equivalente de dosis en tejido blando, a una profundidad apropiada d por debajo de un punto especificado en el cuerpo. Un método aproximado para medir $Hp(d)$ sería utilizar un detector colocado en la superficie del cuerpo cubierto con un material sustitutivo del tejido de un espesor adecuado. No obstante, pueden ser aceptables otras soluciones, siempre que se logre la variación necesaria de la respuesta con la energía.

Cualquier constatación del equivalente de dosis individual debe incluir la especificación de la profundidad de referencia d . Para radiaciones débilmente y fuertemente penetrantes (Las

radiaciones débilmente penetrantes y fuertemente penetrantes se definen como sigue: si, para una orientación dada del cuerpo en un campo uniforme y unidireccional, la dosis equivalente determinada por cualquier área pequeña de la capa sensible de la piel supera en más de diez veces la dosis efectiva, se dice que la radiación es débilmente penetrante.

Si la dosis equivalente no llega a superar en diez veces la dosis efectiva, se dice entonces que la radiación es fuertemente penetrante), las profundidades recomendadas son 0,07 mm y 10 mm respectivamente, aunque pueden ser adecuadas otras profundidades en casos particulares, por ejemplo, 3 mm para el cristalino. Para simplificar la notación, se supone que d está expresada en milímetros, y por tanto los equivalentes de dosis individual para las dos profundidades recomendadas, mencionadas con anterioridad, se expresan como $H_p(0,07)$ y $H_p(10)$.

$H_p(10)$, es decir, el equivalente de dosis individual a 10 mm de profundidad, se utiliza para proporcionar una estimación de la dosis efectiva que evite tanto una subestimación como una sobrestimación excesiva. Se considera que las células sensibles de la piel están entre 0,05 y 0,1 mm por debajo de la superficie de ésta, y por tanto se utiliza $H_p(0,07)$ para calcular la dosis equivalente en la piel. También puede utilizarse $H_p(0,07)$ para la vigilancia de las extremidades, donde la dosis en la piel es la magnitud limitativa.

La calibración de los dosímetros se efectúa en condiciones convencionales simplificadas, sobre un maniquí adecuado. Puede utilizarse la magnitud $H_p(d)$ para especificar el equivalente de dosis en un punto de un maniquí que representa el cuerpo. Si un dosímetro mide $H_p(d)$ correctamente en un punto sobre tal maniquí, se admite que mide $H_p(d)$ con suficiente exactitud en el cuerpo de cualquier persona.

VI.5 Magnitudes para la Vigilancia Radiológica del Lugar de Trabajo

Las magnitudes operacionales recomendadas para la vigilancia radiológica del lugar de trabajo se definen en un maniquí conocido como la esfera de la CIUMR. Se trata de una esfera de material equivalente al tejido con un diámetro de 30 cm, una densidad de 1 g/cm^3 y una composición elemental másica del 76,2% de oxígeno, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrógeno y 2,6% de nitrógeno.

Las dos magnitudes recomendadas por la CIUMR para la vigilancia de área son: el equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$ y el equivalente de dosis direccional $H'(d, W)$, que son adecuadas para medir campos de radiación fuerte y débilmente penetrantes respectivamente.

El equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$ en un punto del campo de radiación es el equivalente de dosis que sería producido por el correspondiente campo expandido y alineado en la esfera de la CIUMR, a una profundidad d sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado.

El campo expandido es aquel en el cual la fluencia y sus distribuciones direccional y energética son las mismas en todo el volumen de interés que en el campo real del punto de referencia. En el campo expandido y alineado, la fluencia y su distribución energética son las mismas que en el campo expandido, pero la fluencia es unidireccional.

Cualquier constatación de la dosis equivalente ambiental debe incluir la especificación de la profundidad de referencia d . En el caso de radiación fuertemente penetrante, la profundidad recomendada es 10mm. Como en el caso del equivalente de dosis individual, d debe expresarse en milímetros, por lo que $H^*(10)$ es el equivalente de dosis ambiental para una profundidad de 10mm. Para medir $H^*(d)$ es necesario que el campo de radiación sea uniforme alrededor del volumen sensible del instrumento y que el instrumento tenga una respuesta isotrópica.

Las radiaciones débilmente penetrantes y fuertemente penetrantes se definen como sigue: si, para una orientación dada del cuerpo en un campo uniforme y unidireccional, la dosis equivalente determinada por cualquier área pequeña de la capa sensible de la piel supera en más de diez veces la dosis efectiva, se dice que la radiación es débilmente penetrante. Si la dosis equivalente no llega a superar en diez veces la dosis efectiva, se dice entonces que la radiación es fuertemente penetrante.

El equivalente de dosis direccional $H'(d,W)$ en un punto del campo de radiación es el equivalente de dosis que sería producido por el correspondiente campo expandido en la esfera de la CIUMR, a una profundidad d sobre un radio en una dirección especificada W . Cualquier enunciado del equivalente de dosis direccional debe incluir la especificación de la profundidad de referencia d y la dirección W de la radiación. Para las radiaciones débilmente y fuertemente penetrantes, las profundidades recomendadas son de 0,07 mm y 10 mm respectivamente. Debe expresarse d igualmente en milímetros.

Si el campo es unidireccional, la dirección W se especifica como el ángulo entre el radio opuesto al campo incidente y el radio especificado. Cuando el radio especificado es paralelo al campo de radiaciones (es decir cuando $W = 0^\circ$) la magnitud $H'(d,0)$ puede representarse simplemente por $H'(d)$. Además, en un campo unidireccional, $H'(d) = H^*(d)$. Para medir $H'(d,W)$ es necesario que el campo de radiaciones sea uniforme para toda la geometría del instrumento y que éste tenga la respuesta direccional adecuada. Para las radiaciones débilmente penetrantes, un instrumento que determine el equivalente de dosis a la profundidad recomendada en una lámina plana de material equivalente al tejido determinará

adecuadamente $H'(0,07)$ si la superficie de la lámina es perpendicular a la dirección del campo de radiación.

VI.6 Límites de dosis

Según las normativas nacionales (CONEA, 2011) **los Límites de Dosis** son: valores de la dosis efectiva o de la dosis equivalente causada a los individuos, también define lo que se considera **Miembro del Público** y es cualquier individuo de la población excepto, para los propósitos del presente reglamento, cuando es sujeto a exposiciones médicas u ocupacionales. A los efectos de verificar el cumplimiento del límite de dosis anual para la exposición del público, el individuo representativo del grupo crítico correspondiente, por prácticas controladas, que no se deberán rebasar.

De igual manera en su artículo 29 de definen las restricciones de dosis relacionadas con las fuentes tales como salvo en el caso de la exposición médicas, la optimización de las medidas de protección y seguridad relativas a una fuente determinada adscrita a una práctica deberá someterse a restricciones de dosis relacionadas con la fuente que:

- a) no excedan de los valores pertinentes establecidos o aceptados por la autoridad reguladora para tal fuente, ni de valores a causa de los cuales se puedan rebasar los límites de dosis;
- b) den la seguridad, para cualquier fuente (incluidas las instalaciones de gestión de desechos radiactivos) que pueda emitir sustancias radiactivas al medio ambiente, de que el efecto acumulativo de cada emisión anual de la fuente se restringe de forma que sea improbable que la dosis efectiva en un año cualquiera a un miembro del público, incluidas las personas distantes de la fuente y las personas de generaciones futuras, rebase cualquier límite de dosis aplicable, teniendo en cuenta las emisiones acumuladas y las exposiciones que se prevea causaran todas las demás fuentes y prácticas pertinentes sometidas a control.

En el mismo se establece que los límites de dosis para la exposición ocupacional de trabajadores con edades superiores a los 18 años son una dosis efectiva de 20mSv por año como promedio en un periodo de cinco años consecutivos y una dosis efectiva de 50mSv en un año, los límites de dosis para la exposición del público una dosis efectiva de 1mSv en un año, de igual manera la restricción de dosis se ha establecido en 5mSv por año.

VI.7 Programas de Vigilancia

El objetivo general de los programas de vigilancia radiológica operacional es la evaluación de las condiciones del lugar de trabajo y de las exposiciones individuales. La evaluación de las dosis a los trabajadores con exposición rutinaria o potencial a fuentes externas de radiación constituye una parte integrante de cualquier programa de protección radiológica y contribuye a asegurar condiciones radiológicas satisfactorias y aceptablemente seguras en el lugar de trabajo.

VI.7.1 Vigilancia radiológica individual

En aquellos lugares donde se realice la vigilancia radiológica individual de los trabajadores, cada trabajador debe poseer un dosímetro integrador por tanto se debe disponer de un servicio de vigilancia radiológica individual autorizado por la autoridad reguladora. La autoridad reguladora debe exigir que este servicio proporcione dosímetros capaces de medir $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$ con suficiente precisión para los tipos de radiación más importantes. El regulador también debe requerir que el servicio sea ofrecido por un personal cualificado y preparado adecuadamente, y que posea el equipo adecuado para el proceso y otros medios necesarios. La autoridad reguladora debe inspeccionar el servicio, exigir que el proceso y los informes de dosis se realicen dentro de los intervalos de tiempo fijados.

Para llevar a cabo estas evaluaciones en la mayoría de los casos, resultará adecuada la colocación de un solo dosímetro a la altura del pecho. Para radiaciones fuertemente penetrantes, este dosímetro debe colocarse en la posición en la que se espera la mayor exposición sobre la superficie a la altura del pecho. Para la radiación que incide principalmente de frente, o cuando la incidencia se espera que sea rotacionalmente simétrica o isotrópica, el dosímetro debe utilizarse en el frente del torso, entre los hombros y la cintura.

En operaciones rutinarias, cada trabajador vigilado debe poseer por regla general dos dosímetros; el trabajador porta uno de ellos mientras el otro (que se llevó anteriormente) se procesa y evalúa. La frecuencia del cambio de dosímetro debe establecerse por el servicio de dosimetría, según el tipo de trabajo que se realiza la exposición prevista asociada con el trabajo, las características de los dosímetros y el límite global de detección del sistema dosimétrico.

Las frecuencias de recambio pueden variar desde una vez al día, en operaciones especiales, hasta cada seis meses, si se espera que la exposición sea muy baja, aunque son usuales los períodos de cambio de uno a tres meses.

VI.7.2 Elección del dosímetro personal

Vigilancia rutinaria: La elección del dosímetro personal dependerá no sólo del tipo de radiación, sino también de la información que se necesita, además de $H_p(d)$, en campos de radiación donde sólo es importante la radiación fotónica, generalmente resulta suficiente la medida de $H_p(10)$. Un simple dosímetro para fotones, que suministran información solamente sobre el equivalente de dosis individual $H_p(10)$ resulta por tanto adecuado en la mayoría de las situaciones prácticas.

Para controlar diariamente la exposición individual, puede ser necesaria la utilización de dosímetros adicionales de lectura directa (electrónicos), los cuales ofrecen estimaciones de la dosis individual con una frecuencia mayor que la proporcionada por los dosímetros ordinarios. Tales dosímetros deben emplearse solamente para controlar la dosis y no como

sustitutos del dosímetro designado por la autoridad reguladora para mantener los registros (registro dosimétrico). No obstante, un dosímetro electrónico considerado por la autoridad reguladora con un diseño apropiado para ser usado como dosímetro de registro (con un rango adecuado de energía, sensibilidad, linealidad, precisión, etc.) podría servir eficazmente para ambos propósitos.

Para los objetivos de protección radiológica, las magnitudes operacionales medidas $H_p(10)$ y $H_p(0,07)$ se interpretan en función de las magnitudes de protección, dosis efectiva E y dosis equivalente para la piel y las extremidades H_T . Para ello, se deben elaborar hipótesis realistas con relación al tipo y uniformidad del campo de radiación y a la orientación del trabajador dentro del campo (ICRP, 1978). En estas condiciones, la lectura del dosímetro ofrece una buena estimación de la exposición del trabajador sin subestimar o sobrestimar seriamente la magnitud de protección en cuestión.

Una característica fundamental de estos dosímetros es la precisión, en la práctica, el criterio de precisión global de los dosímetros personales puede cumplirse estableciendo criterios para una serie de parámetros que influyen en el funcionamiento del dosímetro, por ejemplo, su respuesta al tipo de radiación, la distribución direccional y espectral y la influencia del medio ambiente.

La información referente a las incertidumbres que pueden esperarse al realizar medidas con dosímetros individuales o en el lugar de trabajo se contempla en el párr. 251 de la Publicación No 75 de la CIPR (ICRU, 1997) la cual establece:

“La Comisión ha comprobado que, en la práctica, es posible normalmente conseguir una precisión de un 10% con un nivel de confianza del 95% en la medición de campos de radiación en buenas condiciones de laboratorio (párr. 271, Publicación 60). En el lugar de trabajo, donde generalmente no se conocen bien ni el espectro energético ni la orientación del campo, las incertidumbres de una medición hecha con un dosímetro individual serán significativamente mayores. La no uniformidad y la imprecisión en la orientación del campo introducirán errores en el uso de modelos tipo. La incertidumbre global con un nivel de confianza del 95% en la estimación de la dosis efectiva alrededor del límite podría muy bien alcanzar un factor de 1,5 para dosis alta, en cualquier dirección para los fotones y podría resultar sustancialmente mayor para los neutrones de energía desconocida y para los electrones. Son también inevitables imprecisiones mayores a bajos niveles de dosis efectiva para todos los tipos de radiaciones.”

Aunque no está indicado explícitamente por la ICPR, se interpreta normalmente que para un grupo amplio de trabajadores que utilizan un sistema dosimétrico dado, el 95% de las dosis anuales registradas deben estar dentro de los límites de incertidumbre aceptable indicados. La declaración de la ICPR debe interpretarse como que, para dosis del orden de los límites de dosis anuales, las dosis anuales aparentes para un individuo $H_p(0,07)$ y $H_p(10)$, según

indican un grupo de dosímetros básicos revisados regularmente durante el año y portados en la superficie del cuerpo, no deben diferenciarse en más de -33% o $+50\%$ (al nivel de confianza del 95%) de los equivalentes de dosis indicados por un dosímetro ideal utilizado las mismas veces en el mismo punto.

VI.7.3 Vigilancia radiológica del lugar trabajo

Para controlar la dosis en situaciones en las que el campo de radiación al que se expone un trabajador pudiera aumentar significativa e inesperadamente, deben usarse dosímetros adicionales que puedan suministrar pronta información sobre los cambios a corto plazo del campo de radiación en el ambiente de trabajo. Cuando se determinan las dosis sobre la base de los resultados de la vigilancia rutinaria del lugar de trabajo, la vigilancia debe ser continua y representativa de todas las áreas de trabajo.

La base de un programa rutinario de vigilancia radiológica de la irradiación externa en los lugares de trabajo debe ser la vigilancia completa, realizada cuando se pone en marcha cualquier instalación nueva o cuando se han efectuado cambios sustanciales en una instalación existente. La frecuencia de la vigilancia radiológica rutinaria del lugar de trabajo depende de los cambios previstos en los campos de radiación existentes en el ambiente de trabajo:

- a) Cuando no se esperan alteraciones sustanciales del blindaje protector o de las actividades llevadas a cabo en el lugar de trabajo, podrá utilizarse la vigilancia rutinaria sólo ocasionalmente con fines de verificación.
- b) Cuando se esperan cambios del campo de radiación en el lugar de trabajo que no tienen probabilidad de ser rápidos o severos, unas comprobaciones periódicas u ocasionales, principalmente en puntos establecidos previamente, pueden advertir oportuna y eficazmente sobre las condiciones de deterioro; de forma alternativa se pueden utilizar los resultados de la vigilancia radiológica individual.
- c) Cuando los campos de radiación pueden aumentar con rapidez e imprevisiblemente hasta alcanzar niveles importantes, se necesitará un sistema de detectores de alarma, además de los dosímetros personales, sea colocados en el lugar de trabajo y/o llevados individualmente por cada trabajador. En estas situaciones sólo ese tipo de instrumentación de alarma puede evitar, de forma fiable, la recepción de equivalentes de dosis altos durante cortos períodos de trabajo.

La instrumentación de vigilancia radiológica se calibran en campos de radiación que irradian el volumen del detector de forma uniforme, con el centro del volumen utilizado como punto de referencia. Sin embargo, muchos campos operacionales irradian el detector de manera no uniforme (por ejemplo, en las proximidades de fuentes puntuales o de haces estrechos). Estas

situaciones necesitan especial atención y puede ser necesario el establecimiento de un factor de corrección que pueda aplicarse a las lecturas para obtener una tasa de dosis corregida.

En muchos casos, la vigilancia radiológica del lugar de trabajo se utiliza para obtener un valor límite superior de la dosis equivalente recibida por los trabajadores tal que no se necesiten restricciones adicionales de movimiento dentro del lugar de trabajo. En estos casos se supone que una persona estará ubicada durante todo el horario laboral en aquella parte del lugar de trabajo donde la tasa de dosis equivalente es mayor. No obstante, para los registros y la evaluación de dosis, deben obtenerse y utilizarse estimaciones realistas de la permanencia.

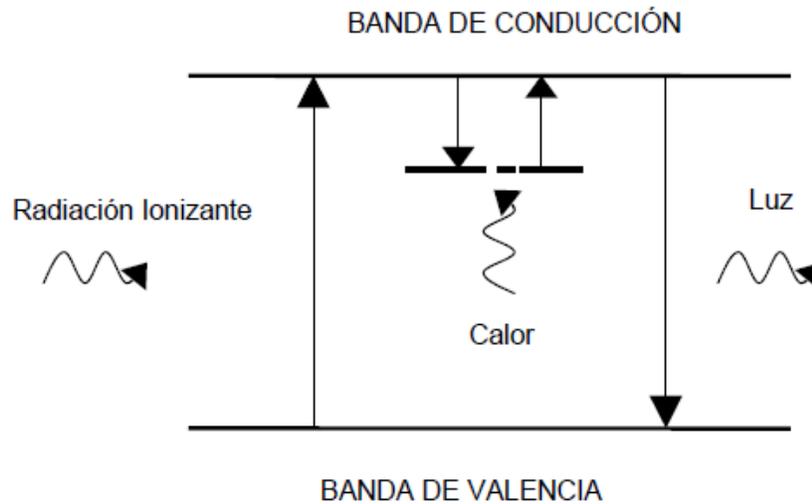
En aquellos casos en que las tasas de dosis puedan variar significativamente con el tiempo, deben registrarse los datos de permanencia en el lugar de trabajo para que puedan aplicarse los períodos de ocupación a las tasas de dosis correspondientes con miras a la evaluación de la exposición

VI.8 Caracterización de Dosímetros para medir equivalente de dosis ambiental $H^*(d)$

VI.8.1 Proceso de Termoluminiscencia

La termoluminiscencia es el proceso por medio de cual un cristal que ha sido irradiado con radiaciones ionizantes emite fotones de luz visible al aumentar su temperatura. El fenómeno luminiscente puede ocurrir por diferentes medios de excitación: fricción (triboluminiscencia), fotones de luz (fotoluminiscencia), energía química (quimioluminiscencia), energía eléctrica (electroluminiscencia) y radiaciones ionizantes (radioluminiscencia).

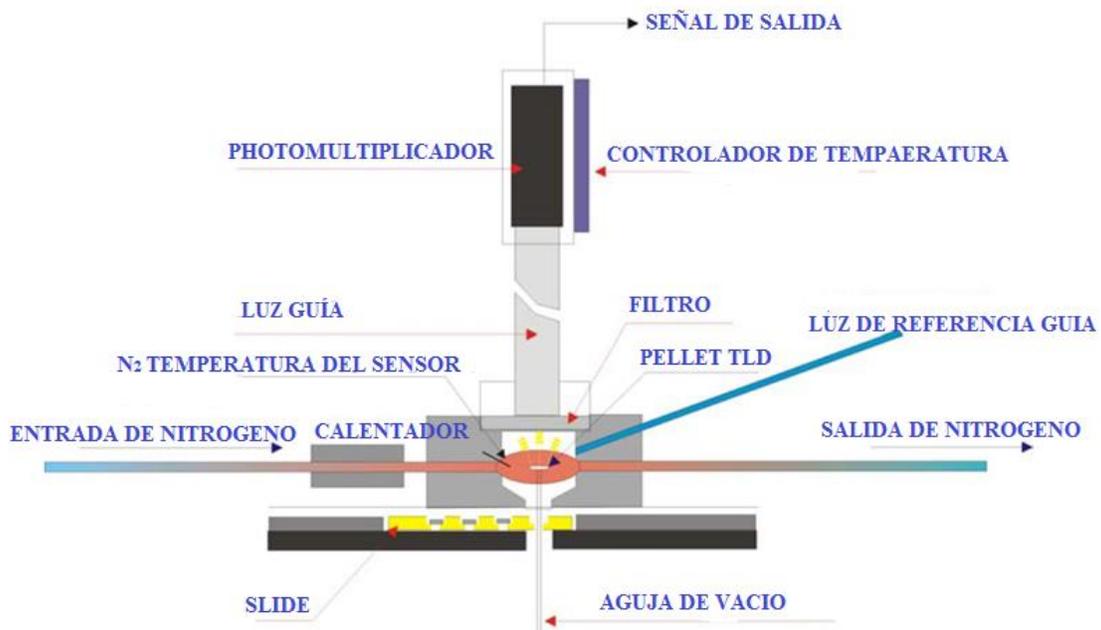
Un modelo muy sencillo del proceso termoluminiscente establece que la radiación ionizante incidente sobre un cristal libera un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Ver figura 2



1 Figura 2. Esquema del mecanismo de la Termoluminiscencia

El electrón es atrapado en la banda prohibida de energía en un sitio de impureza. Este estado es metaestable y el electrón seguirá atrapado hasta que energía le sea entregada.

Al aumentar la temperatura del cristal, el electrón adquiere la energía cinética suficiente para regresar a la banda de conducción y recombinarse con el hueco, liberándose así la diferencia de energía entre ambos niveles, el fotón de luz liberado forma un pulso eléctrico en el tubo fotomultiplicador, el proceso de lectura de cada cristal TL se muestra en el esquema de la figura 3.



2 Figura 3 Principio de medición del lector de TLD RADOS

El Modelo Cinético de primer orden para la termoluminiscencia (TL) fue discutido por Randall Wilkins en 1945 y supone: Un solo tipo de “trampa” y un tipo de “centro” en donde la razón de escape viene dada por:

$$\frac{dn}{dt} = -n * s * e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)} \quad (6)$$

Donde:

n: número de cargas atrapadas (m^{-3})

s: frecuencia de vibración de las cargas en un pozo de potencial

K: constante de Boltzman (eV/K)

T: temperatura absoluta (K)

La intensidad luminiscente I se supone proporcional a la razón de escape:

$$I = -\frac{dn}{dt} = n * s * e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)} \quad (7)$$

Resolviendo la ecuación dn/dt utilizando una función lineal para el aumento de la temperatura en función del tiempo $T = T_0 + \beta t$, donde β significa la tasa de calentamiento, y se obtiene:

$$n = n_0 * e^{\left(-\int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} * e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)} dt\right)} \quad (8)$$

Al substituir el resultado de (7) en (6) se obtiene finalmente:

$$I(T) = n_0 * s * e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)} * e^{\left(-\int_{T_0}^T \frac{s}{\beta} * e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)} dt\right)} \quad (9)$$

Se observa entonces que conforme la temperatura crece el primer exponencial domina y la señal TL crece hasta un punto máximo donde ambas funciones son iguales. A partir de esta temperatura la segunda exponencial domina y la señal TL decrece; formándose así la curva de brillo para un fósforo termoluminiscente. Basándose en el área bajo la curva de brillo que se registra al leer el cristal en el lector, se obtiene la información sobre la cantidad de radiación incidente sobre el cristal.

VI.8.2 Dosímetro termoluminiscente y sus características

La dosimetría es la serie de medidas que se realizan para determinar la cantidad de energía de radiación ionizante que es absorbida por la materia. Un dosímetro es un instrumento utilizado para hacer esta medición. Existen dosímetros activos y pasivos, dentro de los pasivos tenemos a los dosímetros termoluminiscentes.

Los materiales TL más utilizados en dosimetría personal y ambiental son LiF:Mg,Ti (TLD-100), LiF:Mg,Cu,P (GR-200), Li₂B₄O₇:Cu y CaSO₄:Tm. Los dosímetros TL combinan varios detectores de uno o varios materiales TL, de propiedades dosimétricas complementarias, alojados bajo filtros de materiales de espesor y composición adecuados. Ello permite la aplicación de algoritmos de cálculo de dosis, basados en la relación entre la lectura individual de cada detector, de forma que se aporte información adicional sobre el campo de radiación para una evaluación más adecuada de la dosis equivalente personal.

Dichos dosímetros deben ser caracterizados en función de la respuesta con relación a la energía de la radiación y al ángulo de incidencia, esta es una característica crucial de un dosímetro personal. Deben probarse los dosímetros para determinar cómo se ajustan a las características de respuesta angular y energética requeridas para la magnitud o las magnitudes que se van a medir.

Debido a que la definición de la magnitud operacional para la vigilancia individual $H_p(d)$ especifica la medida del equivalente de dosis en el organismo, las pruebas tipo de los dosímetros deben realizarse en un maniquí apropiado para simular la retrodispersión del cuerpo humano y la atenuación por él. Esto supone que si el dosímetro responde adecuadamente en el maniquí, también lo haría en una persona.

Con esta finalidad, en las orientaciones actuales de la CIUMR se indica que los dosímetros personales deberían irradiarse sobre un simulador (ISO) en forma de bloque de una superficie de 30 cm × 30 cm y 15 cm de espesor, hecho de material equivalente al tejido. La respuesta energética y angular se determina por el cálculo de $H_p(d)$ para varias energías y ángulos de incidencia. Los resultados se emplean para relacionar la respuesta requerida para $H_p(10)$ para alguna de las magnitudes físicas tales como la dosis absorbida en aire o el Kerma en aire, por medio de un conjunto de coeficientes de conversión.

Los coeficientes de conversión para fotones monoenergéticos para el maniquí descrito anteriormente, se recogen en el Cuadro II-1 (Anexo II). La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha especificado las condiciones y características de los campos tipo de rayos X que se utilizan para la calibración y los maniqués que deben utilizarse para este tipo de radiaciones, las cuales se resumen en el Cuadro II-2.

Existe un inconveniente en la práctica porque el material sustitutivo del tejido de la CIUMR no puede realizarse exactamente según lo especificado. Pueden utilizarse unos maniqués de retrodispersión adecuados especificados por la ISO en la irradiación de dosímetros para todo el cuerpo (bloque), brazos o piernas (cilindros) y dedos (varillas) (ISO, 1998) Las características de retrodispersión de estos maniqués son aceptablemente cercanas a las del tejido de la CIUMR tanto para las radiaciones neutrónicas como para las fotónicas. En la Ref. (OIEA, 1999), se exponen orientaciones más detalladas sobre el uso de estos maniqués para calibración.

La definición de $H_p(10)$ implica una respuesta que varía con el ángulo cuando la radiación se describe en función de la fluencia de partículas, como resultado del aumento, con el ángulo, de la atenuación en el material que cubre el punto donde se define la magnitud (porque la radiación incidente con un cierto ángulo pasará a través de más material para alcanzar una profundidad dada que la radiación con incidencia normal a la superficie).

Esta atenuación adicional es sustancial para $H_p(10)$ con relación a fotones y neutrones, especialmente en las energías más bajas. La variación apropiada de la respuesta con el ángulo se describe por la variación de $H_p(10)$ con el ángulo de incidencia. En la Fig. II-1 del anexo II se representan gráficamente los cocientes $H_p(10,\alpha)/H_p(10,0^\circ)$ en función de la energía de los fotones para un grupo representativo de ángulos.

Además de las pruebas mencionadas anteriormente estos deben contar con otros tipos de pruebas tales como: Homogeneidad, linealidad, mínimo detectable entre otras las cuales pueden ser distribuidos en pre-operacionales y periódicas, pruebas de funcionamiento, pruebas para la autorización de funcionamiento, prueba rutinaria de funcionamiento. El cuadro 3 muestra un resumen de pruebas para los dosímetros individuales.

CUADRO 3 RESUMEN DE PRUEBAS PARA DOSÍMETROS INDIVIDUALES

| Tipo de prueba | Prueba realizada por | Frecuencia de la prueba |
|-----------------------|--|---|
| Prueba tipo | Fabricante u organización organizada para la prueba tipo | Una vez, generalmente antes de comercializarla a los usuarios finales |
| Aprobación | Organización autorizada por la autoridad reguladora | Anual |
| Ordinaria | Servicio o Usuario final | Mensual |
| GC | Servicio o Usuario final | Diario, antes de iniciar el procesamiento del dosímetro |

VI.9 Análisis de Incertidumbre

La incertidumbre global de un sistema dosimétrico viene determinada por los efectos resultantes de los dos tipos de incertidumbre (Tipo A, aleatorio, y Tipo B, sistemático – véase la Ref. (ISO, 1993))

La incertidumbre tipo de Tipo A, U_A , se identifica con la desviación tipo σ (\bar{x}) de una serie de medidas con valores observados x (los cuales forman una distribución aleatoria con valor medio \bar{x}). Estas incertidumbres pueden reducirse en principio, aumentando el número de mediciones. Son fuentes típicas de incertidumbre del Tipo A las siguientes:

- a) No homogeneidad de la sensibilidad del detector;
- b) Variación de las lecturas del detector debido a un fondo y sensibilidad limitados;
- c) Variación de las lecturas del detector a una dosis cero.

Las incertidumbres del Tipo B, U_B , son aquellas que no pueden reducirse por repetición de mediciones. Se consideran normalmente como causas de incertidumbres del Tipo B las siguientes:

- a) Dependencia energética;
- b) Dependencia direccional;
- c) No linealidad de la respuesta;
- d) Desvanecimiento de la señal, con la temperatura ambiental y la humedad;
- e) Efectos de la exposición a la luz;
- f) Efectos de la exposición a tipos de radiación ionizante que no se intentan medir por el dosímetro;
- g) Efectos de un impacto mecánico;
- h) Errores de calibración;
- i) Variación del fondo natural local.

Los efectos de las incertidumbres del Tipo B aparecen a menudo con una cierta distribución de probabilidades y se comportan como incertidumbres del Tipo A. Por ejemplo, en una irradiación a un cierto ángulo de incidencia, un dosímetro personal incurrirá en un error sistemático debido a la variación de su respuesta con el ángulo; sin embargo, cuando el mismo dosímetro lo lleva una persona situada en un entorno de radiación individual, el dosímetro se irradia desde diferentes ángulos y la incertidumbre resultante se comporta más como si fuera del Tipo A. La ISO recomienda que las incertidumbres del Tipo B se caractericen por desviaciones típicas y varianzas, y que se combinen las incertidumbres del Tipo A y las del Tipo B por suma de cuadrados para obtener la incertidumbre total.

Como la incertidumbre total incluye tanto las incertidumbres aleatorias (Tipo A) como las sistemáticas (Tipo B), para ello es necesaria la hipótesis de que no hay ningún grupo de trabajadores, incluso de un pequeño tanto por ciento del grupo, para los que las condiciones del lugar de trabajo impliquen que las incertidumbres sistemáticas excedan de las incertidumbres aleatorias mencionadas con anterioridad.

La incertidumbre combinada U_C se puede expresar, en la forma:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (10)$$

Para obtener un valor numérico de U_B , deben determinarse por separado las incertidumbres $U_{B,i}$ para cada incertidumbre individual i . Entonces puede obtenerse U_B a partir de:

$$U_B = \sqrt{\sum_i U_{B,i}^2} \quad (11)$$

Por convenio, a menudo se admite que las incertidumbres del Tipo B puedan representarse por una distribución de densidad de probabilidad rectangular, a partir de la cual la incertidumbre puede obtenerse por:

$$U_{B,i} = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Donde a_i es la mitad del intervalo de valores que se supone tenga el parámetro i .

Las ecuaciones (10), (11), y (12) dan como resultado:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + \frac{1}{3} \sum_i a_i^2} \quad (13)$$

La incertidumbre típica combinada tiene todavía el carácter de una desviación estándar. Si, además, se admite que tenga una densidad de probabilidad Gausiana (normal), entonces una desviación típica a cada lado de la media corresponde a un límite de confianza de un 66%. Por tanto, es necesario a menudo multiplicar la incertidumbre combinada por un factor adecuado, llamado factor de cobertura k , para obtener una incertidumbre expandida (conocida también como “incertidumbre global”). Los valores típicos del factor de cobertura serían 2 o 3, para los límites de confianza de aproximadamente 95% o 99% respectivamente. El valor numérico tomado para el factor de cobertura debe indicarse claramente.

VII. METODOLOGIA

El Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) es el prestador de servicio para vigilancia radiológica individual autorizado por la autoridad reguladora. El LAF-RAM cumple con las exigencias de la autoridad reguladora en proporcionar a solicitud del cliente dosímetros capaces de medir $H_p(10)$ con suficiente precisión para los tipos de radiación más importantes. Para ellos cuenta con personal cualificado y preparado adecuadamente, posee el equipo adecuado para el proceso y otros medios necesarios.

Para la mediciones de la dosis equivalente ambiental se realizó la calibración del sistema de dosimetría termoluminiscente el cual consiste en un lector TLD RADOS 2000, un lote de dosímetros, material de los Pellets o pastillas: TLD MCP-N (LiF: Mg, Cu, P) , un irradiador de mesa RadPro IR-200 (^{90}Sr), Software RADOS, Slides y porta slides, Pinza de vacío, de igual manera se utilizó el Banco de Calibración en cual consta de fuente patrón de $^{137}\text{Cesio}$, láseres de posicionamiento, nivel de burbuja, cinta métrica, mesa y accesorios de posicionamiento, tablero de control (ver fotos anexo III)

VII.1 Procedimientos técnicos para la calibración del sistema

VII.1.1 Puesta en Cero de Dosímetros Termoluminiscentes

- a) Colocar los slides con las pastillas que quieren leerse en un cassette.
- b) Colocar el cassette en el equipo lector.
- c) En el software TLD Server, abrir la válvula de nitrógeno y empezar a leer los dosímetros, hacer clic en el botón verde.
- d) Leer los dosímetros en promedio entre 2 y 4 veces, hasta que el número de cuentas llegue a un valor estable. Esto dependerá de las características del lote.
- e) Estos dosímetros deben tener la curva característica de cero dosis del material correspondiente.

VII.1.2 Calibración del Factor de Dosis Cero de Dosímetros Termoluminiscentes

- a) Leer los dosímetros que van a calibrarse hasta que la cantidad de cuentas obtenida se estabilice (ver el *Procedimiento Técnico para Puesta en Cero de Dosímetros Termoluminiscentes*).
- b) En el programa TLD Explorer, ir a Nuevos Resultados (New Results) y seleccionar las dosis de la última lectura.
- c) Hacer clic derecho y seleccionar la opción asignar a Calibración de Dosis Cero (Assign: Zero Dose Calibration).
- d) Dentro de Nuevos Resultados, buscar Calibración de dosis cero y verificar que los valores de dosis mostrados son los mismos que se asignaron. En caso de haber otros, mandarlos a viejos resultados.
- e) Seleccionar la opción ejecutar Calibración de dosis cero (Execute Assignment: Zero Dose Calibration).

- f) En la ventana de calibración, verificar que no hay dosímetros que se desvían más de 30% del promedio. Si es así excluirlos de la calibración.
- g) La opción Mover a viejos resultados no deberá estar marcada. Hacer clic en OK.
- h) Seleccionar todos los valores, hacer clic derecho y seleccionar la opción Asignar a Actualización de la Calibración (Assign Update of Calibration).
- i) En Nuevos Resultados ir a Actualización de la Calibración y verificar los códigos de dosímetros que se van a actualizar. En caso de haber otros, mandarlos a viejos resultados.
- j) Ejecutar Asignación de Actualización de la Calibración.
- k) En la ventana seleccionar la opción de Dosis Cero y marcar la opción de Usar Valores Individuales (Individual Values).
- l) Hacer clic en Ok.
- m) Al finalizar la actualización, hacer clic en aceptar.
- n) Seleccionar los resultados, hacer clic derecho y enviar a Viejos Resultados (Old Results).

VII.1.3 Calibración del Factor de Sensibilidad del Lector RADOS TLD Reader 2000 para Nuevos Lotes de Dosímetros Termoluminiscentes

- a) Poner en cero los dosímetros a utilizar. Todos deben tener el factor de dosis cero calibrado (ver *Procedimiento Técnico para Calibración del Factor de Dosis Cero de Dosímetros Termoluminiscentes*).
- b) Irradiar los dosímetros en el Laboratorio de Calibración Dosimétrica (LCD) con la fuente de referencia a una dosis aproximada de 1mSv de la magnitud correspondiente.
- c) Ejecutar los programas TLD Server y TLD Explorer en modo administrador.
- d) El factor del sistema deberá estar configurado a 1 000 $\mu\text{Sv/vuelta}$ antes de leer los dosímetros.
- e) En el programa TLD Explorer, seleccionar las propiedades del rango de dosímetros utilizados y verificar que el factor del sistema es 1 000 $\mu\text{Sv/vuelta}$.
- f) Realizar la lectura de los dosímetros 24 horas después de la irradiación.
- g) En el programa TLD Explorer, ir a nuevos resultados y buscar las lecturas realizadas.
- h) Verificar que no haya lecturas que se desvíen demasiado de las del promedio (más de 30%).
- i) Seleccionar las lecturas, dar clic derecho y asignar a calibración de sensibilidad del lector.
- j) Dentro de nuevos resultados, ir a calibración de sensibilidad del lector y verificar que las lecturas están ahí.
- k) En la barra de tareas, seleccionar ejecutar asignación y luego calibración de sensibilidad del lector.
- l) En la ventana de calibración de sensibilidad del lector, ingresar 1 como número de vueltas en el campo “Exposición del Sistema en Fuente Local”.

- m) Verificar que no esté marcada la opción de compensar por la sensibilidad individual del cristal, y que esté marcada la opción de mover a viejos resultados.
- n) Verificar en la ventana el valor nuevo del factor de sensibilidad del lector.
- o) Hacer click en OK.

VII.1.4 Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de los Dosímetros Asignados para Calibración del Lector

- a) Seleccionar un lote de dosímetros (por ejemplo 20) con un coeficiente de variación menor al 5% para realizar las calibraciones. Dividir el lote en dos partes.
- b) Poner en cero los dosímetros que van a calibrarse. Todos los dosímetros deben de tener un factor de dosis cero recientemente calibrado.
- c) Irradiar los dosímetros con la fuente de referencia a una dosis de 1 mSv. Anotar la hora y la fecha de la irradiación.
- d) Leer los dosímetros 24 horas después de la irradiación. La mitad del lote se utilizará para realizar la calibración de sensibilidad del lector. Para esto debe seguirse el “*Procedimiento Técnico para Calibración del Factor de Sensibilidad del Lector Rados TLD Reader 2000 para Nuevos Lotes de Dosímetros Termoluminiscentes*”.
- e) La otra mitad se lee después de la calibración del lector.
- f) En el programa TLD Explorer, ir a nuevos resultados y seleccionar las dosis de del último lote de dosímetros.
- g) Dar clic derecho y seleccionar la opción asignar a calibración de sensibilidad individual.
- h) Dentro de nuevos resultados, buscar Calibración de sensibilidad individual y verificar que los valores de dosis mostrados son los mismos que se asignaron.
- i) Seleccionar la opción ejecutar Calibración de sensibilidad individual.
- j) En la ventana de calibración, verificar los valores de sensibilidad individual de los cristales. Estos deben de estar entre 0.90 y 1.10, si no es así deben utilizarse otros dosímetros.
- k) La opción Mover a viejos resultados deberá estar marcada. Dar clic en OK en la ventana de calibración.
- l) Una vez calibrado el lote de 10 dosímetros para calibración del lector, el factor de sensibilidad de los otros 10 puede calibrarse siguiendo el procedimiento descrito en el “*Procedimiento Técnico para Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de Nuevos Dosímetros*”.

VII.1.5 Calibración del Factor de Sensibilidad del Irradiador Local de ⁹⁰Sr

- a) Seleccionar un lote de 5 dosímetros previamente caracterizados para realizar la calibración del factor del irradiador.

- b) Poner en cero los dosímetros a utilizar. Todos deben tener el factor de dosis cero y de sensibilidad individual calibrado. Los dosímetros asignados a realizar la calibración de sensibilidad del lector también deben tener todos los factores calibrados.
- c) Irradiar los dosímetros con una fuente estándar a una dosis de 1 mSv (tanto el lote para calibración del irradiador como los del lote para calibrar el lector).
- d) Los dosímetros deben leerse 24 horas después de la irradiación.
- e) El factor del sistema deberá estar configurado a 1 000 $\mu\text{Sv/vuelta}$ antes de leer los dosímetros (ver manual).
- f) Realizar la calibración del factor de sensibilidad del lector con el lote de dosímetros correspondientes.
- g) Leer los dosímetros del lote para calibración del factor del irradiador.
- h) Utilizando estas lecturas calcular para cada dosímetro un factor de corrección F_c , utilizando la ecuación:

$$F_c = 1\text{mSv}/(\text{Dosis leída en mSv}) \quad (14)$$

- i) Poner todos los dosímetros nuevamente en cero.
- j) Irradiar los dosímetros asignados para calibración del lector nuevamente en la fuente de referencia estándar.
- k) Irradiar los dosímetros para calibración del irradiador a 20 vueltas en el irradiador local, colocándolos en las posiciones 9, 18, 27, 36, 45 del plato irradiador.
- l) Esperar 24 horas para leer los dosímetros.
- m) Luego de hacer la calibración de sensibilidad del lector, leer los dosímetros irradiados en el irradiador local.
- n) Multiplicar la dosis obtenida de cada dosímetro por su correspondiente factor de corrección.
- o) Calcular el promedio de los resultados obtenidos en el paso anterior y dividirlo entre 20 vueltas para obtener el factor del irradiador (mSv/vueltas).
- p) Multiplicar por 1 000 para obtener el factor en $\mu\text{Sv/vuelta}$.
- q) Anotar este valor.
- r) Cambiar el factor del sistema de 1000 $\mu\text{Sv/vuelta}$ al nuevo valor obtenido (ver manual).
- s) Determinar el nuevo factor del lector utilizando el irradiador local siguiendo el procedimiento “*Procedimiento Técnico para Calibración Rutinaria del Factor de Sensibilidad del Lector Rados TLD Reader 2000*”.

VII.1.6 Rutinaria del Factor de Sensibilidad del Lector RADOS TLD Reader 2000

- a) Preparar los dosímetros para la calibración del lector siguiendo el “*Procedimiento Operacional para Preparación de Dosímetros para el Factor de Sensibilidad del Lector Rados TLD Reader 2000*”.

- b) Verificar que hayan pasado 24 horas desde la irradiación de los dosímetros.
- c) Verificar que el generador de nitrógeno lleve más de 2 horas funcionando.
- d) En la computadora asignada a TLD, seleccionar los programas TLD Explorer y TLD Server y abrirlos como administrador.
- e) Realizar la lectura de los dosímetros.
- f) En el programa TLD Explorer, ir a nuevos resultados y buscar las lecturas realizadas.
- g) Seleccionar las lecturas, dar clic derecho y asignar a calibración de sensibilidad del lector.
- h) Dentro de nuevos resultados, ir a calibración de sensibilidad del lector y verificar que las lecturas están ahí.
- i) En la barra de tareas, seleccionar ejecutar asignación y luego calibración de sensibilidad del lector.
- j) En la ventana de calibración, ingresar el número de vueltas que se le dio a los dosímetros en el irradiador de mesa (3 en este caso) en el campo “Número de Vueltas”.
- k) Tomar de la ventana el valor del factor de sensibilidad de lector nuevo y el valor anterior. El valor nuevo deberá de estar dentro del rango de variabilidad normal de no más del 10%. Si es así dar clic en ok.
- l) Si la variación es mayor del 10%, descartar los valores y repetir el proceso de calibración (es necesario tener seguridad que pertenece al mismo lote de los dosímetros utilizados para el reader). Si el problema persiste, considerar recalibrar o sustituir los dosímetros asignados a la calibración rutinaria del lector.

VII.1.7 Irradiación de Dosímetros en el Irradiador Local de ⁹⁰Sr

- a) Poner en cero los dosímetros a ser irradiados, según procedimiento correspondiente para tal fin
- b) Conectar y encender el irradiador local de mesa.
- c) Colocar los dosímetros sobre la mesa, asegurándose de que está limpia.
- d) Retirar los slides de los porta slides.
- e) Con la pinza de vacío, sacar el cristal (o los cristales) y colocarlos en el disco de irradiación manteniendo el orden de los cristales con respecto a su posición en el slide.
- f) No tocar los cristales ni permitir que estos se ensucien.
- g) Proseguir con el resto de los dosímetros, conservando el mismo orden para saber a qué dosímetro corresponde cada cristal.
- h) Colocar el disco dentro del irradiador de mesa.
- i) Seleccionar la cantidad de vueltas con las que se irradiarán los cristales a partir de la calibración realizada al irradiador de mesa. Para calibración rutinaria de sensibilidad del lector, utilizar la cantidad de vueltas que de una dosis aproximadamente igual a 1 mSv (dividir 1 mSv entre el factor del irradiador y redondear al entero más cercano).

- j) Una vez terminada la irradiación, poner los cristales en orden en su lugar, utilizando la pinza de vacío, y posteriormente colocar los slides en los porta slides.

VII.1.8 Calibración del Factor del Sistema

- a) Seleccionar un lote de 10 dosímetros previamente caracterizados para realizar la comprobación del factor del irradiador.
- b) Poner en cero los dosímetros a utilizar. Todos deben tener el factor de dosis cero y de sensibilidad individual calibrado. Los dosímetros asignados a realizar la calibración de sensibilidad del lector también deben tener todos los factores calibrados.
- c) Irradiar la mitad del lote de dosímetros (5) con una fuente de referencia estándar a una dosis de 1mSv.
- d) Irradiar la otra mitad del lote (5) en el irradiador de mesa a una dosis cercana a 1mSv (típicamente 3 vueltas).
- e) Irradiar los dosímetros para calibración del lector siguiendo el “*Procedimiento Técnico para Calibración Rutinaria del Factor de Sensibilidad del Lector Rados TLD Reader 2000*”.
- f) Esperar aproximadamente 24 horas para leer los dosímetros.
- g) Realizar la calibración del factor de sensibilidad del lector con el lote de dosímetros correspondientes.
- h) Leer todos los dosímetros.
- i) Buscar las lecturas en el programa WinTLD Explorer.
- j) Dar clic derecho en las lecturas de los dosímetros irradiados con la fuente de referencia y asignar a Dosis Estándar en Calibración del Sistema.
- k) Dar clic derecho en las lecturas de los dosímetros irradiados con el irradiador de mesa local y asignar a Exposición Local en Calibración del Sistema.
- l) Seleccionar la opción Calibración del Sistema en Ejecutar Asignación.
- m) Revisar en la ventana que el valor del factor de calibración obtenido es similar al obtenido durante la calibración del irradiador local y que no varió en más del 10%. Si es así considerar repetir el procedimiento.
- n) Anotar el valor y dar clic en Ok.

VII.1.9 Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de Nuevos Dosímetros

- a) Poner en cero los dosímetros que van a calibrarse. Todos los dosímetros deben de tener un factor de dosis cero recientemente calibrado. La calibración de dosis cero se hace siguiendo el “*Procedimiento Técnico para Calibración del Factor de Dosis Cero de Dosímetros Termoluminiscentes*”.
- b) Irradiar los dosímetros en el irradiador de mesa a una dosis de aproximadamente 1 mSv (3 vueltas). Anotar la hora y la fecha de la irradiación.
- c) Los cristales utilizados deben ser del mismo lote de los cristales utilizados para la calibración del lector. De no ser así, debe calibrarse todo el sistema para el nuevo lote, siguiendo los siguientes procedimientos: “*Procedimiento Técnico para*

Calibración del Factor de Sensibilidad del Lector Rados TLD Reader 2000 para Nuevos Lotes de Dosímetros Termoluminiscentes”, “Procedimiento Técnico para la Calibración del Factor de Sensibilidad Individual de los Dosímetros Asignados para Calibración del Lector”, “Procedimiento Técnico para la Calibración del Factor de Sensibilidad del Irradiador Local de ⁹⁰Sr” y “Procedimiento Técnico para Calibración del Factor del Sistema”.

- d) Leer los dosímetros 24 horas después de la irradiación. Asegurarse de que la calibración de la sensibilidad del lector ya se ha realizado antes de leer los dosímetros.
- e) En el programa TLD Explorer, ir a nuevos resultados y seleccionar las dosis de la última lectura.
- f) Dar clic derecho y seleccionar la opción asignar a calibración de sensibilidad individual.
- g) Dentro de nuevos resultados, buscar Calibración de sensibilidad individual y verificar que los valores de dosis mostrados son los mismos que se asignaron.
- h) Seleccionar la opción ejecutar Calibración de sensibilidad individual.
- i) En la ventana de calibración, verificar los valores de sensibilidad individual de los cristales. Estos deben de estar entre 0.90 y 1.10. Poner por aparte los dosímetros que no estén dentro los límites.
- j) La opción Mover a viejos resultados deberá estar marcada. Dar clic en OK en la ventana de calibración

VII.1.10 Pruebas de Pérdida de Información (Fading) de un lote de dosímetros

- a) Seleccionar un lote de dosímetros previamente caracterizados (por ejemplo 50) para realizar las pruebas.
- b) Poner en cero los dosímetros a utilizarse. Todos deberán tener los factores de sensibilidad individual y de dosis cero calibrados.
- c) Irradiar los dosímetros a una dosis aproximada de 1 mSv.
- d) Almacenar los dosímetros en un lugar resguardado del polvo, la luz y el exceso de humedad y temperatura.
- e) Separar la mitad del lote de dosímetros para leerlos 1 mes después de la irradiación.
- f) Leer la otra mitad 2 meses después de la irradiación.
- g) Asegurarse de hacer la sensibilidad del lector el día de las lecturas.
- h) Dividir las lecturas obtenidas por el valor esperado y multiplicarlas por 100 para obtener el porcentaje de dosis para un período de 1 mes y 2 meses, respectivamente.
- i) Calcular la diferencia de los porcentajes de dosis obtenidos con el 100%, para obtener la pérdida de información porcentual para cada período.
- j) Para dosímetros se ocupan típicamente en otro período de tiempo, debe determinarse también el fading para ese período. Por ejemplo, puede determinarse en períodos de 15 días, 1 mes, 2 meses, 4 meses y 6 meses.
- k) Realizar una gráfica de la pérdida de información en función del tiempo.

VII.1.11 Determinación del Límite de Detección de un Sistema de Dosimetría Termoluminiscente

- Seleccionar un lote de dosímetros caracterizados para realizar las pruebas. Se recomienda un lote de al menos 20 dosímetros.
- Poner en cero los dosímetros a utilizarse. Anotar la fecha de la puesta en cero. Todos deberán tener los factores de sensibilidad individual y de dosis cero calibrados.
- Irradiar la mitad de los dosímetros a una dosis baja (similar a la que se obtendría por un mes de radiación de fondo) de 0.10mSv y la otra mitad a una dosis alta de 10.0mSv.
- Leer los dosímetros 24 horas después, luego de haber realizado la calibración del lector.
- Calcular el promedio de las dosis de los dosímetros irradiados a 0.10mSv y su desviación estándar y el promedio de las dosis de los dosímetros irradiados a 1.0mSv y su desviación estándar.
- El mínimo detectable puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$L_D = \frac{2(t_n \cdot S_b + t_m^2 \cdot S_\mu^2 \cdot D_b)}{1 - t_m^2 \cdot S_\mu^2} \quad (15)$$

Donde

t_n : es el valor de la distribución de t-student para el número de grados de libertad para las lecturas de dosis baja de 0.10 mSv (número de dosímetros utilizados menos 1).

s_b : es el valor de la desviación estándar de las lecturas de dosis pequeña.

t_m : es el valor de la distribución de t-student para el número de grados de libertad utilizados en el caso de la dosis de 10 mSv (número de dosímetros utilizados menos 1).

s_μ : es la desviación estándar de las lecturas de los dosímetros irradiados a 10 mSv.

D_b : es el promedio de la dosis pequeña.

VII.1.12 Realizar las Pruebas de Dependencia Angular

- Seleccionar un lote de dosímetros (por ejemplo 20) para realizar las pruebas. Dividir el lote en 4 partes.
- Poner en cero los dosímetros a utilizarse. Todos deberán tener los factores de sensibilidad individual y de dosis cero calibrados.
- Irradiar los dosímetros a una dosis aproximada de 1mSv con una fuente de referencia estándar.
- El primer lote debe irradiarse perpendicular al haz, el segundo lote a un ángulo de 20° respecto al primero, el tercero a un ángulo de 40° y el cuarto a un ángulo de 60°.
- Calcular la respuesta promedio de cada lote de dosímetros. La respuesta se calcula por medio de la ecuación:

$$R = \frac{D_L}{D_{ref}} \quad (16)$$

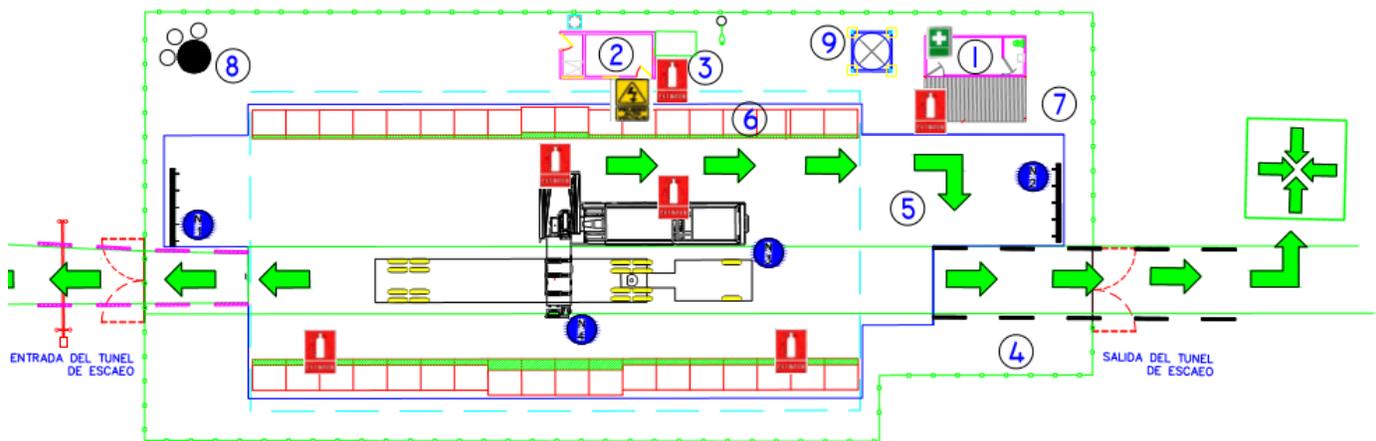
- a) Calcular la suma de las respuestas promedio y multiplicarla por 0.25.
- b) El desempeño de los dosímetros es considerado satisfactorio si se cumple la relación

$$|R - 1| \leq 1.96\Delta \quad (17)$$

Donde 1.96Δ se toma como 0.30.

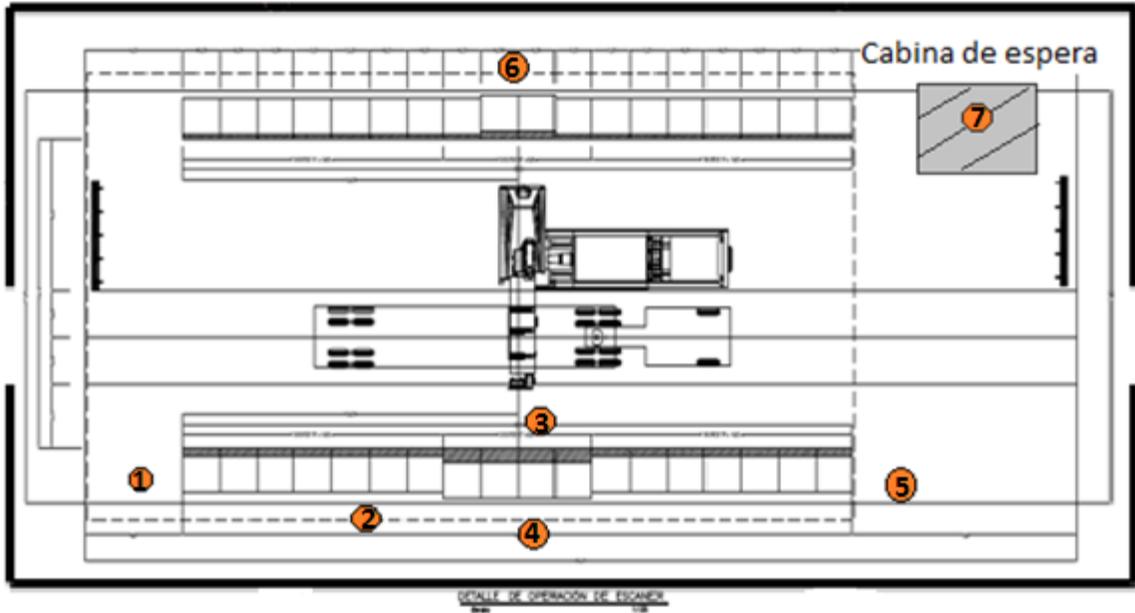
VII.2. Proceso de medición

Con el sistema calibrado para medir la magnitud requerida (dosis equivalente ambiental $H^*(d)$), se procedió a la distribución de los dosímetros, estos fueron colocados siete en cada sitio en donde están instalados los escáner, la figura No. 4 muestra el sitio en su conjunto con todas sus dependencias, basados en dicho esquema se decidió colocar los dosímetros según la distribución que se muestra en la figura No 5 considerando que estos son los puntos que mayor contribución tienen a la radiación dispersa. Los mismos retornan mensualmente al laboratorio para realizarle la lectura correspondiente y obtener la dosis acumulada en ese periodo (ver foto de uno de los sitios en anexo III), Dichas mediciones dieron inicio el mes de febrero y se analiza la información recopilada hasta diciembre del 2016, de igual manera se distribuyeron dosímetros personales para cada trabajador ocupacionalmente expuesto, es relevante mencionar que aunque tenemos alrededor de 20 años de prestar este servicio el sistema se recalibra anualmente para esta magnitud (Dosis Equivalente Personal, $H_p(10)$), de igual manera estos dosímetros también fueron leídos de manera mensual. Para llevar a cabo dicho procedimiento es necesario asignar dos dosímetros por persona y dos por cada punto de medición en sitio para no perder información cuando uno de ellos está siendo evaluado en el laboratorio.



| Sitio de Inspeccion no Intrusiva | |
|----------------------------------|--|
| ① | Oficina |
| ② | Cuarto electrico |
| ③ | Generador electrico |
| ④ | Cerca perimetral de seguridad |
| ⑤ | Losa de tunel de escaneo |
| ⑥ | Muros de concreto de proteccion |
| ⑦ | Caseta de seguridad de motorista |
| ⑧ | Banco de transformadores de 3x25 kva |
| ⑨ | Tanque de agua elevado de 1,100 litros |

3Figura No. 4 Muestra la Distribución del sitio en general



4Figura No. 5 Posicionamiento de los dosímetros en el sitio

Los resultados obtenidos de las mediciones tanto para la dosis equivalente ambiental como en la dosimetría personal se muestran en la sesión correspondiente. Así como todos los factores de calibración del sistema dosimétrico.

VIII.- RESULTADOS

VIII.1 Calibración del sistema

Se realizaron todos los procedimientos descritos en ítems VII para la calibración del sistema, en este caso es importante mencionar que hay procedimientos que son rutinarios y se llevan cabo para mantener la calidad de la medición y del sistema en sí, pero no se obtiene ningún factor de calibración, dichos procedimientos se muestran en este trabajo porque fueron parte de las mediciones realizadas. A continuación se muestran las tablas y factores obtenidos para la calibración del sistema en la magnitud de dosis equivalente ambiental. El cálculo de la incertidumbre de todo el sistema en su conjunto se muestra en el anexo I.

Tabla No. 1 Muestra los valores obtenidos para el factor de dosis cero

| N° DE Dosimetro | Fecha | Cero Dosis [Cuentas] |
|-----------------|----------------|----------------------|
| 4103 | 12/01/2016 | 1805 |
| 4115 | 12/01/2016 | 2064 |
| 4127 | 12/01/2016 | 2093 |
| 4135 | 12/01/2016 | 2044 |
| 4136 | 12/01/2016 | 2481 |
| 4137 | 12/01/2016 | 2197 |
| 4143 | 12/01/2016 | 1815 |
| 4147 | 12/01/2016 | 2035 |
| 4148 | 12/01/2016 | 2272 |
| 4154 | 12/01/2016 | 2095 |
| 4155 | 12/01/2016 | 2056 |
| 4156 | 12/01/2016 | 2085 |
| 4157 | 12/01/2016 | 2385 |
| 4159 | 12/01/2016 | 2029 |
| 4160 | 12/01/2016 | 1817 |
| 4161 | 12/01/2016 | 2490 |
| 4171 | 12/01/2016 | 1993 |
| 4179 | 12/01/2016 | 2131 |
| 4180 | 12/01/2016 | 1838 |
| 4181 | 12/01/2016 | 2189 |
| 4190 | 12/01/2016 | 1988 |
| 4193 | 12/01/2016 | 1997 |
| | Promedio | 2086 |
| | Desv. Estándar | 194 |
| | CV | 9.3 |

Tabla No. 2 Muestra los valores obtenidos para el factor de sensibilidad individual.

| No. Dosimetro | Fecha de Calibracion | Sensibilidad Individual | No. Dosimetro | Fecha de Calibracion | Sensibilidad Individual | No. Dosimetro | Fecha de Calibracion | Sensibilidad Individual |
|---------------|----------------------|-------------------------|---------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|
| 4100 | 20/01/2016 | 0.95 | 4136 | 20/01/2016 | 1.06 | 4171 | 20/01/2016 | 1.04 |
| 4101 | 20/01/2016 | 0.90 | 4137 | 20/01/2016 | 1.02 | 4173 | 20/01/2016 | 0.90 |
| 4102 | 20/01/2016 | 0.86 | 4138 | 20/01/2016 | 0.97 | 4174 | 20/01/2016 | 0.91 |
| 4103 | 20/01/2016 | 0.87 | 4140 | 20/01/2016 | 0.98 | 4175 | 20/01/2016 | 0.96 |
| 4104 | 20/01/2016 | 0.95 | 4141 | 20/01/2016 | 0.92 | 4176 | 20/01/2016 | 0.95 |
| 4105 | 20/01/2016 | 1.07 | 4142 | 20/01/2016 | 0.98 | 4177 | 20/01/2016 | 0.99 |
| 4106 | 20/01/2016 | 0.91 | 4143 | 20/01/2016 | 1.01 | 4178 | 20/01/2016 | 1.23 |
| 4107 | 20/01/2016 | 1.01 | 4144 | 20/01/2016 | 1.00 | 4179 | 20/01/2016 | 0.93 |
| 4108 | 20/01/2016 | 0.98 | 4145 | 20/01/2016 | 0.96 | 4180 | 20/01/2016 | 1.00 |
| 4109 | 20/01/2016 | 0.89 | 4146 | 20/01/2016 | 1.04 | 4181 | 20/01/2016 | 1.08 |
| 4110 | 20/01/2016 | 0.97 | 4147 | 20/01/2016 | 0.99 | 4183 | 20/01/2016 | 1.02 |
| 4111 | 20/01/2016 | 0.95 | 4148 | 20/01/2016 | 1.13 | 4184 | 20/01/2016 | 0.93 |
| 4112 | 20/01/2016 | 0.89 | 4149 | 20/01/2016 | 1.02 | 4185 | 20/01/2016 | 0.92 |
| 4113 | 20/01/2016 | 0.95 | 4150 | 20/01/2016 | 0.98 | 4186 | 20/01/2016 | 1.02 |
| 4114 | 20/01/2016 | 1.09 | 4151 | 20/01/2016 | 1.04 | 4187 | 20/01/2016 | 0.96 |
| 4115 | 20/01/2016 | 0.98 | 4152 | 20/01/2016 | 1.02 | 4188 | 20/01/2016 | 0.99 |
| 4117 | 20/01/2016 | 0.96 | 4153 | 20/01/2016 | 1.02 | 4189 | 20/01/2016 | 0.98 |
| 4118 | 20/01/2016 | 0.98 | 4154 | 20/01/2016 | 1.15 | 4190 | 20/01/2016 | 0.95 |
| 4119 | 20/01/2016 | 1.00 | 4155 | 20/01/2016 | 1.04 | 4191 | 20/01/2016 | 0.98 |
| 4120 | 20/01/2016 | 0.95 | 4156 | 20/01/2016 | 1.17 | 4192 | 20/01/2016 | 1.04 |
| 4121 | 20/01/2016 | 0.86 | 4157 | 20/01/2016 | 1.16 | 4193 | 20/01/2016 | 1.02 |
| 4122 | 20/01/2016 | 0.95 | 4158 | 20/01/2016 | 1.01 | 4194 | 20/01/2016 | 1.02 |
| 4124 | 20/01/2016 | 1.06 | 4159 | 20/01/2016 | 1.03 | 4195 | 20/01/2016 | 0.95 |
| 4126 | 20/01/2016 | 1.19 | 4160 | 20/01/2016 | 1.05 | 4196 | 20/01/2016 | 1.00 |
| 4127 | 20/01/2016 | 1.10 | 4161 | 20/01/2016 | 1.09 | 4197 | 20/01/2016 | 0.93 |
| 4128 | 20/01/2016 | 0.94 | 4162 | 20/01/2016 | 1.03 | 4198 | 20/01/2016 | 1.01 |
| 4129 | 20/01/2016 | 1.03 | 4164 | 20/01/2016 | 0.91 | 4199 | 20/01/2016 | 1.13 |
| 4130 | 20/01/2016 | 1.00 | 4165 | 20/01/2016 | 0.97 | L promedio | | 0.98 |
| 4131 | 20/01/2016 | 1.03 | 4166 | 20/01/2016 | 0.97 | Desviacion estandar | | 0.08 |
| 4132 | 20/01/2016 | 1.03 | 4167 | 20/01/2016 | 0.99 | CV | | 7.84 |
| 4133 | 20/01/2016 | 1.07 | 4168 | 20/01/2016 | 1.05 | | | |
| 4134 | 20/01/2016 | 1.06 | 4169 | 20/01/2016 | 0.99 | | | |
| 4135 | 20/01/2016 | 0.98 | 4170 | 20/01/2016 | 0.99 | | | |

Tabla No. 3 muestra el Factor del irradiador de mesa local

| No. Dosimetro | Sensibilidad Individual | Factor de Correccion | Dosis 20 vueltas (mSv) | Dosis Corregida (mSv) |
|---------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 4112 | 0.93 | 1.08 | 7.76 | 8.37 |
| 4169 | 1.05 | 0.95 | 7.74 | 7.34 |
| 4100 | 0.99 | 1.01 | 8.01 | 8.11 |
| 4117 | 1.02 | 0.98 | 7.71 | 7.53 |
| 4194 | 1.03 | 0.97 | 7.76 | 7.54 |
| 4101 | 0.93 | 1.07 | 7.53 | 8.07 |
| | | | Promedio | 7.83 |
| | | | Dosis/Vuelta (µSv/vuelta) | 391.27 |

Tabla No. 4 Verificación del factor de irradiador de mesa con la fuente de cesio

| VERIFICACION DEL FACTOR DEL IRRADIADOR (IRRADIACION A 1MSV EN EL BUNKER) | | | |
|---|---------------|------|------|
| 26/01/2016 | 03:22:54 p.m. | 4194 | 1.04 |
| 26/01/2016 | 03:23:30 p.m. | 4101 | 1.04 |
| 26/01/2016 | 03:24:03 p.m. | 4169 | 1.03 |
| 26/01/2016 | 03:24:37 p.m. | 4112 | 1.04 |
| 26/01/2016 | 03:25:11 p.m. | 4100 | 1.06 |
| 26/01/2016 | 03:25:44 p.m. | 4119 | 1.02 |
| 26/01/2016 | 03:26:18 p.m. | 4117 | 1.02 |

Tabla No. 5 Obtención del Reader para la magnitud ambiental

| N° | Fecha | Nuevo | Previo |
|----|------------|----------------------------|---------------|
| 1 | 25/05/2016 | 441902 | 1162865 |
| 2 | 10/06/2016 | 431043 | 441902 |
| 3 | 15/07/2016 | 408415 | 431043 |
| 4 | 29/08/2016 | 405516 | 408415 |
| 5 | 16/09/2016 | 404966 | 405516 |
| 6 | 11/10/2016 | 398271 | 404966 |
| 7 | 12/11/2016 | 394043 | 398271 |
| 8 | 16/12/2016 | 378766 | 394043 |
| | | L promedio | 412022 |
| | | Desviacion estandar | 17664 |
| | | CV % | 4.29 |

Tabla No. 6 Muestra la obtención del Fading o pérdida de información del dosímetro

| 0 | No de dosímetro | fecha | Dosis (mSv) |
|---------------------------------|------------------------|---------------|--------------------|
| 1 | 4170 | 16/01/2016 | 1.27 |
| 2 | 4146 | 16/01/2016 | 1.26 |
| 3 | 4152 | 16/01/2016 | 1.12 |
| 4 | 4121 | 16/01/2016 | 1.05 |
| 5 | 4145 | 16/01/2016 | 1.06 |
| 6 | 4150 | 16/01/2016 | 1.20 |
| 7 | 4124 | 16/01/2016 | 1.20 |
| 8 | 4151 | 16/01/2016 | 1.23 |
| 9 | 4153 | 16/01/2016 | 1.13 |
| 10 | 4149 | 16/01/2016 | 1.18 |
| 11 | 4144 | 16/01/2016 | 1.22 |
| 12 | 4129 | 16/01/2016 | 1.06 |
| 13 | 4122 | 16/01/2016 | 1.14 |
| 14 | 4184 | 16/01/2016 | 1.03 |
| 15 | 4128 | 16/01/2016 | 1.02 |
| 16 | 4174 | 16/01/2016 | 0.97 |
| 17 | 4162 | 16/01/2016 | 1.23 |
| 18 | 4158 | 16/01/2016 | 1.10 |
| 19 | 4131 | 16/01/2016 | 1.18 |
| 20 | 4138 | 16/01/2016 | 1.07 |
| | | Prom | 1.13 |
| | | Des. Estandar | 0.09 |
| | | CV | 7.76 |
| Perdida de Informacion o FADING | | | 0.03 |

Tabla No. 7 Muestra la obtención de la homogeneidad del lote de dosímetros

| No. Dosimetro | Fecha | Dosis |
|---------------|--------------|-------|
| 4171 | 13/01/2016 | 10.23 |
| 4160 | 13/01/2016 | 10.32 |
| 4159 | 13/01/2016 | 10.36 |
| 4155 | 13/01/2016 | 10.38 |
| 4180 | 13/01/2016 | 10.63 |
| 4147 | 13/01/2016 | 10.73 |
| 4135 | 13/01/2016 | 10.76 |
| 4193 | 13/01/2016 | 11.00 |
| 4115 | 13/01/2016 | 11.03 |
| 4137 | 13/01/2016 | 11.52 |
| 4127 | 13/01/2016 | 11.61 |
| 4148 | 13/01/2016 | 11.63 |
| 4143 | 13/01/2016 | 11.68 |
| 4161 | 13/01/2016 | 11.69 |
| 4181 | 13/01/2016 | 11.79 |
| 4136 | 13/01/2016 | 12.06 |
| 4154 | 13/01/2016 | 12.13 |
| 4157 | 13/01/2016 | 12.92 |
| | D. Mínimo | 10.23 |
| | D. Máximo | 12.92 |
| | Homogeneidad | 20.82 |

VIII.2 Mediciones en los 6 sitios

A continuación se muestran tablas y gráficas resumen de las mediciones obtenidas en los sitios, tanto de la dosis equivalente del personal ocupacionalmente expuesto como de la dosis equivalente ambiental, en anexo IV está el desglose completo de cada una de las mediciones obtenidas por el personal por periodo y por sitio por periodo.

Tabla No. 8 Muestra la codificación que se utilizó para representar cada uno de los sitios

| Sitio | |
|--------------|-----------------------|
| A | Peñas Blanca |
| B | Puerto Corinto |
| C | Las Manos |
| D | El Espino |
| E | El Guasaule |
| F | San Pancho |

Tabla No. 9 Resumen de todos los periodos y la dosis equivalente personal acumulada por usuario

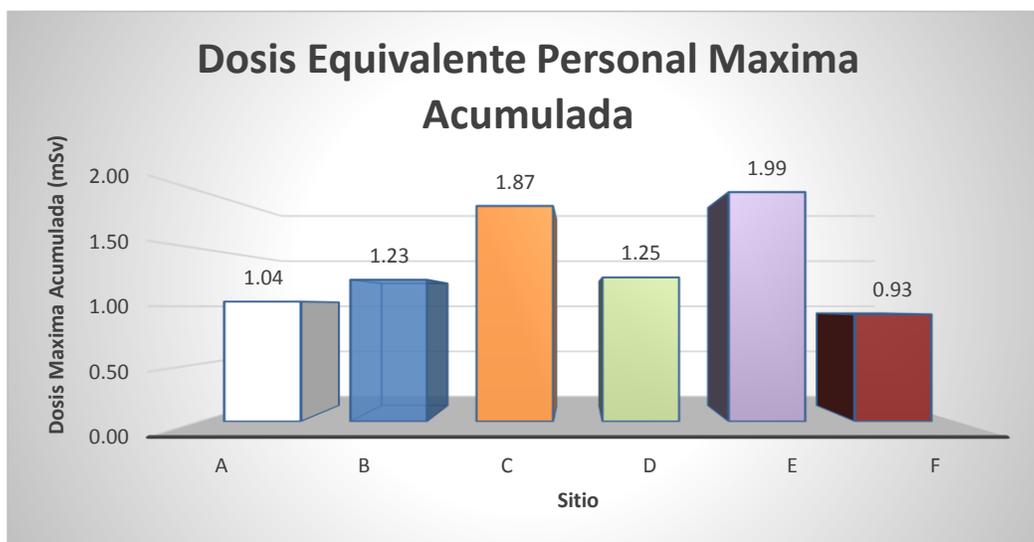
| N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Dosis Acumulada [mSv] | Dosis Promedio [mSv] | Desviación Estandar |
|----------|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Periodos | 12 Febrero al 11 Marzo | 11 Marzo al 13 abril | 13 abril al 12 Mayo | 12 Mayo al 13 junio | 13 junio al 15 julio | 15 julio al 12 agosto | 12 agosto al 09 septiembre | 09 septiembre al 14 octubre | 14 octubre al 16 de Noviembre | 16 de Noviembre al 14 de Diciembre | | | |
| Usuario | | | | | | | | | | | | | |
| A1 | 0.0 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.00 | 0.06 | 0.52 | 0.05 | 0.03 |
| A2 | 0.06 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.05 | 0.08 | 0.10 | 0.00 | 0.06 | 0.78 | 0.08 | 0.04 |
| A3 | 0.05 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 0.10 | 0.06 | 0.10 | 0.02 | 0.65 | 0.07 | 0.03 |
| A4 | 0.05 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.04 | 0.07 | 0.06 | 0.00 | 0.06 | 0.61 | 0.06 | 0.03 |
| A5 | 0.06 | 0.12 | 0.01 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.08 | 0.11 | 0.10 | 0.05 | 0.79 | 0.08 | 0.03 |
| A6 | 0.07 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.12 | 0.08 | 0.82 | 0.08 | 0.02 |
| A7 | 0.07 | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.89 | 0.09 | 0.03 |
| A8 | 0.09 | 0.10 | 0.05 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.93 | 0.09 | 0.03 |
| A9 | 0.07 | 0.10 | 0.03 | 0.17 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.15 | 0.74 | 0.07 | 0.05 |
| A10 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.15 | 0.12 | 0.09 | 0.10 | 0.02 | 0.16 | 0.12 | 1.04 | 0.10 | 0.04 |
| B1 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 0.06 | 0.10 | 0.13 | 0.05 | 0.71 | 0.07 | 0.03 |
| B2 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 0.06 | 0.08 | 0.11 | 0.03 | 0.65 | 0.07 | 0.02 |
| B3 | 0.06 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.07 | 0.06 | 0.12 | 0.02 | 0.66 | 0.07 | 0.03 |
| B4 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.02 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.02 | 0.68 | 0.07 | 0.03 |
| B5 | 0.03 | 0.09 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.00 | 0.02 | 0.44 | 0.04 | 0.03 |
| B6 | 0.04 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.44 | 0.04 | 0.03 |
| B7 | 0.08 | 0.10 | 0.05 | 0.12 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.89 | 0.09 | 0.02 |
| B8 | 0.07 | 0.09 | 0.05 | 0.13 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.95 | 0.10 | 0.03 |
| B9 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.11 | 0.13 | 0.05 | 0.11 | 0.19 | 0.14 | 0.26 | 1.23 | 0.12 | 0.06 |
| B10 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.12 | 0.05 | 0.81 | 0.08 | 0.02 |
| B11 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.14 | 0.08 | 0.17 | 0.09 | 0.13 | 0.13 | 1.03 | 0.10 | 0.04 |
| B12 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.13 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.96 | 0.10 | 0.03 |
| B13 | 0.06 | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.09 | 0.08 | 0.06 | 0.12 | 0.00 | 0.12 | 0.78 | 0.08 | 0.04 |
| B14 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.79 | 0.08 | 0.02 |
| B15 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.15 | 0.04 | 0.13 | 0.05 | 0.16 | 0.00 | 0.20 | 0.78 | 0.08 | 0.07 |
| B16 | 0.03 | 0.11 | 0.03 | 0.15 | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.14 | 0.00 | 0.15 | 0.85 | 0.09 | 0.05 |

Continuación tabla No.9

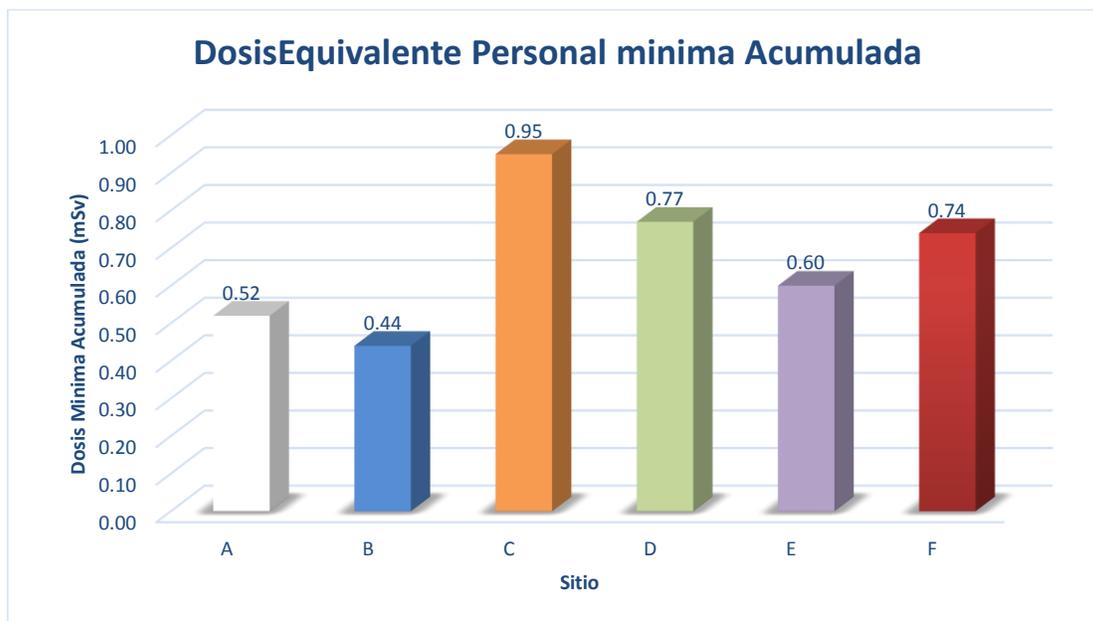
| N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Dosis Acumulada [mSv] | Dosis Promedio [mSv] | Desviación Estandar |
|----------|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Periodos | 12 Febrero al 11 Marzo | 11 Marzo al 13 abril | 13 abril al 12 Mayo | 12 Mayo al 13 junio | 13 junio al 15 julio | 15 julio al 12 agosto | 12 agosto al 09 septiembre | 09 septiembre al 14 octubre | 14 octubre al 16 de Noviembre | 16 de Noviembre al 14 de Diciembre | | | |
| Usuario | | | | | | | | | | | | | |
| C1 | 0.08 | 0.11 | 0.07 | 0.28 | 0.11 | 0.09 | 0.08 | 0.17 | 0.14 | 0.14 | 1.27 | 0.13 | 0.06 |
| C2 | 0.27 | 0.12 | 0.18 | 0.17 | 0.27 | 0.09 | 0.16 | 0.17 | 0.27 | 0.17 | 1.87 | 0.19 | 0.06 |
| C3 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.05 | 0.15 | 0.09 | 0.12 | 0.16 | 0.17 | 0.13 | 1.19 | 0.12 | 0.04 |
| C4 | 0.07 | 0.10 | 0.06 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.15 | 0.14 | 0.05 | 0.95 | 0.10 | 0.04 |
| C5 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.14 | 0.14 | 0.05 | 0.12 | 0.11 | 0.19 | 0.04 | 1.07 | 0.11 | 0.05 |
| C6 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.16 | 0.15 | 0.08 | 0.10 | 0.14 | 0.22 | 0.08 | 1.20 | 0.12 | 0.05 |
| C7 | 0.09 | 0.11 | 0.11 | 0.05 | 0.12 | 0.08 | 0.08 | 0.12 | 0.14 | 0.13 | 1.03 | 0.10 | 0.03 |
| D1 | 0.08 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.00 | 0.06 | 0.86 | 0.09 | 0.04 |
| D2 | 0.07 | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.00 | 0.05 | 0.77 | 0.08 | 0.03 |
| D3 | 0.08 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.07 | 0.99 | 0.10 | 0.02 |
| D4 | 0.08 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.13 | 0.05 | 0.97 | 0.10 | 0.02 |
| D5 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.16 | 0.04 | 1.02 | 0.10 | 0.03 |
| D6 | 0.06 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.10 | 0.00 | 0.05 | 0.85 | 0.09 | 0.04 |
| D7 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.19 | 0.12 | 1.11 | 0.11 | 0.03 |
| D8 | 0.07 | 0.10 | 0.06 | 0.13 | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.16 | 0.13 | 0.16 | 1.05 | 0.11 | 0.04 |
| D9 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.16 | 0.12 | 0.09 | 0.10 | 0.17 | 0.19 | 0.12 | 1.25 | 0.13 | 0.04 |
| D10 | 0.08 | 0.11 | 0.07 | 0.13 | 0.10 | 0.09 | 0.06 | 0.14 | 0.14 | 0.12 | 1.04 | 0.10 | 0.03 |
| E1 | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.00 | 0.04 | 0.60 | 0.06 | 0.03 |
| E2 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.10 | 0.08 | 0.06 | 0.10 | 0.00 | 0.07 | 0.66 | 0.07 | 0.03 |
| E3 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.04 | 0.08 | 0.07 | 0.10 | 0.02 | 0.69 | 0.07 | 0.03 |
| E4 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.09 | 0.09 | 0.15 | 0.05 | 0.83 | 0.08 | 0.03 |
| E5 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.03 | 0.09 | 0.09 | 0.11 | 0.10 | 0.84 | 0.08 | 0.02 |
| E6 | 0.06 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.00 | 0.13 | 0.78 | 0.08 | 0.04 |
| E7 | 0.05 | 0.10 | 0.03 | 0.14 | 0.07 | 0.10 | 0.05 | 0.13 | 0.00 | 0.26 | 0.93 | 0.09 | 0.07 |
| E8 | 0.04 | 0.09 | 0.03 | 0.17 | 0.06 | 0.10 | 0.04 | 0.13 | 0.00 | 0.46 | 1.12 | 0.11 | 0.13 |
| E9 | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.18 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.13 | 0.00 | 0.85 | 1.61 | 0.16 | 0.25 |
| E10 | 0.06 | 0.12 | 0.04 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 1.08 | 1.79 | 0.18 | 0.32 |
| E11 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.91 | 0.09 | 0.02 |
| E12 | 0.05 | 0.09 | 0.06 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.09 | 0.00 | 0.10 | 0.74 | 0.07 | 0.04 |
| E13 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | 0.10 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.12 | 0.11 | 1.25 | 1.99 | 0.20 | 0.37 |
| F1 | 0.08 | 0.10 | 0.06 | 0.13 | 0.09 | 0.08 | 0.06 | 0.03 | 0.00 | 0.11 | 0.74 | 0.07 | 0.04 |
| F2 | 0.08 | 0.10 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.02 | 0.12 | 0.10 | 0.85 | 0.09 | 0.03 |
| F3 | 0.09 | 0.09 | 0.05 | 0.13 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.93 | 0.09 | 0.02 |

Durante el período comprendido entre febrero a diciembre de 2016, se evaluó la dosis de 59 usuarios en los seis sitios de manera mensual esto implica que se realizaron 590 lecturas solo para los ocupacionalmente expuestos.

En la gráfica No 1, se observa que en el sitio E fue donde se dio la mayor acumulación de dosis personal en todo el transcurso de las mediciones (1.99mSv), en la tabla No 9 se muestra que fue acumulada por el portador E13 y el valor más alto lo muestra en el último periodo de noviembre a diciembre.



Gráfica No.1 Dosis Equivalente Personal máxima acumulada en cada uno de los sitios en todo el periodo de medición

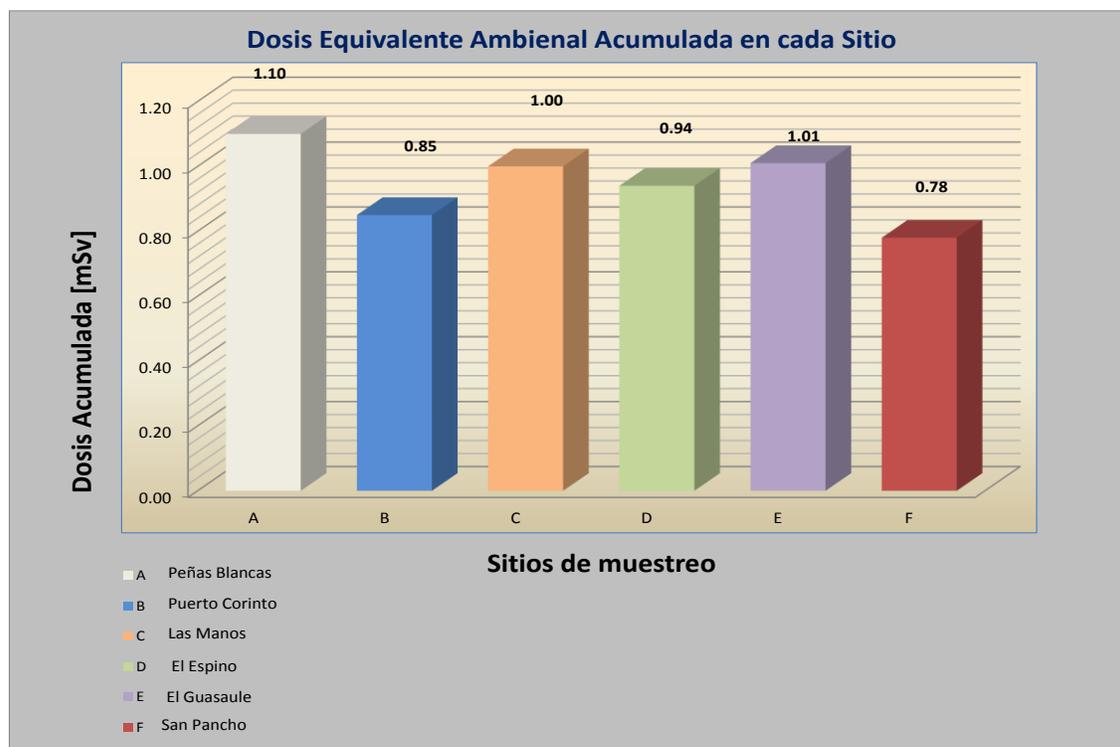


Gráfica No.2 Dosis Equivalente Personal mínima acumulada en todo el periodo de medición en cada sitio

El análisis de las Dosis Equivalente Ambiental obtenidas en cada sitio en transcurso de las mediciones se muestra a continuación

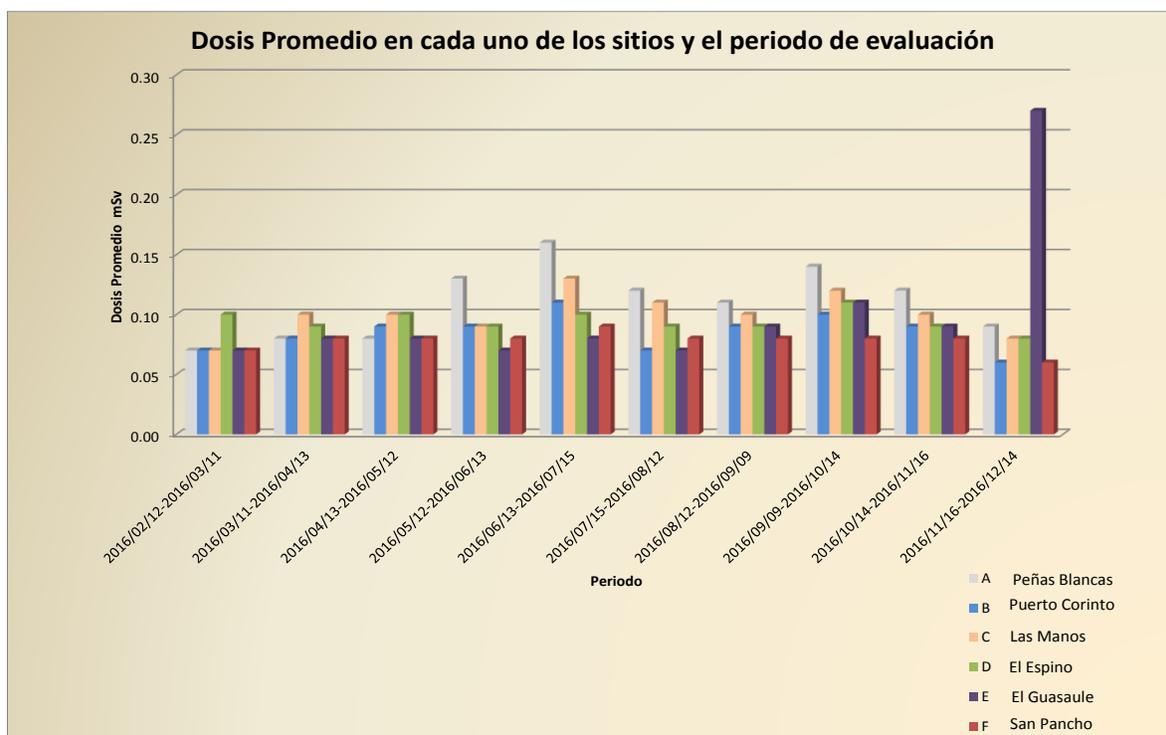
Tabla No. 10 Resumen de la Dosis Equivalente Ambiental H*(10) por periodo y acumulada obtenida en cada uno de los sitios

| Periodo | A | B | C | D | E | F |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2016/02/12-2016/03/11 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.07 |
| 2016/03/11-2016/04/13 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.08 |
| 2016/04/13-2016/05/12 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |
| 2016/05/12-2016/06/13 | 0.13 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.08 |
| 2016/06/13-2016/07/15 | 0.16 | 0.11 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.09 |
| 2016/07/15-2016/08/12 | 0.12 | 0.07 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.08 |
| 2016/08/12-2016/09/09 | 0.11 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| 2016/09/09-2016/10/14 | 0.14 | 0.10 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.08 |
| 2016/10/14-2016/11/16 | 0.12 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| 2016/11/16-2016/12/14 | 0.09 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.27 | 0.06 |
| Dosis prom (mSv) | 0.11 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.08 |
| Dosis Acumulada (mSv) | 1.10 | 0.85 | 1.00 | 0.94 | 1.01 | 0.78 |
| Desviacion estándar | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.01 |



Gráfica No.3 Muestra resumen de la Dosis Equivalente Ambiental acumulada en todo el periodo de medición por cada sitio

Para la dosis equivalente ambiental se distribuyeron 7 dosímetros en cada sitio con cambios mensuales lo cual implica que se llevaron a cabo 420 lecturas en todo el transcurso de las mediciones, en la tabla 10 y gráfica 3 podemos observar que prácticamente la dosis equivalente ambiental acumulada en los meses de medición en su mayoría está alrededor de 1mSv, además analizando la dosis promedio gráfica 4 podemos ver que el sitio E sufre un incremento en el último periodo de noviembre a diciembre esto concuerda con el incremento también en la dosis equivalente personal.



Gráfica No.4 Muestra resumen de la Dosis Equivalente Ambiental acumulada por cada periodo de medición y por cada sitio

IX.- CONCLUSIONES

Se realizó la calibración del sistema del Servicio de Dosimetría Termoluminiscentes en la magnitud operacional de dosis equivalente ambiental y se caracterizó un lote de 100 dosímetros para la medición de $H^*(10)$, obteniéndose los factores de Cero dosis, Sensibilidad individual, factor de calibración del irradiador de mesa local, verificación del irradiador respecto al banco de calibración, pérdida de información (fading) y homogeneidad del lote, se hizo el cálculo de la incertidumbre para todo el sistema obteniendo un valor de 30% con un nivel de confianza del 95% ($k = 2$). Según la bibliografía estos sistemas deben estar calibrados para que la respuesta este en un rango de (-33% hasta +50%).

Los resultados para la dosis equivalente ambiental acumulada esta alrededor de 1mSv en 10 periodos de manera mensual, siendo en el sitio A donde se obtuvo la mayor dosis acumulado de 1.10mSv y la segunda mayor en el sitio E con un valor de 1.01mSv, según las normas nacionales la restricción de dosis es de 5mSv al año, esto implica que los valores obtenidos están por debajo de dicho límite.

En lo que respecta a la dosis equivalente personal el valor máximo acumulado se da en un portador ubicado en el sitio E y es de 1.99mSv, la segunda mayor dosis acumulada fue en el sitio C de 1.87mSv, por los portadores E13 y C2 respectivamente, es importante destacar que en el caso del portador C2 fueron recibidas de manera constante en el transcurso del periodo, sin embargo para el portador E13 se dio un incremento significativo en el último periodo de la medición, el límite para los ocupacionalmente expuesto es de 20 mSv al año por tanto el valor obtenido está por debajo tanto del límite establecido como la restricción de dosis.

X.- RECOMENDACIONES

- En los sitios donde los valores de dosis ambiental dieron mayor que 1mSv se debe utilizar de manera permanente la dosimetría personal.
- Realizar el monitoreo en los puestos de trabajo con autorización de ADUANA
- Implementar un programa de protección radiológica donde se incluya capacitación continua al personal involucrado.

XI.- BIBLIOGRAFÍA

- CIUMR . (1988). *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources Part 2, Rep. No. 43* . Bethesda MD: CIUMR.
- CIUMR. (1985). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, Rep. No. 39*. Bethesda MD: CIUMR.
- CIUMR. (1985). *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, Rep. No. 51*. Bethesda MD: CIUMR.
- CIUMR. (1988). *Determination of dose equivalents from External Radiation Sources - Part 2, Rep No. 43*. Bethesda MD: CIUMR.
- CONEA. (2011). *Reglamento Tecnico de Protecion contra las Radiaciones Ionizantes de la Republica de Nicaragua*. Managua: CONEA.
- ICRP. (1978). *The Principles and General Procedures for Handling Emergency and Accidental Exposures of Workers, Publication No. 28*. NUEVA YORK: ICRP.
- ICRP. (1982). *General Principles of Monitoring for Radiation Protection of workers, Publication No 35*. Oxford, Nueva York: ICRP.
- ICRP. (1997). *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47*. NUEVA YORK: ICRP.
- ICRU. (1997). *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation (Report 57)*. NUEVA YORK: ICRU.
- ISO. (1993). *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*. Ginebra: ISO.
- ISO. (1998). *X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy, ISO 4037/Part 3: Calibration of Area and Personal Dosemeters and the Measurement of their Response as a Fun*. Ginebra: ISO.
- NBS. (1997). *Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de*. VIENA: OIEA.
- NCRP. (1995). *National Countil on Radiation Protection Measurements use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Efective Dose to workers for External Exposure to low _LET Radiations, Rep. No 122* . Washinton, DC: NCRP.
- OIEA. (1999). *Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, Colección de Informes de Seguridad No 16*. Viena: OIEA.
- OIEA. (2004). *Protección Radiológica Ocupacional, Colección de Normas de Seguridad No RS-G-1.1*. VIENA: OIEA.

XII.-ANEXO

Anexo I

CALCULO DE INCERTIDUMBRES

La información referente a las incertidumbres que pueden esperarse al realizar medidas con dosímetros individuales en el lugar de trabajo se contempla en el párrafo 251 de la Publicación No.75 de la CIPR, la cual establece:

“La Comisión ha comprobado que, en la práctica, es posible normalmente conseguir una precisión de un 10% con un nivel de confianza del 95% en la medición de campos de radiación en buenas condiciones de laboratorio (párrafo 271, Publicación 60). En el lugar de trabajo, donde generalmente no se conocen bien ni el espectro energético ni la orientación del campo, las incertidumbres de una medición hecha con un dosímetro individual serán significativamente mayores. La no uniformidad y la imprecisión en la orientación del campo introducirán errores en el uso de modelos tipo. La incertidumbre global con un nivel de confianza del 95% en la estimación de la dosis efectiva alrededor del límite podría muy bien alcanzar un factor de 1.5 en cualquier dirección para los fotones y podría resultar sustancialmente mayor para los neutrones de energía desconocida y para los electrones. Son también inevitables imprecisiones mayores a bajos niveles de dosis efectiva para todos los tipos de radiaciones”.

Aunque no está indicado explícitamente por la ICPR, se interpreta normalmente que para un grupo amplio de trabajadores que utilizan un sistema dosimétrico dado, el 95% de las dosis anuales registradas deben estar dentro de los límites de incertidumbre aceptable indicados. La declaración de la CIPR debe interpretarse como que, para dosis del orden de los límites de dosis anuales, las dosis anuales aparentes para un individuo Hp(0.07) y Hp(10), según indican un grupo de dosímetros básicos revisados regularmente durante el año y portados en la superficie del cuerpo, no deben diferenciarse en más de -33% ó +50% (al 95% del nivel de confianza) de las dosis equivalentes indicadas por un dosímetro ideal utilizado las mismas veces en el mismo punto.

Una incertidumbre de -33% a +50% para un nivel de confianza del 95% (correspondiente a un factor de cobertura $k = 2$) puede alcanzarse si:

$$1.96 U_C \leq (0.33+0.50)/2$$

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \leq 0.21$$

U_C ...Incertidumbre combinada

U_A ... Incertidumbre estándar Tipo A

U_B ... Incertidumbre estándar Tipo B

La aceptación del sistema dosimétrico no implica el cumplimiento de criterios predefinidos para cada parámetro de forma independiente, sino que los efectos combinados de las incertidumbres están dentro de ciertos límites.

Se analizaron todas las fuentes que contribuyeron a la incertidumbre combinada (total) de la medición tales como: Calibración de TLD, Dependencia energética de la respuesta del dosímetro, Naturaleza del campo de radiación, Dirección del campo de radiación, Condiciones ambientales, la radiación de fondo, Material de retrodispersión (hábitos individuales de portar el dosímetro), Dispositivos de lectura del dosímetro, Estadística de los conteos, curvas "Glow"

Con dicha información se determinó el tipo y distribución de cada contribución a la incertidumbre, considerando la magnitud de cada uno de los componentes y se combinaron de manera individual para obtener la combinada total.

Tabla No. 11 Clasificación de Componentes de la incertidumbre

| Tipo A | Tipo B |
|--|---|
| 1.- No homogeneidad del lote de dosímetros (sensibilidad individual) 2.- Variación del lectura cero del dosímetros 3.- Variación sensibilidad del lector | 1.- Dependencia energética y angular de los dosímetros 2.- No linealidad en la respuesta 3.- Fading, dependencia de la humedad y la temperatura 4.- Efectos por exposición a la luz 5.- Errores de calibración 6.- Efectos de la exposición a otros tipos de radiaciones |

Fórmula para el cálculo de dosis

$$D = \left[\frac{(L - L_0) \times S_d \times C_d \times K_e \times K_f}{SL} \right] - F_n \quad 18$$

Donde:

L – lectura del dosímetro

L₀ - fondo del material de los detectores (lectura cero).

S_d – sensibilidad del dosímetro (individual o promedio)

C_d - factor de Cuentas a dosis (factor de calibración)

K_e - factor de corrección por dependencia energética.

K_f - factor de corrección por fading.

SL - sensibilidad del lector.

F_n - dosis debida al fondo natural (*la despreciamos*).

La Incertidumbre total viene dada por:

$$\frac{U(D)}{D} = \left[\frac{\Delta_L^2 + \Delta_{L_0}^2}{(L - L_0)^2} + \left(\frac{\Delta_{Sd}}{Sd}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{SL}}{SL}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{Cd}}{Cd}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{Kf}}{Kf}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{Ke}}{Ke}\right)^2 \right]^{1/2} \quad 19$$

| Tipo A | Tipo B |
|---|--|
| Δ_L – Homogeneidad del lote | Δ_{ca} - Factor de Calibración |
| Δ_{L_0} – Lectura Cero | Δ_{Kf} – Fading |
| Δ_{SD} – Sensibilidad individual | Δ_{Ke} – Dependencia Energética y angular de los dosímetros |
| Δ_{SL} – Sensibilidad del lector | |

CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE TOTAL

Por tanto haciendo las sustituciones de los valores en la ecuación correspondiente se tiene que:

$$\frac{U(D)}{D} = \left[\frac{761,267^2 + 201^2}{(13,336,851)^2} + (0.0716)^2 + 0.0389^2 + 0.03^2 + 0.03^2 + 0.10^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{U(D)}{D} = \left[\frac{5.8 \times 10^{+11} + 40,582}{1.80 \times 10^{+14}} + 5.13 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-3} + 9 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-4} + 0.01 \right]^{1/2} = 0.15$$

Según la teoría esta debe ser ≤ 0.21 , por tanto el sistema está en óptimas condiciones para realizar las mediciones

Anexo II

DATOS RELATIVOS A PRUEBAS TIPO DE DOSÍMETROS PERSONALES Y DE MONITORES DE ÁREA EN FUNCIÓN DE MAGNITUDES OPERACIONALES

En las pruebas tipo de los sistemas dosimétricos se necesitan una serie de datos de referencia para relacionar las magnitudes dosimétricas operacionales con magnitudes físicas tales como la fluencia de partículas y el Kerma, a efectos de corregir las medidas de las magnitudes operacionales con respecto al ángulo de incidencia de la radiación y para especificar las características de las radiaciones de referencia recomendadas por la ISO.

CUADRO II-1. COEFICIENTES DE CONVERSIÓN DE KERMA EN AIRE A $H_p(10,0^\circ)$ EN UN BLOQUE CIUMR Y FACTORES DE DEPENDENCIA ANGULAR

| Energía de los fotones (MeV) | $H_p(10,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy) | Relación $H_p(10,\alpha)/H_p(10,0^\circ)$ para los ángulos α indicados | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
| 0,010 | 0,009 | 1,000 | 0,889 | 0,556 | 0,222 | 0,000 | 0,000 |
| 0,0125 | 0,098 | 1,000 | 0,929 | 0,704 | 0,388 | 0,102 | 0,000 |
| 0,015 | 0,264 | 1,000 | 0,966 | 0,822 | 0,576 | 0,261 | 0,030 |
| 0,0175 | 0,445 | 1,000 | 0,971 | 0,879 | 0,701 | 0,416 | 0,092 |
| 0,020 | 0,611 | 1,000 | 0,982 | 0,913 | 0,763 | 0,520 | 0,167 |
| 0,025 | 0,883 | 1,000 | 0,980 | 0,937 | 0,832 | 0,650 | 0,319 |
| 0,030 | 1,112 | 1,000 | 0,984 | 0,950 | 0,868 | 0,716 | 0,411 |
| 0,040 | 1,490 | 1,000 | 0,986 | 0,959 | 0,894 | 0,760 | 0,494 |
| 0,050 | 1,766 | 1,000 | 0,988 | 0,963 | 0,891 | 0,779 | 0,526 |
| 0,060 | 1,892 | 1,000 | 0,988 | 0,969 | 0,911 | 0,793 | 0,561 |
| 0,080 | 1,903 | 1,000 | 0,997 | 0,970 | 0,919 | 0,809 | 0,594 |
| 0,100 | 1,811 | 1,000 | 0,992 | 0,972 | 0,927 | 0,834 | 0,612 |

CUADRO II-2. ESPECIFICACIONES PARA LAS RADIACIONES FOTÓNICAS DE REFERENCIA DE LA ISO, SERIES DE ESPECTRO ESTRECHO (RADIACION GAMMA)

| Energía (media) (keV) | Fuente gamma | Primera capa de semirreducción (mm Cu) |
|-----------------------|--------------|--|
| 662 | Cesio 137 | 10,3 |
| 1250 | Cobalto 60 | 14,6 |

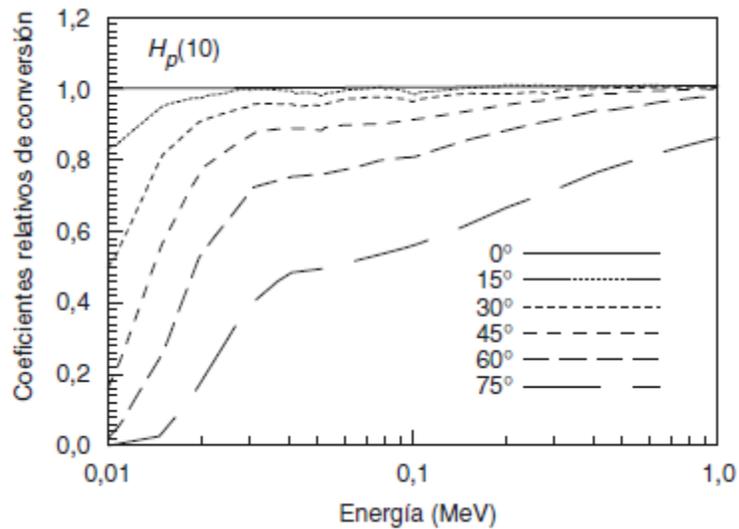


FIG. II-1. Dependencia angular de los coeficientes de conversión de fotones para Hp(10) en un bloque CIUMR

CUADRO II-3 CARACTERISTICAS DE LOS DOSIMETROS TERMOLUMINISCENTES UTILIZADOS EN LAS MEDICIONES

| Feature | |
|---|---|
| Form | solid disc 4.5 mm diameter, of selected thickness |
| Effective atomic number Z | 8.2 |
| Density [g.cm-3] | 2.5 |
| TL emission spectrum [nm] | 385 |
| Relative sensitivity to TLD-100 | 15 |
| Main peak temperature [°C] | 210 |
| Zero dose reading [nGy] | 100 |
| Detection threshold [nGy] | 50 |
| Linearity range [Gy] | $10^{-6} \div 10$ |
| Repeatability | < 2% |
| Photon energy dependence 30 keV - 1.3 MeV | < 20 % |
| Batch homogeneity [1 SD] | < 5 % |
| Thermal fading [% at room temperature] | < 5% / yr |
| Fluorescent light effect on fading and zero reading | negligible at laboratory light intensity |
| Reusability | unlimited |
| Dose rate influence | independent |

Anexo III

FOTOS DE CALIBRACION DEL SISTEMAS



Foto No.1 Lector RADOS 2000



Foto No. 3 Disco del irradiador local con los pellets y la bomba de vacío.



Foto No. 4 Banco de Calibración y posicionamiento de los dosímetros

FOTOS DEL ESCANER UBICADO EN EL PUESTO FRONTERIZO LAS MANOS



Foto No. 5 edificio donde está instalado el escáner



Foto No. 6 El equipo de la compañía Alvimer



Foto No.7 Proceso de escaneo al contenedor



Foto No.8 Colocación de los dosímetros detrás del túnel



Foto No. 9 Caja donde están los dosímetros



Foto No. 10 Dosímetro dentro del túnel

Anexo IV

DOSIS EQUIVALENTE PERSONAL POR CADA UNO DE LOS PERIODOS Y POR CADA SITIO

Tabla No. 12 Muestra la dosis equivalente personal para los periodos 1 y 2 (febrero – Abril)

| 1 | | | | 2 | | | |
|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------------------|---------|------------------|---------------|
| Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] | Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] |
| 2016/02/12- 2016/03/11 | A1 | 2095 | 0.00 | 2016/03/11- 2016/04/13 | A1 | 2416 | 0.10 |
| | A2 | 3165 | 0.06 | | A2 | 12243 | 0.12 |
| | A3 | 2644 | 0.05 | | A3 | 2985 | 0.09 |
| | A4 | 2640 | 0.05 | | A4 | 2982 | 0.09 |
| | A5 | 3294 | 0.06 | | A5 | 12808 | 0.12 |
| | A6 | 2396 | 0.07 | | A6 | 2735 | 0.10 |
| | A7 | 2307 | 0.07 | | A7 | 568 | 0.09 |
| | A8 | 2395 | 0.09 | | A8 | 12671 | 0.10 |
| | A8 | 3298 | 0.07 | | A8 | 638 | 0.10 |
| | A10 | 2700 | 0.11 | | A10 | 631 | 0.10 |
| | B1 | 2066 | 0.06 | | B1 | 2234 | 0.08 |
| | B2 | 3319 | 0.06 | | B2 | 12839 | 0.08 |
| | B3 | 2400 | 0.06 | | B3 | 2749 | 0.09 |
| | B4 | 2996 | 0.06 | | B4 | 12202 | 0.08 |
| | B5 | 3239 | 0.03 | | B5 | 12440 | 0.09 |
| | B6 | 3137 | 0.04 | | B6 | 12217 | 0.08 |
| | B7 | 2346 | 0.08 | | B7 | 558 | 0.10 |
| | B8 | 8084 | 0.07 | | B8 | 607 | 0.09 |
| | B9 | 2312 | 0.09 | | B9 | 12203 | 0.09 |
| | B10 | 8099 | 0.08 | | B10 | 2231 | 0.05 |
| | B11 | 2484 | 0.08 | | B11 | 2889 | 0.07 |
| | B12 | 12933 | 0.07 | | B12 | 564 | 0.07 |
| | B13 | 8049 | 0.06 | | B13 | 12079 | 0.09 |
| | B14 | 8061 | 0.06 | | B14 | 3362 | 0.06 |
| | B15 | 8078 | 0.03 | | B15 | 3102 | 0.00 |
| | B16 | 2898 | 0.03 | | B16 | 605 | 0.11 |
| | C1 | 12782 | 0.08 | | C1 | 10155 | 0.11 |
| | C1 | 3108 | 0.27 | | C1 | 641 | 0.12 |
| | C3 | 2331 | 0.12 | | C3 | 2999 | 0.11 |
| | C4 | 8056 | 0.07 | | C4 | 8036 | 0.10 |
| | C5 | 2218 | 0.11 | | C5 | 12384 | 0.10 |
| | C6 | 8085 | 0.11 | | C6 | 567 | 0.09 |
| | C7 | 12794 | 0.09 | | C7 | 749 | 0.11 |
| | D1 | 3244 | 0.08 | | D1 | 12578 | 0.14 |
| | D2 | 2708 | 0.07 | | D2 | 3254 | 0.12 |
| | D3 | 2033 | 0.08 | | D3 | 2191 | 0.13 |
| | D4 | 2305 | 0.08 | | D4 | 2662 | 0.12 |
| | D5 | 3397 | 0.10 | | D5 | 12995 | 0.10 |
| | D6 | 2755 | 0.06 | | D6 | 8009 | 0.13 |
| | D7 | 2347 | 0.10 | | D7 | 2515 | 0.09 |
| | D8 | 8006 | 0.07 | | D8 | 3043 | 0.10 |
| | D9 | 2321 | 0.11 | | D9 | 12575 | 0.10 |
| | D10 | 12731 | 0.08 | | D10 | 643 | 0.11 |
| | E1 | 3138 | 0.06 | | E1 | 12223 | 0.09 |
| | E2 | 3140 | 0.05 | | E2 | 12224 | 0.08 |
| | E3 | 2979 | 0.08 | | E3 | 10192 | 0.07 |
| | E4 | 2402 | 0.08 | | E4 | 2770 | 0.09 |
| | E5 | 2980 | 0.07 | | E5 | 12022 | 0.09 |
| E6 | 2687 | 0.06 | E6 | 3019 | 0.13 | | |
| E7 | 2713 | 0.05 | E7 | 647 | 0.10 | | |
| E8 | 2952 | 0.04 | E8 | 610 | 0.09 | | |
| E9 | 2286 | 0.05 | E9 | 563 | 0.10 | | |
| E10 | 1154 | 0.06 | E10 | 12235 | 0.12 | | |
| E11 | 1231 | 0.10 | E11 | 691 | 0.07 | | |
| E12 | 12288 | 0.05 | E12 | 10177 | 0.09 | | |
| E13 | 3399 | 0.05 | E13 | 2115 | 0.08 | | |
| F1 | 2289 | 0.08 | F1 | 565 | 0.10 | | |
| F2 | 12715 | 0.08 | F2 | 955 | 0.10 | | |
| F3 | 3021 | 0.09 | F3 | 570 | 0.09 | | |

Tabla No. 13 Muestra la dosis equivalente personal para los periodos 3 y 4 (Abril – junio)

| 3 | | | | 4 | | | |
|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------------------|---------|------------------|---------------|
| Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] | Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] |
| 2016/04/13- 2016/05/12 | A1 | 2095 | 0.08 | 2016/05/12- 2016/06/13 | A1 | 2416 | 0.08 |
| | A2 | 3165 | 0.11 | | A2 | 12243 | 0.11 |
| | A3 | 2644 | 0.07 | | A3 | 2985 | 0.07 |
| | A4 | 2640 | 0.09 | | A4 | 2982 | 0.09 |
| | A5 | 3249 | 0.01 | | A5 | 12808 | 0.11 |
| | A6 | 2396 | 0.09 | | A6 | 2735 | 0.09 |
| | A7 | 2307 | 0.04 | | A7 | 568 | 0.12 |
| | A8 | 2395 | 0.05 | | A8 | 12671 | 0.13 |
| | A8 | 3298 | 0.03 | | A8 | 638 | 0.17 |
| | A10 | 2700 | 0.07 | | A10 | 631 | 0.15 |
| | B1 | 2066 | 0.07 | | B1 | 2234 | 0.07 |
| | B2 | 3319 | 0.07 | | B2 | 12839 | 0.07 |
| | B3 | 2400 | 0.08 | | B3 | 2749 | 0.07 |
| | B4 | 2996 | 0.06 | | B4 | 12202 | 0.06 |
| | B5 | 3239 | 0.06 | | B5 | 12440 | 0.06 |
| | B6 | 3137 | 0.07 | | B6 | 12217 | 0.07 |
| | B7 | 2346 | 0.05 | | B7 | 558 | 0.12 |
| | B8 | 8084 | 0.05 | | B8 | 607 | 0.13 |
| | B9 | 2312 | 0.06 | | B9 | 12203 | 0.11 |
| | B10 | 8099 | 0.06 | | B10 | 2231 | 0.11 |
| | B11 | 2484 | 0.08 | | B11 | 2889 | 0.06 |
| | B12 | 12933 | 0.06 | | B12 | 564 | 0.13 |
| | B13 | 8049 | 0.04 | | B13 | 12079 | 0.12 |
| | B14 | 8061 | 0.04 | | B14 | 3362 | 0.10 |
| | B15 | 8078 | 0.02 | | B15 | 3102 | 0.15 |
| | B16 | 2898 | 0.03 | | B16 | 605 | 0.15 |
| | C1 | 12782 | 0.07 | | C1 | 10155 | 0.28 |
| | C1 | 3108 | 0.18 | | C1 | 641 | 0.17 |
| | C3 | 2331 | 0.09 | | C3 | 2999 | 0.05 |
| | C4 | 8056 | 0.06 | | C4 | 8036 | 0.13 |
| | C5 | 2218 | 0.07 | | C5 | 12384 | 0.14 |
| | C6 | 8085 | 0.07 | | C6 | 567 | 0.16 |
| | C7 | 12794 | 0.11 | | C7 | 749 | 0.05 |
| | D1 | 3244 | 0.13 | | D1 | 12578 | 0.13 |
| | D2 | 2708 | 0.10 | | D2 | 3254 | 0.10 |
| | D3 | 2033 | 0.11 | | D3 | 2191 | 0.11 |
| | D4 | 2305 | 0.11 | | D4 | 2662 | 0.11 |
| | D5 | 3397 | 0.09 | | D5 | 12995 | 0.09 |
| | D6 | 2755 | 0.14 | | D6 | 8009 | 0.14 |
| | D7 | 2347 | 0.07 | | D7 | 2515 | 0.12 |
| | D8 | 8006 | 0.06 | | D8 | 3043 | 0.13 |
| | D9 | 2321 | 0.09 | | D9 | 12575 | 0.16 |
| | D10 | 12731 | 0.07 | | D10 | 643 | 0.13 |
| | E1 | 3138 | 0.07 | | E1 | 12223 | 0.07 |
| | E2 | 3140 | 0.06 | | E2 | 12224 | 0.06 |
| | E3 | 2979 | 0.06 | | E3 | 10192 | 0.06 |
| | E4 | 2402 | 0.08 | | E4 | 2770 | 0.08 |
| | E5 | 2980 | 0.08 | | E5 | 12022 | 0.08 |
| E6 | 2687 | 0.11 | E6 | 3019 | 0.11 | | |
| E7 | 2713 | 0.03 | E7 | 647 | 0.14 | | |
| E8 | 2952 | 0.03 | E8 | 610 | 0.17 | | |
| E9 | 2286 | 0.05 | E9 | 563 | 0.18 | | |
| E10 | 1154 | 0.04 | E10 | 12235 | 0.10 | | |
| E11 | 1231 | 0.07 | E11 | 691 | 0.05 | | |
| E12 | 12288 | 0.06 | E12 | 10177 | 0.13 | | |
| E13 | 3399 | 0.05 | E13 | 2115 | 0.10 | | |
| F1 | 2289 | 0.06 | F1 | 565 | 0.13 | | |
| F2 | 12715 | 0.06 | F2 | 955 | 0.10 | | |
| F3 | 3021 | 0.05 | F3 | 570 | 0.13 | | |

Tabla No. 14 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 5 y 6 (junio – Agosto)

| 5 | | | | 6 | | | |
|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------------------|---------|------------------|---------------|
| Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] | Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] |
| 2016/06/13- 2016/07/15 | A1 | 10154 | 0.05 | 2016/07/15- 2016/08/12 | A1 | 2416 | 0.03 |
| | A2 | 3165 | 0.09 | | A2 | 12243 | 0.05 |
| | A3 | 2644 | 0.06 | | A3 | 2985 | 0.03 |
| | A4 | 2640 | 0.06 | | A4 | 2982 | 0.04 |
| | A5 | 3294 | 0.09 | | A5 | 12808 | 0.06 |
| | A6 | 2396 | 0.06 | | A6 | 2735 | 0.05 |
| | A7 | 2307 | 0.08 | | A7 | 568 | 0.06 |
| | A8 | 2395 | 0.09 | | A8 | 12671 | 0.07 |
| | A8 | 3298 | 0.07 | | A8 | 638 | 0.07 |
| | A10 | 2700 | 0.12 | | A10 | 631 | 0.09 |
| | B1 | 2066 | 0.06 | | B1 | 2234 | 0.03 |
| | B2 | 3319 | 0.06 | | B2 | 12839 | 0.03 |
| | B3 | 2400 | 0.07 | | B3 | 2749 | 0.02 |
| | B4 | 2996 | 0.11 | | B4 | 12202 | 0.02 |
| | B5 | 3239 | 0.04 | | B5 | 12440 | 0.03 |
| | B6 | 3137 | 0.00 | | B6 | 12217 | 0.06 |
| | B7 | 2346 | 0.10 | | B7 | 558 | 0.08 |
| | B8 | 8084 | 0.08 | | B8 | 607 | 0.08 |
| | B9 | 2312 | 0.13 | | B9 | 12203 | 0.05 |
| | B10 | 8099 | 0.10 | | B10 | 2231 | 0.07 |
| | B11 | 2484 | 0.14 | | B11 | 2889 | 0.08 |
| | B12 | 12933 | 0.09 | | B12 | 564 | 0.08 |
| | B13 | 8049 | 0.09 | | B13 | 12079 | 0.08 |
| | B14 | 8061 | 0.08 | | B14 | 3362 | 0.07 |
| | B15 | 8078 | 0.04 | | B15 | 3102 | 0.13 |
| | B16 | 2898 | 0.08 | | B16 | 605 | 0.09 |
| | C1 | 12782 | 0.11 | | C1 | 10155 | 0.09 |
| | C1 | 3108 | 0.27 | | C1 | 641 | 0.09 |
| | C3 | 2331 | 0.15 | | C3 | 2999 | 0.09 |
| | C4 | 8056 | 0.10 | | C4 | 8036 | 0.08 |
| | C5 | 2218 | 0.14 | | C5 | 12384 | 0.05 |
| | C6 | 8085 | 0.15 | | C6 | 567 | 0.08 |
| | C7 | 12794 | 0.12 | | C7 | 749 | 0.08 |
| | D1 | 3244 | 0.10 | | D1 | 12578 | 0.07 |
| | D2 | 2708 | 0.08 | | D2 | 3254 | 0.06 |
| | D3 | 2033 | 0.09 | | D3 | 2191 | 0.06 |
| | D4 | 2305 | 0.10 | | D4 | 2662 | 0.07 |
| | D5 | 3397 | 0.10 | | D5 | 12995 | 0.08 |
| | D6 | 2755 | 0.07 | | D6 | 8009 | 0.07 |
| | D7 | 2347 | 0.11 | | D7 | 2515 | 0.09 |
| | D8 | 8006 | 0.08 | | D8 | 3043 | 0.09 |
| | D9 | 2321 | 0.12 | | D9 | 12575 | 0.09 |
| | D10 | 12731 | 0.10 | | D10 | 643 | 0.09 |
| | E1 | 3138 | 0.09 | | E1 | 12223 | 0.05 |
| | E2 | 3140 | 0.10 | | E2 | 12224 | 0.08 |
| E3 | 2979 | 0.11 | E3 | 10192 | 0.04 | | |
| E4 | 2402 | 0.07 | E4 | 2770 | 0.05 | | |
| E5 | 2980 | 0.10 | E5 | 12022 | 0.03 | | |
| E6 | 2687 | 0.06 | E6 | 3019 | 0.05 | | |
| E7 | 2713 | 0.07 | E7 | 647 | 0.10 | | |
| E8 | 2952 | 0.06 | E8 | 610 | 0.10 | | |
| E9 | 2286 | 0.08 | E9 | 563 | 0.10 | | |
| E10 | 1154 | 0.08 | E10 | 12235 | 0.07 | | |
| E11 | 1231 | 0.11 | E11 | 691 | 0.08 | | |
| E12 | 12288 | 0.09 | E12 | 10177 | 0.07 | | |
| E13 | 3399 | 0.07 | E13 | 2115 | 0.08 | | |
| F1 | 2289 | 0.09 | F1 | 565 | 0.08 | | |
| F2 | 12715 | 0.10 | F2 | 955 | 0.08 | | |
| F3 | 3021 | 0.10 | F3 | 570 | 0.09 | | |

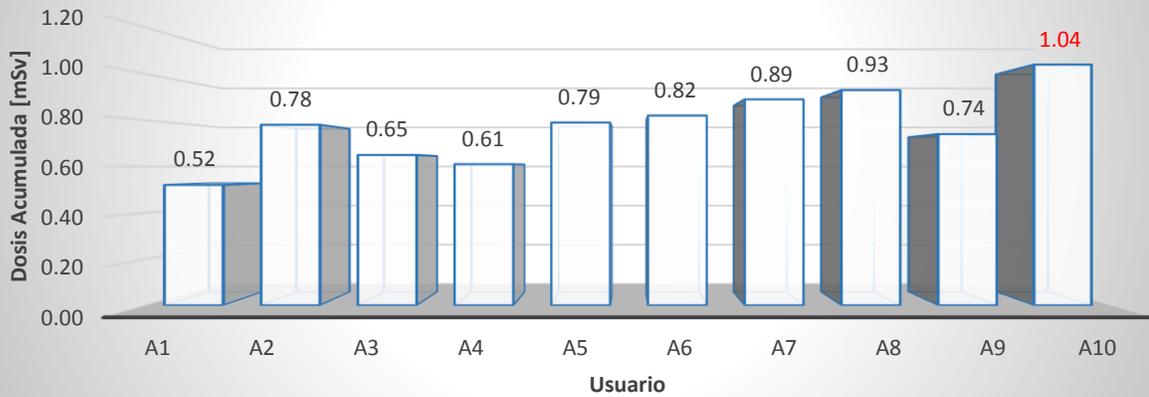
Tabla No. 15 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 7 y 8 (Agosto – Octubre)

| 7 | | | | 8 | | | |
|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------------------|---------|------------------|---------------|
| Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] | Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] |
| 2016/08/12- 2016/09/09 | A1 | 10154 | 0.05 | 2016/09/09- 2016/10/14 | A1 | 2416 | 0.07 |
| | A2 | 3165 | 0.08 | | A2 | 12243 | 0.10 |
| | A3 | 2644 | 0.10 | | A3 | 2985 | 0.06 |
| | A4 | 2640 | 0.07 | | A4 | 2982 | 0.06 |
| | A5 | 3294 | 0.08 | | A5 | 12808 | 0.11 |
| | A6 | 2396 | 0.06 | | A6 | 2735 | 0.10 |
| | A7 | 2307 | 0.06 | | A7 | 568 | 0.13 |
| | A8 | 2395 | 0.06 | | A8 | 12671 | 0.12 |
| | A8 | 3298 | 0.05 | | A8 | 638 | 0.03 |
| | A10 | 2700 | 0.10 | | A10 | 631 | 0.02 |
| | B1 | 2066 | 0.06 | | B1 | 2234 | 0.10 |
| | B2 | 3319 | 0.06 | | B2 | 12839 | 0.08 |
| | B3 | 2400 | 0.07 | | B3 | 2749 | 0.06 |
| | B4 | 2996 | 0.07 | | B4 | 12202 | 0.09 |
| | B5 | 3239 | 0.04 | | B5 | 12440 | 0.07 |
| | B6 | 3137 | 0.04 | | B6 | 12217 | 0.06 |
| | B7 | 2346 | 0.07 | | B7 | 558 | 0.09 |
| | B8 | 8084 | 0.08 | | B8 | 607 | 0.12 |
| | B9 | 2312 | 0.11 | | B9 | 12203 | 0.19 |
| | B10 | 8099 | 0.09 | | B10 | 2231 | 0.08 |
| | B11 | 2484 | 0.17 | | B11 | 2889 | 0.09 |
| | B12 | 12933 | 0.09 | | B12 | 564 | 0.13 |
| | B13 | 8049 | 0.06 | | B13 | 12079 | 0.12 |
| | B14 | 8061 | 0.07 | | B14 | 3362 | 0.11 |
| | B15 | 8078 | 0.05 | | B15 | 3102 | 0.16 |
| | B16 | 2898 | 0.07 | | B16 | 605 | 0.14 |
| | C1 | 12782 | 0.08 | | C1 | 10155 | 0.17 |
| | C1 | 3108 | 0.16 | | C1 | 641 | 0.17 |
| | C3 | 2331 | 0.12 | | C3 | 2999 | 0.16 |
| | C4 | 8056 | 0.07 | | C4 | 8036 | 0.15 |
| | C5 | 2218 | 0.12 | | C5 | 12384 | 0.11 |
| | C6 | 8085 | 0.10 | | C6 | 567 | 0.14 |
| | C7 | 12794 | 0.08 | | C7 | 749 | 0.12 |
| | D1 | 3244 | 0.08 | | D1 | 12578 | 0.07 |
| | D2 | 2708 | 0.09 | | D2 | 3254 | 0.10 |
| | D3 | 2033 | 0.10 | | D3 | 2191 | 0.11 |
| | D4 | 2305 | 0.09 | | D4 | 2662 | 0.11 |
| | D5 | 3397 | 0.11 | | D5 | 12995 | 0.15 |
| | D6 | 2755 | 0.09 | | D6 | 8009 | 0.10 |
| | D7 | 2347 | 0.09 | | D7 | 2515 | 0.13 |
| | D8 | 8006 | 0.07 | | D8 | 3043 | 0.16 |
| | D9 | 2321 | 0.10 | | D9 | 12575 | 0.17 |
| | D10 | 12731 | 0.06 | | D10 | 643 | 0.14 |
| | E1 | 3138 | 0.05 | | E1 | 12223 | 0.08 |
| | E2 | 3140 | 0.06 | | E2 | 12224 | 0.10 |
| | E3 | 2979 | 0.08 | | E3 | 10192 | 0.07 |
| | E4 | 2402 | 0.09 | | E4 | 2770 | 0.09 |
| | E5 | 2980 | 0.09 | | E5 | 12022 | 0.09 |
| E6 | 2687 | 0.06 | E6 | 3019 | 0.07 | | |
| E7 | 2713 | 0.05 | E7 | 647 | 0.13 | | |
| E8 | 2952 | 0.04 | E8 | 610 | 0.13 | | |
| E9 | 2286 | 0.07 | E9 | 563 | 0.13 | | |
| E10 | 1154 | 0.06 | E10 | 12235 | 0.08 | | |
| E11 | 1231 | 0.08 | E11 | 691 | 0.12 | | |
| E12 | 12288 | 0.06 | E12 | 10177 | 0.09 | | |
| E13 | 3399 | 0.08 | E13 | 2115 | 0.12 | | |
| F1 | 2289 | 0.06 | F1 | 565 | 0.03 | | |
| F2 | 12715 | 0.09 | F2 | 955 | 0.02 | | |
| F3 | 3021 | 0.07 | F3 | 570 | 0.10 | | |

Tabla No. 16 Muestra la dosis equivalente personal para los períodos 9 y 10 (octubre–Diciembre)

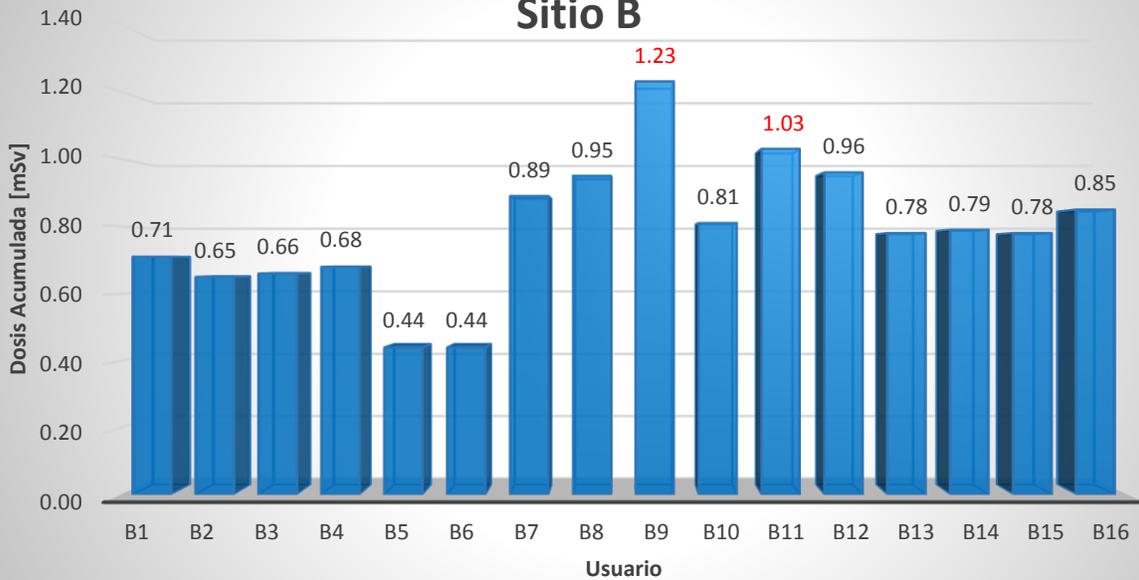
| 9 | | | | 10 | | | |
|---------------------------|---------|------------------|---------------|---------------------------|---------|------------------|---------------|
| Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] | Periodo | Usuario | N° de dosiometro | Hp (10) [mSv] |
| 2016/10/14- 2016/11/16 | A1 | 10154 | 0.00 | 2016/09/09- 2016/10/14 | A1 | 2416 | 0.06 |
| | A2 | 3165 | 0.00 | | A2 | 12243 | 0.06 |
| | A3 | 2644 | 0.10 | | A3 | 2985 | 0.02 |
| | A4 | 2640 | 0.00 | | A4 | 2982 | 0.06 |
| | A5 | 3294 | 0.10 | | A5 | 12808 | 0.05 |
| | A6 | 2396 | 0.12 | | A6 | 2735 | 0.08 |
| | A7 | 2307 | 0.11 | | A7 | 568 | 0.13 |
| | A8 | 2395 | 0.10 | | A8 | 12671 | 0.12 |
| | A8 | 3298 | 0.00 | | A8 | 638 | 0.15 |
| | A10 | 2700 | 0.16 | | A10 | 631 | 0.12 |
| | B1 | 2066 | 0.13 | | B1 | 2234 | 0.05 |
| | B2 | 3319 | 0.11 | | B2 | 12839 | 0.03 |
| | B3 | 2400 | 0.12 | | B3 | 2749 | 0.02 |
| | B4 | 2996 | 0.11 | | B4 | 12202 | 0.02 |
| | B5 | 3239 | 0.00 | | B5 | 12440 | 0.02 |
| | B6 | 3137 | 0.00 | | B6 | 12217 | 0.02 |
| | B7 | 2346 | 0.10 | | B7 | 558 | 0.10 |
| | B8 | 8084 | 0.12 | | B8 | 607 | 0.13 |
| | B9 | 2312 | 0.14 | | B9 | 12203 | 0.26 |
| | B10 | 8099 | 0.12 | | B10 | 2231 | 0.05 |
| | B11 | 2484 | 0.13 | | B11 | 2889 | 0.13 |
| | B12 | 12933 | 0.12 | | B12 | 564 | 0.12 |
| | B13 | 8049 | 0.00 | | B13 | 12079 | 0.12 |
| | B14 | 8061 | 0.10 | | B14 | 3362 | 0.10 |
| | B15 | 8078 | 0.00 | | B15 | 3102 | 0.20 |
| | B16 | 2898 | 0.00 | | B16 | 605 | 0.15 |
| | C1 | 12782 | 0.14 | | C1 | 10155 | 0.14 |
| | C1 | 3108 | 0.27 | | C1 | 641 | 0.17 |
| | C3 | 2331 | 0.17 | | C3 | 2999 | 0.13 |
| | C4 | 8056 | 0.14 | | C4 | 8036 | 0.05 |
| | C5 | 2218 | 0.19 | | C5 | 12384 | 0.04 |
| | C6 | 8085 | 0.22 | | C6 | 567 | 0.08 |
| | C7 | 12794 | 0.14 | | C7 | 749 | 0.13 |
| | D1 | 3244 | 0.00 | | D1 | 12578 | 0.06 |
| | D2 | 2708 | 0.00 | | D2 | 3254 | 0.05 |
| | D3 | 2033 | 0.13 | | D3 | 2191 | 0.07 |
| | D4 | 2305 | 0.13 | | D4 | 2662 | 0.05 |
| | D5 | 3397 | 0.16 | | D5 | 12995 | 0.04 |
| | D6 | 2755 | 0.00 | | D6 | 8009 | 0.05 |
| | D7 | 2347 | 0.19 | | D7 | 2515 | 0.12 |
| | D8 | 8006 | 0.13 | | D8 | 3043 | 0.16 |
| | D9 | 2321 | 0.19 | | D9 | 12575 | 0.12 |
| | D10 | 12731 | 0.14 | | D10 | 643 | 0.12 |
| | E1 | 3138 | 0.00 | | E1 | 12223 | 0.04 |
| | E2 | 3140 | 0.00 | | E2 | 12224 | 0.07 |
| E3 | 2979 | 0.10 | E3 | 10192 | 0.02 | | |
| E4 | 2402 | 0.15 | E4 | 2770 | 0.05 | | |
| E5 | 2980 | 0.11 | E5 | 12022 | 0.10 | | |
| E6 | 2687 | 0.00 | E6 | 3019 | 0.13 | | |
| E7 | 2713 | 0.00 | E7 | 647 | 0.26 | | |
| E8 | 2952 | 0.00 | E8 | 610 | 0.46 | | |
| E9 | 2286 | 0.00 | E9 | 563 | 0.85 | | |
| E10 | 1154 | 0.10 | E10 | 12235 | 1.08 | | |
| E11 | 1231 | 0.12 | E11 | 691 | 0.11 | | |
| E12 | 12288 | 0.00 | E12 | 10177 | 0.10 | | |
| E13 | 3399 | 0.11 | E13 | 2115 | 1.25 | | |
| F1 | 2289 | 0.00 | F1 | 565 | 0.11 | | |
| F2 | 12715 | 0.12 | F2 | 955 | 0.10 | | |
| F3 | 3021 | 0.10 | F3 | 570 | 0.11 | | |

Equivalente de Dosis Personal Acumulada Sitio A



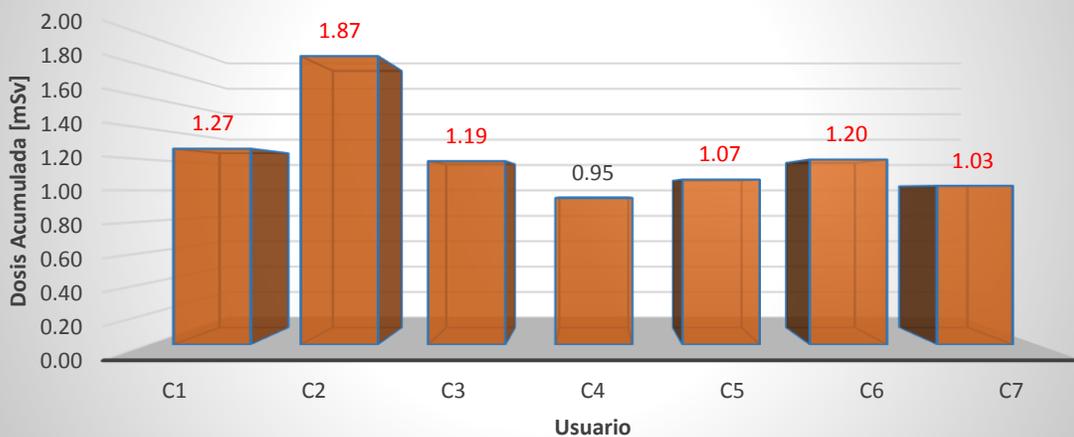
Gráfica No. 5 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio A

Dosis Equivalente Personal Acumulada Sitio B



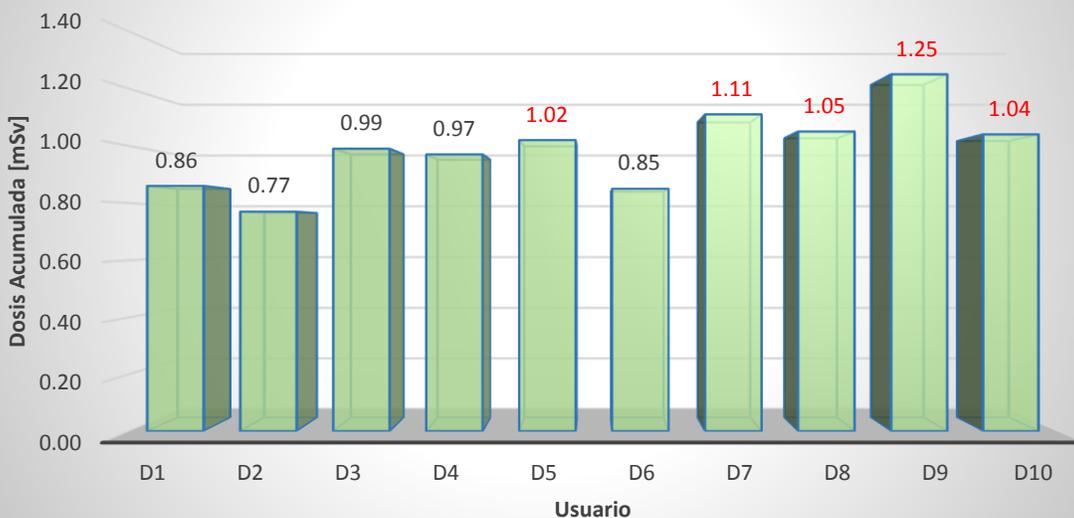
Gráfica No. 6 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio B

Dosis Equivalente Personal Acumulada sitio C

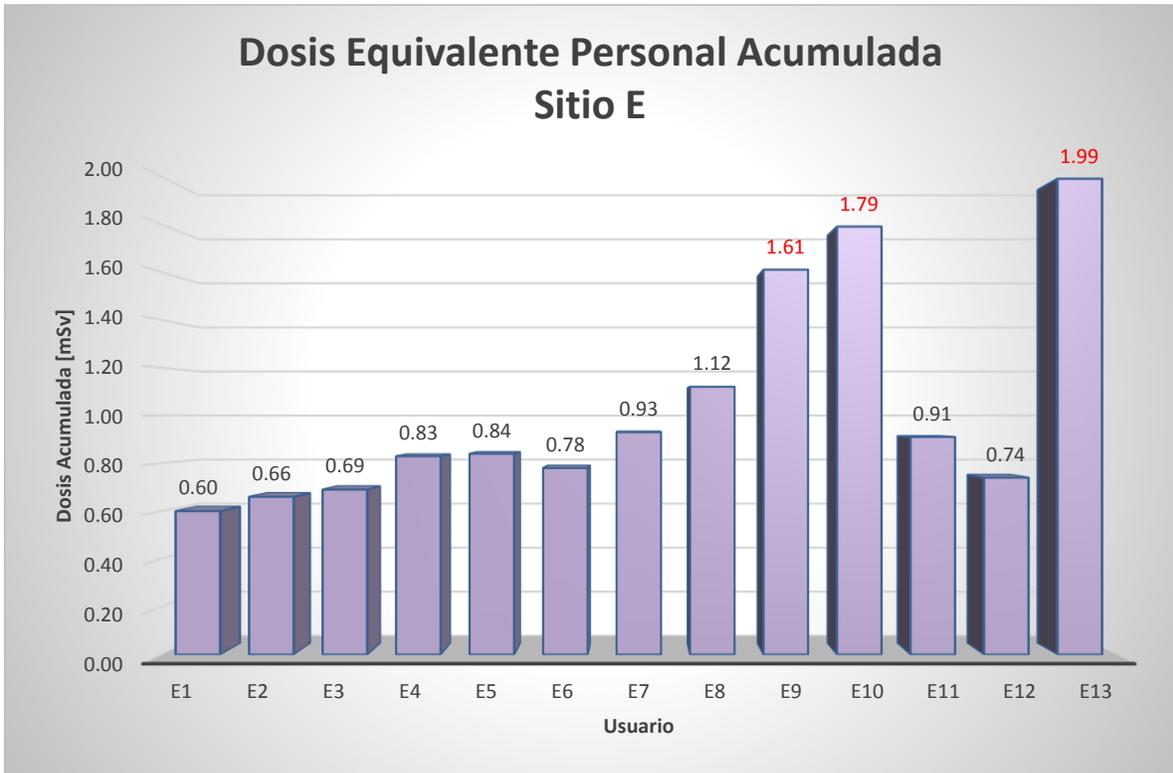


Gráfica No. 7 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio C

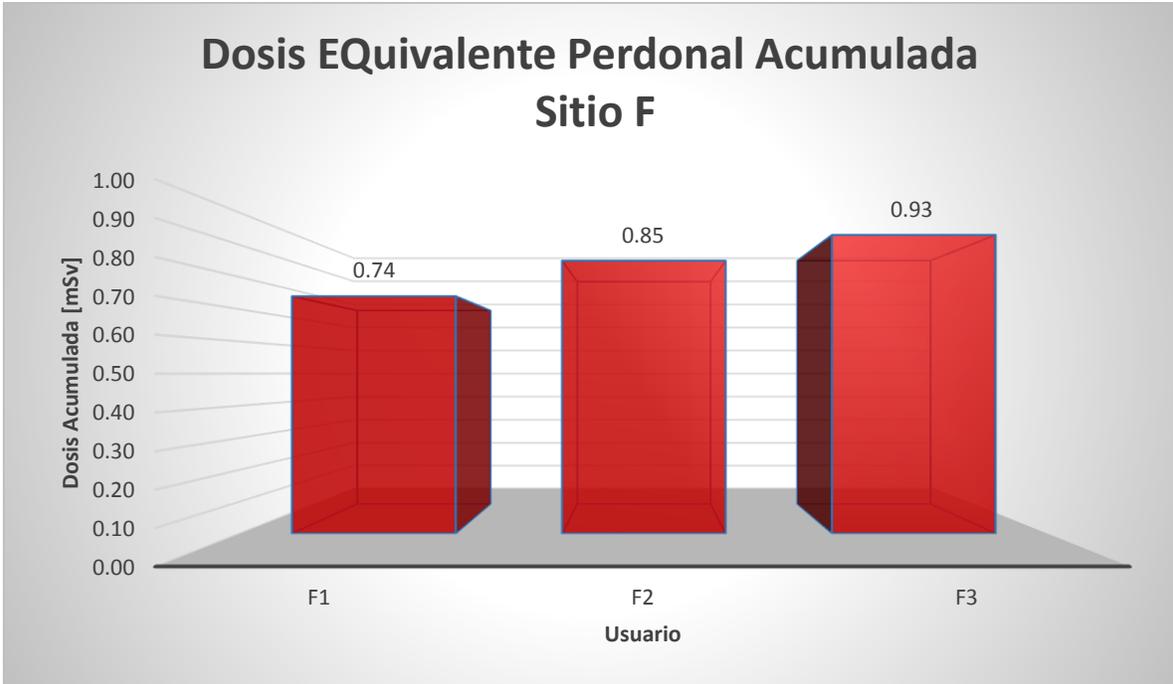
Dosis Equivalente Personal Acumulada Sitio D



Gráfica No. 8 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio D



Gráfica No. 9 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio E



Gráfica No.10 Dosis Máxima acumulada por el personal en todo el periodo de medición para el Sitio F

Tabla No. 17 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 1 de febrero a marzo

| 1 | | | | | |
|----------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de Dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/02/12- 2016/03/11 | 4192 | 0.06 | 0.07 | 0.01 |
| | | 4189 | 0.07 | | |
| | | 4185 | 0.07 | | |
| | | 4186 | 0.07 | | |
| | | 4133 | 0.08 | | |
| | | 4177 | 0.07 | | |
| | | 4167 | 0.06 | | |
| B | | 4114 | 0.05 | 0.07 | 0.03 |
| | | 4165 | 0.06 | | |
| | | 4130 | 0.06 | | |
| | | 4105 | 0.06 | | |
| | | 4120 | 0.05 | | |
| | | 4183 | 0.06 | | |
| C | | 4164 | 0.14 | 0.07 | 0.00 |
| | | 4142 | 0.07 | | |
| | | 4175 | 0.07 | | |
| | | 4178 | 0.08 | | |
| | | 4111 | 0.07 | | |
| | | 4108 | 0.07 | | |
| D | | 4110 | 0.07 | 0.10 | 0.08 |
| | | 4104 | 0.07 | | |
| | | 4102 | 0.07 | | |
| | | 4196 | 0.06 | | |
| | | 4195 | 0.07 | | |
| | | 4198 | 0.25 | | |
| E | | 4197 | 0.06 | 0.07 | 0.04 |
| | | 4199 | 0.06 | | |
| | | 4194 | No entregado | | |
| | 4107 | 0.06 | | | |
| | 4118 | 0.06 | | | |
| | 4188 | 0.07 | | | |
| | 4132 | 0.06 | | | |
| F | 4187 | 0.05 | 0.07 | 0.00 | |
| | 4141 | 0.06 | | | |
| | 4134 | 0.16 | | | |
| | 4166 | 0.07 | | | |
| | 4173 | 0.07 | | | |
| | 4113 | 0.07 | | | |
| | 4168 | 0.06 | 0.07 | 0.00 | |
| | 4140 | 0.07 | | | |
| | 4176 | 0.07 | | | |
| | 4191 | 0.07 | | | |
| | | | | | |

Tabla No. 18 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 2 de marzo a abril

| 2 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/03/11- 2016/04/13 | 4153 | 0.08 | 0.08 | 0.00 |
| | | 4162 | 0.08 | | |
| | | 4171 | 0.08 | | |
| | | 4156 | 0.08 | | |
| | | 4158 | 0.08 | | |
| | | 4138 | 0.08 | | |
| | | 4152 | 0.08 | | |
| B | | 4128 | 0.08 | 0.08 | 0.00 |
| | | 4184 | 0.08 | | |
| | | 4122 | 0.08 | | |
| | | 4144 | 0.08 | | |
| | | 4149 | 0.08 | | |
| | | 4146 | 0.08 | | |
| C | | 4190 | 0.08 | 0.10 | 0.01 |
| | | 4180 | 0.10 | | |
| | | 4170 | 0.09 | | |
| | | 4181 | 0.11 | | |
| | | 4174 | 0.09 | | |
| | | 4131 | 0.09 | | |
| D | | 4115 | 0.09 | 0.09 | 0.02 |
| | | 4158 | 0.10 | | |
| | | 4143 | 0.08 | | |
| | | 4136 | 0.09 | | |
| | | 4157 | 0.14 | | |
| | | 4135 | 0.08 | | |
| | | 4155 | 0.08 | | |
| E | | 4127 | 0.08 | 0.08 | 0.00 |
| | | 4159 | 0.08 | | |
| | 4124 | 0.08 | | | |
| | 4151 | 0.08 | | | |
| | 4161 | 0.08 | | | |
| | 4179 | 0.08 | | | |
| | 4148 | 0.08 | | | |
| F | 4137 | 0.09 | 0.08 | 0.00 | |
| | 4147 | 0.08 | | | |
| | 4129 | 0.08 | | | |
| | 4193 | 0.08 | | | |
| | 4160 | 0.08 | | | |
| | 4145 | 0.08 | | | |
| | 4126 | 0.08 | | | |
| 4150 | 0.09 | | | | |
| | 4103 | 0.08 | | | |

Tabla No. 19 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 3 de Abril a Mayo

| 3 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviacion estandar |
| A | 2016/04/13- 2016/05/12 | 4192 | 0.08 | 0.08 | 0.01 |
| | | 4189 | 0.09 | | |
| | | 4185 | 0.09 | | |
| | | 4186 | 0.09 | | |
| | | 4133 | 0.08 | | |
| | | 4177 | 0.08 | | |
| | | 4167 | 0.08 | | |
| B | | 4114 | 0.08 | 0.09 | 0.03 |
| | | 4165 | 0.09 | | |
| | | 4130 | 0.16 | | |
| | | 4105 | 0.08 | | |
| | | 4120 | 0.08 | | |
| | | 4183 | 0.08 | | |
| | | 4164 | 0.09 | | |
| C | | 4142 | 0.10 | 0.10 | 0.01 |
| | | 4175 | 0.09 | | |
| | | 4109 | 0.13 | | |
| | | 4111 | 0.09 | | |
| | | 4108 | 0.09 | | |
| | | 4110 | 0.09 | | |
| | | 4104 | 0.09 | | |
| D | 4102 | 0.09 | 0.10 | 0.02 | |
| | 4196 | 0.09 | | | |
| | 4195 | 0.14 | | | |
| | 4198 | 0.09 | | | |
| | 4197 | 0.09 | | | |
| | 4199 | 0.09 | | | |
| | 4106 | 0.09 | | | |
| E | 4107 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | |
| | 4118 | 0.08 | | | |
| | 4188 | 0.09 | | | |
| | 4132 | 0.08 | | | |
| | 4187 | 0.08 | | | |
| | 4141 | 0.08 | | | |
| | 4134 | 0.09 | | | |
| F | 4166 | 0.08 | 0.08 | 0.01 | |
| | 4173 | 0.09 | | | |
| | 4113 | 0.09 | | | |
| | 4168 | 0.08 | | | |
| | 4140 | 0.09 | | | |
| | 4176 | 0.08 | | | |
| | 4191 | 0.08 | | | |

Tabla No. 20 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 4 de Mayo a Junio

| 4 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/05/12- 2016/06/13 | 4153 | 0.08 | 0.13 | 0.13 |
| | | 4162 | 0.08 | | |
| | | 4171 | 0.41 | | |
| | | 4156 | 0.08 | | |
| | | 4158 | 0.1 | | |
| | | 4138 | 0.07 | | |
| | | 4152 | 0.07 | | |
| B | | 4128 | 0.07 | 0.09 | 0.04 |
| | | 4184 | 0.07 | | |
| | | 4122 | 0.18 | | |
| | | 4144 | 0.07 | | |
| | | 4149 | 0.08 | | |
| | | 4146 | 0.07 | | |
| C | | 4190 | 0.07 | 0.09 | 0.01 |
| | | 4180 | 0.10 | | |
| | | 4170 | 0.09 | | |
| | | 4181 | 0.11 | | |
| | | 4174 | 0.08 | | |
| | | 4131 | 0.09 | | |
| D | | 4115 | 0.09 | 0.09 | 0.02 |
| | | 4158 | 0.10 | | |
| | | 4143 | 0.09 | | |
| | | 4136 | 0.11 | | |
| | | 4157 | 0.13 | | |
| | | 4135 | 0.08 | | |
| | | 4155 | 0.08 | | |
| E | | 4127 | 0.08 | 0.07 | 0.01 |
| | | 4159 | 0.08 | | |
| | 4124 | 0.07 | | | |
| | 4151 | 0.07 | | | |
| | 4161 | 0.06 | | | |
| | 4179 | 0.07 | | | |
| | 4148 | 0.08 | | | |
| F | 4137 | 0.07 | 0.08 | 0.00 | |
| | 4147 | 0.06 | | | |
| | 4129 | 0.08 | | | |
| | 4193 | 0.08 | | | |
| | 4160 | 0.08 | | | |
| | 4145 | 0.08 | | | |
| 4126 | 0.08 | | | | |
| | | 4150 | 0.08 | | |
| | | 4103 | 0.08 | | |

Tabla No. 21 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 5 de Junio a Julio

| 5 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/06/13- 2016/07/15 | 4192 | 0.09 | 0.16 | 0.16 |
| | | 4189 | 0.1 | | |
| | | 4185 | 0.53 | | |
| | | 4186 | 0.1 | | |
| | | 4133 | 0.11 | | |
| | | 4177 | 0.09 | | |
| | | 4167 | 0.1 | | |
| B | | 4114 | 0.08 | 0.11 | 0.06 |
| | | 4165 | 0.08 | | |
| | | 4130 | 0.24 | | |
| | | 4105 | 0.08 | | |
| | | 4120 | 0.09 | | |
| | | 4183 | 0.08 | | |
| | | 4164 | 0.09 | | |
| C | | 4142 | 0.13 | 0.13 | 0.05 |
| | | 4175 | 0.11 | | |
| | | 4109 | 0.25 | | |
| | | 4111 | 0.11 | | |
| | | 4108 | 0.11 | | |
| | | 4110 | 0.11 | | |
| | | 4104 | 0.12 | | |
| D | | 4102 | 0.1 | 0.10 | 0.00 |
| | | 4196 | 0.1 | | |
| | | 4195 | 0.1 | | |
| | | 4198 | 0.1 | | |
| | | 4197 | 0.1 | | |
| | | 4199 | 0.1 | | |
| | | 4106 | 0.1 | | |
| E | 4107 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | |
| | 4118 | 0.08 | | | |
| | 4188 | 0.08 | | | |
| | 4132 | 0.08 | | | |
| | 4187 | 0.08 | | | |
| | 4141 | 0.08 | | | |
| | 4134 | 0.09 | | | |
| F | 4166 | 0.09 | 0.09 | 0.02 | |
| | 4173 | 0.09 | | | |
| | 4113 | 0.14 | | | |
| | 4168 | 0.08 | | | |
| | 4140 | 0.09 | | | |
| | 4176 | 0.09 | | | |
| | 4191 | 0.08 | | | |

Tabla No. 22 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 6 de Julio a agosto

| 6 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/07/15- 2016/08/12 | 4153 | 0.07 | 0.12 | 0.11 |
| | | 4162 | 0.07 | | |
| | | 4171 | 0.37 | | |
| | | 4156 | 0.08 | | |
| | | 4154 | 0.1 | | |
| | | 4138 | 0.07 | | |
| | | 4152 | 0.07 | | |
| B | | 4128 | 0.08 | 0.07 | 0.01 |
| | | 4184 | 0.07 | | |
| | | 4122 | 0.07 | | |
| | | 4144 | 0.07 | | |
| | | 4149 | 0.08 | | |
| | | 4146 | 0.08 | | |
| | | 4190 | 0.07 | | |
| C | | 4180 | 0.10 | 0.11 | 0.04 |
| | | 4170 | 0.09 | | |
| | | 4181 | 0.19 | | |
| | | 4174 | 0.08 | | |
| | | 4131 | 0.09 | | |
| | | 4115 | 0.09 | | |
| | | 4158 | 0.10 | | |
| D | | 4143 | 0.10 | 0.09 | 0.01 |
| | | 4136 | 0.08 | | |
| | | 4157 | 0.10 | | |
| | | 4135 | 0.09 | | |
| | | 4155 | 0.09 | | |
| | | 4127 | 0.08 | | |
| | | 4159 | 0.07 | | |
| E | 4124 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | |
| | 4151 | 0.07 | | | |
| | 4161 | 0.09 | | | |
| | 4179 | 0.07 | | | |
| | 4148 | 0.08 | | | |
| | 4137 | 0.07 | | | |
| | 4147 | 0.06 | | | |
| F | 4129 | 0.08 | 0.08 | 0.01 | |
| | 4193 | 0.08 | | | |
| | 4160 | 0.1 | | | |
| | 4145 | 0.07 | | | |
| | 4121 | 0.07 | | | |
| | 4150 | 0.08 | | | |
| | 4103 | 0.07 | | | |

Tabla No. 23 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 7 de agosto a septiembre

| 7 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviacion estandar |
| A | 2016/08/12- 2016/09/09 | 4192 | 0.07 | 0.11 | 0.09 |
| | | 4189 | 0.08 | | |
| | | 4185 | 0.32 | | |
| | | 4186 | 0.08 | | |
| | | 4133 | 0.08 | | |
| | | 4177 | 0.07 | | |
| | | 4167 | 0.07 | | |
| B | | 4114 | 0.07 | 0.09 | 0.03 |
| | | 4165 | 0.07 | | |
| | | 4130 | 0.16 | | |
| | | 4105 | 0.07 | | |
| | | 4120 | 0.08 | | |
| | | 4183 | 0.08 | | |
| | | 4164 | 0.08 | | |
| C | | 4142 | 0.09 | 0.10 | 0.03 |
| | | 4175 | 0.09 | | |
| | | 4109 | 0.17 | | |
| | | 4111 | 0.09 | | |
| | | 4108 | 0.09 | | |
| | | 4110 | 0.09 | | |
| | | 4104 | 0.09 | | |
| D | | 4102 | 0.08 | 0.09 | 0.01 |
| | | 4196 | 0.08 | | |
| | | 4195 | 0.11 | | |
| | | 4198 | 0.08 | | |
| | | 4197 | 0.08 | | |
| | | 4199 | 0.09 | | |
| | | 4106 | 0.08 | | |
| E | 4107 | 0.08 | 0.09 | 0.04 | |
| | 4118 | 0.07 | | | |
| | 4188 | 0.19 | | | |
| | 4132 | 0.07 | | | |
| | 4187 | 0.08 | | | |
| | 4141 | 0.07 | | | |
| | 4134 | 0.07 | | | |
| F | 4166 | 0.08 | 0.08 | 0.01 | |
| | 4173 | 0.08 | | | |
| | 4113 | 0.11 | | | |
| | 4168 | 0.07 | | | |
| | 4140 | 0.07 | | | |
| | 4176 | 0.08 | | | |
| | 4191 | 0.07 | | | |

Tabla No. 24 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 8 de Septiembre a octubre

| 8 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/09/09- 2016/10/14 | 4153 | 0.08 | 0.14 | 0.14 |
| | | 4162 | 0.09 | | |
| | | 4171 | 0.45 | | |
| | | 4156 | 0.11 | | |
| | | 4154 | 0.11 | | |
| | | 4138 | 0.08 | | |
| | | 4152 | 0.08 | | |
| B | | 4128 | 0.07 | 0.10 | 0.05 |
| | | 4184 | 0.08 | | |
| | | 4122 | 0.2 | | |
| | | 4144 | 0.08 | | |
| | | 4149 | 0.08 | | |
| | | 4146 | 0.09 | | |
| | | 4190 | 0.08 | | |
| C | | 4180 | 0.12 | 0.12 | 0.04 |
| | | 4170 | 0.11 | | |
| | | 4181 | 0.20 | | |
| | | 4174 | 0.09 | | |
| | | 4131 | 0.11 | | |
| | | 4115 | 0.11 | | |
| D | | 4158 | 0.11 | 0.11 | 0.03 |
| | | 4143 | 0.1 | | |
| | | 4136 | 0.1 | | |
| | | 4157 | 0.17 | | |
| | | 4135 | 0.09 | | |
| | | 4155 | 0.1 | | |
| | | 4127 | 0.1 | | |
| E | | 4159 | 0.09 | 0.11 | 0.06 |
| | 4124 | 0.09 | | | |
| | 4151 | 0.09 | | | |
| | 4161 | 0.25 | | | |
| | 4179 | 0.08 | | | |
| | 4148 | 0.11 | | | |
| | 4137 | 0.09 | | | |
| F | 4147 | 0.08 | 0.08 | 0.02 | |
| | 4129 | 0.08 | | | |
| | 4193 | 0.08 | | | |
| | 4160 | 0.13 | | | |
| | 4145 | 0.08 | | | |
| | 4121 | 0.07 | | | |
| | 4150 | 0.08 | | | |
| 4103 | 0.06 | | | | |

Tabla No. 25 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 9 de octubre a noviembre

| 9 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/10/14- 2016/11/16 | 4192 | 0.08 | 0.12 | 0.11 |
| | | 4189 | 0.08 | | |
| | | 4185 | 0.38 | | |
| | | 4186 | 0.09 | | |
| | | 4133 | 0.09 | | |
| | | 4177 | 0.07 | | |
| | | 4167 | 0.08 | | |
| B | | 4114 | 0.07 | 0.09 | 0.05 |
| | | 4165 | 0.06 | | |
| | | 4130 | 0.19 | | |
| | | 4105 | 0.08 | | |
| | | 4120 | 0.08 | | |
| | | 4183 | 0.07 | | |
| | | 4164 | 0.07 | | |
| C | | 4142 | 0.10 | 0.10 | 0.03 |
| | | 4175 | 0.09 | | |
| | | 4109 | 0.17 | | |
| | | 4111 | 0.09 | | |
| | | 4108 | 0.10 | | |
| | | 4110 | 0.09 | | |
| | | 4104 | 0.09 | | |
| D | | 4102 | 0.07 | 0.09 | 0.03 |
| | | 4196 | 0.08 | | |
| | | 4195 | 0.16 | | |
| | | 4198 | 0.09 | | |
| | | 4197 | 0.08 | | |
| | | 4199 | 0.09 | | |
| | | 4106 | 0.08 | | |
| E | 4107 | 0.08 | 0.09 | 0.05 | |
| | 4118 | 0.07 | | | |
| | 4188 | 0.08 | | | |
| | 4132 | 0.2 | | | |
| | 4187 | 0.08 | | | |
| | 4141 | 0.07 | | | |
| | 4134 | 0.08 | | | |
| F | 4166 | 0.07 | 0.08 | 0.02 | |
| | 4173 | 0.07 | | | |
| | 4113 | 0.12 | | | |
| | 4168 | 0.07 | | | |
| | 4140 | 0.07 | | | |
| | 4176 | 0.07 | | | |
| | 4191 | 0.06 | | | |

Tabla No. 26 Medición de Dosis Equivalente Ambiental periodo 10 de noviembre a diciembre

| 10 | | | | | |
|-------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| Sitio | Periodo | N° de dosimetro | H*(10) [mSv] | Promedio H*(10) | Desviación estandar |
| A | 2016/11/16- 2016/12/14 | 4153 | 0.26 | 0.09 | 0.08 |
| | | 4162 | 0.06 | | |
| | | 4171 | 0.06 | | |
| | | 4156 | 0.07 | | |
| | | 4154 | 0.07 | | |
| | | 4138 | 0.05 | | |
| | | 4152 | 0.06 | | |
| B | | 4128 | 0.04 | 0.06 | 0.03 |
| | | 4184 | 0.05 | | |
| | | 4122 | 0.13 | | |
| | | 4144 | 0.05 | | |
| | | 4149 | 0.06 | | |
| | | 4146 | 0.06 | | |
| C | | 4190 | 0.05 | 0.08 | 0.03 |
| | | 4180 | 0.08 | | |
| | | 4170 | 0.08 | | |
| | | 4181 | 0.14 | | |
| | | 4174 | 0.06 | | |
| | | 4131 | 0.07 | | |
| D | | 4115 | 0.08 | 0.08 | 0.03 |
| | | 4158 | 0.08 | | |
| | | 4143 | 0.07 | | |
| | | 4136 | 0.07 | | |
| | | 4157 | 0.14 | | |
| | | 4135 | 0.06 | | |
| | | 4155 | 0.06 | | |
| E | | 4127 | 0.07 | 0.27 | 0.11 |
| | | 4159 | 0.07 | | |
| | 4124 | 0.31 | | | |
| | 4151 | 0.32 | | | |
| | 4161 | 0.47 | | | |
| | 4179 | 0.21 | | | |
| | 4148 | 0.25 | | | |
| F | 4137 | 0.19 | 0.06 | 0.02 | |
| | 4147 | 0.13 | | | |
| | 4129 | 0.05 | | | |
| | 4193 | 0.06 | | | |
| | 4160 | 0.09 | | | |
| | 4145 | 0.05 | | | |
| | 4121 | 0.05 | | | |
| 4150 | 0.06 | | | | |
| | 4103 | 0.04 | | | |