

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**EVALUACIÓN Y REDISEÑO DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE  
IRRADIACIÓN DE LA FUENTE DE COBALTO – 60 DE LA EPN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
QUÍMICA**

**JESSICA ALEXANDRA MONTENEGRO VILLARREAL  
jesssyal@gmail.com**

**DIRECTOR: ING. ROQUE ANTONIO SANTOS TORRES, M.Sc  
roqueantonio.santos@gmail.com**

**Quito, julio 2014**

©Escuela Politécnica Nacional (2014)  
Reservados todos los derechos de reproducción.

## **DECLARACIÓN**

Yo, Jessica Montenegro, declaro que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Jessica Alexandra Montenegro Villarreal

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jessica Montenegro, bajo mi supervisión.

---

Ing. Roque Santos, M.Sc  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto interno PII-DCN-003-2012: Evaluación y rediseño del blindaje de la cámara de irradiación de la fuente de cobalto-60 de la EPN, que se ejecutó en el Departamento de Ciencias Nucleares.

## **AGRADECIMIENTOS**

Alcanzar esta meta me llena de satisfacción, y no hubiese sido posible sin la bendición de Dios y la virgen Dolorosa para guiar mi camino, el apoyo, el amor y la comprensión de mis Padres Enrique y Narciza, gracias papitos por entregar su amor incondicional en los buenos y malos momentos, por su paciencia y por ser el empuje en mi vida a ustedes infinitas gracias.

A mi ñaña y a mi sobrino Gabo gracias por su cariño y apoyo, a mi abuelita Piedad y mi tío Luis que aunque ya no estén con nosotros, su amor y protección aún se sienten, gracias por todo, a todos mis tíos, tías y primos por su apoyo.

A mi Director de Tesis el Ingeniero Roque Santos, gracias por su tiempo, paciencia y confianza sin su apoyo este gran sueño no sería hoy una realidad. A los Ingenieros Francisco Salgado y Maribel Luna por su amistad, su confianza y por haber compartido conmigo sus conocimientos para el desarrollo de este proyecto.

A mis amigas y amigos de la Facultad de Ingeniería Química gracias por su amistad, sus consejos y por compartir conmigo mis alegrías y tristezas durante estos años de estudio. En especial a Jessy Gómez, Mabe, Maica y Eli Pérez gracias amigas por ser incondicionales, por su amistad y por ese gran cariño hacia mi e Isabella.

A todas las personas del DCN, Pao, Dra. Florinella Muñoz, Dra. Catalina Vasco, y los chicos y chicas tesistas gracias por su amistad y por estar siempre dispuestos a ayudar.

Finalmente quiero agradecer a las personas que colaboraron con sus valiosos conocimientos en este proyecto José Ignacio Márquez y Andrés, gracias por su tiempo y ayuda desinteresada.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi hija Isabella por ser mi inspiración y el mejor regalo que la vida me pudo dar, te amo mi pequeño ser de luz y a mis padres por ser el ejemplo de perseverancia y superación para mi vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

		<b>PÁGINA</b>
	<b>RESUMEN</b>	<b>xii</b>
	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xiv</b>
<b>1</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1	Transporte de fotones gamma e interacción con la materia	1
1.1.1	Fotones gamma	1
1.1.2	Interacción de fotones gamma	3
1.2	Diseño y evaluación de blindajes	9
1.2.1	Magnitudes dosimétricas	9
1.2.1.1	Magnitudes dosimétricas de protección radiológica	10
1.2.1.2	Magnitudes dosimétricas operacionales	13
1.2.2	Protección radiológica	14
1.2.2.1	Protección radiológica externa	16
1.2.3	Límite de dosis	17
1.2.4	Detección y medida de la radiación externa	19
1.2.4.1	Tipos de detectores	19
1.2.4.2	Detectores de ionización de gases	20
1.2.5	Diseño de blindajes para irradiadores gamma	24
1.2.5.1	Introducción	24
1.2.5.2	Aspectos que se consideran en el diseño de blindajes	28
1.2.5.3	Métodos de cálculo de blindaje para radiación gamma en geometrías puntuales	29
1.2.5.4	Métodos de cálculo de blindajes para radiación gamma en geometrías diferentes a las puntuales	32
1.2.5.5	Materiales y consideraciones estructurales en el diseño de blindajes	35
1.2.6	Evaluación de blindajes para irradiadores gamma	39
<b>2</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
2.1	Evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación	40
2.2	Diseño del modelo digital de la geometría actual del blindaje de la cámara de irradiación	42
2.2.1	Definición de los datos de entrada (input) del modelo digital del blindaje actual de la cámara de irradiación en el programa MCNP5	42
2.2.1.1	Definición de la tarjeta de celdas	43



2.2.1.2	Definición de la tarjeta de superficies	44
2.2.1.3	Definición de la tarjeta de datos	45
2.2.2	Datos de salida (output)	50
2.3	Validación del modelo digital generado con el programa MCNP5	53
2.3.1	Modelo 1: variación del número de historias de partículas (nps), método análogo de resolución	54
2.3.2	Modelo 2: división de la pared de la cámara de irradiación en 5 segmentos iguales método no analógico de resolución	55
2.3.3	Modelo 3: redefinición del material para las divisiones de la pared de la cámara de irradiación	56
2.3.4	Modelo 4: ubicación de los puntos de fuga	57
2.4	Rediseño del blindaje de la cámara de irradiación considerando una actividad de 100 000 Ci	58
2.5	Determinación de la inversión económica	59
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>60</b>
3.1	Evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación	60
3.1.1	Resultados del levantamiento de información de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación	60
3.1.2	Mapa de dosis experimental	65
3.1.2.1	Mapa de dosis al contacto	65
3.1.2.2	Mapa de dosis ambiental	74
3.1.2.3	Identificación de los puntos de fuga para la condición actual del irradiador	78
3.2	Diseño del modelo digital de la geometría actual del blindaje de la cámara de irradiación	85
3.2.1	Definición de los datos de entrada	85
3.2.1.1	Tarjetas de materiales	85
3.2.1.2	Tarjetas de superficies	88
3.2.1.3	Tarjetas de celdas	92
3.2.1.4	Definición de la fuente	93
3.2.1.5	Tarjetas de cuantificadores de datos y número de historia de partículas	93
3.2.2	Análisis de los datos de salida	93
3.3	Validación del modelo digital generado con el programa MCNP5	94
3.3.1	Modelo 1: variación del número de historias de partículas (nps), método análogo de resolución	95

3.3.2	Modelo 2: división de las paredes de la cámara de irradiación en 5 segmentos iguales, método no análogo de resolución	97
3.3.3	Modelo 3: redefinición del material para las divisiones de las paredes de la cámara de irradiación	104
3.3.4	Modelo 4: ubicación de los puntos de fuga	111
3.4	Rediseño del blindaje de la cámara de irradiación considerando una actividad de 100 000 Ci	113
3.4.1	Introducción	113
3.4.2	Mapa de dosis del irradiador considerando una actividad de 100 000 Ci	114
3.4.2.1	Mapa de dosis al contacto	114
3.4.2.2	Mapa de dosis a 1 metro de distancia, mapa de dosis ambiental	119
3.4.3	Rediseño del blindaje del irradiador para una actividad de 100 000 Ci	122
3.4.3.1	Rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$	122
3.4.3.2	Rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 10 $\mu\text{Sv/h}$	125
3.4.4	Mapa de la tasa de dosis considerando el rediseño propuesto	127
3.4.4.1	Mapa de la tasa de dosis del rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$	127
3.4.4.2	Mapa de la tasa de dosis del rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 10 $\mu\text{Sv/h}$	128
3.5	Determinación de la inversión económica	132
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>135</b>
4.1	Conclusiones	135
4.2	Recomendaciones	136
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>146</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.1</b>	Factores de ponderación de la radiación $w_r$	11
<b>Tabla 1.2</b>	Factores de ponderación de la radiación, $w_T$	12
<b>Tabla 1.3</b>	Valores de alfa, beta y gamma para el cálculo del factor de acumulación	27
<b>Tabla 1.4</b>	Tipos de presentaciones del plomo como material de blindaje	36
<b>Tabla 1.5</b>	Composición de diferentes tipos de hormigón ordinario	37
<b>Tabla 1.6</b>	Aditivos utilizados en el hormigón para mejorar su densidad	51
<b>Tabla 1.7</b>	Tipos de acero y sus densidades	38
<b>Tabla 2.1</b>	Descripción de las superficies utilizadas en el modelo digital	44
<b>Tabla 2.2</b>	Valores de los factores de conversión de fluencia de fotones a dosis equivalente ambiental para una partícula de fuente	49
<b>Tabla 2.3</b>	Tabla de datos de salida y su descripción	51
<b>Tabla 2.4</b>	Rango de error relativo y su respectiva confiabilidad	52
<b>Tabla 2.5</b>	VARIABLES utilizadas para el cálculo de tasa de dosis ambiental	53
<b>Tabla 3.1</b>	Datos del irradiador de la EPN	60
<b>Tabla 3.2</b>	Registro de actividades de la fuente de Cobalto – 60	61
<b>Tabla 3.3</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared norte del irradiador	75
<b>Tabla 3.4</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared sur del irradiador	76
<b>Tabla 3.5</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared este del irradiador	77
<b>Tabla 3.6</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared oeste del irradiador	77
<b>Tabla 3.7</b>	Puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador	80
<b>Tabla 3.8</b>	Puntos de fuga identificados en la pared sur del irradiador	81
<b>Tabla 3.9</b>	Puntos de fuga identificados en la pared este del irradiador	83
<b>Tabla 3.10</b>	Puntos de fuga identificados en la pared oeste del irradiador	84

<b>Tabla 3.11</b>	Composición química, valor ZAID y fracción del hormigón NBS 03 (m228)	86
<b>Tabla 3.12</b>	Composición química, valor ZAID y fracción del aire (m204)	87
<b>Tabla 3.13</b>	Composición química, valor ZAID y fracción del acero inoxidable (m316)	87
<b>Tabla 3.14</b>	Composición química, valor ZAID y fracción del plomo (m171)	88
<b>Tabla 3.15</b>	Composición química, valor ZAID y fracción del agua (m354)	88
<b>Tabla 3.16</b>	Descripción de las superficies utilizadas	89
<b>Tabla 3.17</b>	Tarjetas de celdas definidas para el modelo $M_0$	92
<b>Tabla 3.18</b>	Resumen de la definición del modelo digital $M_0$	94
<b>Tabla 3.19</b>	Población de partículas que atraviesan las celdas en relación al NPS y tiempo de simulación	96
<b>Tabla 3.20</b>	Resumen de la definición del modelo digital $M_1$ y comparación con el modelo $M_0$	96
<b>Tabla 3.21</b>	Descripción de las geometrías utilizadas para caracterizar las geometrías modificadas del irradiador en el modelo $M_2$	98
<b>Tabla 3.22</b>	Arreglo de importancias para la división de celdas	99
<b>Tabla 3.23</b>	Resumen de la definición del modelo digital $M_2$	104
<b>Tabla 3.24</b>	Porosidad y características del hormigón ordinario	106
<b>Tabla 3.25</b>	Porcentaje de porosidad en el hormigón ordinario	106
<b>Tabla 3.26</b>	Resumen de la definición del modelo digital $M_{3,2}$	110
<b>Tabla 3.27</b>	Resumen de la definición del modelo digital $M_4$	113
<b>Tabla 3.28</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	120
<b>Tabla 3.29</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared sur del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	120
<b>Tabla 3.30</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	121

<b>Tabla 3.31</b>	Mapa de dosis ambiental de la pared oeste del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	122
<b>Tabla 3.32</b>	Coefficiente de atenuación lineal para el plomo y hormigón	123
<b>Tabla 3.33</b>	Propuesta de rediseño del irradiador considerando como límite 0,5 $\mu\text{Sv/h}$	124
<b>Tabla 3.34</b>	Puntos de fuga y espesor de blindaje requerido	125
<b>Tabla 3.35</b>	Propuesta de rediseño del irradiador considerando como límite 10 $\mu\text{Sv/h}$	127
<b>Tabla 3.36</b>	Costo de la propuesta de rediseño del irradiador como límite 0,5 $\mu\text{Sv/h}$	133
<b>Tabla 3.37</b>	Costo de la propuesta de rediseño del irradiador como límite 0,5 $\mu\text{Sv/h}$	134
<b>Tabla AI.1</b>	Parámetros utilizados para definir a la fuente de Cobalto-60 con la actividad real de cada lápiz, modelo digital M <sub>5</sub>	149
<b>Tabla AII.1</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared norte del irradiador	149
<b>Tabla AII.2</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared sur del irradiador	150
<b>Tabla AII.3</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared este del irradiador	153
<b>Tabla AII.4</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared oeste del irradiador	154
<b>Tabla AVII.1</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000Ci	185
<b>Tabla AVII.2</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared sur del irradiador al considerar una actividad de 100 000Ci	186
<b>Tabla AVII.3</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000Ci	187
<b>Tabla AVII.4</b>	Mapa de dosis correspondiente a la pared oeste del irradiador al considerar una actividad de 100 000Ci	188

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1</b>	Esquema de decaimineto del Cobalto – 60 a Niquel - 60	1
<b>Figura 1.2</b>	Espectro de las radiaciones electromagnéticas	2
<b>Figura 1.3</b>	Región dominante para cada tipo de interacción en función de la energía del fotón y el número atómico del material	4
<b>Figura 1.4</b>	Representación de las posibles interacciones de un fotón con el material de blindaje	4
<b>Figura 1.5</b>	Representación gráfica de la interacción de absorción fotoeléctrica	5
<b>Figura 1.6</b>	Esquema de la interacción del esparcimiento de Compton	7
<b>Figura 1.7</b>	Representación de la interacción de la producción de pares	8
<b>Figura 1.8</b>	Clasificación de detectores con base al tipo de interacción de la radiación con la materia	20
<b>Figura 1.9</b>	Esquema básico de un detector de cámara de ionización	20
<b>Figura 1.10</b>	Regiones de operación de un detector gaseoso	21
<b>Figura 1.11</b>	Tasa de conteo en función del voltaje en un contador	23
<b>Figura 1.12</b>	Esquema que representa la atenuación de la radiación	25
<b>Figura 1.13</b>	Gráfico de transmisión k para plomo como blindaje de rayos gamma	30
<b>Figura 1.14</b>	Figura para el cálculo del blindaje hacia adentro	31
<b>Figura 1.15</b>	Figura para el cálculo de blindaje hacia afuera	31
<b>Figura 1.16</b>	Historia de un fotón al interactuar con el medio	34
<b>Figura 2.1</b>	Diagrama de flujo utilizado para la evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación	41
<b>Figura 2.2</b>	Estructura del archivo de entrada del programa MCNP5	42

<b>Figura 2.3</b>	Esquema del centro de coordenadas utilizado	43
<b>Figura 2.4</b>	Estructura de una celda definida en el programa MCNP5	43
<b>Figura 2.5</b>	Estructura de una superficie definida en el programa MCNP5	45
<b>Figura 2.6</b>	Estructura de la definición de un material en el programa MCNP5	46
<b>Figura 2.7</b>	Estructura de la definición de un cuantificador de datos en el programa MCNP5	48
<b>Figura 2.8</b>	Diagrama de flujo utilizado para la validación del modelo digital	54
<b>Figura 2.9</b>	Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo digital $M_1$	55
<b>Figura 2.10</b>	Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo digital $M_2$	56
<b>Figura 2.11</b>	Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo $M_3$	55
<b>Figura 3.1</b>	Dimensiones del irradiador de la EPN	61
<b>Figura 3.2</b>	Plano en 2 dimensiones del irradiador de la EPN	64
<b>Figura 3.3</b>	Esquema del mallado utilizado para la pared este del irradiador	65
<b>Figura 3.4</b>	Plano del mallado realizado en el irradiador de la EPN	66
<b>Figura 3.5</b>	Código utilizado para identificar a los puntos del mallado	67
<b>Figura 3.6</b>	Esquema de la pared este del irradiador en el que se muestran los puntos considerados para la medición	68
<b>Figura 3.7</b>	Representación gráfica del mapa de dosis de la pared norte del irradiador	69
<b>Figura 3.8</b>	Representación gráfica del mapa de dosis de la pared sur del irradiador	70
<b>Figura 3.9</b>	Representación gráfica del mapa de dosis de la pared este del irradiador	71
<b>Figura 3.10</b>	Representación gráfica del mapa de dosis de la pared oeste del irradiador	72

<b>Figura 3.11</b>	Representación gráfica del mapa de dosis del techo del irradiador	73
<b>Figura 3.12</b>	Código utilizado para identificar a los puntos externos del mapa de dosis ambiental	74
<b>Figura 3.13</b>	Localización de los puntos del mapa de dosis ambiental	74
<b>Figura 3.14</b>	Código utilizado para identificar a los puntos de fuga del irradiador	78
<b>Figura 3.15</b>	Puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador	79
<b>Figura 3.16</b>	Puntos de fuga identificados en la pared sur del irradiador	81
<b>Figura 3.17</b>	Puntos de fuga identificados en la pared este del irradiador	82
<b>Figura 3.18</b>	Puntos de fuga identificados en la pared oeste del irradiador	84
<b>Figura 3.19</b>	Gráfica que expone el porcentaje de número de cuantificadores de datos que pasaron las 10 pruebas estadísticas del programa MCNP5	100
<b>Figura 3.20</b>	Ilustración que representa el porcentaje de error en el modelo digital $M_2$ para la medición al contacto de la tasa de dosis	101
<b>Figura 3.21</b>	Ilustración que representa el porcentaje de error en el Modelo digital $M_2$ para la medición ambiental de la tasa de dosis	102
<b>Figura 3.22</b>	Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital $M_2$	103
<b>Figura 3.23</b>	Ilustración del porcentaje de error en el modelo digital $M_{3,1}$	107
<b>Figura 3.24</b>	Ilustración del porcentaje de error en el modelo digital $M_{3,1}$	108
<b>Figura 3.25</b>	Ilustración del porcentaje de error del modelo $M_{3,2}$	109
<b>Figura 3.26</b>	Ilustración del porcentaje de error del modelo $M_{3,2}$	109
<b>Figura 3.27</b>	Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital $M_4$	111
<b>Figura 3.28</b>	Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital $M_2$	112
<b>Figura 3.29</b>	Mapa de dosis de la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	115
<b>Figura 3.30</b>	Mapa de dosis de la pared sur del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	116



<b>Figura 3.31</b>	Mapa de dosis de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	117
<b>Figura 3.32</b>	Mapa de dosis de la pared oeste del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	118
<b>Figura 3.33</b>	Mapa de dosis del techo del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci	119
<b>Figura 3.34</b>	Mapa de dosis de la pared este del irradiador actividad 100 000 Ci	128
<b>Figura 3.35</b>	Mapa de dosis de la pared norte del irradiador actividad 100 000 Ci con 10 $\mu$ Sv/h	129
<b>Figura 3.36</b>	Mapa de dosis de la pared sur del irradiador actividad 100 000 Ci con 10 $\mu$ Sv/h	130
<b>Figura 3.37</b>	Mapa de dosis de la pared este del irradiador actividad 100 000 Ci con 10 $\mu$ Sv/h	131
<b>Figura 3.38</b>	Mapa de dosis de la pared oeste del irradiador actividad 100 000 Ci con 10 $\mu$ Sv/h	132
<b>Figura AI.1</b>	Ilustración que representa la distribución real de los lápices de Cobalto - 60	147
<b>Figura A IV.1</b>	Ilustración que representa la definición de la cámara de irradiación de la fuente	184

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Definición de fuente en el programa MCNP5	147
<b>ANEXO II</b> Mapa de dosis experimental del blindaje del irradiador de la EPN	149
<b>ANEXO III</b> Documento LTR-PPR-TDE01 “Registro de toma de datos dosimétricos en la fuente de Cobalto – 60	156
<b>ANEXO IV</b> Definición de la cámara de irradiación de la fuente de Cobalto – 60	158
<b>ANEXO V</b> Archivos de entrada desarrollados en el programa MCNP5	165
<b>ANEXO VI</b> Técnica de reducción de varianza de la división de la geometría	184
<b>ANEXO VII</b> Mapa de dosis al contacto de las paredes del irradiador obtenido mediante simulación en el programa MCNP5 al considerar una actividad de 100 000 Ci	185
<b>ANEXO VIII</b> Cálculo del blindaje auxiliar	190
<b>ANEXO IX</b> Catálogo de láminas de plomo	192

## RESUMEN

La simulación es una herramienta ampliamente utilizada en la industria nuclear y sus aplicaciones, debido a la ventaja de trabajar en entornos virtuales cuyo comportamiento se aproxima a la realidad, eximiendo así los posibles riesgos asociados y la obtención de datos confiables. El objetivo del presente proyecto de titulación fue desarrollar un modelo digital en el programa Monte Carlo N-Particle (MCNP5) que permitió evaluar y rediseñar el blindaje de la cámara de irradiación de la fuente de Cobalto – 60 de la Escuela Politécnica Nacional.

Para cumplir con este objetivo primero se midió la tasa de dosis ambiental en puntos específicos sobre las paredes del irradiador y a un metro de distancia de las mismas, para ello se utilizó el detector Polimaster modelo PM1401K. Además, se identificaron las fugas presentes en las paredes del irradiador, al considerar datos de estudios anteriores y el mapa de dosis obtenido experimentalmente.

Luego se desarrolló un modelo digital en el programa Monte Carlo N-Particle (MCNP5), mediante el cual se evaluó el blindaje. Se obtuvo la tasa de dosis ambiental con una actividad actual de la fuente de 2 072,1 Ci para los mismos puntos del mapa de dosis experimental. Para el desarrollo del modelo se realizó el levantamiento de la información sobre la geometría del irradiador como su longitud, altura, localización de alarmas, ventana, puerta y demás dispositivos dispuestos en las paredes. Se definieron los datos de entrada de un modelo digital inicial,  $M_0$ , en el programa MCNP5, para el cual se consideró el modelo obtenido por Gómez J.(2013) en lo referente a la definición de la fuente de Cobalto – 60 y el interior de la cámara de irradiación.

Para la validación del modelo digital del blindaje del irradiador se compararon los resultados conseguidos de la simulación del modelo inicial,  $M_0$ , con los datos experimentales del mapa de la tasa de dosis, el porcentaje de error aceptable para la validación del modelo digital fue de 15 %.

A partir del modelo  $M_0$ , se diseñaron 4 modelos digitales del blindaje del irradiador en donde se realizaron los siguientes cambios: se subdividieron las paredes en 5 segmentos iguales, se utilizó la técnica de reducción de varianza de la división de la geometría e importancias, se definió el espesor de un segmento de aire entre las paredes y en la ubicación de los puntos de fuga. Con los cambios efectuados se obtuvo un modelo con un error del 9,62 %, por lo tanto el modelo fue validado.

Con el modelo digital validado se pronosticaron los valores de la tasa de dosis tanto para los puntos en las paredes, como los ambientales al considerar la actividad máxima de diseño de la fuente de 100 000 Ci, con esta información se determinaron: los puntos donde la tasa de dosis supera a los límites establecidos de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  para el público y 10  $\mu\text{Sv/h}$  para el personal ocupacionalmente expuesto, la capacidad del blindaje actual y se establecieron los requisitos del rediseño del blindaje.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad en los países de América Latina se observa un gran interés en las aplicaciones de las radiaciones ionizantes como Argentina que cuenta con 2 plantas de irradiación de productos e investigación, Brasil donde existen 3 plantas de irradiación y es el país que actualmente presenta el mayor desarrollo de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en América Latina, Colombia y Uruguay que cuentan con una planta de irradiación cada uno en las cuales se realiza la irradiación de productos alimenticios para conseguir productos inocuos al consumo humano, mediante el tratamiento post cosecha de frutas y vegetales con fines de control fitosanitario, disminución de las cargas microbianas en especias, la esterilización de productos farmacéuticos y la investigación (Alcérreca,2009,p.1). La situación actual del Ecuador en torno a las aplicaciones de las radiaciones ionizantes es precaria ya que solamente se cuenta con la instalación piloto de la Escuela Politécnica Nacional y su aplicación se restringe a investigación en irradiación de nuevos productos.

Un importante requerimiento de la protección radiológica en instalaciones donde se realizan aplicaciones de las radiaciones ionizantes es que se cumplan con los niveles máximos de la tasa de dosis para la exposición del personal a saber 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  para el público y 10  $\mu\text{Sv/h}$  para el personal ocupacionalmente expuesto (OIEA, 2011, p. 93). Por mediciones de tasa de dosis realizadas por personal técnico en el exterior de las paredes de la cámara de irradiación del Irradiador de Cobalto-60 del Laboratorio de Tecnología de Radiaciones (LTR), se conoce que la configuración actual del blindaje presenta puntos de fuga y no soportaría una actividad de la fuente de 100 000 Ci, ya que no es capaz de asegurar una tasa de dosis de 10  $\mu\text{Sv/h}$  en las paredes externas del irradiador y a un metro de las mismas esto conlleva un riesgo para el personal que trabaja en las instalaciones del LTR, así como para el medio ambiente.

Para evaluar el blindaje actual del irradiador y establecer los requerimientos de rediseño del mismo se hace uso de la simulación mediante herramientas computacionales, las cuales son herramientas útiles para realizar estudios en la

rama de las ciencias nucleares ya que permiten evaluar un diseño en un escenario virtual sin necesidad de realizarlo experimentalmente y poder tomar las decisiones adecuadas mediante el análisis de los resultados los cuales son confiables y obtenidos de manera eficiente (Fernández, 2009, pp. 1-3).

La herramienta computacional con la que se trabaja en el presente proyecto es el programa MCNP5, utilizado para simular el transporte de fotones mediante la ecuación de transporte de Boltzmann. Este código fue desarrollado en el “Laboratorio Nacional de los Alamos” de los Estados Unidos, el mismo ha sido utilizado y probado exitosamente para diversas aplicaciones(X-5 Monte Carlo Team, 2003, p. 1).

Con la realización de este trabajo se sentarán las bases para permitir, que en un futuro el país sea capaz de desempeñar un papel más importante en el diseño de instalaciones nucleares, además en el desarrollo y aplicación de las radiaciones ionizantes, la cual es una alternativa tecnológica segura y confiable (Rangel, 2010, p. 44).

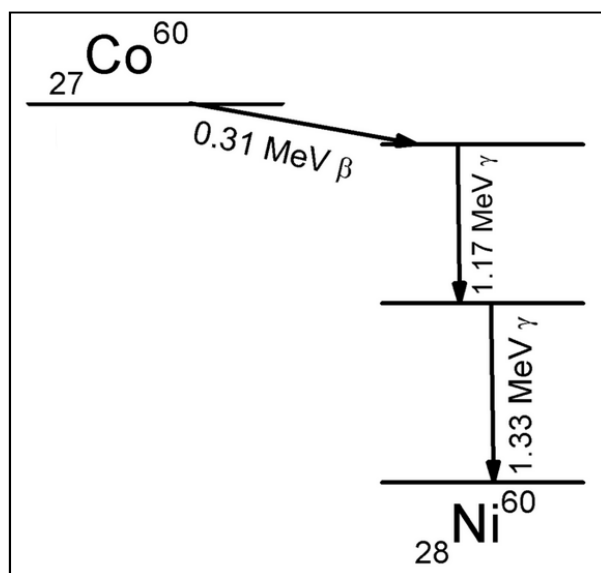
# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1. TRANSPORTE DE FOTONES GAMMA E INTERACCIÓN CON LA MATERIA

### 1.1.1. FOTONES GAMMA

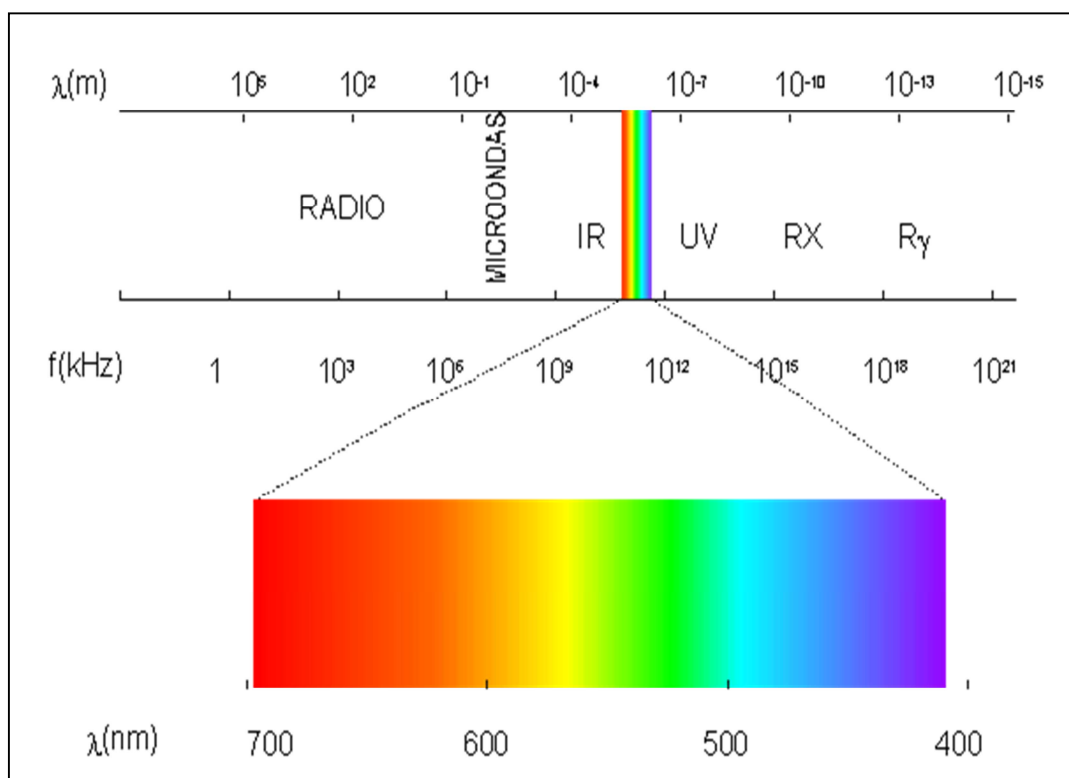
Los fotones gamma son un tipo de radiación electromagnética producida por el reajuste de protones y neutrones en el núcleo de un isótopo inestable conocido como radionucleído al desprenderse de su energía de excitación (Nuñez y Roglá, 2004, pp. 51-52; Leroy y Rancoita, 2008, pp.1-2).

El decaimiento del Cobalto – 60 a Niquel - 60, es un ejemplo de la emisión de fotones gamma, en donde el Cobalto - 60 decae por desintegración beta al isótopo inestable Niquel – 60 el cual emite 2 fotones gamma con energías de 1,17 y 1,33 MeV y alcanza un estado estable, en la Figura 1.1 se representa el decaimiento del Cobalto – 60.



**Figura 1.1.** Esquema de decaimiento del Cobalto – 60 a Niquel - 60  
(Ferrer, 2003, p. 241)

El rango de energías típicas para fotones se encuentra en el rango de 10 keV a 10 MeV. En la Figura 1.2 se observa la clasificación de las ondas electromagnéticas con base en su longitud de onda y frecuencia. Se puede observar que los fotones gamma tienen una frecuencia que oscila entre  $10^{18}$  a  $10^{21}$  kHz y poseen una longitud de onda que se encuentra entre  $10^{-13}$  y  $10^{-15}$  m, lo que determina su mayor poder de penetración en la materia con la que interactúan. Como materiales de blindaje para fotones gamma se utilizan materiales de alto número atómico como por ejemplo plomo y hormigón debido a la alta capacidad de atenuación de fotones que estos materiales poseen (Ortega, 2010, pp. 16-17).



**Figura 1.2.** Espectro de las radiaciones electromagnéticas  
(Tipler y Mosca, 1993, p. 958)



### 1.1.2. INTERACCIÓN DE FOTONES GAMMA

Un fotón gamma o rayo gamma es una radiación electromagnética que viaja a la velocidad de la luz, la cual no posee masa ni carga y su energía  $E_\gamma$  se define mediante la ecuación 1.1 (Ragheb, 2011, pp. 1-2).

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [1.1]$$

Donde:

$h$  es la constante de Planck ( $6,625 \times 10^{-34}$  J·s).

$\nu$  es la frecuencia del fotón.

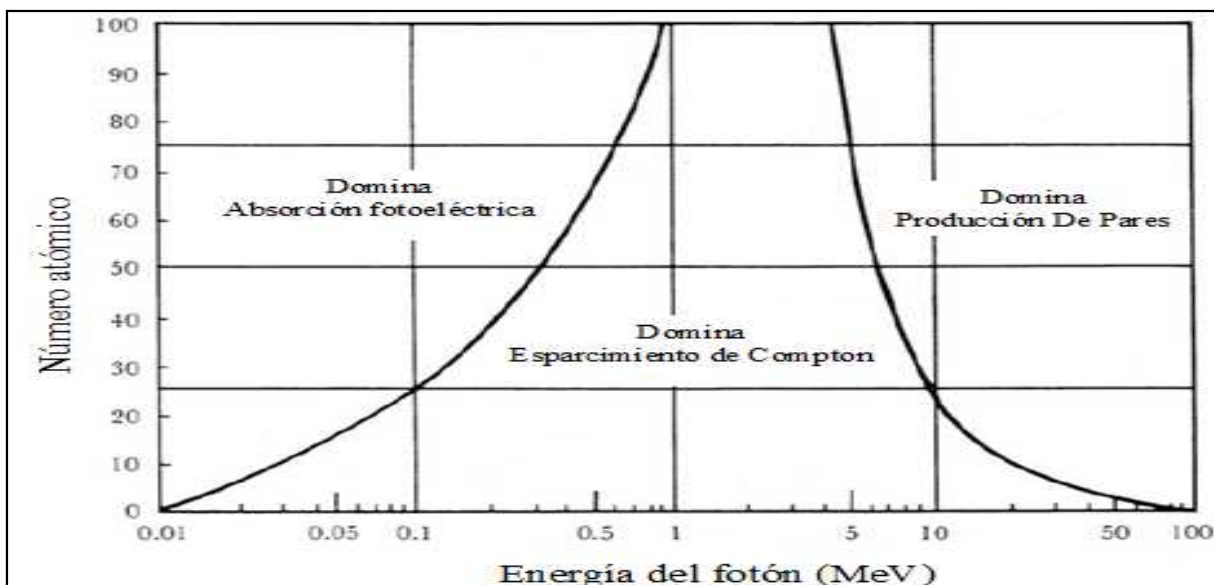
$\lambda$  es la longitud de onda.

$c$  es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s<sup>2</sup>).

Los mecanismos de interacción principales de los rayos gamma con la materia son: la absorción fotoeléctrica, el esparcimiento de Compton y la producción de pares (Nelson y Reilly, 1997, p. 178).

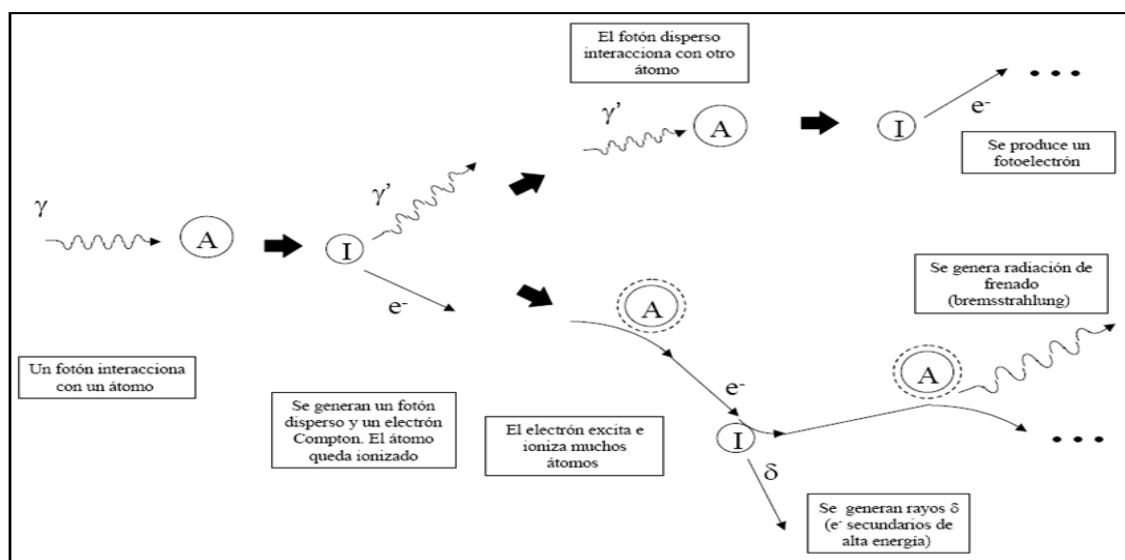
Los tres mecanismos conducen a una transferencia parcial o total de la energía del fotón y tienen como resultado la generación de electrones secundarios, los cuales ionizan a otros átomos del material de blindaje (Attix, 2004, p. 124).

La Figura 1.3 expone las regiones en las cuales cada uno de los tres mecanismos de interacción predominan, en función de la energía incidente de los fotones y el número atómico del material de blindaje (Angelo, 2004, p.198).



**Figura 1.3.** Región dominante para cada tipo de interacción en función de la energía del fotón y el número atómico del material (Attix, 2004, p.125)

En la Figura 1.4 se muestra el esquema de interacción de un fotón gamma con el material de blindaje, el cual sufre las interacciones anteriormente mencionadas.



**Figura 1.4.** Representación de las posibles interacciones de un fotón con el material de blindaje (Sánchez, 2005, p. 4)

### a. Absorción fotoeléctrica

En la absorción fotoeléctrica, el fotón gamma incidente es totalmente absorbido por el átomo con el que interactúa y su energía es transferida completamente a un electrón atómico, el cual como consecuencia es expulsado de la capa interna del átomo. Este electrón es denominado como fotoelectrón y la energía cinética con la que el electrón abandona el átomo ( $E$ ) se expresa mediante la ecuación 1.2 (McAlister, 1955, p. 3-4, Angelo, 2004, pp.197-198)

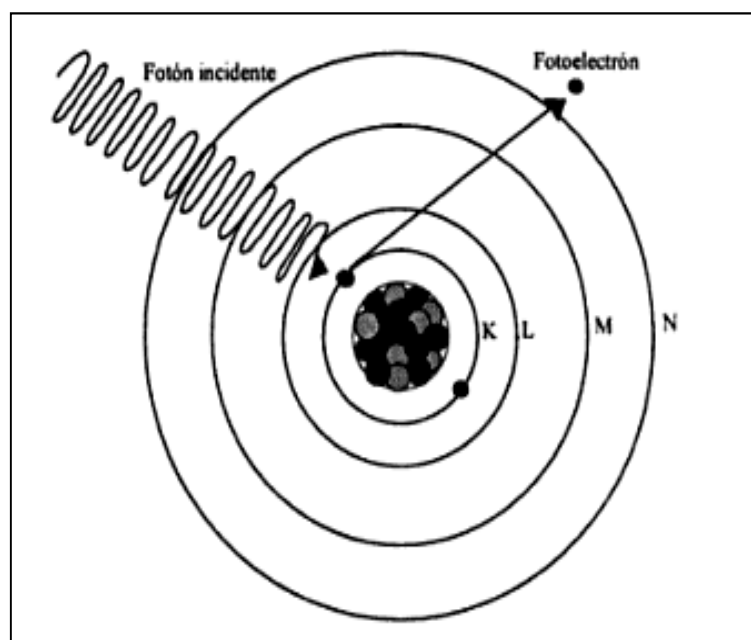
$$E = E_{\gamma} - \phi \quad [1.2]$$

Donde:

$E_{\gamma}$  es la energía del fotón incidente

$\phi$  es la energía del enlace del electrón

En la Figura 1.5 se indica un esquema de la absorción fotoeléctrica.



**Figura 1.5.** Representación gráfica de la interacción de absorción fotoeléctrica (Iturbe, 2011, p. 107)

El fotoelectrón resultante pierde su energía mediante ionizaciones secundarias de otros átomos del material de blindaje. A consecuencia de la salida del fotoelectrón del átomo, este átomo ionizado posee un espacio en una de sus capas el cual es ocupado por otro electrón de un orbital externo, proceso conocido como reordenamiento electrónico. Como resultado de este proceso se emite radiación electromagnética menor a 50 KeV (Ragheb, 2011, pp. 3-4).

El parámetro que establece la probabilidad de que ocurra este tipo de interacción es la sección eficaz de absorción fotoeléctrica, que se expresa mediante la ecuación 1.3 (Glasstone, 2011, p.52).

$$\sigma = \frac{Z^4}{E_\gamma^3} \quad [1.3]$$

Donde:

$\sigma$  es la sección eficaz de absorción

$E_\gamma$  es la energía del fotón incidente

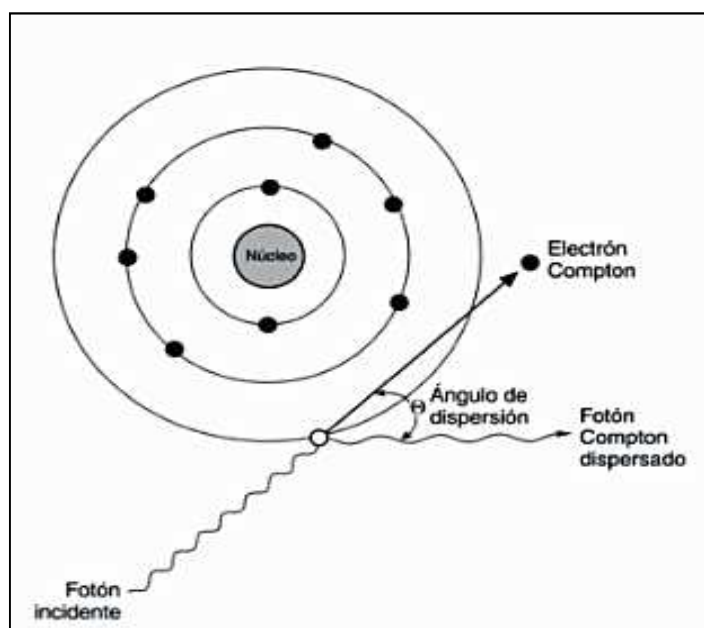
$Z$  es el número atómico del medio de interacción

La absorción fotoeléctrica es importante en materiales con alto número atómico sometidos a fotones incidentes de energía por debajo de los 50 keV (Nelson y Reilly, 2004, p. 32; OIEA, 2010, pp. 16-17).

## **b. Esparcimiento de Compton**

En el esparcimiento de Compton o esparcimiento incoherente, ocurre la interacción entre el fotón incidente y un electrón del átomo del material absorbente, el cual se considera libre, ya que la energía del fotón es del orden de KeV o más y la energía de unión del electrón atómico es del orden de eV (Podgorsak, 2011, pp. 30-32).

En la Figura 1.6 se presenta un esquema del esparcimiento de Compton.



**Figura 1.6.** Esquema de la interacción del esparcimiento de Compton  
(Glasstone, 2011, p. 54)

El fotón incidente es desviado en un ángulo  $\theta$  medido con respecto a su dirección original. El fotón transfiere una parte de su energía al electrón el cual es expulsado, de la interacción resulta un electrón liberado llamado electrón Compton y un fotón dispersado con menor energía que el fotón incidente (Chilton, Shultis, y Faw, 1984, pp. 36-37). El reordenamiento electrónico es de menor intensidad comparado con la absorción fotoeléctrica.

Debido a que todos los ángulos de dispersión están permitidos, la energía transferida al electrón ( $E_{\gamma'}$ ) puede variar desde cero a una fracción de la energía del fotón incidente ( $E_{\gamma}$ ). La expresión que relaciona la energía transferida y el ángulo se expresa mediante la ecuación 1.4 (Knoll, 2010, pp. 50-51).

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2 (1 - \cos \theta)}} \quad [1.4]$$

Donde:  $m_0 c^2$  es la energía de la masa en reposo del electrón (0,511 MeV).

La probabilidad de que ocurra este tipo de interacción decrece con el incremento de la energía del fotón incidente y se incrementa con la densidad electrónica del material ( $\rho_{mat}$ ), como se expresa en la ecuación 1.5 (Lamarsh y Baratta, 2001, pp. 95-96).

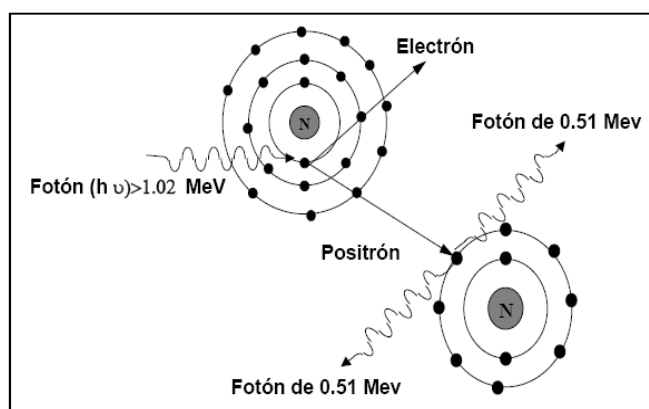
$$\sigma = \frac{\rho_{mat}}{E_{\gamma}} \quad [1.5]$$

El esparramiento de Compton es el proceso de interacción predominante para fotones que tienen energías entre 0,5 y 10 MeV (Instituto Balseiro, 2010, p. 5; Moro, 2005, pp. 38-39, 43).

### c. Producción de pares

En este proceso, el fotón incidente con energía ( $E_{\gamma}$ ) es completamente absorbido por el núcleo del átomo y da como resultado un par electrón-positrón, los cuales son emitidos en dirección opuesta entre sí. La interacción es inducida por un fuerte campo eléctrico conocido como campo de Coulomb el cual se da debido a la fuerza existente entre el núcleo y cada uno de los electrones del átomo (Ragheb, 2011, pp. 11-12).

En la Figura 1.7 se muestra una representación gráfica de la producción de pares.



**Figura 1.7.** Representación de la interacción de la producción de pares (Sánchez, 2005, p. 5)

La sección eficaz de esta interacción es igual al cuadrado del número atómico del material de blindaje  $Z^2$ .

Para que este tipo de interacción se lleve a cabo es necesario que la energía del fotón incidente sea mayor a 1,02 MeV, valor equivalente a la suma de la energía de dos electrones y energía mínima necesaria para la producción de pares. En la práctica, el proceso de producción de pares sucede a energías superiores a 2 MeV (Brose, 2011, pp. 38-40; Stabin, 2007, p. 60).

La energía cinética del electrón ( $E_{e^-}$ ) y positrón ( $E_{e^+}$ ) creados está dada por la ecuación 1.6.

$$E_{e^-} = E_{e^+} = \frac{1}{2}(E_{\gamma} - 1,022) \quad [1.6]$$

## 1.2 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE BLINDAJES

### 1.2.1. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS

Las magnitudes dosimétricas proporcionan una medida física relacionada con los efectos de las radiaciones ionizantes en una zona de interés o en un determinado punto.

La Comisión Internacional de Unidades de Radiación y Medidas (ICRU) por sus siglas en inglés, y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) por sus siglas en inglés establecieron la siguiente división entre las magnitudes de protección radiológica: magnitudes dosimétricas con fines de protección radiológica, donde se considera las propiedades del cuerpo humano y magnitudes dosimétricas operacionales utilizadas para la vigilancia de la radiación externa (Wernli, 2004, pp. 3-5; Blasco, 2014, p. 1).

### 1.2.1.1 Magnitudes dosimétricas de protección radiológica

En las magnitudes dosimétricas con fines de protección radiológica se expresan los límites de dosis de la ICRP y son: la dosis absorbida (D), la dosis equivalente (H) y la dosis efectiva (E).

#### a. Dosis absorbida (D)

La dosis absorbida se define como el cociente entre la energía media (E) impartida por la radiación ionizante a una materia de masa (m) y se define matemáticamente a través de la ecuación 1.6 (Arias, 2010, pp. 11-12).

$$D = \frac{\overline{dE}}{dm} \quad [1.7]$$

Las unidades de la dosis absorbida son J/ kg, relación que recibe el nombre de gray (Gy).

La tasa de dosis absorbida ( $\dot{D}$ ) es la variación de la dosis absorbida con respecto al tiempo, sus unidades son gray por unidad de tiempo como ejemplo Gy/h. La ecuación 1.8 expresa la tasa de dosis absorbida.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [1.8]$$

#### b. Dosis Equivalente (H)

La dosis equivalente se obtiene a partir de la dosis absorbida (D) y un factor de ponderación de la radiación  $w_r$  que depende del tipo de radiación incidente, como se muestra en la Tabla 1.1. La dosis equivalente se calcula a través de la ecuación 1.8 (Instituto Balseiro, 2000, p. 11):



$$H = D \cdot w_r \quad [1.9]$$

La dosis equivalente se expresa en sievert (Sv) y es dimensionalmente equivalente a J/kg.

En la Tabla 1.1 se encuentran los tipos de factores de ponderación según distintos tipos de radiaciones.

**Tabla 1.1.** Factores de ponderación de la radiación,  $w_r$

Tipo de radiación	$w_r$
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones con energías	
<10keV	5
10keV a 100keV	10
>10keV a 2 MeV	20
>2 MeV a 20 MeV	10
>20MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de E>2MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión	20

(ICRP 103, 2007, p.58)

La tasa de dosis equivalente ( $\dot{H}$ ) es la variación de la dosis equivalente con respecto al tiempo, sus unidades son sievert por unidad de tiempo y se define matemáticamente con la ecuación 1.10.

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad [1.10]$$

### c. Dosis Efectiva (E)

Los distintos tejidos y órganos del cuerpo humano al ser irradiados tienen una sensibilidad diferente a la radiación. En consideración a este comportamiento se introduce otro factor de ponderación por órgano o tejido,  $w_T$ . La ICRP asigna

valores específicos del factor  $w_T$  a los órganos y tejidos como se muestran en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Factores de ponderación de la radiación,  $w_T$

Tejido u órgano	$w_T$
Gónadas	0,20
Médula ósea	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Mamas	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroide	0,05
Piel	0,01
Superficie ósea	0,01
Resto	0,05

(ICRP 103, 2007, p.58)

La dosis efectiva se obtiene como la sumatoria del producto entre el factor de ponderación de cada órgano o tejido irradiado por su correspondiente dosis equivalente como se expresa en la ecuación 1.11 (Wernli, 2004, p. 7).

$$E = \sum H_T \cdot w_T \quad [1.11]$$

Donde  $H_T$ , corresponde a la dosis equivalente en un órgano o tejido.

La dosis efectiva se expresa en sievert (Sv) y es dimensionalmente equivalente a J/kg.

La tasa de dosis efectiva ( $\dot{E}$ ) es el cociente de  $dE$  por  $dt$ , donde  $dE$  es el incremento de dosis efectiva en el intervalo de tiempo  $dt$ . Sus unidades son Sievert por unidad de tiempo por ejemplo: Sv/s. La ecuación 1.12 muestra la relación de la dosis efectiva con el tiempo.

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} \quad [1.12]$$

### 1.2.1.2 Magnitudes dosimétricas operacionales

Las magnitudes dosimétricas de protección no son posibles de ser medidas por métodos directos, es decir, mediante detectores de radiación, debido a ello la ICRU, ha definido a las siguientes magnitudes operacionales para monitoreo de irradiación externa de área (ICRP 103, 2007, p. 63):

- Dosis equivalente ambiental  $H^*_{(d)}$
- Dosis equivalente direccional  $H'_{(d,\Omega)}$

Las magnitudes operacionales tienen por objetivo establecer una razonable aproximación de la dosis efectiva y de la dosis equivalente (Instituto Balseiro, 2000, p. 12).

#### a. Dosis equivalente ambiental ( $H^*_{(d)}$ )

La dosis equivalente ambiental  $H^*_{(d)}$  se refiere a la dosis equivalente medida a una profundidad (d) en mm, en la esfera ICRU cuando esta se encuentra en un campo de radiación alineado y expandido, en sentido contrario al del campo (ICRP 103, 2007, pp. 64-65).

La esfera ICRU es una esfera equivalente a tejido de 30 cm de diámetro, de densidad  $1 \text{ g/cm}^3$  y de una composición en masa de 76.2 % de oxígeno, 11,1 % de carbono, 10,1 % de hidrógeno y 2,6 % de nitrógeno (Brosed, 2011 p. 221).

La unidad de medida de la dosis equivalente ambiental es el sievert (Sv).

En la actualidad se recomienda con fines de monitoreo ambiental, utilizar una profundidad de 10 mm en la esfera ICRU. Para este caso específico la dosis equivalente ambiental se expresa mediante  $H^*_{(10)}$  que se relaciona con la dosis efectiva (Brosed, 2011, p. 225).

La tasa de dosis equivalente ambiental ( $\dot{H}^*_{(10)}$ ) que en adelante será llamada “Tasa de dosis” es correspondiente a la variación de la dosis equivalente ambiental con respecto al tiempo. Sus unidades son sievert por unidad de tiempo y su definición matemática se expresa en la ecuación 1.13.

$$TDEA = \frac{dH^*(10)}{dt} \quad [1.13]$$

### 1.2.2. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

La protección radiológica se define como el conjunto de medidas normativas, métodos y acciones establecidas por los organismos competentes para garantizar que el personal ocupacionalmente expuesto, el público y el medio ambiente no sufran riesgos biológicos debidos a la utilización de las radiaciones ionizantes (González, 2011, p. 12; Doménech y Haydée, 2011, p. 25).

La filosofía de la protección radiológica ha sido desarrollada por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) por sus siglas en inglés, la cual es el organismo encargado de establecer los principios básicos de la protección radiológica a nivel internacional, así como también el Consejo Nacional de Protección y Medición de la Radiación (NCRP) de los Estados Unidos (Turner, 2010, p. 451).

Los aspectos reguladores en protección radiológica durante la última década han sido encargados a la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esta organización ha preparado publicaciones con la finalidad de orientar a los gobiernos en la organización de su función reguladora. La publicación “Protección

Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad” permiten relacionar las recomendaciones conceptuales de la ICRP y las funciones de los gobiernos relacionadas con la implementación de dichas recomendaciones de manera efectiva (Arias, 2010, p. 7).

En el Ecuador, el organismo regulador en protección radiológica es la Subsecretaría de Control de las Aplicaciones Nucleares (SCAN), perteneciente al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

El objetivo primordial de la protección radiológica es asegurar un nivel apropiado de protección contra los efectos adversos de las radiaciones ionizantes a las personas, así como al medio ambiente que se encuentren expuestos a las radiaciones ionizantes.

Para conseguir este objetivo, es necesario aplicar los principios de la protección radiológica propuestos por la ICRP, los cuales se describen a continuación:

#### **a. Justificación de la práctica**

Toda actividad que incremente la exposición a radiaciones ionizantes como los fotones gamma deberá producir un beneficio suficiente a las personas expuestas o a la sociedad que compense el perjuicio debido a la exposición a la radiación (Instituto Balseiro, 2000, p.2).

#### **b. Optimización de la protección radiológica**

Consiste en analizar y decidir la magnitud de los recursos necesarios para reducir las dosis de radiación, el número de personas expuestas y la probabilidad de una exposición tan bajas como sea posible, donde se consideran los factores económicos y sociales. Para lograr la optimización de la exposición deben

seguirse procedimientos que regulen y controlen el uso de las instalaciones (Gallego, 2011, pp. 22- 23).

### **c. Límites de dosis individual**

La dosis total de un individuo expuesto a fuentes controladas en situaciones planificadas no deberá superar los límites de dosis establecidos por el ICRP (ICRP 103, 2007, p.13).

#### **1.2.2.1. Protección radiológica externa**

Las técnicas básicas de protección contra la radiación externa dependen de tres factores:

##### **a. Reducción del tiempo de exposición**

La dosis recibida es directamente proporcional al tiempo de exposición, por lo tanto, al disminuir el tiempo de exposición la dosis recibida disminuye. La correcta planificación de las tareas a ser realizadas en el irradiador permitirá reducir el tiempo de exposición (Stabin, 2007, p. 246; Turner, 2010, p. 475).

##### **b. Distancia a la fuente radiactiva**

La dosis recibida ( $\dot{E}$ ) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia ( $d$ ) entre la fuente y un punto de interés, es decir si se aumenta el doble la distancia, la dosis recibida disminuirá a la cuarta parte. Este fenómeno es notable para geometrías puntuales, cuando las distancias del punto a la fuente sean mayores a las dimensiones de la fuente y se define matemáticamente a través de la ecuación 1.14 (Instituto Balseiro, 2010, p. 4).

$$\frac{\dot{E}^{(1)}}{\dot{E}^{(2)}} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad [1.14]$$

### c. Blindaje o pantallas de protección

Se define al blindaje como todo sistema cuya función es disminuir o atenuar un campo de radiación por la interposición de un medio físico entre la fuente radiactiva y las personas o cosas a proteger. La selección del tipo de blindaje dependerá del tipo de fuente radiactiva y de la intensidad del haz (Arias, 2010, p. 20; Sánchez, 2010, p. 5).

El blindaje es una técnica muy útil cuando los factores de tiempo y distancia no pueden ser empleados ventajosamente para la protección de la radiación externa. Si se usa únicamente al blindaje este se puede reducir la dosis recibida considerablemente, pero en la práctica la cantidad de blindaje a utilizar dependerá de un balance entre el costo y el beneficio (Turner, 2010, p. 482).

### 1.2.3. LÍMITE DE DOSIS

Los límites de dosis son valores que pueden ser recibidos por las personas expuestas a las radiaciones ionizantes. A pesar de que estos valores en general no deben ser sobrepasados, estos pueden disminuir de acuerdo a estudios de optimización y justificación adecuados.

La OIEA elabora anualmente una guía de Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación, la cual toma en consideración las conclusiones del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y las recomendaciones de la ICRP.

Los límites de dosis para situaciones de exposición planificadas que se encuentran en la guía de la OIEA se detallan a continuación (OIEA, 2011, pp.93-94):

**a. Exposición del Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)**

Para la exposición del POE mayor de 18 años, los límites de dosis son:

- Una dosis efectiva de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años), y de 50 mSv en un año cualquiera
- Una dosis equivalente en el cristalino de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años), y de 50mSv en un año cualquiera
- Una dosis equivalente de las extremidades (manos y pies) o en la piel de 500 mSv en un año

**b. Protección durante el embarazo y la lactancia**

- Las condiciones de trabajo de una mujer que se encuentre en estado de gestación o lactancia serán comparables con los del público, para el cual el límite de dosis efectiva es de 1 mSv en un año.

**c. Exposición del personal en formación y estudiantes**

Para estudiantes y personal en formación mayores de 18 años los límites de dosis serán los mismos que para el POE.

Para la exposición de personal en formación y estudiantes de 16 a 18 años que reciban capacitación para empleos relacionados con las radiaciones y los estudiantes que utilizan fuentes durante sus estudios, los límites de dosis son:



- Una dosis efectiva de 6 mSv en un año
- Una dosis equivalente en el cristalino de 20 mSv en un año
- Una dosis equivalente en las extremidades (manos y pies) o en la piel de 150 mSv en un año

#### **d. Exposición del Público**

Para la exposición del público, los límites de dosis son:

- Una dosis efectiva de 1 mSv en un año
- En circunstancias especiales, podría aplicarse un valor más elevado de dosis efectiva en un solo año, siempre que el promedio de la dosis efectiva durante cinco años consecutivos no exceda de 1 mSv por año
- Una dosis equivalente en el cristalino de 15 mSv en un año
- Una dosis equivalente en la piel de 50 mSv en un año

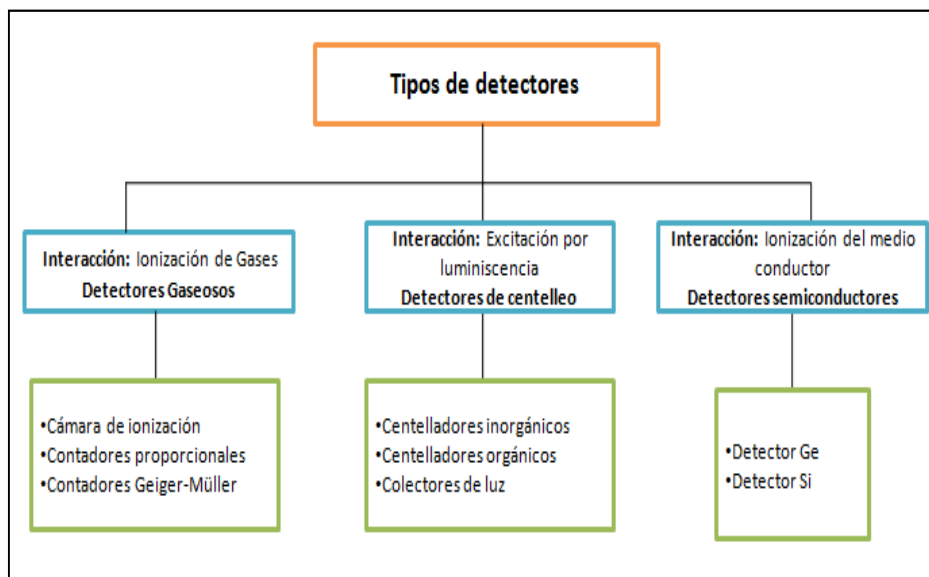
#### **1.2.4. DETECCIÓN Y MEDIDA DE LA RADIACIÓN EXTERNA**

El ser humano no cuenta con la capacidad de detectar de forma directa las radiaciones ionizantes como los rayos gamma, debido a esto es necesario utilizar instrumentos que indiquen la presencia de las radiaciones ionizantes y las cuantifiquen (Gallego, 2010, p.4; Carrasco, 2012, p. 9).

Los detectores de radiación son instrumentos de lectura directa, que indican la tasa de radiación de un objeto o el ambiente. Se basan en la interacción de la radiación con la materia, estas interacciones pueden ser: ionización de gases, excitación por luminiscencia o detectores semiconductores (Pascual y Gadea, 2001, p.5).

### 1.2.4.1 Tipos de detectores

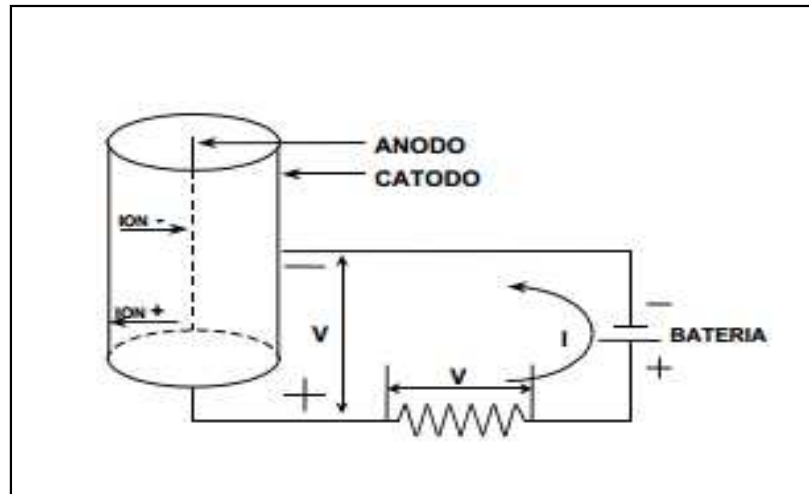
Se ha clasificado a los detectores con base en la interacción de la radiación con la materia. Los tipos de interacción considerados son: ionización de gases, excitación por luminescencia y ionización del medio conductor, en la Figura 1.8 se puede observar la clasificación y los tipos de detectores que se encuentran dentro de cada grupo (Turner, 2010, p.241; Knoll, 2010, p.105).



**Figura 1.8.** Clasificación de detectores con base al tipo de interacción de la radiación con la materia

### 1.2.4.2 Detectores de ionización de gases

El principio de operación de un detector de ionización de gases o simplemente un detector gaseoso se fundamenta en la interacción de la radiación con la materia para este caso específico la propiedad que posee la radiación en formar iones al atravesar el aire o un gas noble dentro de un recinto o cámara. La Figura 1.9 ilustra un detector gaseoso.



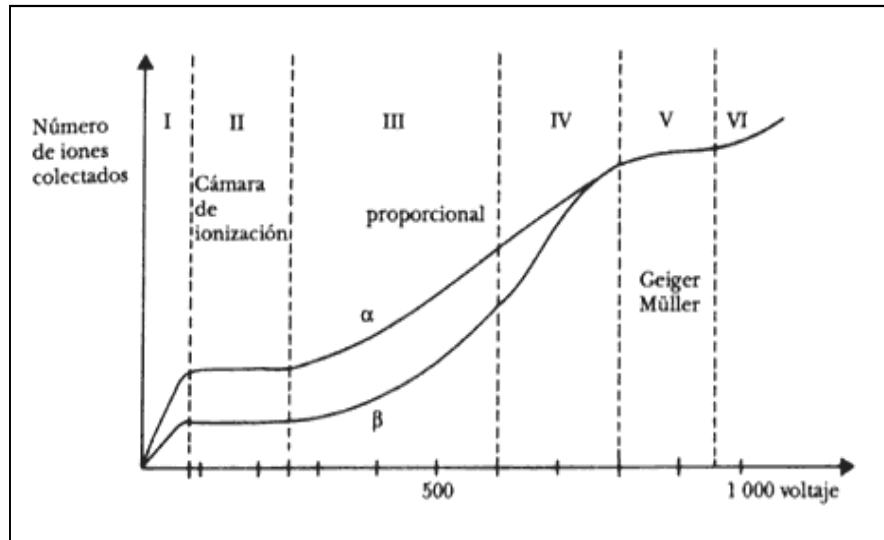
**Figura 1.9.** Esquema básico de un detector de cámara de ionización

El detector está formado por un recipiente cuyas paredes son de material conductor, las cuales son el cátodo, un hilo conductor que es el ánodo y un gas determinado (aire, xenón, argón) dentro del recipiente, es recomendable utilizar gases nobles ya que la energía de ionización de éstos es baja. Una elección adecuada del gas de relleno permite detectar una variedad de radiaciones (Alcaraz, 2010, pp. 2-4).

Se establece una diferencia de potencial  $V$  entre el ánodo y el cátodo, cuyo valor define el modo de funcionamiento del detector y con este se crea un campo eléctrico.

Una vez que la radiación penetra en el detector se crean pares ión electrón. El campo eléctrico generado por la diferencia de potencial, aumenta la velocidad con la que los electrones se desplazan hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo. Los electrones aumentan su velocidad entre mayor sea la diferencia de voltaje  $V$ .

El número de iones recolectados depende de la diferencia de potencial, los diferentes tipos de detectores gaseosos como cámara de ionización, proporcionales y Geiger Müller se caracterizan por su operación en diferentes regiones de voltaje, como se puede observar en la Figura 1.10 (Escobar, 2008, pp. 2-5).



**Figura 1.10.** Regiones de operación de un detector gaseoso  
(Instituto Balseiro, 2000, p. 4)

#### a. Cámaras de ionización

Como se puede observar en la Figura 1.10 en la región I al trabajar con un potencial poco intenso, los pares ión-electrón que se forman se re combinan, la corriente es nula y no se detecta la radiación.

En la región II de la Figura 1.10 al aumentar el voltaje el número de iones recolectados no cambia. En la región II el detector opera como cámara de ionización en la cual la corriente de salida es directamente proporcional a la energía de la radiación. Las cámaras de ionización son utilizadas para detectar radiaciones alfa y grandes flujos de radiación (Shani, 2000, pp.85-89).

#### b. Contador proporcional

En la región III el detector funciona como contador proporcional, la corriente de salida es proporcional a la radiación incidente y a la tensión  $V$ .

Como se observa en la Figura 1.10 el número de iones recolectados se incrementa al aumentar el voltaje, este incremento de iones y por ende de corriente de salida es debido a las ionizaciones secundarias que son creadas por

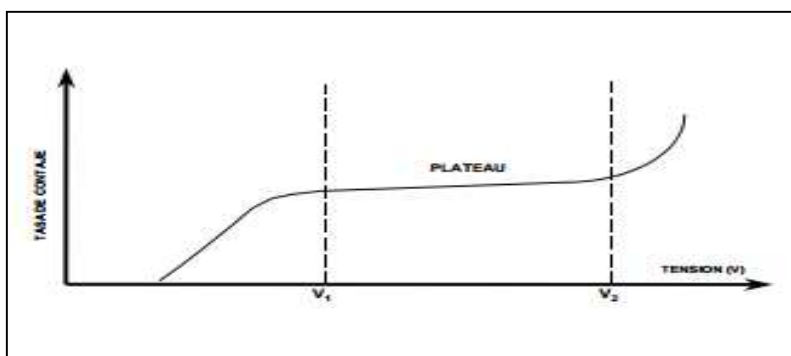
los pares de iones-electrones con una alta energía cinética al chocar con los átomos neutros del gas generándose un efecto de multiplicación. El número de iones secundarios es proporcional al número de pares primarios generados por la radiación (Podgorsak, 2005, pp.78-79).

Los detectores en esta zona de funcionamiento se emplean frecuentemente en el monitoreo de contaminación superficial con radio nucleídos emisores alfa o beta.

Al incrementar la diferencia de potencial  $V$  sobre los valores que corresponden al rango de funcionamiento como contador proporcional, se llega a la región IV, denominada de proporcionalidad limitada, en la cual la proporcionalidad entre corriente de salida y tensión no existe debido al número tan alto de ionizaciones lo que provoca la distorsión del campo eléctrico debido a esto un detector que trabaje en esta región es poco útil en la práctica (Tsoulfanidis, 1983, pp.189-190)

### c. Contadores Geiger – Müller

En la región V de la Figura 1.10 el número de iones que alcanzan los electrodos es constante e independiente del voltaje. Es por ello que la información recogida es independiente de la energía de la radiación y por lo tanto de su ionización inicial, esta zona es conocida como “plateau” como se puede observar en la Figura 1.11, en esta zona de operación el detector gaseoso es conocido con el nombre de Geiger – Müller (Instituto Balseiro, 2000, p. 5-6).



**Figura 1.11.** Tasa de conteo en función del voltaje en un contador Geiger- Müller (Instituto Balseiro, 2000, p.6)

Un detector Geiger- Müller es un dispositivo usado para la detección y medición de todos los tipos de radiación: radiación alfa, beta y gamma.

Este tipo de detectores son los más usados ya que son fáciles de operar, su construcción es sencilla. Normalmente operan con voltaje alrededor de 700 o 800 voltios pero este valor puede variar según el diseño de cada detector (Syed, 2007,p. 166-167).

La región VI de la Figura 1.10 se conoce como zona de descarga continua, en esta el valor del voltaje es tan alto que los iones positivos, arrancan electrones del cátodo, obteniéndose una descarga continua que inutiliza al detector.

## **1.2.5. DISEÑO DE BLINDAJES PARA IRRADIADORES GAMMA**

### **1.2.5.1 Introducción**

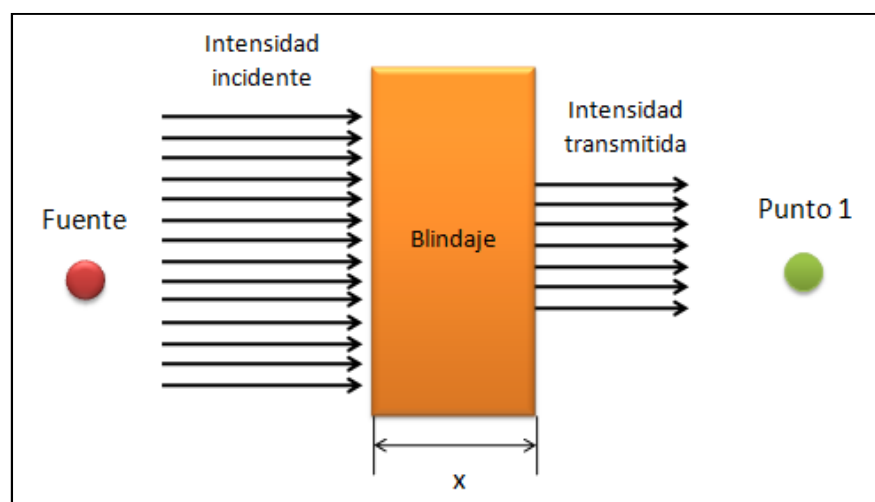
El objetivo principal del diseño del blindaje es limitar la intensidad de radiación hasta los niveles permitidos por la norma radiológica vigente, esto se puede cumplir, mediante la interposición de materiales entre la fuente emisora de radiación y el ambiente a proteger (Instituto Balseiro, 2000, p.4).

La combinación particular de materiales y su disposición específica en el diseño final del blindaje está influenciada por ciertos factores que no serán solamente las propiedades de atenuación del material utilizado como blindaje. Para el diseño final del blindaje se deben considerar: la geometría de la fuente, el costo de la construcción, la resistencia estructural, el mantenimiento, la seguridad, el peso, las limitaciones del espacio y el medio ambiente físico de la instalación. Los aspectos de seguridad y de mantenimiento del blindaje requieren que se tenga en cuenta las propiedades químicas y físicas de los materiales utilizados como blindaje (Chilton et al, 1984, pp. 366-368).

De los tres principios básicos de protección ante la radiación externa: el tiempo, la distancia y el blindaje, este último es el método que da lugar a las condiciones de

trabajo de seguridad intrínsecas, mientras que la dependencia de la distancia y el tiempo de exposición implica un control administrativo continuo sobre los trabajadores (Shultis y Faw, 2010, p. 1424)

Se conoce como blindaje radiológico al material interpuesto entre una fuente emisora de radiación y un punto determinado, en la Figura 1.12 se puede observar el cambio de intensidad que sufre un paquete de fotones al incidir sobre un material blindante de espesor (x).



**Figura 1.12.** Esquema que representa la atenuación de la radiación

La interposición de un espesor de blindaje (x) produce una atenuación de la tasa de dosis en dicho punto, la cual se relaciona con el coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ ) del material utilizado según la ecuación 1.15. Dicha ecuación corresponde a la ley general de atenuación de fotones para el caso de geometría infinita y fuente puntual (Nelson y Reilly 1997, p. 2).

$$\dot{H}_{(1)} = \dot{H}_{(0)} e^{-\mu x} \quad [1.15]$$

Donde:

$\dot{H}_{(0)}$  = corresponde a la tasa de dosis en el punto de interés P1 cuando no existe blindaje interpuesto entre la fuente y el punto P1

$\dot{H}_{(1)}$  = corresponde a la tasa de dosis en el punto de interés P1 cuando existe blindaje interpuesto entre la fuente y el punto P1

$\mu$  = coeficiente de atenuación lineal

$x$  = espesor del material de blindaje

El coeficiente lineal de atenuación ( $\mu$ ) puede ser considerado como la fracción de energía removida de los fotones por el medio blindante por centímetro de blindaje (Ternes, 2010, pp.1-2).

La ecuación 1.15 considera las condiciones de haz estrecho ya que tanto la fuente como el detector se consideran colimados, condiciones que no se acercan a la realidad ya que no se toma en cuenta a la radiación dispersa producto de la interacción de los fotones con el medio de blindaje (Knoll, 2010, p. 476).

Bajo las condiciones de haz extenso o haz no colimado se toma en cuenta la existencia de la radiación dispersa producto del esparcimiento de Compton y la producción de pares lo que nos permite una apreciación cercana a la realidad del efecto del material de blindaje ante la radiación incidente (Tsoulfanidis, 1983, p.353).

La ecuación 1.16 describe la reducción de la tasa de dosis para una cantidad de material de blindaje dado bajo las condiciones de haz extenso y geometría infinita (Shultis y Faw, 2010, p. 148).

$$\dot{H}_{(1)} = \dot{H}_{(0)} e^{-\mu x} \cdot B \quad [1.16]$$

Donde:

$B$  es el factor de acumulación o Build-Up



### a. Factor de acumulación B

El factor de acumulación es un factor adimensional siempre mayor a 1 que depende de la energía de la radiación incidente, del número atómico del material de blindaje y del espesor de este.

En forma general el factor de acumulación puede ser definido como se muestra en la ecuación 1.17 (Instituto Balseiro, 2000, p. 11).

$$B = \frac{\text{Respuesta total a la radiación en el punto de interes}}{\text{Respuesta a la radiación no colisionada en el punto de interes}} \quad [1.17]$$

El factor de acumulación se define para una fuente puntual ubicada, junto con el detector en un medio infinito. Su cálculo es posible mediante expresiones analíticas empíricas como la ecuación 1.18 o a través de tablas y gráficos elaborados experimentalmente (Stabin, 2011, p. 258).

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad [1.18]$$

**Tabla 1.3.** Valores de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  para el cálculo del factor de acumulación

Material de blindaje	$\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	$\beta$ ( $cm^{-1}$ )	$\gamma$
Plomo	1.7772	-0.5228	0.5457
Hormigón	0.1539	-0.1161	2.0752
Acero	0.5704	-0.3063	0.6326

(Stabin, 2007, p. 245)

El factor de acumulación se establece como una función del espesor del material de blindaje, lo que implica que no puede ser expresado en unidades absolutas de longitud sino en términos de:

- El número de trayectorias libres medias de un fotón de una energía específica en un medio.

- El número de longitudes de relajación de un fotón de una energía específica en un medio.

La trayectoria libre media (t<sub>lm</sub>) o (mpf por su siglas en inglés mean free path) de un fotón en un medio es la distancia media recorrida por un fotón antes de interactuar con éste, y está dada como el inverso del coeficiente de atenuación lineal del medio para la energía de un fotón dado (Stabin, 2007, p.246).

El número de longitudes de relajación se define como el producto del espesor del material y el coeficiente de atenuación lineal (Stabin, 2007, p.247).

#### **1.2.5.2. Aspectos que se consideran en el diseño de blindajes**

Para el diseño del blindaje se requiere tomar en cuenta los siguientes aspectos: (Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias, 1998, p.5).

##### **a. Bases de diseño**

Los factores importantes a considerarse en el diseño de blindajes frente a radiaciones son los siguientes (Chica, 2002, pp. 56-58):

- Tipo de radiación a atenuar, esta puede ser alfa, beta o gamma
- Factor de Carga (W), correspondiente a la fracción de tiempo que funciona el equipo o fuente
- Factor de Uso (U), parámetro que cuantifica la fracción de tiempo durante el cual el haz de radiación está dirigido al punto de interés, para una fuente isotrópica se pueden considerar los siguientes valores de U, piso y paredes 1, techo  $\frac{1}{4}$
- Factor de ocupación (T), corresponde a la fracción de tiempo efectivo de irradiación durante el cual una persona permanece en un punto de interés, su valor es 1

- Actividad de la fuente, conocer la magnitud de su intensidad en unidades del SI
- Dimensiones y formas de las fuentes
- Definición de la geometría del sistema fuente-blindaje-detector
- Valores de tasa de dosis que se pretende conseguir con la interposición del blindaje entre la fuente de emisión y el punto de interés al considerar las recomendaciones de la normativa internacional vigente, como por ejemplo una tasa de dosis de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  para el público

### **b. Cálculo de espesores de blindaje**

Una vez determinadas las bases de diseño se procede al cálculo del espesor del blindaje para lo cual se considera lo siguiente (Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias, 1998, p. 6):

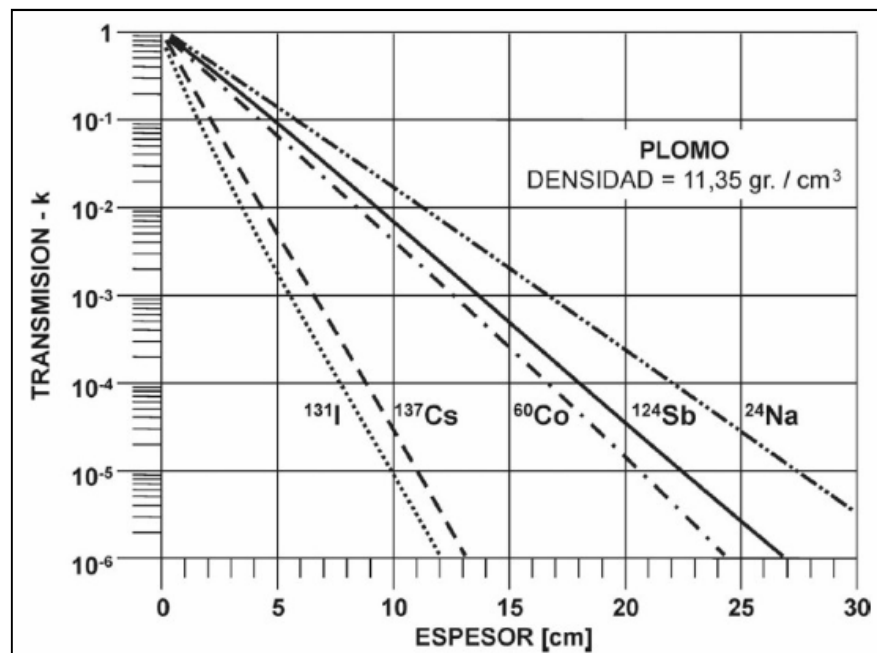
- Métodos de cálculo, indicar las ecuaciones utilizadas para el cálculo del diseño del blindaje
- Gráficas o tablas usadas para la determinación del coeficiente de transmisión  $k$  y el factor de acumulación  $B$  si es el caso
- Selección de material de blindaje en función del tipo de radiación a atenuar

#### **1.2.5.3. Métodos de cálculo de blindaje para radiación gamma en geometrías puntuales**

Al realizar los cálculos del blindaje para radiación gamma bajo la consideración de una fuente puntual isotrópica y de geometría infinita es importante conocer el parámetro denominado factor de transmisión. El factor de transmisión  $k$  se define mediante la ecuación 1.19

$$k = \frac{\dot{H}_{(1)}}{\dot{H}_{(0)}} = \frac{\text{tasa de dosis con atenuador interpuesto, en el punto 1}}{\text{tasa de dosis sin atenuador interpuesto en el punto 1}} \quad [1.19]$$

Los gráficos de transmisión se construyen para un nucleído dado y para un cierto material utilizado como blindaje, esta relación es independiente de la distancia punto-fuente y es una función exclusiva del espesor del material de blindaje interpuesto entre el punto y la fuente. Un ejemplo de un gráfico de transmisión se muestra en la Figura 1.13.



**Figura 1.13.** Gráfico de transmisión  $k$  para plomo como blindaje de rayos gamma (Attix, 2004, p.125)

#### a. Cálculo del espesor de blindaje para rayos gamma

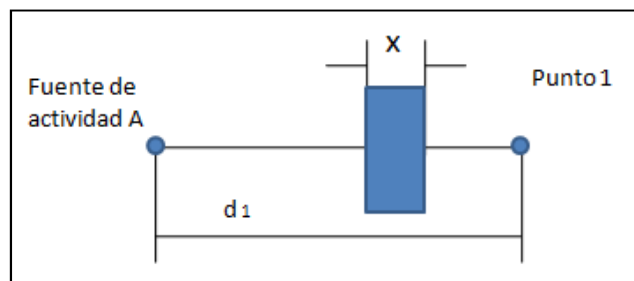
En el cálculo de espesor de blindaje para fuentes de rayos gamma se presentan dos situaciones en referencia a la geometría del blindaje a calcular, las cuales son (Instituto Balseiro, 2010, pp.16-18):

- Blindaje hacia adentro
- Blindaje hacia afuera

### b. Blindaje hacia adentro

Para el cálculo del espesor de blindaje hacia adentro, es decir, desde el punto de interés hacia la fuente los datos conocidos son (Instituto Balseiro, 2010, p.16-18):

- La actividad de la fuente
- La tasa de dosis en el punto 1, sin atenuador interpuesto y la tasa de dosis requerida en el punto 1
- La distancia fija  $d_1$  entre la fuente y el punto 1 como se puede observar en la Figura 1.14.



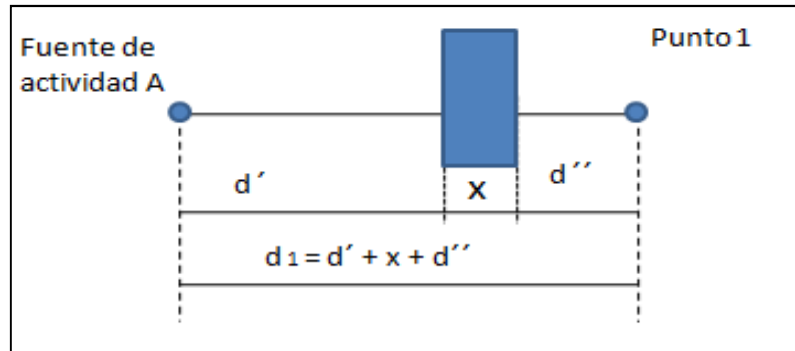
**Figura 1.14.** Figura para el cálculo de blindaje hacia adentro

Se procede al cálculo del coeficiente de transmisión  $k$ , se ubica su valor en el gráfico correspondiente al material de blindaje requerido y se obtiene el valor del espesor  $x$  necesario para alcanzar la tasa de dosis requerida en el punto 1.

### c. Blindaje hacia afuera

Para este caso en que la distancia entre la fuente y el punto de interés no es constante como se indica en la Figura 1.15, los datos conocidos son los siguientes:

- La actividad de la fuente
- La tasa de dosis en el punto 1



**Figura 1.15.** Figura para el cálculo de blindaje hacia afuera

Para poder determinar el espesor del material blindante se requiere de un método iterativo, el cual se explica a continuación (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2013, p. 13-14):

- Se asigna un valor arbitrario a  $x$ , que será  $x_1$
- Se calcula el valor de  $d_1$  con la ecuación  $d_1 = d' + x_1 + d''$
- Se calcula el valor de  $B$
- Se calcula  $\dot{H}_{(1)}$  con la ecuación 1.14
- Se calcula el valor de  $k$  con la ecuación 1.16
- Se obtiene el valor de  $x_2$  al colocar en el gráfico del coeficiente de transmisión para el radioisótopo de trabajo el valor de  $k$  obtenido del punto anterior
- Se repiten los pasos anteriores hasta que el valor de  $x_2$  sea igual al de  $x_1$

#### 1.2.5.4. Métodos de cálculo de blindajes para radiación gamma en geometrías diferentes a las puntuales

En la práctica la mayoría de las fuentes de radiación gamma no son puntuales y poseen una geometría complicada, básicamente los métodos para el análisis del blindaje en esta situación es obtener soluciones numéricas a la ecuación de transporte de Boltzmann mediante métodos probabilísticos como el Método Monte Carlo.

En la simulación de problemas de blindaje en el método Monte Carlo las decisiones en cuanto a lo lejos que un fotón viaja antes de interactuar con el material de blindaje, que tipo de interacciones que se producen, que dirección tienen los fotones dispersados, entre otros, son todos tomados sobre una base probabilística en el que se seleccionan números aleatorios. El método Monte Carlo se basa en simular la posibilidad de que ocurra un suceso mediante el muestreo estadístico de la distribución de la probabilidad que rige un proceso (Papadakis, 2010, p. 27).

### a. Método Monte Carlo Aplicado al Transporte de fotones

En lo que respecta a los cálculos de transporte de fotones, se debe utilizar una ecuación mediante la cual se pueda determinar la densidad de partículas ( $x$ ), dicha ecuación es posible de obtener al convertir la ecuación de transporte de Boltzmann en la “Ecuación Integral de la densidad de la Partícula Emergente” que corresponde a la ecuación 1.20 (Hussein, 2007, pp. 296 – 298)

$$x(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = C(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, t) T(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, E, \vec{\Omega}) x'(\vec{r}', E', \vec{\Omega}', t) \quad [1.20]$$

Donde:

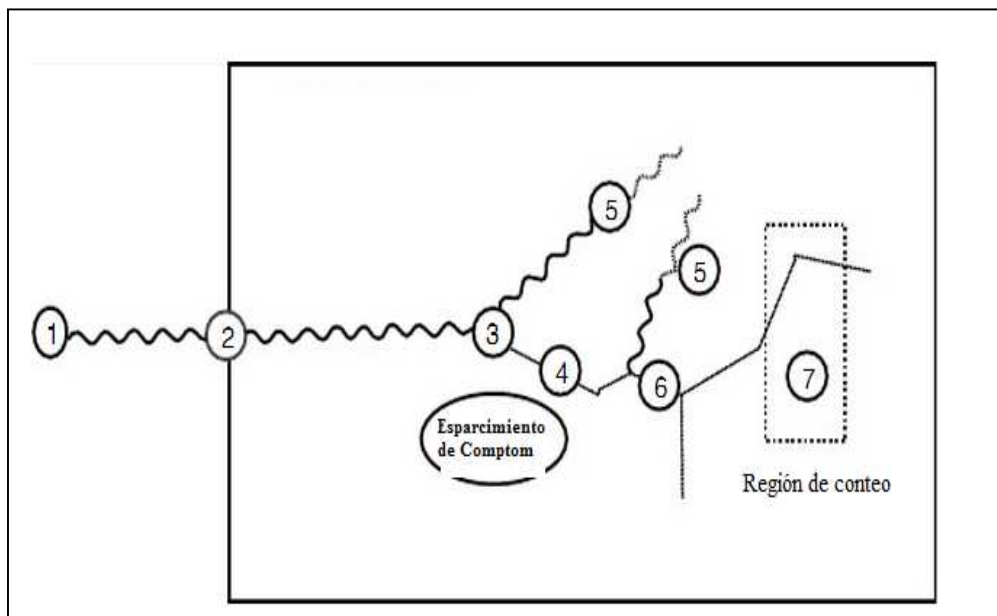
$x(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ : Corresponde a la densidad de partículas que abandonan una fuente o emergen de una colisión en las coordenadas en el espacio  $\vec{r}$ , de la dirección  $\vec{\Omega}$  en el tiempo  $t$  con energía  $E$ .

$C(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, t)$ : Representa al operador de colisión que provoca que una partícula en las coordenadas  $\vec{r}$ , choque y cambie su dirección de  $\vec{\Omega}'$  a  $\vec{\Omega}$  y su energía de  $E'$  a  $E$ , como producto de la dispersión

$T(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, E, \vec{\Omega})$ : Es el operador de transporte, que traslada una partícula desde una posición  $\vec{r}'$  hasta una nueva coordenada  $\vec{r}$ , a lo largo de una dirección  $\vec{\Omega}$  con energía constante.

$x'(\vec{r}', E', \vec{\Omega}', t)$ : Es la densidad de partículas iniciales.

En la Figura 1.16 se representa el proceso o camino que en literatura recibe el nombre de historia de un fotón que incluye las trayectorias de las partículas secundarias.



**Figura 1.16.** Historia de un fotón al interactuar con el medio  
(Mayleset al, 2007, p. 79)

La historia de la trayectoria de un fotón es la siguiente (Mayleset al, 2007, pp.78 - 79):

- Punto 1, se escoge la energía del fotón, la dirección y la posición inicial de salida esto, basado en un muestreo de la distribución de fotones incidentes
- Punto 2, se calcula la distancia que recorre el fotón dentro del material
- Punto 3, se sortea el tipo de interacción. Esta puede ser esparcimiento de Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares
- Punto 4, se sortea la energía y la dirección de la partícula secundaria
- Punto 5, se produce la absorción de la partícula en el medio
- Punto 6, se sortea las distancias, energías e interacciones de las partículas secundarias



- Punto 7, se produce la deposición de la energía de la partícula en la región de conteo

#### **1.2.5.5. Materiales y consideraciones estructurales en el diseño de blindajes**

La selección de materiales y su disposición específica en el diseño final del blindaje está influenciada por los siguientes factores (NCRP 49, 1976, p.13-14):

- El tipo de radiación a atenuar puede ser alfa, beta o gamma
- Las propiedades de atenuación del material utilizado como blindaje
- Las propiedades mecánicas del material. Estas propiedades son: estabilidad, resistencia estructural y compatibilidad con otros materiales
- El espesor requerido y el peso del material
- La estabilidad ambiental del material seleccionado
- La toxicidad
- La transparencia óptica (cuando sea requerida)
- Las limitaciones del espacio y el medio ambiente físico de la instalación.
- El costo del material incluido su mantenimiento e instalación

A continuación se presentan las propiedades más relevantes y composición de materiales utilizados como blindaje para fotones.

##### **a. Plomo**

Las propiedades del plomo que lo convierten en un buen material de blindaje son su alta densidad  $11,35 \text{ g/cm}^3$ , alto número atómico ( $Z = 82$ ), alto nivel de estabilidad, facilidad de fabricación, su disponibilidad, buena flexibilidad en su aplicación y contar con una buena resistencia a la corrosión química (Chilton et al, 1984, p. 366).

Al ser un metal, el plomo tiene una ventaja sobre los materiales agregados como el hormigón ya que este es un material más uniforme en lo que respecta a su

densidad. Debido a la alta densidad del plomo es fácil suponer que los blindajes elaborados con plomo tienden a ser más pesados que los que se construyen con materiales más ligeros, ésta representa una limitante cuando el peso y el volumen son considerados, en este caso los materiales utilizados son el hormigón o el agua. Cuando el espacio es una limitante para el espesor del material, el plomo es el material recomendado a pesar de su relativo alto costo (NCRP 49, 1976, p.28).

En lo que respecta a su reutilización el plomo contiene sólo pequeñas cantidades de otros elementos que pueden ser afectadas de manera adversa por la radiación, lo que le permite al plomo estar inmediatamente disponible para su reutilización sin ningún tratamiento previo.

Los blindajes de plomo son relativamente fáciles de fabricar, ya que el plomo puede ser moldeado, extruido y soldado. A continuación en la Tabla 1.4 se presentan las distintas formas en las que el plomo puede ser utilizado como blindaje frente a la radiación (Donal, 2012, pp. 1-8).

**Tabla 1.4.** Tipos de presentaciones del plomo como material de blindaje

<b>FORMA</b>	<b>USO</b>
Hoja de plomo	Losa y placa para blindajes permanentes
Perdigones de plomo	Cuando la accesibilidad es limitada
Lana de plomo	Llenar las grietas profundas en una barrera de radiación
Epoxi plomo	Llenar las grietas profundas en una barrera de radiación
Masilla de plomo	Útil como parche temporal que no se endurece
Ladrillo de plomo	Práctico, fácil de manejar fácil transporte y puede ser reutilizado
Línea de plomo	Blindaje de tubería para líquidos radioactivos
Mangas de plomo	Blindaje de ductos y tuberías que transportan materiales radioactivos
Polvo de plomo	Dispersos en el plástico para material flexible o también mezclado con hormigón.
Vidrio plomado	Blindaje transparente

(Donald, 2012, p. 34)

## b. Hormigón

Su bajo costo, su alta resistencia a la compresión, la facilidad de colocación, su alto nivel de estabilidad y la alta eficacia en la atenuación de fotones hacen del hormigón un material utilizado como blindaje (Amirabadi, 2013, pp. 1081-1084).

Existen diversos tipos de hormigón los cuales varían en su composición y densidad. La Tabla 1.5 muestra tres tipos de hormigón ordinario

**Tabla 1.5.** Composición de diferentes tipos de hormigón ordinario

Elemento	Hormigón Regular	Hormigón Tipo 03	Hormigón Tipo 04
	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso
H	1	0,9	0,6
C	-----	5	-----
O	55,5	47,4	49,8
Na	3	-----	1,7
Mg	-----	2,4	0,3
Al	3,4	3,6	4,6
Si	33,7	14,5	31,5
S	-----	0,3	0,1
K	-----	0,2	2
Ca	2	24,7	8,3
Fe	1,4	1,1	1,3
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,3	2,39	2,35

(Mc Conn et al, 2011, pp. 82-112)

Para conseguir una alta densidad en el hormigón es necesario agregados como metales y minerales. En la Tabla 1.6 se muestran los tipos de aditivos comerciales para aumentar la densidad del hormigón el costo al usar este tipo de hormigones es considerablemente más alto que el costo al utilizar el hormigón regular (Klieger y Lamond J, 2004, p. 543).

**Tabla 1.6.** Aditivos utilizados en el hormigón para mejorar su densidad

Tipo de agregado	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Bario	3,35
Hierro y fósforo	4,8
Magnetita	3,53
Bario y boro	3,1
Magnetita y acero	4,64
Hierro - limonita	4,54

(Klieger y Lamond, 2004, p. 544)

Es posible también incrementar la densidad del hormigón colocando barras de refuerzo de acero las cuales proporcionan una mejor resistencia a la tracción y homogenizan al hormigón o concreto armado.

### c. Acero

El acero se usa ampliamente como material de blindaje de fotones debido a sus excelentes propiedades estructurales, térmicas y químicas y su facilidad de fabricación. La utilización de acero como blindaje es recomendable donde el espacio físico es limitado o donde la resistencia estructural es de gran importancia. (Chilton et al, 1984, p.382). La Tabla 1.7 muestra las densidades de los tipos de acero más utilizados en la industria nuclear.

**Tabla 1.7.** Tipos de acero y sus densidades

Propiedad	Acero Inoxidable		
	304 y 304L	316 y 316L	347
Densidad (g/ cm <sup>3</sup> )	7,9	8,0	8,0

(Chilton et al, 1984, p.382)

### d. Agua

El agua puede ser usada como material de blindaje en contenedores provisionales, como es el caso de la piscina de almacenamiento de un irradiador

tipo IV, su densidad es baja y por ello requiere de un gran volumen. Como ventajas es fácil de conseguir y su costo no es elevado en comparación a los materiales anteriormente descritos (Agency HSE, 2012, pp.15-16).

#### **1.2.6. EVALUACIÓN DE BLINDAJES PARA IRRADIADORES GAMMA**

El procedimiento para la evaluación del blindaje es el siguiente:

1. Realizar el plano estructural del recinto de irradiación, cuya memoria de cálculo haya sido aprobada previamente por la Autoridad Reguladora, debidamente realizado y firmado por un profesional y el titular de la licencia de operación donde se demuestre que la dosis al contacto y a un metro de las paredes no supere la dosis de  $10 \mu\text{Sv/h}$  (CNEA, 2005, p. 45).
2. Realizar un rastreo con un detector de radiación apropiado, alrededor de la cámara de irradiación, para localizar posibles fugas o puntos calientes que corresponden a puntos de mayor nivel de radiación; lo que se realizará tanto con el irradiador en servicio y cuando esté apagado (Consejo Supremo de Gobierno, Capítulo III, p. 17).
3. Implementar las medidas del caso para atenuar la radiación en el caso de que se encontraren puntos calientes, de manera que se consiga la protección del operador (Consejo Supremo de Gobierno, Capítulo III, p. 17).

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN

Para evaluar la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación, se realizó un levantamiento de información sobre la geometría del irradiador en la que se midieron la longitud y la altura del irradiador y de la cámara de irradiación, se determinaron el tipo de material, la densidad del blindaje y además se estableció la ubicación de las alarmas, ventana, puerta y demás dispositivos dispuestos en las paredes de la cámara.

Con la información recolectada se realizó la construcción de un plano en 2D a detalle real de la cámara de irradiación, en el que se dividieron las paredes externas de la cámara en cuadrículas de 1m x 1m. Este plano fue utilizado como referencia para el mapa de tasa de dosis equivalente ambiental  $\dot{H}^*_{(10)}$  al contacto en las paredes del irradiador.

Para realizar el mapa de dosis experimental se dividieron las paredes externas del irradiador en cuadrículas de 1m x 1m, se empleó el detector Polimaster, modelo PM1401K para medir la tasa de dosis equivalente ambiental al contacto en los puntos de intersección de la cuadrícula de las paredes. Adicionalmente, se monitoreó el ambiente con el detector colocado a 1 m de distancia de las paredes y a una altura de 1,4 m que corresponde a la altura donde se coloca el dosímetro personal un hombre de estatura promedio. Para asegurar la repetitividad y reproducibilidad del proceso se realizaron tres mediciones en cada punto.

Además, se calculó la actividad actual de la fuente con base a la fecha en la que se realizó la medición de la tasa de dosis, mediante la ecuación 2.1

$$A [Bq] = A_0 \times e^{\frac{-\ln(2) \times t}{t_{1/2}}} \quad [2.1]$$

Donde:

$A_0$  corresponde al valor de la actividad inicial de la fuente

$t$ : el tiempo transcurrido desde  $t_0$

$t_{1/2}$ : el periodo de vida media del Cobalto-60 el cual es igual a 5,27 años

Se determinaron con exactitud los puntos calientes o de fuga existentes en las paredes de la cámara de irradiación para ello se consideró el registro de tasa de dosis disponible en el irradiador en el mes de enero de 2 012 y se midieron los valores de la tasa de dosis equivalente ambiental al contacto en los puntos de fuga determinados y a un metro de distancia de los mismos por tres ocasiones.

Con los valores de tasa de dosis equivalente ambiental se determinó el valor del coeficiente de variación de los mismos para analizar la confiabilidad y reproducibilidad del proceso, si el valor del coeficiente de variación para cada punto es menor a 10, los datos son estadísticamente confiables y reproducibles.

En la Figura 2.1 se observa el diagrama de flujo que se siguió para la evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación.



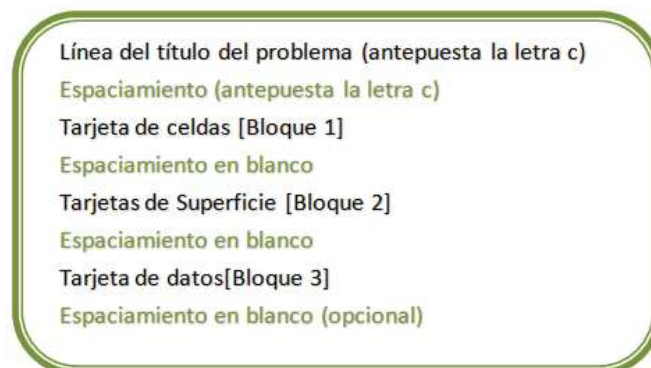
**Figura 2.1.** Diagrama de flujo utilizado para la evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación

## 2.2 DISEÑO DEL MODELO DIGITAL DE LA GEOMETRÍA ACTUAL DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN

### 2.2.1 DEFINICIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA (INPUT) DEL MODELO DIGITAL DEL BLINDAJE ACTUAL DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN EN EL PROGRAMA MCNP5

Los datos de entrada corresponden a la información requerida para el diseño del modelo digital como son: la geometría del irradiador y de los demás dispositivos dispuestos en las paredes, sus dimensiones altura, longitud y las composiciones químicas de cada uno de estos.

Para la definición de los datos de entrada se debe seguir la estructura del programa MCNP5, que se expone en la Figura 2.2, el ingreso de los datos de entrada al programa es por medio de archivos de texto.



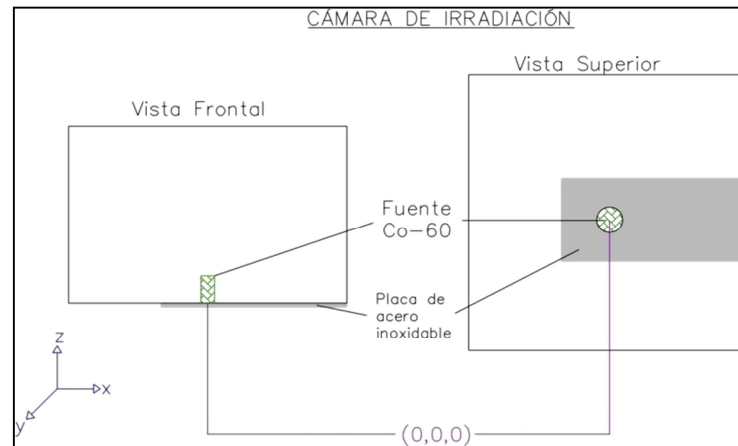
**Figura 2.2.** Estructura del archivo de entrada del programa Monte Carlo N- Particle MCNP5

Para definir los datos de entrada es importante definir un centro de coordenadas el mismo que permita determinar todas las superficies que van a intervenir en la simulación.

El centro de coordenadas fue situado en el centro de la base de la fuente de Cobalto- 60, tal como lo realizó Gómez (2013), como se puede observar en la



Figura 2.3. El modelo obtenido en esta sección se denominó  $M_0$  y correspondió al modelo inicial.



**Figura 2.3.** Esquema del centro de coordenadas utilizado para ubicar las superficies del modelo digital del blindaje de la cámara de irradiación (Gómez J, 2013, p 58)

### 2.2.1.1 Definición de la tarjeta de celdas

Una celda se define por las intersecciones, uniones o complementos de las superficies al considerar los materiales que lo conforman, la importancia y el tipo de fotones que emite.

La relación entre superficies se expresa con operadores los cuales son:

- Espacio en blanco que representa intersección
- Dos puntos (:) representan unión
- Numeral (#) exclusión

La estructura de la definición de una celda en el archivo de entrada se muestra en la Figura 2.4.

```
10 16 -4.2 1-2 IMP: P:1 $ Pared externa
```

**Figura 2.4.** Estructura de una celda definida en el programa MCNP5

Donde 10 representa el número de celda, 16 el número del material, -4.2 la densidad del material en unidades de  $\text{g/cm}^3$ , 1-2 el número de superficies que limitan la celda, *IMP: P=1* que representa la importancia que tiene la celda, la importancia en el programa MCNP5 constituye el tipo de radiación que se deberán analizar para esta celda, la letra P indica fotones y el número que se asigna es normalmente 1 y *\$ pared externa* indica comentario.

Para el modelo  $M_0$  se establecieron celdas para los siguientes elementos: las paredes de hormigón de la cámara de irradiación, el espacio dentro de la cámara, la piscina, la placa de acero inoxidable, los dispositivos que se encuentran sobre las paredes externas, la puerta, la ventana y el espacio de 1 m desde la parte externa de la cámara de irradiación. Se especificó para cada celda los materiales que las conforman, dicha información fue obtenida en la sección 2.1.

### 2.2.1.2 Definición de la tarjeta de superficies

Para definir las superficies en el programa MCNP5 se utilizaron macro cuerpos, los cuales son figuras tridimensionales que dividen al espacio en una región con sentido positivo (interior del macrocuerpo) y otra con sentido negativo (exterior del macrocuerpo), los macro cuerpos utilizados para el diseño del modelo  $M_0$  se describen en la Tabla 2.1 se puede observar la representación gráfica de dichas superficies.

**Tabla 2.1.** Descripción de las superficies utilizadas en el modelo digital

Cuerpo	Código	Descripción MCNP	Representación
Cilindro Recto	RCC	$V_x V_y V_z H_x H_y H_z R$ Donde: $V_x V_y V_z =$ centro de la base. $H_x H_y H_z =$ vector del eje del cilindro. $R =$ radio	Lápices que conforman la fuente

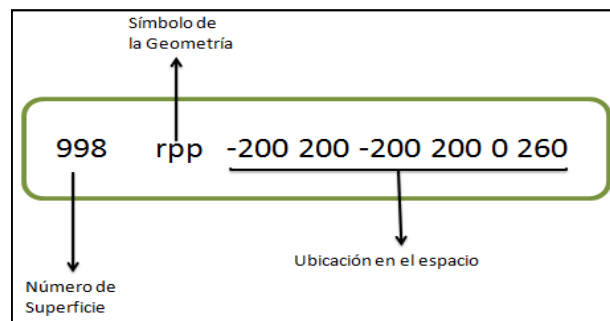
(Gómez, 2013 p. 74)

**Tabla 2.1.** Descripción de las superficies utilizadas en el modelo digital (continuación...)

Cuerpo	Código	Descripción MCNP	Representación
Paralelepípedo Rectangular	RPP	$X_{\min} X_{\max} Y_{\min} Y_{\max} Z_{\min} Z_{\max}$	Paredes de la cámara de irradiación, puerta, ventana y demás dispositivos dispuestos sobre las caras externas de las paredes de la cámara de irradiación

(Gómez, 2013 p. 74)

La estructura que utiliza el programa MCNP5 para definir a una superficie es asignarle un único número de manera arbitraria, seguido de la descripción del macro cuerpo utilizado. La Figura 2.5 ilustra un ejemplo de la definición de una superficie.

**Figura 2.5.** Estructura de una superficie definida en el programa MCNP5

### 2.2.1.3 Definición de la tarjeta de datos

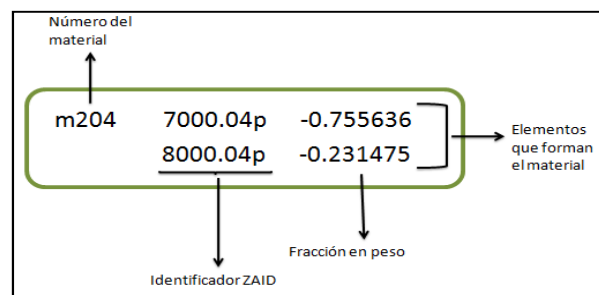
En la tarjeta de datos se define lo siguiente:

#### a. Materiales utilizados

Para ingresar los materiales se debe asignar un número arbitrario para definir a un único material, dicho número debe estar antepuesto a la letra m, seguido del identificador ZAID y la fracción en peso de cada elemento anteponiendo el signo menos (-).

En el identificador ZAID se registra la información de cada elemento químico que está formando el material mediante la siguiente estructura ZZZAAA.nnX donde ZZZes el número atómico; AAA es la masa atómica al trabajar con electrones y fotones corresponde el número 0; nn es el identificador de la librería de sección eficaz y X es la clase de dato que se utiliza en la simulación en el caso de fotones se coloca la letra p (X-5 Monte Carlo Team, 2003, pp. 3-114 – 3-117, Gómez J. 2013, pp. 95).

La librería de sección eficaz, utilizada en el programa MCNP5 para el transporte de fotones es la MCPLIB cuyo valor corresponde a 04 en el identificador ZAID (White, 2003,pp. 3-4).La estructura de la definición de un material en el archivo de entrada se muestra en la Figura 2.6



**Figura 2.6.** Estructura de la definición de un material en el programa MCNP5

Los materiales utilizados en el modelo  $M_0$  se obtuvieron de la información recolectada en la sección 2.1

### b. Fuente de emisión de partículas

La definición de la fuente fue tomada del modelo cinco ( $M_5$ ) de Gómez J, 2013, la cual está definida por 12 lápices ubicados conforme a la ubicación de la fuente real ver Anexo I.

### c. Modo de transporte

Para definir el modo de transporte se utiliza la tarjeta “**mode**” seguida de la letra que el código del MCNP5 asigna a fotones (p), definido para el modelo  $M_0$  como mode p.

### d. Cuantificador de Datos – “Tally”

Para calcular la tasa de dosis tanto al contacto y a un metro de distancia de las paredes externas de la cámara se escogió el tally F5, una tarjeta de cuantificación de datos o “tally” en inglés es un registro de las contribuciones por cada partícula durante una simulación Monte Carlo (X-5 Monte Carlo Team, 2008, pp. 3-204 – 3-208).

El tally F5 es un detector puntual que estima el flujo de partículas para este caso fotones en un punto. Para este tipo de detector el flujo total registrado es la contribución de la radiación directa, que son partículas que provienen de la fuente, y de la radiación dispersa partículas que resultan de la interacción con el medio llamadas pseudopartículas.

El tally F5 se expresa mediante la ecuación 2.2 la cual es una modificación de la ecuación de transporte de Boltzmann y es utilizada para calcular el flujo de partículas en un punto (X-5 Monte Carlo Team, 2008, vol i pp. 2-91).

$$F5 = \frac{W \cdot p(\Omega_p) \cdot e^{-\lambda}}{2\pi d^2} \int_E \int_t \int_{\Omega} \phi(\vec{r}_p, E, \vec{\Omega}, t) dE dt d\Omega \quad [2.2]$$

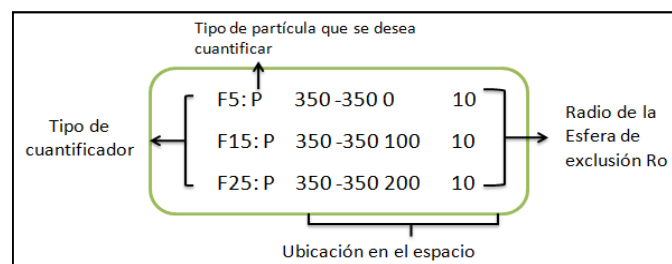
Donde  $W$  es el peso de la partícula,  $p(\Omega_p)$  corresponde a la probabilidad de emitir una partícula en la dirección  $\Omega_p$ ,  $d^2$  la distancia desde el punto de emisión o de colisión hacia el detector,  $\phi(\vec{r}_p, E, \vec{\Omega}, t)$  es el flujo de partículas y el coeficiente  $\lambda$  se calcula mediante la ecuación 2.3.

$$\lambda = \sum_i \mu_i(E) d_i \quad [2.3]$$

Donde  $\mu_i(E)$  es el coeficiente de interacción lineal para una partícula de energía  $E$  y  $d_i$  la longitud de la trayectoria de la partícula en el material.

Las unidades en las que se reporta el resultado del tally F5 son: número de partículas.cm<sup>-2</sup>.

Para definir a un tally se colocó la letra F seguido del número de tally seleccionado (F5), seguido del operador de unión (:), del tipo de partículas (fotones, p) y finalmente se define el punto donde se deseó que se calcule el flujo de partículas seguido del diámetro de la esfera de exclusión ( $R_0$ ). Todos los datos en cm, la estructura de la definición de un "tally" en el archivo de entrada en el programa MCNP5 se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Estructura de la definición de un cuantificador de datos en el programa MCNP5

Para calcular el flujo de partículas en más de un punto se debe aumentar el número del tally de 10 en 10, como se muestra en la Figura 2.8.

Para el modelo  $M_0$  se localizaron los detectores sobre los puntos de intersección del mallado en las paredes externas de la cámara de irradiación y a un metro de estas, todos con un radio de esfera de exclusión de  $R_0 = 10$  cm. La esfera de exclusión es una zona que rodea al detector puntual en la cual se contabiliza la contribución de flujos al detector puntual (Shultis y Faw, 2011, p. 18).

### e. Factores de conversión

El flujo calculado con el tally F5 puede ser convertido a un resultado dosimétrico para este caso específicamente la tasa de dosis equivalente ambiental, para obtenerlos el programa MCNP5 requiere la información sobre la relación entre el flujo o fluencia de partículas y la tasa de dosis en función de la energía de las partículas en este caso fotones, las tarjetas DE y DF permiten ingresar este tipo de información.

Los coeficientes de conversión utilizados en este trabajo fueron obtenidos de la Autoridad Reguladora Nuclear Argentina ARN en su Guía AR-1 Revisión 1, los cuales a su vez son basados en las recomendaciones del ICRP N° 74 y mediante estos las unidades en las que se reportan los resultados de los tallys son Sv/s.

En la Tabla 2.2 se detallan los valores de los factores de conversión de fluencia de fotones a dosis equivalente ambiental para una partícula de fuente.

**Tabla 2.2.** Valores de los factores de conversión de fluencia de fotones a dosis equivalente ambiental para una partícula de fuente

Energía (MeV)	$h_{\Phi}^* (10, E)$ (pSvcm <sup>2</sup> )
0,01	0,061
0,015	0,83
0,02	1,05
0,03	0,81
0,04	0,64
0,05	0,55
0,06	0,51
0,08	0,53
0,10	0,61
0,15	0,89
0,20	1,20
0,30	1,80

**Tabla 2.2.** Valores de los factores de conversión de fluencia de fotones a dosis equivalente ambiental para una partícula de fuente (continuación...)

Energía (MeV)	$h_{\Phi}^*$ (10, E) (pSvcm <sup>2</sup> )
0,40	2,38
0,50	2,93
0,60	3,44
0,80	4,38
1	5,20
2	8,60
3	11,10
4	13,40
5	15,50
6	17,60
8	21,60
10	25,60

(ARN, 2003,p. 25-26)

#### f. Número de Historias de partículas (NPS)

El número de historias de partículas se determina al utilizar la función NPS seguida del número de partículas, el valor que por defecto asigna el MCNP5 es de 1 000 000 partículas dicho valor fue utilizado para el modelo M<sub>0</sub>.

#### 2.2.2 DATOS DE SALIDA (OUTPUT)

Los resultados de la simulación se presentan en el archivo de salida mediante secciones denominadas tablas, las cuales se identifican por un número en la Tabla 2.3 se presentan la identificación y la descripción de las tablas del archivo de salida utilizadas para el análisis de resultados en el modelo M<sub>0</sub> (Shultis y Faw, 2011, pp. 33 - 34).



**Tabla 2.3.** Tablas de datos de salida y su descripción

N° de Tabla	Descripción de la Tabla
60	Importancia de la celda
100	Tabla de secciones transversales
126	Población de las partículas en cada celda
160	Análisis del TFC (Cuadro de fluctuación de los cuantificadores)

(Shultis y Faw, 2011, pp. 33 - 34)

Además en el archivo de salida se encuentra la información necesaria para poder evaluar la precisión de los resultados, en este enfoque el programa MCNP5 realiza 10 pruebas estadísticas a los cuantificadores de datos para asegurar que los resultados obtenidos sean estadísticamente confiables. Las pruebas que se realizan a los cuantificadores se detallan a continuación:

- Análisis de los valores medios, varianza y desviación estándar
- Análisis de la precisión y exactitud
- Análisis del teorema del límite central e intervalos de confianza
- Estimación de los errores relativos en MCNP
- Análisis de la Figura de mérito de MCNP
- Separación del error relativo en 2 componentes
- Análisis de la variación de la varianza
- Análisis del valor de la historia empírica de la función de densidad de probabilidad  $f(x)$
- Formación de intervalos de confianza estadísticamente válidos
- Análisis del ejemplo de datos de salida estadísticamente patológicos

Los cuantificadores deben pasar por las 10 pruebas estadísticas, si esto no es posible se debe aumentar el número de partículas necesarias para alcanzar el resultado esperado.

Dentro de las pruebas estadísticas más importantes en el programa MCNP5 se encuentra el error relativo (R), para poder interpretar los valores de este se considera la información detallada en la Tabla 2.4.

Al utilizar detectores puntuales como es el caso del tally F5 el error relativo de los datos obtenidos debe ser menor a 0,05 mientras que para los demás tipos de tally el error relativo aceptable es de 0,1.

**Tabla 2.4.** Rango de error relativo y su respectiva confiabilidad

Rango de error (R)	Calidad del tally
>0.5	Descartado
0,2 a 0,5	Descartado
<0,1	Confiable excepto para detectores puntuales o de anillo
<0,05	Confiable para detectores puntuales o de anillo

Como resultado de la simulación, el programa MCNP5 calcula el flujo de fotones en los detectores puntuales definidos en las paredes externas de la cámara en la cuadrícula y a un metro de estas. Los resultados se encuentran en el cuadro de fluctuación de los cuantificadores en el archivo de salida.

Los valores de la tasa de dosis obtenidos en el programa MCNP5 fueron calculados para una fuente que sufre una desintegración por segundo y emite un fotón gamma, la tasa de dosis se representa mediante la ecuación 2.4.

$$\frac{d\dot{H}^*(10)}{dt} \left[ \frac{Sv}{s} \right] = \sum_i H(E) \quad [2.4]$$

Dónde: i representa a todas las posibles fuentes que emiten fotones y que contribuyen para el conteo de fotones en cada detector (Gómez J, 2013, p. 63).

Para obtener la tasa de dosis considerando la actividad actual de la fuente se utilizó la ecuación 2.5.

$$\begin{aligned}
& \frac{d\dot{H}^*(10)}{dt} \left[ \frac{\mu Sv}{h} \right] \\
&= \frac{\text{fotones gammas}}{\text{decaimiento Co - 60}} \left[ \frac{\text{Partícula}}{\text{Bq}} \right] \times A[\text{Bq}] \times \sum_i H(E) \left[ \frac{\frac{Sv}{s}}{\text{Partícula}} \right] \quad [2.5] \\
&\times \frac{1\mu Sv}{10^{-6}Sv} \times \frac{3600 s}{1 h}
\end{aligned}$$

El número de fotones emitidos por cada decaimiento del Cobalto-60 son 2, la actividad A representa el número de desintegraciones por segundo que sufre la fuente de Cobalto-60, dicho valor se calculó como se indica en la ecuación 2.1.

En la Tabla 2.5 se muestran los valores de la actividad, la vida media, la edad de la fuente de Cobalto-60, datos necesarios para realizar el cálculo de la tasa de dosis ambiental.

**Tabla 2.5.** Variables utilizadas para el cálculo de tasa de dosis ambiental

Fecha de toma de datos:	22/07/2 013	Unidades			Unidades
Actividad de la fuente	2 072,1	Ci	Edad de la fuente:	8 269	días
	7,667 E+13	Bq	Vida media:	1 924	días
# gamma/ decaimiento	2	gamma/(Bq/s)			

### 2.3 VALIDACIÓN DEL MODELO DIGITAL GENERADO CON EL PROGRAMA MCNP5

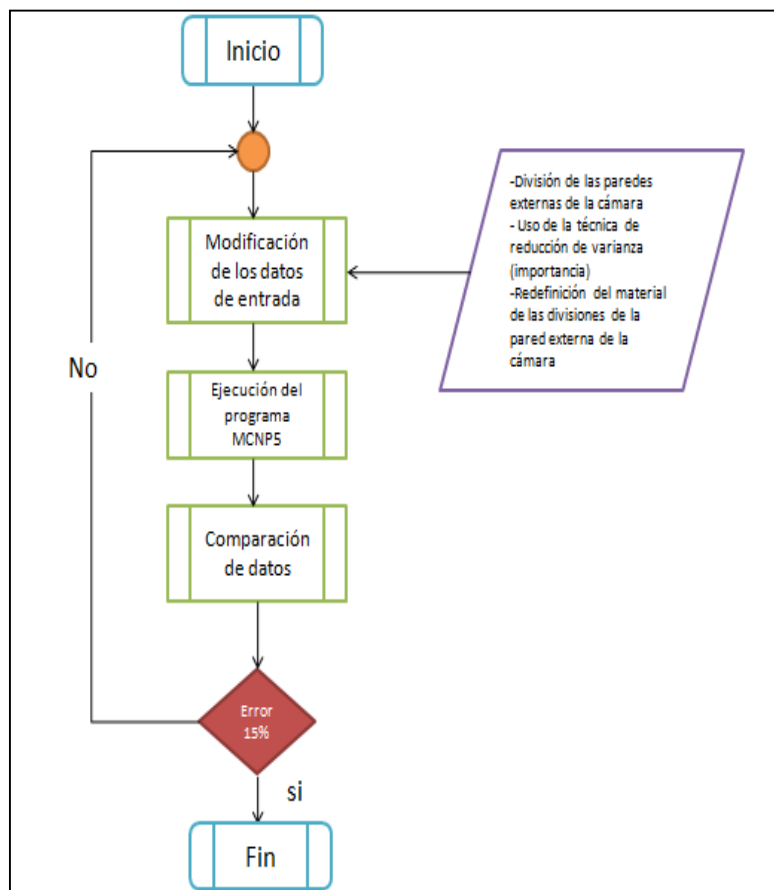
Todas las simulaciones realizadas en este proyecto se llevaron a cabo en un computador ACER con un plataforma de Windows 7 de procesador CORE i7 – 2600 con 3,40 GHz, sistema operativo de 32 bits y memoria RAM de 2,26 GB.

Una vez definido el modelo  $M_0$  y obtenidos los datos de la simulación de dicho modelo, estos fueron comparados con los datos registrados de la medición experimental y se calculó el error porcentual, mediante la ecuación 2.6.

$$error \% = \frac{V_{Experimental} - V_{Simulado}}{V_{Experimental}} \times 100 \quad [2.6]$$

El valor de error porcentual máximo admisible fue de 15 %. Si no se cumplía con este valor, se modificaban los datos de entrada. Los cambios que fueron realizados al modelo  $M_0$ , permitieron al modelo acercarse a la realidad.

La Figura 2.8 muestra el diagrama de flujo que se siguió para la validación del modelo digital generado con el programa MCNP5.

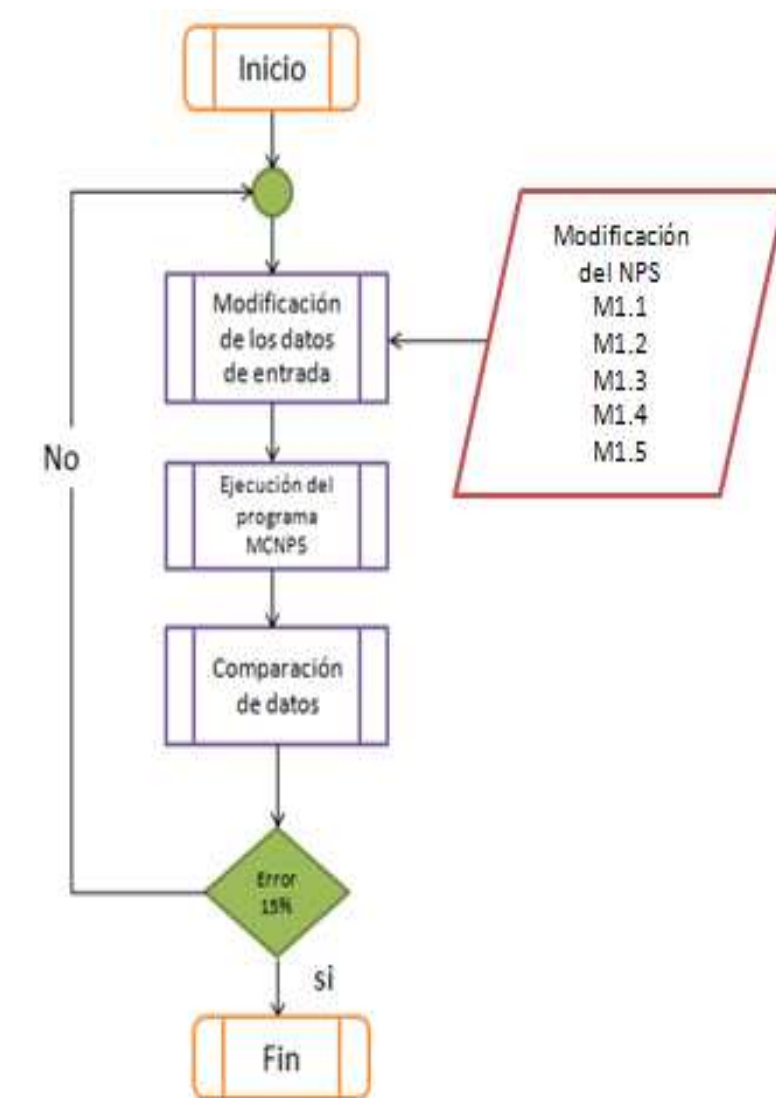


**Figura 2.8.** Diagrama de flujo utilizado para la validación del modelo digital

### 2.3.1 MODELO 1: VARIACIÓN DEL NÚMERO DE HISTORIAS DE PARTÍCULAS (NPS), MÉTODO ANÁLOGO DE RESOLUCIÓN

Al considerar como base al modelo  $M_0$ , se aumentó el número de historias de partículas NPS de 1 000 000 a 10 000 000, 100 000 000, 1 000 000 000 y 10 000 000 000 NPS. Para definir el material de la pared se utilizó una sola capa de hormigón ordinario.

En la Figura 2.9 se puede observar el diagrama de flujo seguido para la definición del modelo 1 ( $M_1$ ).



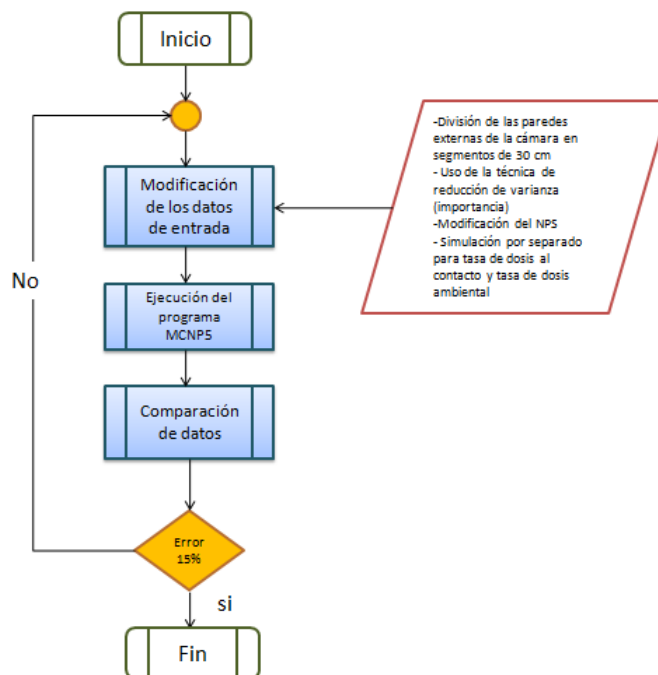
**Figura 2.9.** Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo digital  $M_1$

### 2.3.2 MODELO 2: DIVISIÓN DE LA PARED DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN EN 5 SEGMENTOS IGUALES MÉTODO NO ANALOGO DE RESOLUCIÓN

Para el modelo 2 ( $M_2$ ) se partió del modelo  $M_0$  y se dividió a las paredes de la cámara de irradiación en 5 segmentos de 30 cm de espesor.

Para definir el material de cada segmento de la pared se consideró hormigón ordinario, además se utilizó la técnica de reducción de varianza de la división de la geometría y ruleta rusa también llamada como “Técnica de la Importancias” (ver Anexo II), se varió el número de historias de partículas y se realizó la simulación al considerar primero únicamente los tallys al contacto con las paredes, para la medición de la tasa de dosis al contacto y segundo se consideraron únicamente los tallys colocados a un metro de distancia de las paredes de la cámara de irradiación para la medición de la tasa de dosis ambiental.

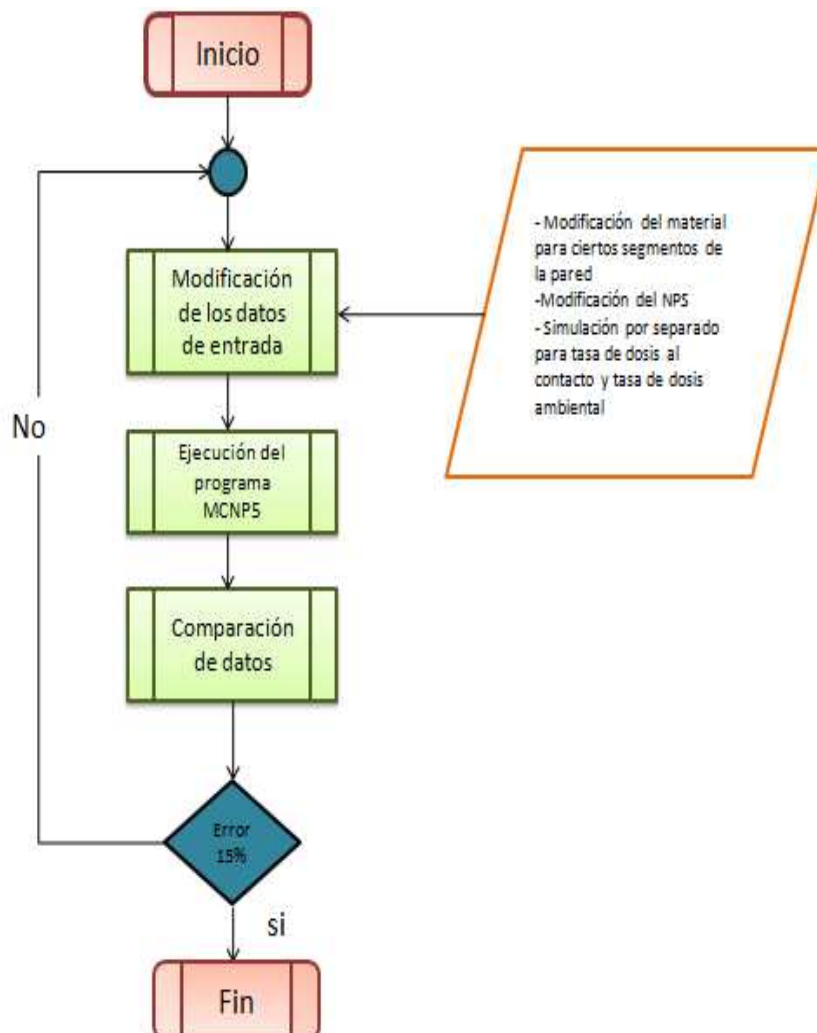
La Figura 2.10 muestra el diagrama de flujo seguido para la definición del modelo  $M_2$



**Figura 2.10.** Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo digital  $M_2$

### 2.3.3 MODELO 3: REDEFINICIÓN DEL MATERIAL PARA LAS DIVISIONES DE LA PARED DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN

Para definir el modelo 3 ( $M_3$ ) se partió del modelo  $M_2$ , sobre el cual fue necesario cambiar el material definido para ciertos segmentos de la pared de la cámara de irradiación por aire, con el fin de que los resultados cumplan con que el error porcentual sea menor del 15%. Se mantuvo el criterio de realizar la simulación por separado para la medición de la tasa de dosis al contacto y ambiental. La Figura 2.11 muestra el diagrama de flujo seguido para la definición del modelo  $M_3$ .



**Figura 2.11.** Diagrama de flujo utilizado para la definición del modelo digital  $M_3$

#### **2.3.4 MODELO 4: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA**

Para definir el modelo 4 ( $M_4$ ) se partió del modelo  $M_3$ , sobre el cual fue necesario colocar espacios de aire como material en ciertos puntos de la pared de la cámara de irradiación, estos puntos corresponden a los puntos de fuga o puntos calientes, para ello se definieron celdas que coincidan en dichos puntos, con el fin de que los resultados cumplan con un error porcentual menor del 15%. Se mantuvo el criterio de realizar la simulación por separado para la medición de la tasa de dosis al contacto y ambiental.

### **2.4 REDISEÑO DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN CONSIDERANDO UNA ACTIVIDAD DE 100 000 Ci**

Una vez validado el modelo digital para la actividad determinada en la sección 2.1 se calculó la tasa de dosis ambiental tanto en las paredes como a un metro de distancia para una actividad de 100 000 Ci mediante la ecuación 2.5.

Una vez determinado el nuevo mapa de la tasa de dosis se determinaron los puntos adicionales a los puntos calientes o puntos de fugas determinados en la sección 2.1 que requieren de blindaje auxiliar.

Se realizó el cálculo del espesor del blindaje auxiliar para los puntos de fuga mediante la ecuación 1.16 en la que se consideraron los materiales utilizados para blindaje de la radiación gamma como hormigón y plomo. Para el cálculo del blindaje auxiliar se consideraron 2 opciones:

- La tasa de dosis ambiental debe ser menor o igual a  $0,5 \mu\text{Sv/h}$  conforme a lo establecido por la OIEA para el público en general.
- La tasa de dosis ambiental debe ser menor o igual a  $10 \mu\text{Sv/h}$  para el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE).



Una vez determinado el espesor del material utilizado como blindaje se modificó el modelo validado en la sección 2.2 en el que se incrementaron las celdas, las superficies y los materiales correspondientes al blindaje auxiliar calculado para cada opción.

## **2.5 DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN ECONÓMICA**

Con el rediseño establecido en la sección 2.4 se determinó la inversión económica requerida para su implementación al considerar cada una de las opciones anteriormente establecidas.

Se tomaron en cuenta costos del blindaje auxiliar con base en proformas entregadas por proveedores internacionales de materiales para protección radiológica.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN

En esta sección se indican los resultados obtenidos de la evaluación de la condición actual del blindaje de la cámara de irradiación.

##### 3.1.1 RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN

La instalación del irradiador fue diseñada con la ayuda y colaboración del Comisariato de Energía Atómica de Francia (CEA) y técnicos de la Escuela Politécnica Nacional, el irradiador fue construido en el año de 1974 (Salgado, 2010, pp. 1-2,5). Los datos técnicos del irradiador se muestran en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1.** Datos del irradiador de la EPN

No.	Datos técnicos	Descripción
1	Diseño	Comisariato de Energía Atómica de Francia
2	Año	1974
3	Categoría	IV
4	Tipo	Panorámico, almacenamiento en húmedo
5	Radioisótopo	Cobalto- 60 (vida media: 5,27 años)
6	Número de lápices de la fuente	12
7	Configuración de la fuente	Canasta cilíndrica de 17 cm de diámetro interno, 23,8 cm de diámetro externo , altura 31 cm, material acero inoxidable
8	Cámara de Irradiación	Dimensiones : 4 m de largo, 4 m de ancho y 2,6 m de altura

**Tabla 3.1.** Datos del irradiador de la EPN (continuación...)

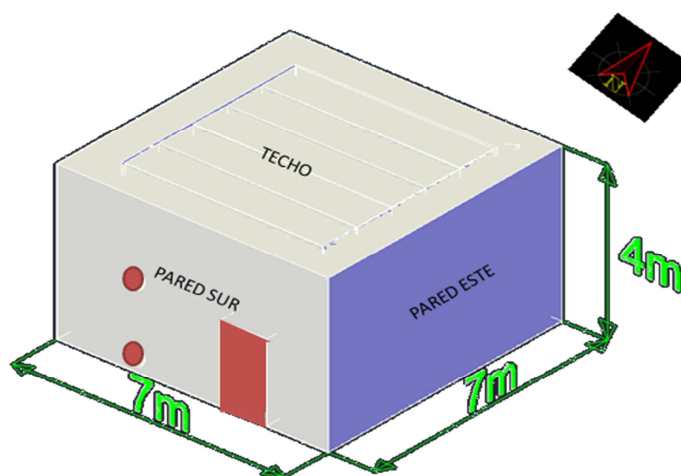
No.	Datos técnicos	Descripción
9	Blindaje	Blindaje fijo de paredes de hormigón armado de 1.5 m de espesor con densidad de 2.35 g/cm <sup>3</sup> y techo espesor 1,4 m de hormigón armado
10	Dimensiones del Irradiador	7 m de largo, 7 m de ancho y 4 m de altura

La actividad máxima de diseño del irradiador, así como la actividad actual se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Registro de actividades de la fuente de Cobalto - 60

No.	Actividad	Descripción
1	Actividad máxima de diseño	150 000 Ci
2	Actividad Inicial	20 000 Ci (junio 1980)
3	Actividad primera recarga	40 700 Ci ( diciembre 1990)
4	Actividad Actual	2 072,1 Ci (julio 2013)

La Figura 3.1 describe las dimensiones del irradiador y la orientación con la cual se identificaron a las paredes del mismo, se consideró como punto sur la pared donde se encuentra la puerta.

**Figura 3.1.** Dimensiones del irradiador de la EPN

Además, se identificaron los dispositivos colocados en las paredes del irradiador, el plano a detalle del irradiador se indica en la Figura 3.2. A continuación se describen los dispositivos presentes en cada pared:

En la pared norte se encuentran los siguientes dispositivos

- Una ventana de vidrio plomado (A) con un espesor de 1,40 m. La cara interna está protegida con un vidrio especial plomado que no toma coloración con la interacción de los rayos gamma. Esta ventana está llena con aceite. El diseño y construcción de la ventana fue realizado por la empresa francesa SOVIS
- La ventana se encuentra sobre un marco de hierro, nivelado con una precisión de 0,1 mm
- Cinco orificios (B,C,D,E,F) previstos para la instalación de telemanipuladores, los cuales se encuentran blindados con tapones de plomo de forma circular de 40 cm de diámetro y 3,5 cm de espesor
- El equipo electrónico que se encuentra en la pared norte está constituido por un cofre ALILOG 11(G), un cofre de alimentación de energía (H) y un cofre de Operación de la fuente (I)
- Dos cajas metálicas de toma corrientes (J, K)

En la pared sur se encuentran los siguientes dispositivos:

- Dos orificios blindados con tapones de plomo de forma circular con un diámetro de 50 cm y 3,5 cm de espesor (L, M)
- Puerta de acceso construida de hormigón cuyas dimensiones son: largo 2,00 m, ancho 1,22 m y espesor de 1,50 m y esta forrada con planchas de acero, es accionada por un motor de 3 Hp (N)
- Un cofre de comando eléctrico de la puerta (O)
- Dos cofres de señalización (P, Q)
- Dos cajas metálicas de toma corrientes (R,S)

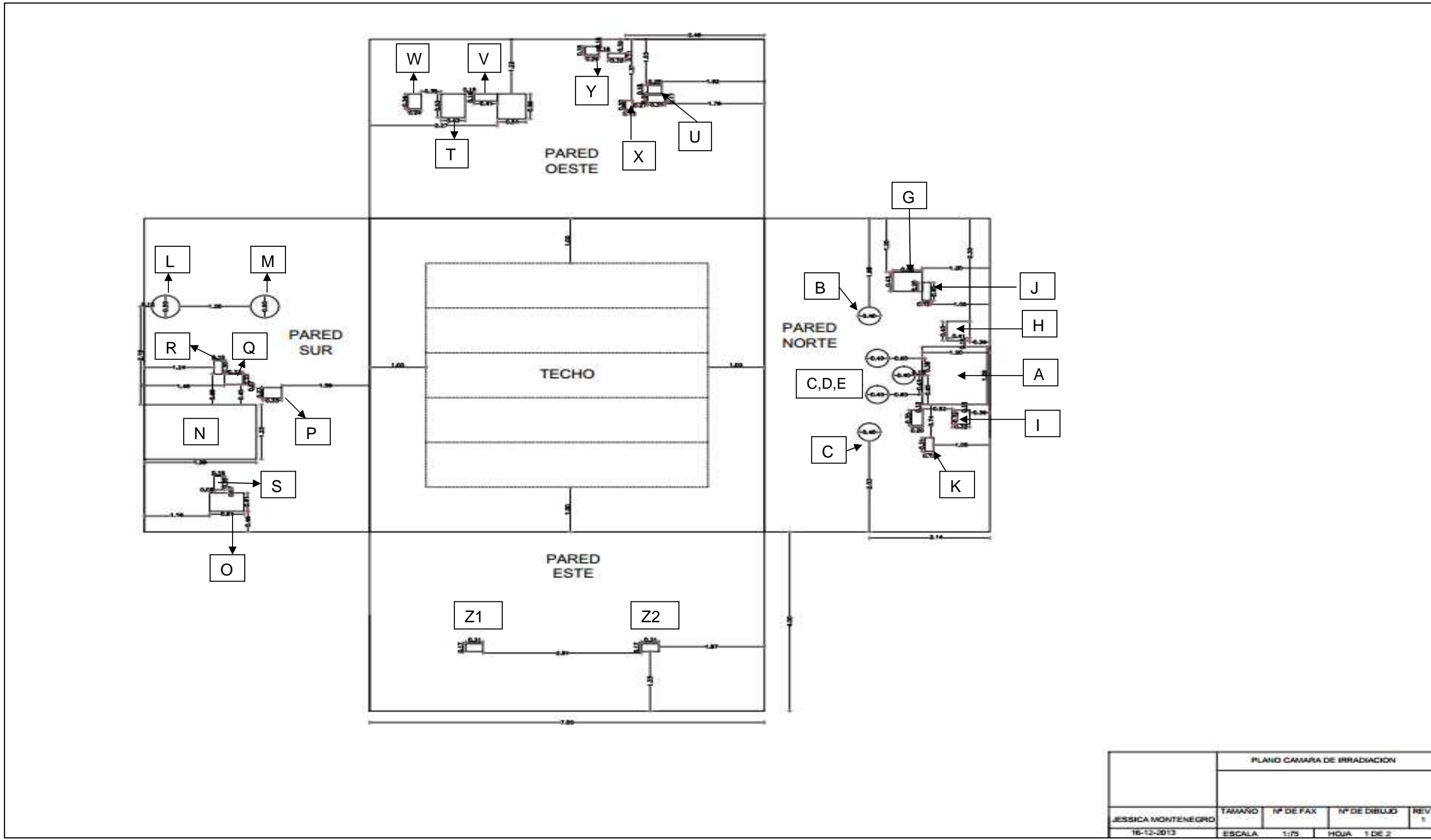
En la pared oeste se encuentran los siguientes dispositivos:

- Un cofre ALILOG 11(T)
- Dos cajas metálicas de toma corrientes (U,V)
- Un cofre de señalización (W)
- Un cofre de comando de la bomba de circulación de la piscina (X)
- Un detector de LUDLUM (Y)

En la pared este se encuentran los siguientes dispositivos:

- Dos cajas metálicas de toma corrientes (Z1 y Z2)

El techo del irradiador está formado por un total de 9 bloques removibles de hormigón armado, 4 bloques de 4,58 x 1,10 x 0,70 m, orientados de sur a norte y 5 bloques de 5,00 x 1,00 x 0,70 m, orientados de este a oeste.



PLANO CAMARA DE IRRADIACION				
JESSICA MONTENEGRO	TAMANO	Nº DE FAX	Nº DE DIBUJO	REV.
16-12-2013	ESCALA	1:75	HOJA	1 DE 2

Figura 3.2. Plano en 2 dimensiones del irradiator de la EPN

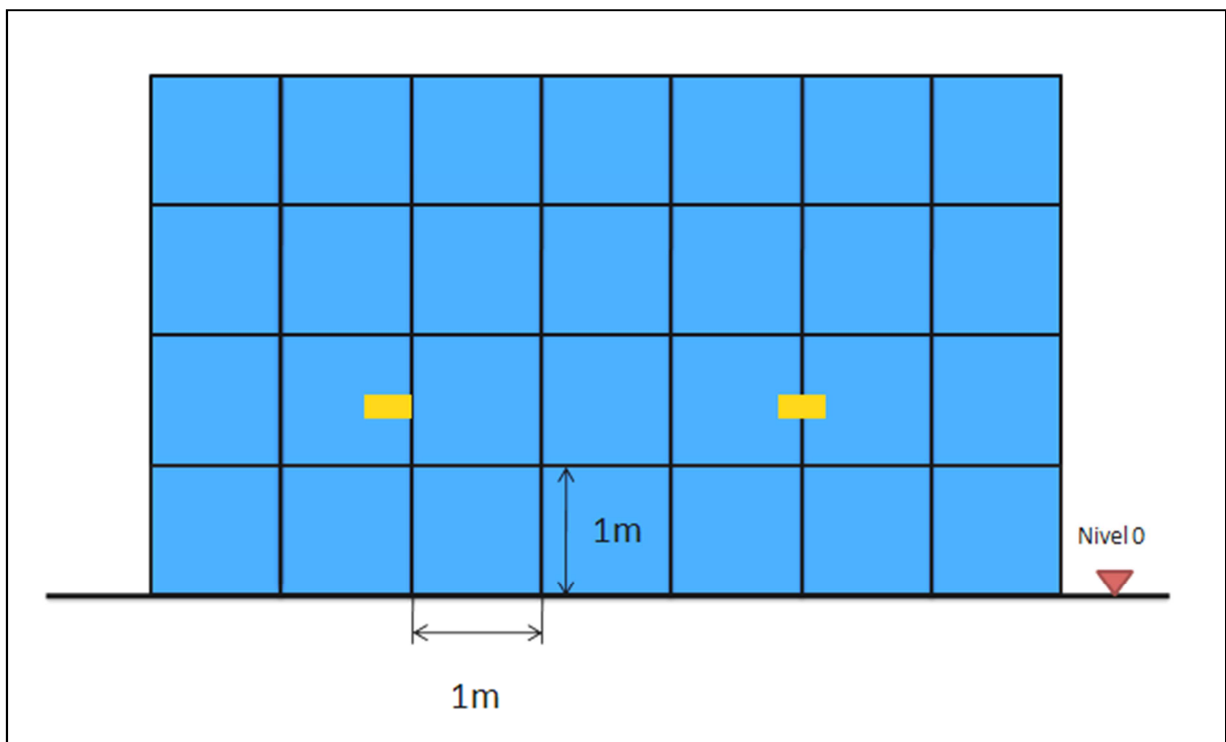
### 3.1.2 MAPA DE DOSIS EXPERIMENTAL

En esta sección se indican los resultados obtenidos de la medición de la tasa de dosis al contacto de las paredes de la cámara de irradiación y a 1m de distancia de las mismas con el detector Polimaster modelo PM1401K.

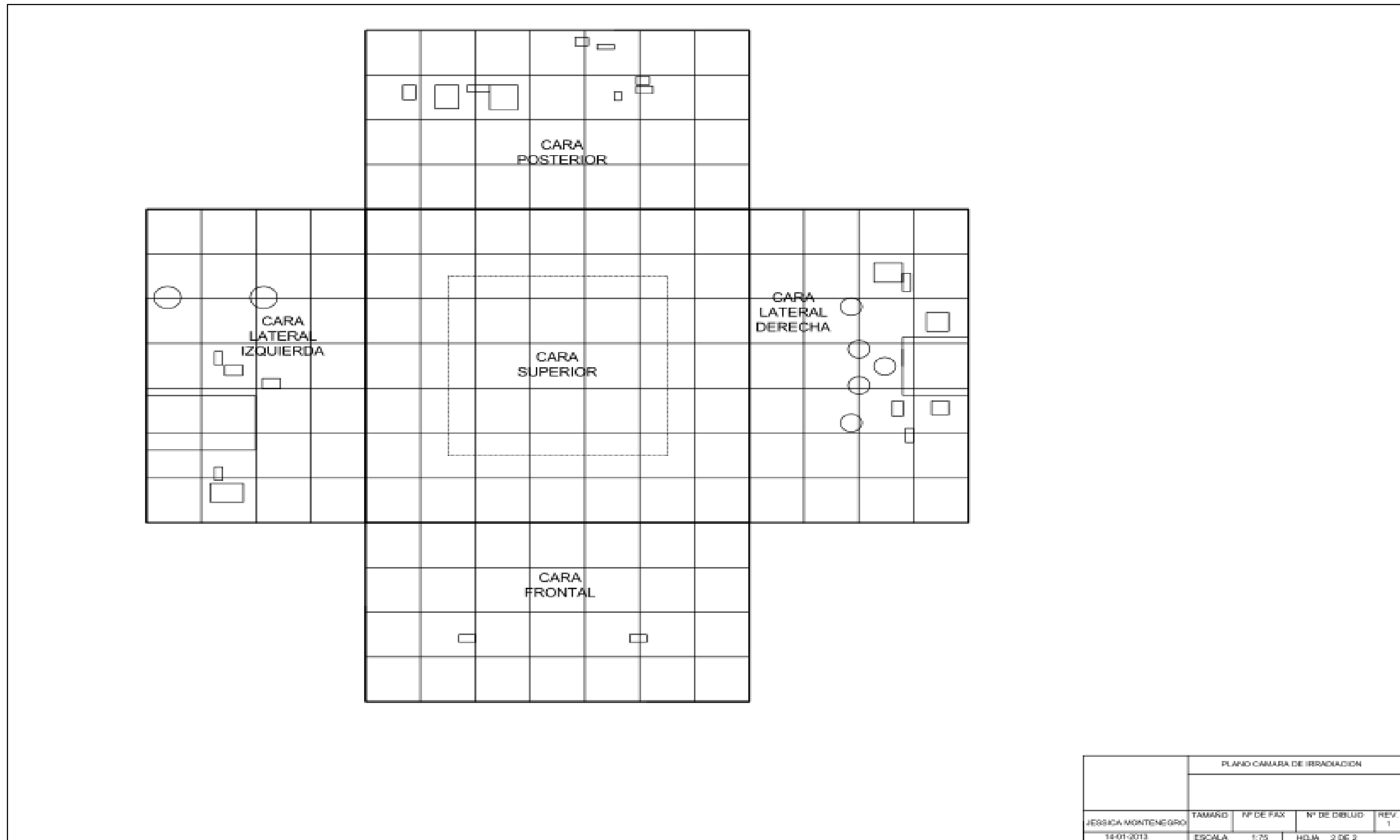
#### 3.1.2.1 Mapa de dosis al contacto

Una vez obtenido el plano a detalle del irradiador se dividieron a las paredes en cuadrículas de 1x1 m, se muestra un ejemplo en la Figura 3.3.

En la Figura 3.4 se puede observar el mallado realizado en todas las paredes del irradiador.



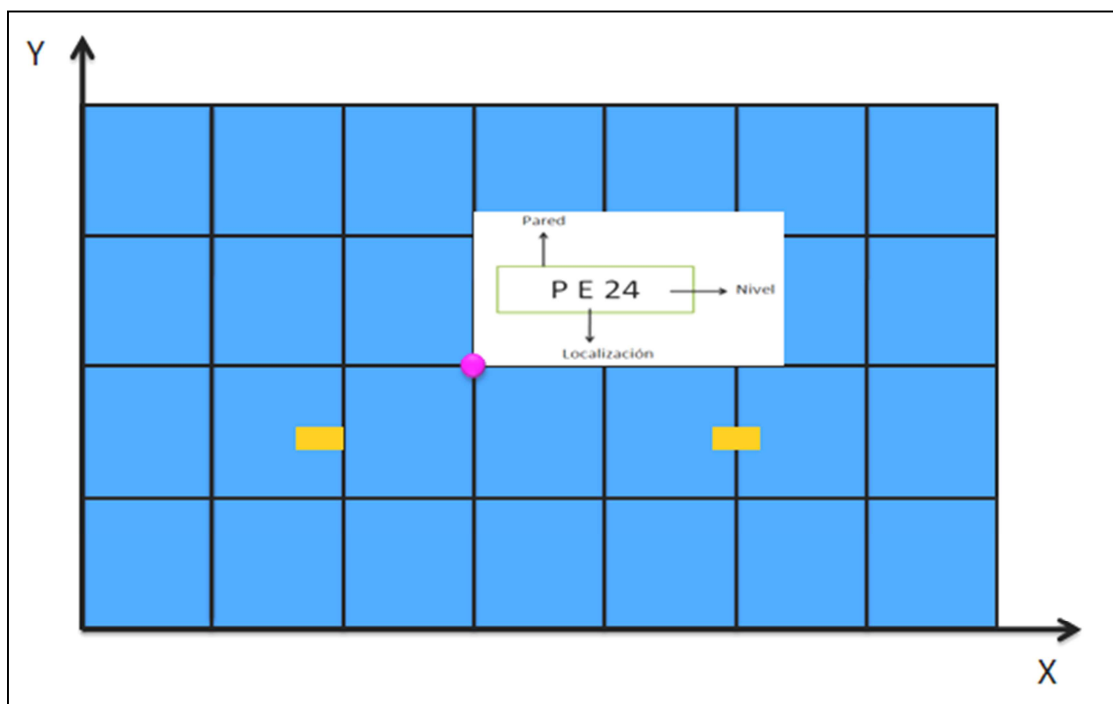
**Figura 3.3.** Esquema del mallado para la pared este del irradiador



**Figura 3.4.** Plano del mallado realizado en del irradiador de la EPN

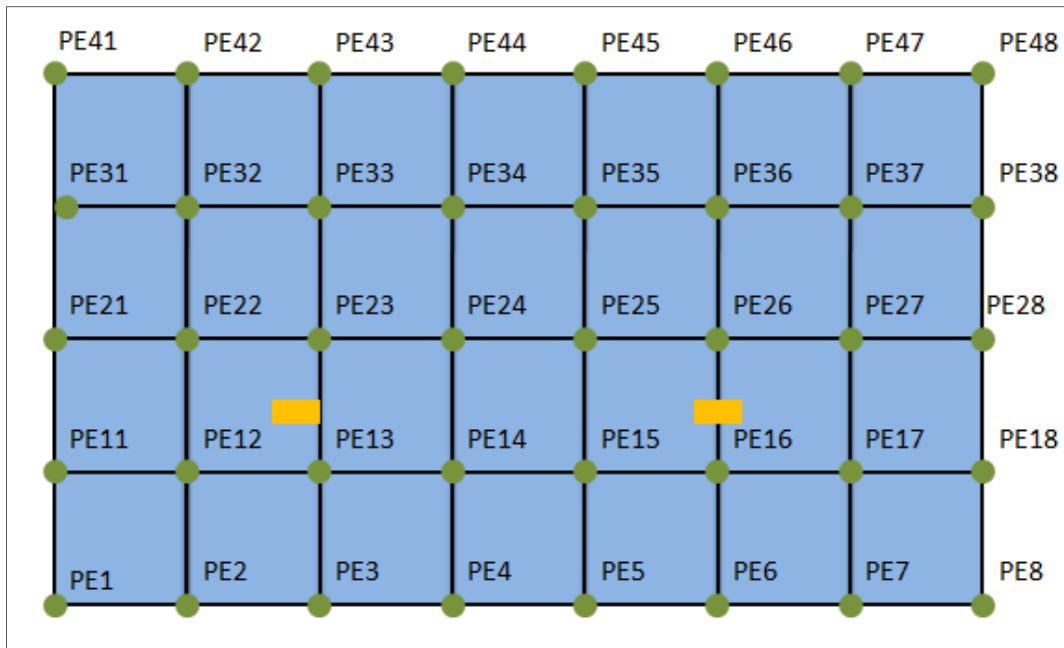


Para identificar a cada punto en el que se realizó la medición de la tasa de dosis equivalente ambiental, se utilizó el código que se muestra en la Figura 3.5, donde la primera letra (P) sirve para identificar a la pared y (T) para techo, la segunda letra (E) corresponde a la localización de la pared: norte (N), sur (S), este (E), oeste (O) y 24 es el número asignado para el punto donde (2) corresponde al nivel en el eje y de las paredes y 4 corresponde al nivel en el eje x de las mismas.



**Figura 3.5.** Código utilizado para identificar a los puntos del mallado

La Figura 3.6 ilustra un ejemplo del mallado construido en la pared este del irradiador para el mapa de dosis al contacto. Los puntos verdes corresponden a los puntos en los que se realizó la lectura con el detector Polimaster PM1401K de la tasa de dosis equivalente ambiental ( $\dot{H}^*_{(10)}$ ) que de aquí en adelante se nombrará únicamente como tasa de dosis.



**Figura 3.6.** Esquema de la pared este del irradiador en el que se muestran los puntos considerados para la medición de la tasa de dosis

Los resultados del mapa de dosis al contacto en las paredes del irradiador se pueden observar en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 para las paredes norte, sur, este, oeste y techo respectivamente. La representación gráfica del mapa de dosis presentado de aquí en adelante corresponde a las medidas reales de la pared 4 m de altura y 7 m de longitud y la tasa de dosis se presenta en unidades de  $\mu\text{Sv/h}$ . Los valores de la tasa de dosis medidas experimentalmente en cada punto del mallado para cada pared del irradiador se muestran en el Anexo II.

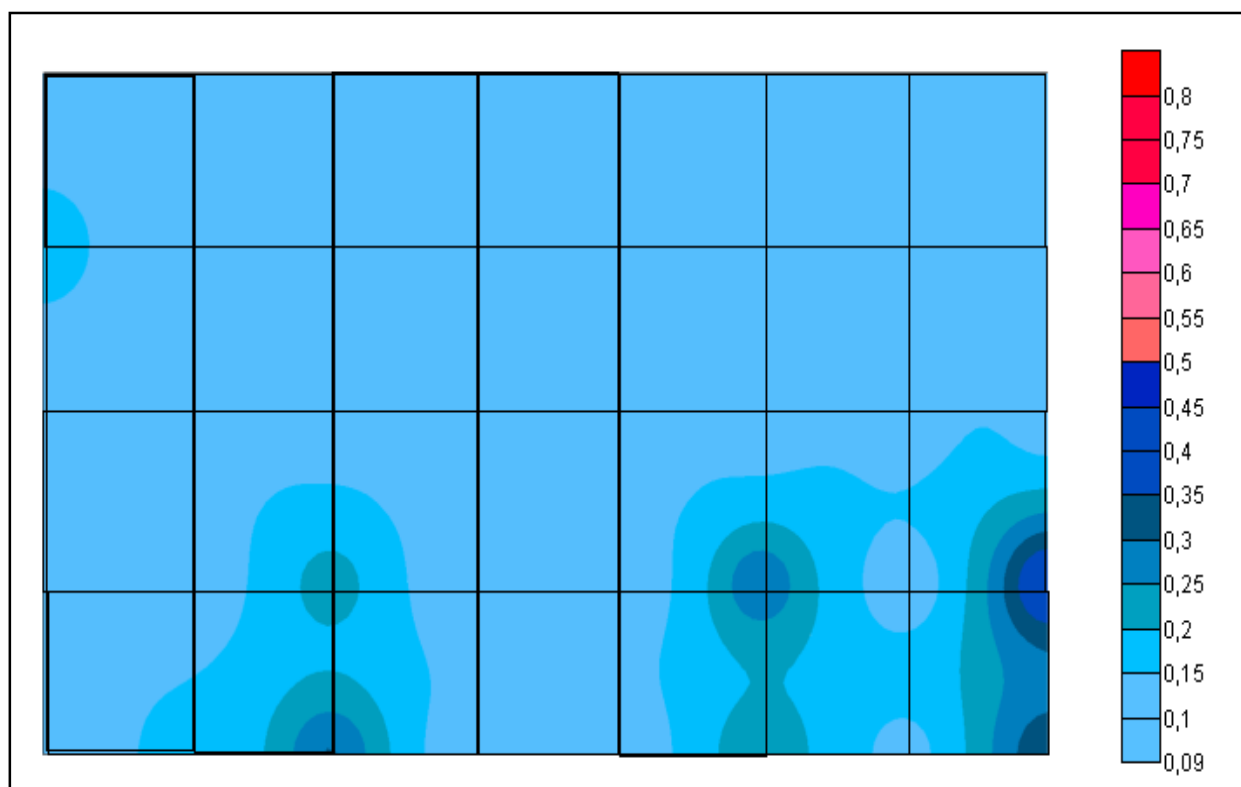
Se calculó el valor medio de las lecturas realizadas y este valor fue comparado con los valores de tasa de dosis generados por el modelo digital.

El análisis del coeficiente de variación de los datos obtenidos experimentalmente presentó un valor menor a 10 y permitió determinar que los resultados son estadísticamente confiables y reproducibles.

### a. Pared norte

La Figura 3.7 muestra la representación gráfica del mapa de dosis de la pared norte del irradiador en el que se puede observar que con la actividad de la fuente de 2 072,1 Ci, ningún punto del mallado supera la tasa de dosis de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ , pero se nota la presencia de puntos con tasas de dosis superiores a 0,12  $\mu\text{Sv/h}$  valor correspondiente a la lectura de fondo realizada con el detector Polimaster, la tasa de dosis en estos puntos se encuentra en el rango de 0,16  $\mu\text{Sv/h}$  a 0,41  $\mu\text{Sv/h}$  debido a que las paredes del irradiador al ser construidas de hormigón armado no presentan una densidad homogénea en toda su estructura.

La ubicación de estos puntos como se puede observar en la Figura 3.7 corresponden a la zona inferior de la pared hasta los 2 m de altura, espacio físico donde se encuentra la cámara de irradiación.

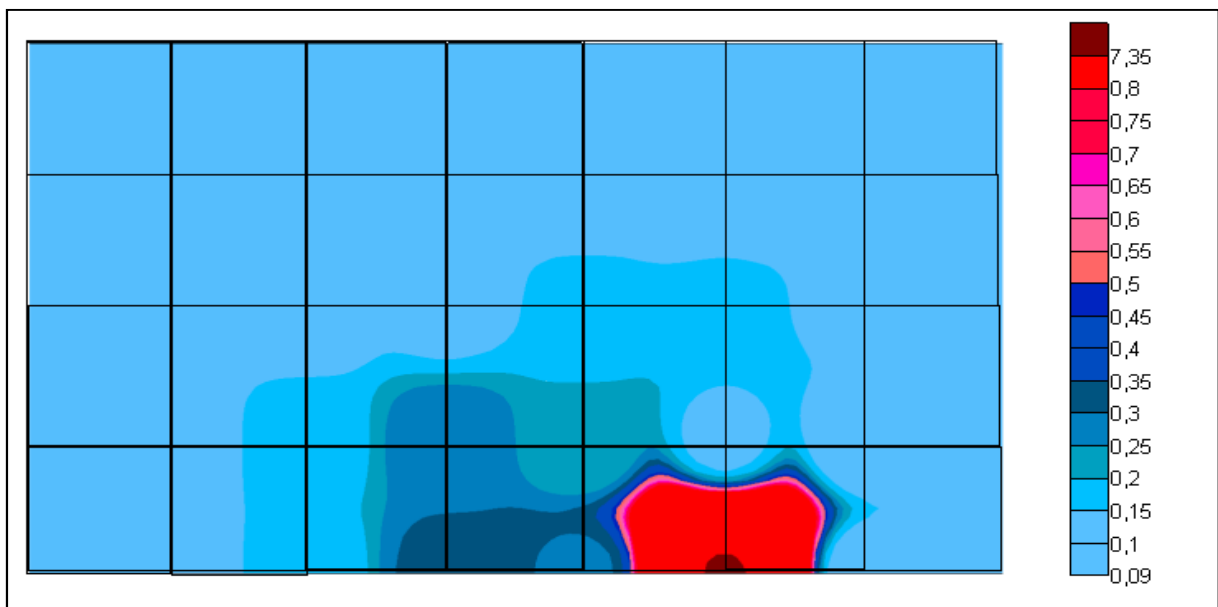


**Figura 3.7.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared norte del irradiador

### b. Pared Sur

La representación gráfica del mapa de dosis de la pared sur del irradiador se presenta en la Figura 3.8, se observa que el punto con la mayor tasa de dosis (7,35  $\mu\text{Sv/h}$ ) se encuentra ubicado en el en la zona inferior derecha de la pared, esto debido a que en este punto se encuentra la puerta de acceso a la cámara de irradiación y existe entre la puerta y el piso un espacio de 0,5 cm aproximadamente, si bien existe un bloque de plomo entre la puerta y la cámara de irradiación este está conformado por bloques de plomo y al existir espacios de aire entre estos debido a su forma, no constituyen un blindaje adecuado como lo podría ser una placa de plomo.

Además existen puntos en los que la tasa de dosis se encuentra en el rango de 0,15  $\mu\text{Sv/h}$ , y 0,31  $\mu\text{Sv/h}$  los cuales se ubican en la zona central e inferior de la pared, zona correspondiente a la cámara de irradiación y que como ya se mencionó en el acápite de la pared norte esto se debe a que las paredes no presentan una densidad homogénea en su estructura.

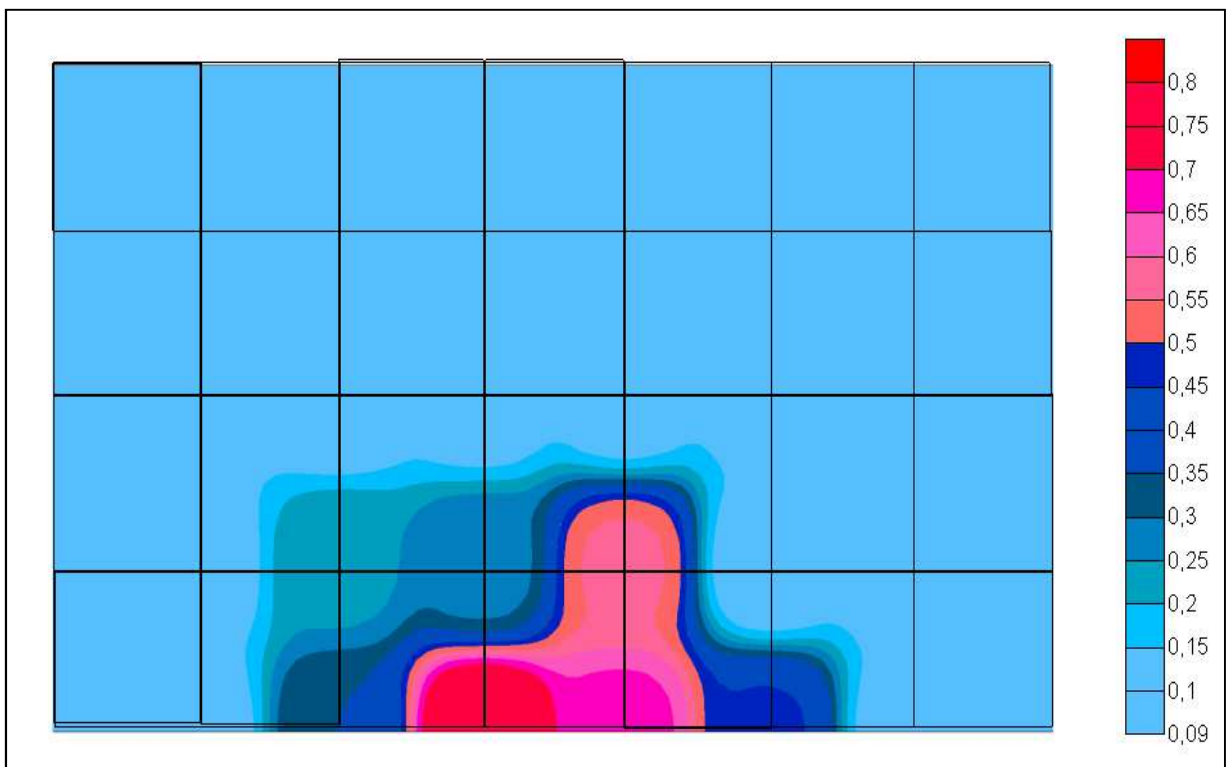


**Figura 3.8.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared sur del irradiador

### c. Pared Este

La Figura 3.9 muestra la representación gráfica del mapa de dosis de la pared este del irradiador en la que se puede observar que existen puntos en los que se supera la tasa de dosis de  $0,5 \mu\text{Sv/h}$ , el rango de tasa de dosis para dichos puntos es de  $0,24$  y  $0,78 \mu\text{Sv/h}$  los cuales se encuentran ubicados en la zona central inferior de la pared.

La presencia de estos puntos denota que la pared este del irradiador no presenta una densidad homogénea en su estructura, esto debido a que el hormigón del que está construida no fue compactado correctamente y existen espacios de aire en su estructura.

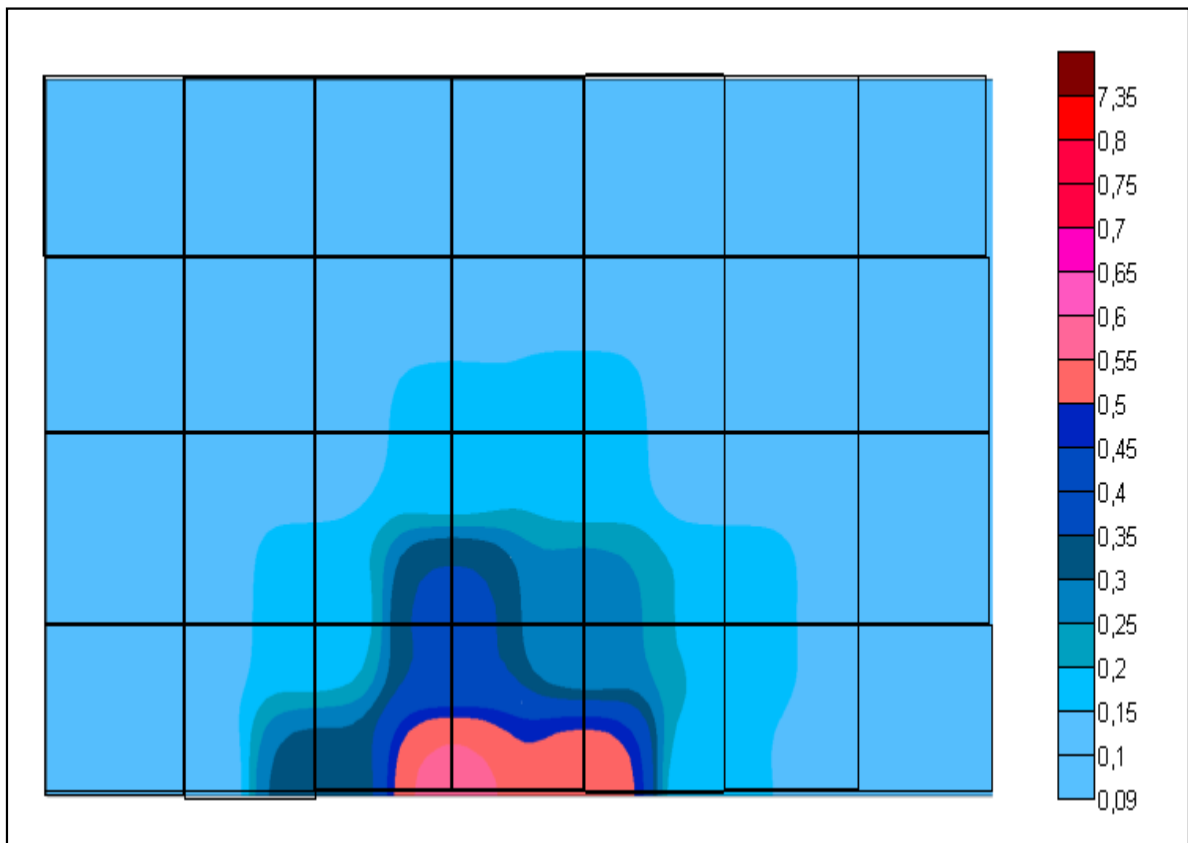


**Figura 3.9.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared este del irradiador

#### d. Pared Oeste

En la Figura 3.10 se presenta la representación gráfica del mapa de tasa de dosis de la pared oeste del irradiador se observa que existen puntos donde la tasa de dosis es superior a la tasa de dosis de la lectura de fondo del detector Polimaster y al igual que las demás paredes esta zona se ubica en la parte inferior central.

El rango de tasa de dosis para esta zona es de 0,14 y 0,55  $\mu\text{Sv/h}$  al considerar una actividad de la fuente de 2 072,1 Ci. Como ya se explicó la presencia de esta zona se debe a que la densidad de las paredes del irradiador no es totalmente homogénea.



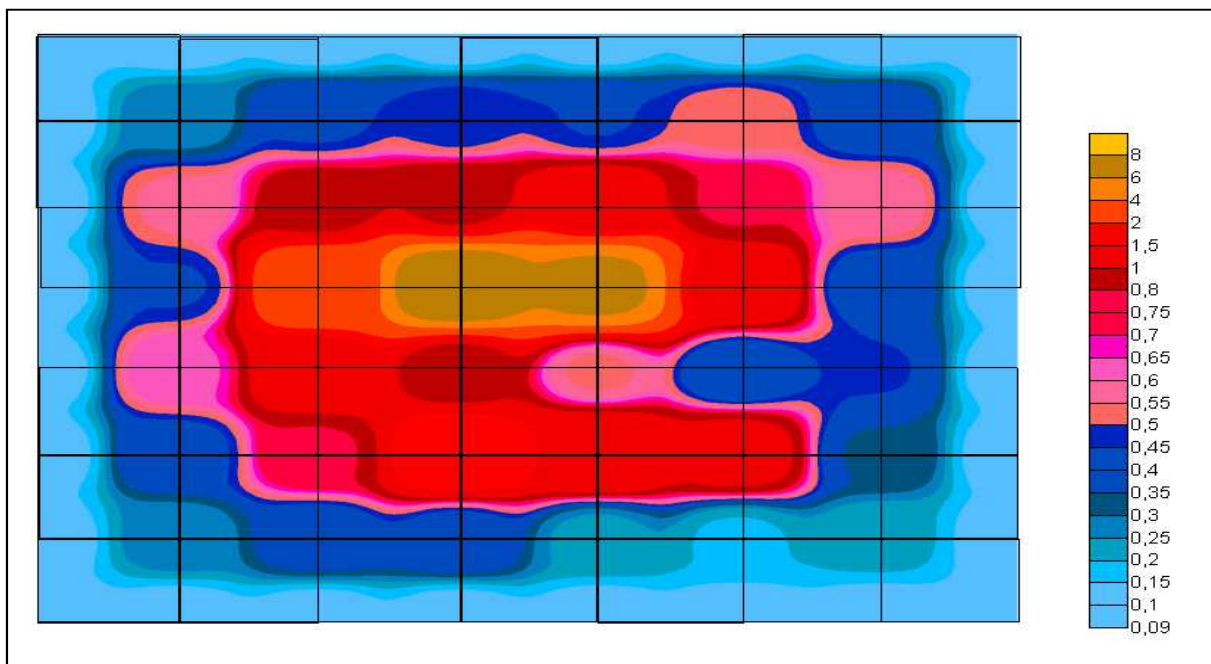
**Figura 3.10.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared oeste del irradiador

### e. Techo

La Figura 3.11 muestra la representación gráfica del mapa de tasa de dosis del techo del irradiador en la que se observa que debido al diseño estructural del techo el cual está compuesto por bloques de hormigón y al no estar completamente unidos entre sí, existen espacios de aire entre 3 y 5 mm por los cuales fuga la radiación y se obtienen por ello tasas de dosis superiores a las de las paredes del irradiador en el rango de 6 a 8  $\mu\text{Sv/h}$ .

Como se puede observar en la Figura 3.11 la zona central del techo es en la que se presentan las mayores tasas de dosis siendo estas 7,48 y 6,39  $\mu\text{Sv/h}$ , debido a que en esta ubicación en la cámara de irradiación se encuentra la fuente de Cobalto – 60.

A medida que los puntos sobre los que se realizaron las mediciones se alejan de la zona central la tasa de dosis se reduce hasta valores de 0,12  $\mu\text{Sv/h}$  en sus bordes.



**Figura 3.11.** Representación gráfica del mapa de dosis del techo del irradiador





Los resultados expuestos en las Tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 corresponden a los mapas de dosis ambiental para cada punto externo por 3 repeticiones, de las paredes norte, sur, este y oeste respectivamente.

Los datos fueron obtenidos mediante el detector Polimaster. Además se calculó el valor medio de estos datos, este valor fue comparado con los generados por el modelo digital.

#### a. Pared Norte

Los valores de la tasa de dosis de los puntos externos a la pared norte del irradiador para cada repetición se presentan en la Tabla 3.3, el valor promedio de la tasa de dosis en todos los puntos no supera el límite de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ , al considerar la actividad de la fuente de 2 072,1 Ci.

**Tabla 3.3.** Mapa de dosis ambiental de la pared norte del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PNEX1	0,12	0,11	0,11	0,11
PNEX2	0,12	0,13	0,11	0,12
PNEX3	0,12	0,11	0,11	0,11
PNEX4	0,11	0,1	0,1	0,10
PNEX5	0,1	0,1	0,09	0,10
PNEX6	0,13	0,14	0,13	0,13
PNEX7	0,12	0,13	0,11	0,12
PNEX8	0,12	0,12	0,11	0,12

### b. Pared Sur

Los puntos externos de la pared sur del irradiador tienen una tasa de dosis en promedio de 0,12  $\mu\text{Sv/h}$ , que corresponde a la lectura de fondo del detector y no se supera el valor de límite de tasa de dosis de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ .

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de la tasa de dosis para los puntos del mapa de dosis externo de la pared sur del irradiador.

**Tabla 3.4.** Mapa de dosis ambiental de la pared sur del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PSEX1	0,12	0,12	0,11	0,12
PSEX2	0,12	0,12	0,11	0,12
PSEX3	0,12	0,12	0,12	0,12
PSEX4	0,11	0,12	0,11	0,11
PSEX5	0,12	0,12	0,12	0,12
PSEX6	0,11	0,12	0,12	0,12
PSEX7	0,1	0,11	0,12	0,11
PSEX8	0,11	0,1	0,11	0,11

### c. Pared Este

En la pared este a diferencia de la pared norte y sur se presentan tasas de dosis superiores a los 0,12  $\mu\text{Sv/h}$  en los puntos PEEX4, PEEX5 y PEEX6, esto se debe a que estos puntos coincidieron con la ubicación de puntos de fuga en la pared este del irradiador.

La Tabla 3.5 presenta los valores de la tasa de dosis de los puntos externos de la pared este del irradiador para cada repetición.

**Tabla 3.5.** Mapa de dosis ambiental de la pared este del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PEEX1	0,13	0,13	0,12	0,13
PEEX2	0,13	0,12	0,11	0,12
PEEX3	0,13	0,12	0,11	0,12
PEEX4	0,24	0,25	0,23	0,24
PEEX5	0,26	0,26	0,24	0,25
PEEX6	0,19	0,16	0,18	0,18
PEEX7	0,13	0,14	0,12	0,13
PEEX8	0,13	0,15	0,14	0,14

**d. Pared Oeste**

En el mapa de dosis de la pared oeste que se muestra en la Tabla 3.6 se puede notar que los puntos POEX4, POEX5 y POEX6 tienen valores superiores 0,12  $\mu\text{Sv/h}$ , al igual que en la pared este, los puntos antes mencionados coincidieron con puntos de fuga ubicados en la pared del irradiador.

**Tabla 3.6.** Mapa de dosis ambiental de la pared oeste del irradiador

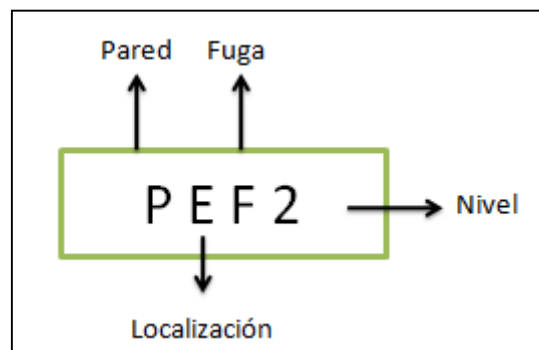
PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
POEX1	0,1	0,1	0,09	0,10
POEX2	0,12	0,11	0,11	0,11
POEX3	0,12	0,11	0,11	0,11
POEX4	0,19	0,21	0,18	0,19
POEX5	0,2	0,22	0,19	0,20
POEX6	0,18	0,19	0,17	0,18
POEX7	0,1	0,1	0,1	0,10
POEX8	0,1	0,11	0,1	0,10

### 3.1.2.3 Identificación de los puntos de fuga para la condición actual del irradiador

Para la identificar a los puntos de fuga presentes en el blindaje del irradiador se consideró los puntos del mallado con tasas de dosis superiores a la lectura de fondo del dosímetro la cual fue de  $0,12 \mu\text{Sv/h}$ .

Además se consideraron a los puntos de fuga identificados por personal técnico del Laboratorio de Tecnologías de las Radiaciones reportados en el documento LTR-PPR-TDE01 "Registro de toma de datos dosimétricos en la fuente de Cobalto – 60" que se encuentra en el Anexo III.

Para identificar a cada punto se utilizó el código que se muestra en la Figura 3.14 donde la primera letra (P) corresponde a pared la segunda letra (E) hace referencia a la localización de la pared: este (E), norte (N), sur (S), oeste (O), la tercera letra (F) corresponde a fuga y 2 es el número que identifica al punto de fuga.



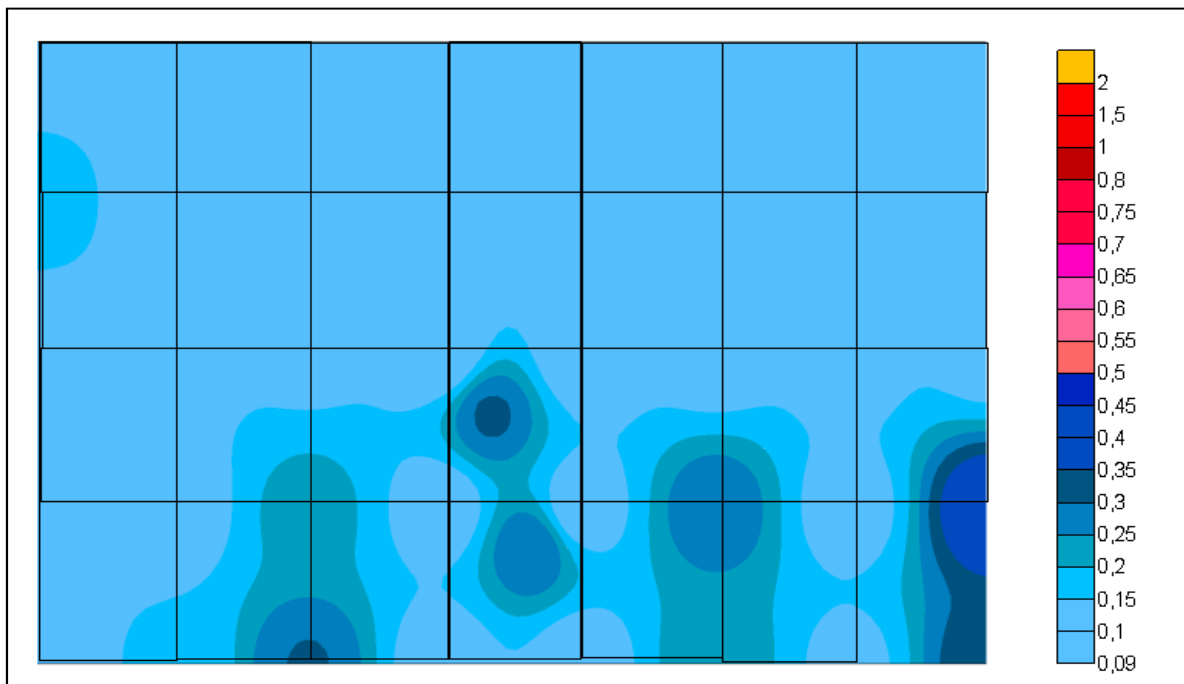
**Figura 3.14.** Código utilizado para identificar a los puntos de fuga del irradiador

Los puntos de fuga encontrados en las paredes del irradiador se muestran en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18, en las Tablas 3.7, 3.8, 3.9, y 3.10, se indica el valor de la tasa de dosis para cada punto.

### a. Pared Norte

En la Figura 3.15 se muestra la representación gráfica de los puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador, el rango de dosis de las fugas es de  $0,14 \mu\text{Sv/h}$  y  $0,41 \mu\text{Sv/h}$ . Estos puntos se encuentran ubicados en la parte inferior de la pared norte, el punto con mayor tasa de dosis se ubica en la parte lateral derecha de la pared y la tasa de dosis en este punto es de  $0,41 \mu\text{Sv/h}$  y se deben a que la estructura de la pared de hormigón no tienen una densidad homogénea.

Como se puede observar en la Figura 3.15 la tasa de dosis a medida que se aleja del punto de fuga se acerca al valor de lectura de fondo del detector, es así que en el nivel superior de la pared la tasa de dosis en la pared es de  $0,12 \mu\text{Sv/h}$  en promedio.



**Figura 3.15.** Puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador

En la Tabla 3.7 se indican los valores de los puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador donde se muestra el código de identificación del punto, el valor de la tasa de dosis para cada repetición y el valor promedio de la tasa de dosis en cada punto.

**Tabla 3.7.** Puntos de fuga identificados en la pared norte del irradiador

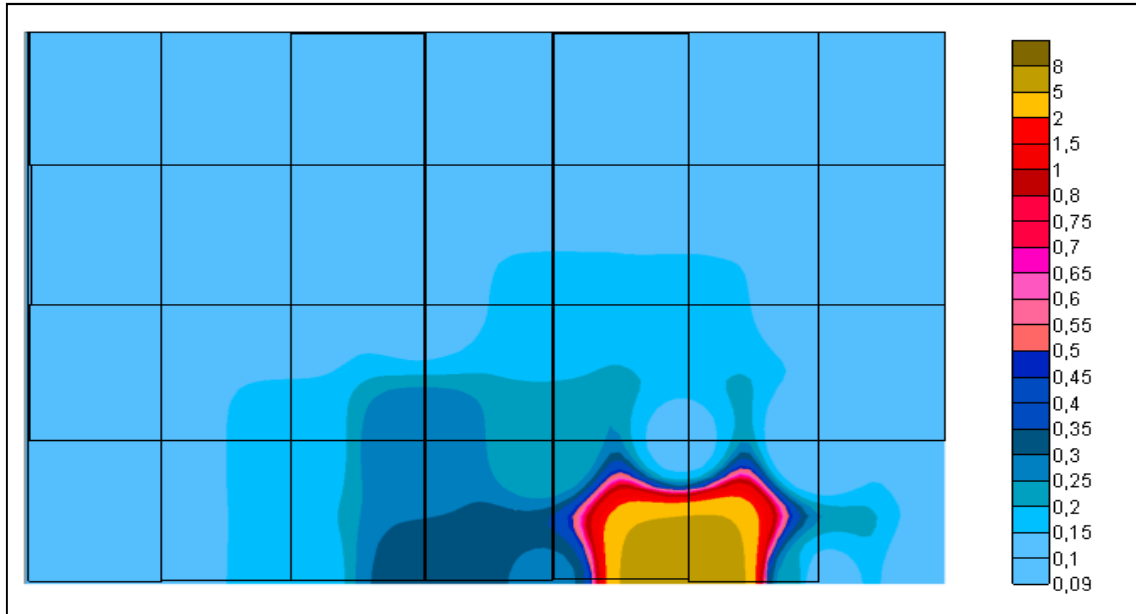
PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PNF1	0,3	0,31	0,29	0,30
PNF2	0,33	0,29	0,31	0,31
PNF3	0,32	0,27	0,32	0,30
PNF4	0,23	0,24	0,23	0,23
PNF5	0,32	0,35	0,32	0,33
PNF6	0,22	0,23	0,22	0,22
PNF7	0,31	0,26	0,31	0,29
PNF8	0,42	0,39	0,42	0,41
PNF9	0,17	0,15	0,17	0,16

#### b. Pared Sur

En la pared sur se identificaron puntos de fuga con una tasa de dosis de 7,77  $\mu\text{Sv/h}$  y 7,35 debidos a como ya se explicó en el acápite b de la sección 3.1.2.1 son debidos al espacio de aire que existe entre la puerta del irradiador y el piso su ubicación se puede observar en la Figura 3.16.

Los demás puntos de fuga se deben a que la compactación del hormigón no fue realizada adecuadamente y existen puntos donde la densidad del hormigón no es homogénea, debido a que existen burbujas de aire, estos puntos se encuentran en la zona inferior central de la pared hasta una altura de 1,5 m aproximadamente, zona que corresponde a la cámara de irradiación.

En el nivel superior de la pared la tasa de dosis es igual a la lectura de fondo del detector correspondiente al valor de 0,12  $\mu\text{Sv/h}$ .



**Figura 3.16.** Puntos de fuga identificados en la pared sur del irradiador

En la Tabla 3.8 se indican los valores de los puntos de fuga identificados en la pared sur donde se reportan los valores de la tasa de dosis para cada repetición y su valor promedio además del código de identificación para los puntos de fuga.

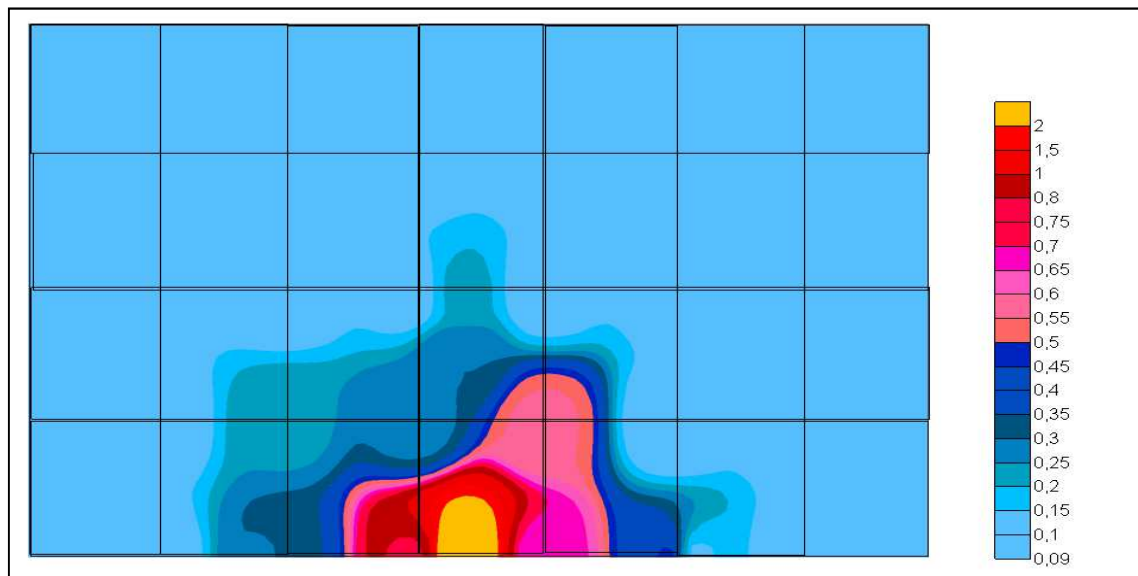
**Tabla 3.8.** Puntos de fuga identificados en la pared sur del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PSF1	7,2	8,61	7,5	7,77
PSF2	0,26	0,23	0,24	0,24
PSF3	0,15	0,18	0,17	0,17
PSF4	0,33	0,3	0,3	0,31
PSF5	0,3	0,29	0,28	0,29
PSF6	7,42	7,35	7,29	7,35
PSF7	0,18	0,17	0,16	0,17
PSF8	0,3	0,25	0,29	0,28
PSF9	0,2	0,21	0,22	0,21
PS10	0,15	0,15	0,16	0,15
PS11	0,16	0,15	0,15	0,15
PS12	0,15	0,14	0,15	0,15

### c. Pared Este

En la Figura 3.17 se muestra la ubicación y el valor de los puntos de fuga identificados en la pared este, los cuales se encuentran en la parte inferior central y se ubican hasta una altura de 2 m aproximadamente en la parte central de la pared.

El rango de tasa de dosis de los puntos de fuga es de 0,14  $\mu\text{Sv/h}$  a 2,87  $\mu\text{Sv/h}$ , el punto con la mayor tasa de dosis se encuentra ubicado al ras del piso en la parte central de la pared. Como ya se mencionó la presencia de estos puntos de fuga denota que la pared tiene una estructura de hormigón armado no homogénea



**Figura 3.17.** Puntos de fuga identificados en la pared este del irradiador

En la Tabla 3.9 se presentan los valores de los puntos de fuga identificados en la pared este, los valores de tasa de dosis para cada repetición y su valor promedio.



**Tabla 3.9.** Puntos de fuga identificados en la pared este del irradiador

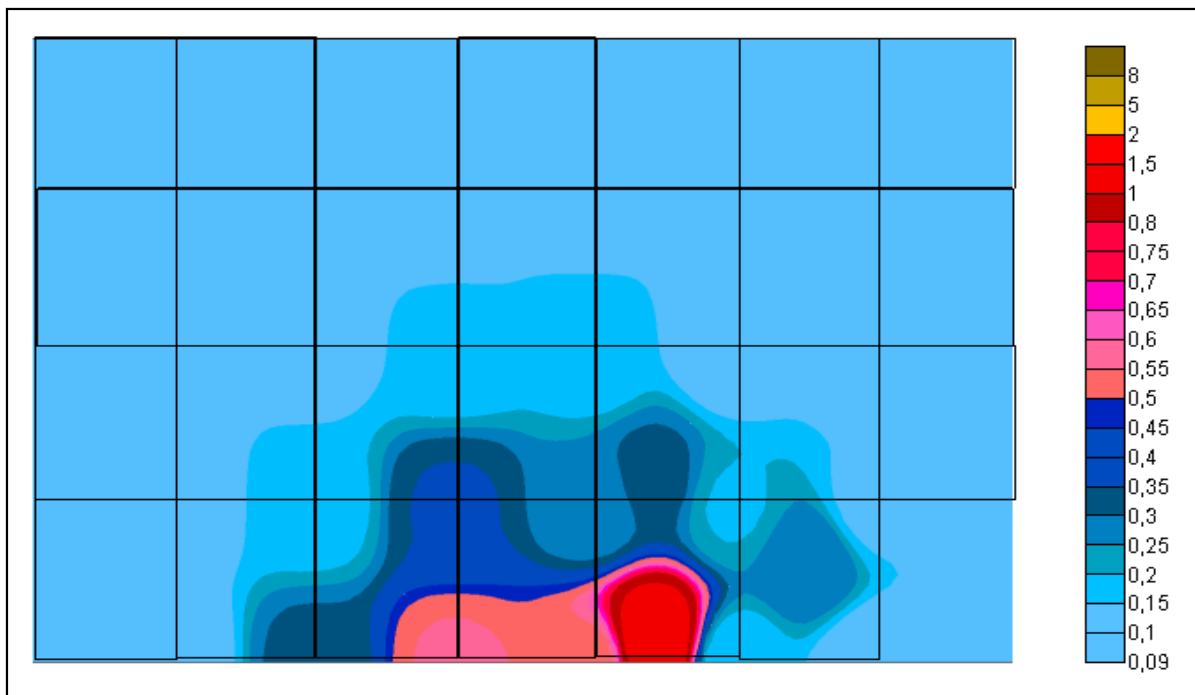
PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
PEF1	0,28	0,29	0,29	0,29
PEF2	2,81	2,9	2,91	2,87
PEF3	0,31	0,29	0,29	0,30
PEF4	0,2	0,22	0,21	0,21
PEF5	0,13	0,15	0,14	0,14
PEF6	0,35	0,34	0,36	0,35
PEF7	0,75	0,85	0,75	0,78
PEF8	0,65	0,73	0,61	0,66
PEF9	0,43	0,43	0,5	0,45
PEF10	0,25	0,25	0,22	0,24
PEF11	0,27	0,28	0,3	0,28
PEF12	0,5	0,57	0,6	0,56

#### d. Pared Oeste

Los puntos de fuga identificados en la pared oeste se encuentran distribuidos en la zona inferior central de la pared, el rango de tasa de dosis para estos puntos es de 0,15  $\mu\text{Sv/h}$  y 0,55  $\mu\text{Sv/h}$ , el valor con la mayor tasa de dosis se encuentra en la parte central inferior de la pared como se puede observar en la Figura 3.18. Esta zona corresponde a la cámara de irradiación

En los niveles superiores y extremos de la pared la tasa de dosis es similar a la lectura de fondo del detector.

Cabe señalar que la presencia de puntos de fuga en la pared se debe a que la estructura de hormigón no tiene una densidad homogénea.



**Figura 3.18.** Puntos de fuga identificados en la pared oeste del irradiator

En la Tabla 3.10 se indican los valores de los puntos de fuga identificados en la pared oeste del irradiator para cada repetición y su valor promedio.

**Tabla 3.10.** Puntos de fuga identificados en la pared oeste del irradiator

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	1	2	3	PROMEDIO
POF1	0,32	0,3	0,32	0,31
POF2	0,55	0,56	0,55	0,55
POF3	0,52	0,53	0,52	0,52
POF4	0,15	0,16	0,15	0,15
POF5	0,18	0,16	0,18	0,17
POF6	0,36	0,34	0,36	0,35
POF7	0,25	0,28	0,25	0,26
POF8	0,18	0,21	0,2	0,20
POF9	0,15	0,17	0,15	0,16
POF10	0,17	0,15	0,17	0,16
POF11	1,25	1,19	1,22	1,22
POF12	0,34	0,3	0,31	0,32
POF13	0,31	0,3	0,29	0,30

## **3.2 DISEÑO DEL MODELO DIGITAL DE LA GEOMETRÍA ACTUAL DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN**

En esta sección se muestra cómo se desarrolló el modelo digital  $M_0$  del blindaje de la cámara de irradiación, el cual sirvió como base para realizar las modificaciones necesarias con el fin de obtener un modelo cercano a la realidad.

### **3.2.1. DEFINICIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA**

Para el desarrollo del modelo digital  $M_0$ , primero se consideró el modelo digital obtenido por Gómez J. (2013) en lo referente a la definición de la fuente y al interior de la cámara de irradiación, definición de materiales, superficies y celdas información que se muestra en el Anexo IV.

Se añadió al modelo de Gómez J. (2013) la definición de las paredes del irradiador, todos los dispositivos colocados en las paredes del irradiador, así como a la ventana, la puerta, la piscina de almacenamiento de la fuente y el espacio de 1m fuera de las paredes del irradiador.

A continuación se detallan las tarjetas de datos obtenidas para el modelo  $M_0$ . El formato utilizado para describirlas es el utilizado para el ingreso de datos en el programa MCNP5. Los datos de entrada del modelo digital  $M_0$  se muestran el Anexo V.

#### **3.2.1.1 Tarjetas de materiales**

Los materiales seleccionados para el modelo  $M_0$  fueron los siguientes:

Hormigón ordinario NBS 03, fue el material seleccionado para las paredes, el techo y la puerta del irradiador, en la Tabla 3.11 se indica la composición química, el identificador ZAID para fotones y la fracción en peso. Dichos valores fueron utilizados para el desarrollo del modelo digital  $M_0$ . El número que se asignó a este material fue m228.

**Tabla 3.11.** Composición química, valor ZAID y fracción del hormigón NBS 03 (m228)

Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )		2,35
Elemento	Identificador ZAID para fotones	Fracción en peso
H	1 000	0,008485
C	6 000	0,050064
O	8 000	0,473483
Mg	12 000	0,024183
Al	13 000	0,036063
Si	14 000	0,145100
S	16 000	0,002970
K	19 000	0,001697
Ca	20 000	0,246924
Fe	26 000	0,011031

(Mc Conn *et al*, 2011)

El material utilizado para el espacio exterior de las paredes del irradiador fue aire seco a condiciones normales. En la Tabla 3.12 se muestra la composición química, el identificador ZAID para fotones y la fracción en peso. El número asignado para identificar a este material fue m204.

**Tabla 3.12.** Composición química, valor ZAID y fracción del airem204

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		0,001225	
Elemento	Identificador ZAID para fotones	Fracción en peso	
N	7 000	0,755636	
O	8 000	0,231475	
Ar	18 000	0,012889	

El material utilizado para definir a los dispositivos colocados sobre las paredes del irradiador fue el acero inoxidable AISI 316-L, la composición química, el identificador ZAID para fotones y la fracción en peso, se muestran en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13.** Composición química, valor ZAID y fracción del acero inoxidable AISI 316-L (m316)

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		8,00	
Elemento	Identificador ZAID para fotones	Fracción en peso	
C	6 000	0,000300	
Si	14 000	0,010000	
P	15 000	0,000450	
S	16 000	0,000300	
Cr	24 000	0,170000	
Mn	25 000	0,020000	
Fe	26 000	0,653950	
Ni	28 000	0,120000	
Mo	42 000	0,025000	

(Mc Conn *et al*, 2011)

El plomo fue el material utilizado para definir los discos que se encuentran dispuestos en las paredes del irradiador, así como para el bloque que protege al detector ubicado en la esquina noroccidental de la cámara de irradiación. La composición química, el identificador ZAID para fotones y la fracción en peso del plomo se muestran en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14.** Composición química, valor ZAID y fracción del plomo (m171)

<b>Elemento</b>	Pb
<b>Identificador ZAID para fotones</b>	82 000
<b>Fracción en peso</b>	1
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>) *</b>	11,35

(Lenntech BV, 2012)

En la definición del modelo digital M<sub>0</sub> se consideró a la piscina de almacenamiento de la fuente para ello se definió también como material el agua. Para el agua de la piscina la composición química, el identificador ZAID para fotones y la fracción en peso, se indican en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15.** Composición química, valor ZAID y fracción del Agua (m354)

<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>		0,998207
<b>Elemento</b>	<b>Identificador ZAID para fotones</b>	<b>Fracción en peso</b>
H	1 000	0,111894
O	8 000	0,888106

(Mc Connet *al*, 2011)

### 3.1.2.1 Tarjetas de superficies

Para la definición de las superficies se consideró la información obtenida en la sección 3.1.1 referente a la geometría del irradiador, longitud y altura, ubicación y geometría de los dispositivos dispuestos en las paredes, la puerta y la ventana. En el programa MCNP5 las superficies se definieron utilizando macro cuerpos como paralelepípedos rectangulares, cilindros paralelos al eje y cilindros rectos como se detalla en la Tabla 3.16.

**Tabla 3.16.** Descripción de las superficies utilizadas

Superficie	Cuerpo	Característica	Código MCNP	
			Número asignado	Descripción
Paredes del irradiador	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna de la cámara	998	RPP -200 200 -200 200 0 260
		Pared externa de la cámara	999	RPP -350 350 -350 350 -100 410 modificar para el piso de la cámara
Fuente de Cobalto-60	Cilindro Recto	Región activa del lápiz 1	1	RCC 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4025
		Encapsulado del lápiz 1	2	RCC 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.32
		Capa de óxido del lápiz 1	3	RCC 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4525
Agua bajo la cámara de irradiación	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna cámara de agua	303	RPP -200 60 -61 61 -455 -0.5
Puerta	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna de la puerta	401	RPP 66 188 -350 -200 0 200
Ventana	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna de la ventana	402	RPP -65 65 200 140 0 120

**Tabla 3.16.** Descripción de las superficies utilizadas (continuación...)

Superficie	Cuerpo	Característica	Código MCNP	
			Número asignado	Descripción
Piscina	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna de la piscina	995	RPP -850 -350 -134 134 -455 -0.5
Espacio de aire fuera del irradiador	Paralelepípedo Rectangular	Pared externa del espacio de aire	997	RPP -1150 700 -650 650 -455 700
Disco de plomo Pared sur	Cilindro paralelo al eje	Pared interna del cilindro	403	c/y -219 13 50
		Pared externa del cilindro	404	c/y -269 13 50
Cofre Alilog Pared norte	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	405	RPP -241 -198 370 350 120 172
		Pared externa del dispositivo	406	RPP -241.5 -198.5 370.5 350.5 120.5 172.5
Cofre de seguridad pared norte	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	407	RPP -121.5 -78.5 360 350 35.5 76
Cofre de operación pared norte	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	408	RPP 99.5 77.5 360 350 35.5 66
Caja de tomacorrientes Pared norte	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	409	RPP -203 -163 365 350 40 55
Cofre de operación puerta	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	410	RPP 304 259 -350 -365 116 177



**Tabla 3.16.** Descripción de las superficies utilizadas (continuación...)

Superficie	Cuerpo	Característica	Código MCNP	
			Número asignado	Descripción
Cofre de señalización I puerta sur	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	411	RPP -78 -68 -350-365 211 244
		Pared externa del dispositivo	412	RPP -78.5 -68.5 -350.5-365.5 211.5 244.5
Cofre de señalización II puerta sur	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	413	RPP -33 -13 -350-365 211 244
		Pared externa del dispositivo	414	RPP -33.5 -13.5 -350.5-365.5 211.5 244.5
Cofre I pared oeste	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	415	RPP -353 -320 -350-365 122 178
		Pared externa del dispositivo	416	RPP -353.5 -320.5 -350.5-365.5 122.5 178.5
Detector pared oeste	Paralelepípedo Rectangular	Pared interna del dispositivo	417	RPP -19.5 -320.5 -350.5-365.5 122.5 178.5
		Pared externa del dispositivo	418	RPP -353.5 -320.5 -350.5-365.5 122.5 178.5

### 3.2.1.3 Tarjetas de celdas

Para la definición de las celdas que se utilizaron en el modelo digital  $M_0$  se utilizó las superficies definidas en la sección 3.2.1.2, con su número de identificación, al igual que los materiales definidos en la sección 3.2.1.1. con su respectiva densidad. Las celdas utilizadas para el desarrollo del modelo se indican en la Tabla 3.17.

Para cada celda se definió su importancia, para el modelo  $M_0$  se colocó 1 a las celdas que intervienen en la simulación, y 0 a las celdas que no intervienen.

**Tabla 3.17.** Tarjeta de celdas definidas para el modelo digital  $M_0$

Cuerpo	Código MCNP	
	Número de celda	Descripción
Encapsulado lápiz 1	1	316 -8.00 -1 2 imp:p=1
Región activa lápiz 1	2	204 - 0.001225 -2 imp:p=1
Óxido lápiz 1	51	100 -4.9 1 -51 imp:p=1
Bloque de plomo	304	171 -11.35 -304 imp:p=1
Agua bajo la cámara de irradiación	303	354 -0.998207 -303 imp:p=1
Interior de la cámara de irradiación	996	204 -0.001225 103 -998 #1 #2 # superficies de los lápices de la fuente imp:p=1
Piscina	105	354 -0.998207 -995 imp:p=1
Paredes del irradiador	997	228 -2.35 -999 996 # 402 #403
Espacio de aire fuera del irradiador	998	204 -0.001225 999-997 imp:p=1
Resto de la simulación (vacío)	999	0 997 imp:p=0
Puerta	401	228 -2.35 -401 imp:p=1
Ventana	402	171 -11.45 -402 imp:p=1
Dispositivos	404,405,406,407 408,409,410,411,412,413, 414,415,416,417,418	316 -8 -celda de cada dispositivo imp:p=1

#### **3.2.1.4 Definición de la fuente**

Para la definición de la fuente se consideró la fuente obtenida por Gómez J. en su modelo 5 ( $M_5$ ) información que se muestra en el Anexo I.

#### **3.2.1.5 Tarjetas de cuantificadores de datos y número de historia de partículas**

Para obtener el valor de la tasa de dosis al contacto y a un metro de distancia de las paredes externas del irradiador se utilizó tarjetas de cuantificación de datos F5, la descripción detallada de la definición de estas tarjetas se encuentra en la sección 2.2.1.3. En el anexo V se muestra el código utilizado para definir a los detectores utilizados en el modelo  $M_0$  para los puntos al contacto y a 1 m de distancia de las paredes del irradiador.

El número de historias de partículas utilizadas para el modelo  $M_0$  fue de 1 000 000.

### **3.2.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE SALIDA**

Los valores de la tasa de dosis obtenidos por el programa fueron transformados a las unidades de  $\mu\text{Sv/h}$  como se indicó en la sección 2.2.2. donde se consideró la actividad de 2 072,1 Ci. Para el modelo  $M_0$  todos los detectores tienen un contaje igual a cero, como resultado de que al ser el hormigón un material absorbente para fotones, las partículas que el programa MCNP5 transporta a través de él, no llegan a atravesar todo el espesor y por lo tanto no alcanzan las zonas donde se encuentran los detectores de manera que se requiere de un mayor número de partículas para conseguir una cantidad apreciable de estas en los detectores y con ello el incremento del tiempo en la simulación.

Las características más importantes del modelo digital  $M_0$ , se detallan en la Tabla 3.18.

**Tabla 3.18.** Resumen de la definición del modelo digital  $M_0$ 

Componentes		Detalles
Paredes de la cámara de irradiación	Material	Hormigón
	Geometría	Paralelepípedos
	Características	Una sola capa
Detectores	Al contacto	Todos
	1 m de distancia	Todos
	Fugas	Todas
NPS		1 000 000
Número de simulaciones por modelo		1

### 3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO DIGITAL GENERADO CON EL PROGRAMA MCNP5

En este apartado se realizó la comparación de los datos obtenidos con el programa MCNP5 y los datos experimentales del mapa de tasa de dosis conseguidos de las mediciones realizadas con el detector POLIMASTER. Se realizaron los siguientes cambios al modelo digital  $M_0$  en las secciones se subdividieron las paredes en 5 segmentos iguales, se utilizó la técnica de reducción de varianza de la división de la geometría e importancias, se definió el espesor de un segmento de aire entre las paredes y en la ubicación de los puntos de fuga con el fin de que el error obtenido en la comparación de datos experimentales con los datos que se obtuvieron de la simulación no sea mayor al 15%, dichos cambios se explican a mayor detalle en las secciones 3.3.1,3.3.2,3.3.3 y 3.3.4.

Se partió de la comparación de los resultados obtenidos con el modelo digital  $M_0$ , que como se mencionó en la sección 3.2.2 no existía contaje en todos los detectores, de manera que se obtuvieron valores igual a cero para cada punto, por lo tanto, el error porcentual entre datos simulados y experimentales fue del 100%.

Debido a que el error porcentual es del 100% se concluye que, el modelo digital  $M_0$  no es válido para simular el modelo del blindaje de la cámara de irradiación, cabe notar que se partió de este modelo para realizar los cambios convenientes.

### **3.3.1 MODELO 1: VARIACIÓN DEL NÚMERO DE HISTORIAS DE PARTÍCULAS (NPS), MÉTODO ANÁLOGO DE RESOLUCIÓN**

En el modelo  $M_0$  se consideraron a 1 000 000 de historias para la simulación y a las paredes del irradiador como una sola capa. Las partículas de interés son las que alcanzan a pasar la capa de hormigón, por ello se requiere de un número mayor de historias para conseguir una cantidad apreciable y estas lleguen a los detectores tanto al contacto y a 1 m de distancia de las paredes del irradiador, lo que implica un mayor tiempo de simulación.

Para verificar el número de historias que llegan y atraviesan la celda correspondiente a la capa de hormigón de las paredes de la cámara de irradiación el programa MCNP5 en el archivo de salida (output), existe una sección llamada tabla 126 en la que se indica la población de historias para cada celda.

La Tabla 3.19 muestra la población de partículas NPS para las celdas correspondientes: al interior de la cámara de irradiación celda número 996, a las paredes y techo del irradiador celda número 997, puerta celda número 401, ventana celda número 402 y al espacio considerado fuera de las paredes del irradiador celda número 998 para distintos valores de NPS.

**Tabla 3.19.** Población de partículas que atraviesan las celdas en relación al NPS y tiempo de simulación

Celda / NPS	Modelo				
	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$M_{1,3}$	$M_{1,4}$	$M_{1,5}$
	1 000 000	10 000 000	100 000 000	1 000 000 000	10 000 000 000
996	999 860	10 000 714	100 007 771	1 000 062 568	10 000 062 568
997	882 359	8 825 560	88 222 820	882 273 511	88 226 478 145
401	887 256	8 832 140	88 232 589	882 245 789	88 226 448 132
402	889 856	8 832 181	88 232 574	882 225 896	88 226 589 098
998	0	0	2	14	24
Tiempo de simulación en horas	168	335,7	475,3	600	698,2

Como se puede observar en la Tabla 3.19 el número de partículas que alcanzan a atravesar la pared de hormigón aumenta de 0 a 24 al incrementar el NPS, pero no se alcanza un número considerable de partículas fuera de las paredes del irradiador para registrar lectura en los detectores, además al incrementar el NPS se incrementa el tiempo de simulación.

La Tabla 3.20 expone las características más importantes del modelo digital  $M_1$  y la comparación de este con el modelo  $M_0$ .

**Tabla 3.20.** Resumen de la definición del modelo digital  $M_1$  y comparación de las características del mismo con el modelo digital  $M_0$

Componentes		Detalles $M_1$	Detalles $M_0$
Paredes de la cámara de irradiación	Material	Hormigón	Hormigón
	Geometría	Paralelepípedos	Paralelepípedos
	Características	Una sola capa	Una sola capa
Detectores	Al contacto	Todos	Todos
	1 m de distancia	Todos	Todos

**Tabla 3.20.** Resumen de la definición del modelo digital  $M_1$  y comparación de las características del mismo con el modelo digital  $M_0$  (continuación...)

<b>Componentes</b>	<b>Detalles <math>M_1</math></b>		<b>Detalles <math>M_0</math></b>
<b>NPS</b>	$M_1$	1 000 000	1 000 0000
<b>Número de simulaciones por modelo</b>		1	1

Como se observa en la Tabla 3.20 se consideró al modelo  $M_1$  igual al modelo  $M_0$  ya que al variar el NPS en los cuantificadores al contacto y ambientales no se consigue contaje de partículas.

### **3.3.2 MODELO 2: DIVISIÓN DE LAS PAREDES DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN EN 5 SEGMENTOS IGUALES, MÉTODO NO ANÁLOGO DE RESOLUCIÓN**

Dado que los detectores no tuvieron contajes con la simulación análoga del modelo digital  $M_1$  y que los tiempos de simulación resultaron ser del rango de días, se recurrió a la técnica de reducción de varianza (TRV) de la división de geometría e importancias el cual es un método no análogo de resolución como se explica en el Anexo VI.

Para aplicar esta TRV se dividió las paredes, la puerta y la ventana en 5 divisiones (5 celdas) iguales, de 30 cm de espesor cada una y se les asignó las importancias a cada celda de modo que estas aumenten a medida que la población de partículas decae.

El criterio requerido para asignar importancias a las celdas es el de tratar de mantener en estas la población de historias constante y similar al número de historias que comienzan en la fuente celda número 996, con ello se consigue que una cantidad considerable de partículas alcancen el exterior del blindaje y por lo tanto exista contaje en los detectores (Shultis y Faw, 2011, p. 248).

La asignación de importancias es un proceso iterativo en el cual se inicia al colocar importancias con el valor de 1 a las celdas de interés, en los datos de salida entregados por el programa MCNP5 se muestra la población de historias que llegan a cada celda de la división y al realizar los cocientes entre poblaciones de celdas contiguas se obtiene el valor por el cual se debe multiplicar la importancia de la celda con menor población (Shultis y Faw, 2011, pp.250).

Para la definición de superficies y celdas de los 5 nuevos segmentos considerados en las paredes, la puerta y la ventana se procedió como en la sección 2.2.1. En la Tabla 3.21 se detallan las geometrías modificadas para el modelo  $M_2$ .

**Tabla 3.21.** Descripción de las geometrías utilizadas para caracterizar las geometrías modificadas del irradiador en el modelo digital  $M_2$

Cuerpo	Código MCNP		
	Tarjeta	Número	Descripción
Paredes	Celda 1	63	228 -2.35 -63 998 #301#302#303 imp:p=1
	Superficie 1		RPP -230 230 -230 230 -455 290
	Celda 2	64	228 -2.35 -64 63#301#302#303imp:p=1
	Superficie 2		RPP -260 260 -260 260 -455 320
	Celda 3	67	228 -2.35 -67 64 #301#302#303 imp:p=1
	Superficie 3		RPP -290 290 -290 290 -455 350
	Celda 4	68	228 -2.35 -68 67 #301#302#303 imp:p=1
	Superficie 4		RPP -320 320 -320 320 -455 380
	Celda 5	997	171 -11.35 -999 68 #301#302#303 imp:p=1
	Superficie 5		RPP -350 350 -350 350 -455 410

La Tabla 3.22 muestra la población de partículas en las celdas y el factor de importancia para cada una de ellas en las 3 iteraciones.

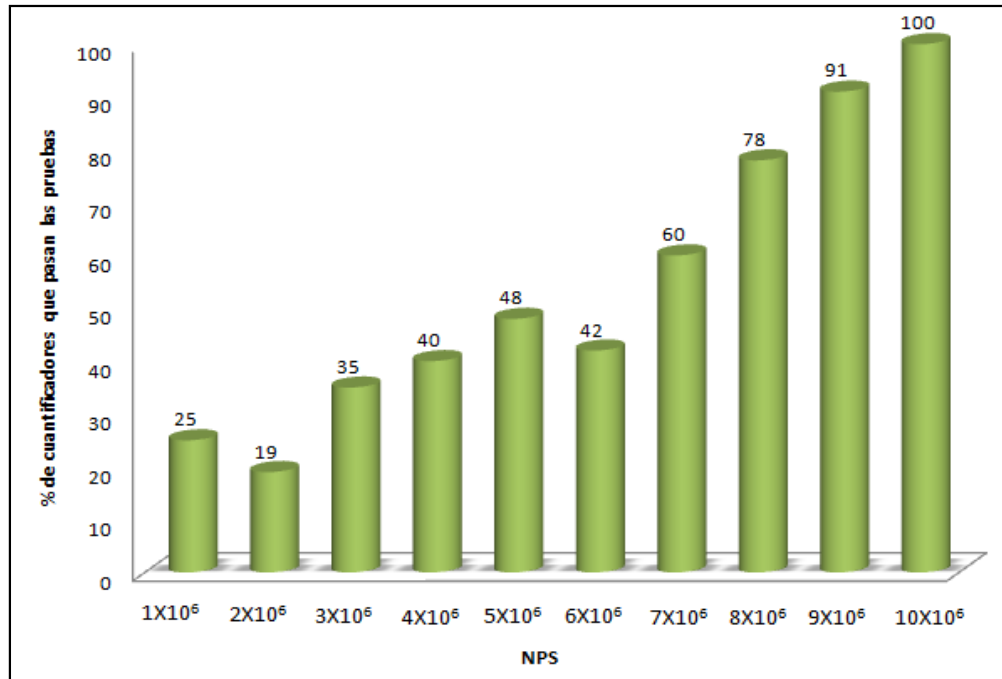


**Tabla 3.22.** Arreglo de importancias para la división de celdas

Celda	Población imp=1	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
		imp	población	imp	población	Imp	población
<b>996</b>	999 965	<b>1</b>	999 905	<b>1</b>	999 892	<b>1</b>	999 895
<b>63</b>	879 168	<b>1</b>	889 822	<b>1</b>	889 249	<b>1</b>	889 650
<b>64</b>	39 601	<b>25</b>	1 072 192	<b>16</b>	687 682	<b>20</b>	854 114
<b>67</b>	1 069	<b>936</b>	1 092 761	<b>599</b>	702 365	<b>780</b>	913 894
<b>68</b>	17	<b>59 000</b>	1 550 980	<b>37 737</b>	1 009 270	<b>48 000</b>	1 014 808
<b>997</b>	0	<b>1 888 000</b>	1 065 065	<b>1 207 584</b>	712 884	<b>1 572 480</b>	86 916
<b>401</b>	878 541	<b>1</b>	889 632	<b>1</b>	889 145	<b>1</b>	889 745
<b>501</b>	38 965	<b>25</b>	1 072 589	<b>16</b>	687 569	<b>20</b>	849 632
<b>502</b>	1 102	<b>936</b>	1 092 874	<b>599</b>	703 258	<b>780</b>	914 852
<b>503</b>	14	<b>59 000</b>	1 551 478	<b>37 737</b>	1 008 956	<b>48000</b>	1 023 698
<b>504</b>	0	<b>1 888 000</b>	1 065 589	<b>1 207 584</b>	714 859	<b>1572480</b>	897 412
<b>402</b>	877 589	<b>1</b>	889 874	<b>1</b>	887 856	<b>1</b>	889 412
<b>505</b>	39 547	<b>25</b>	1 072 589	<b>16</b>	689 547	<b>20</b>	874 236
<b>506</b>	1 058	<b>936</b>	1 092 589	<b>599</b>	703 589	<b>780</b>	925 698
<b>507</b>	16	<b>59 000</b>	1 554 789	<b>37 737</b>	1 009 653	<b>48000</b>	1 008 954
<b>508</b>	0	<b>1 888 000</b>	1 068 956	<b>1 207 584</b>	714 852	<b>1572480</b>	885 236

Como se puede observar el mejor arreglo de importancias fue el arreglo obtenido en la iteración número 3, ya que se alcanza una población aproximadamente constante en las celdas de interés.

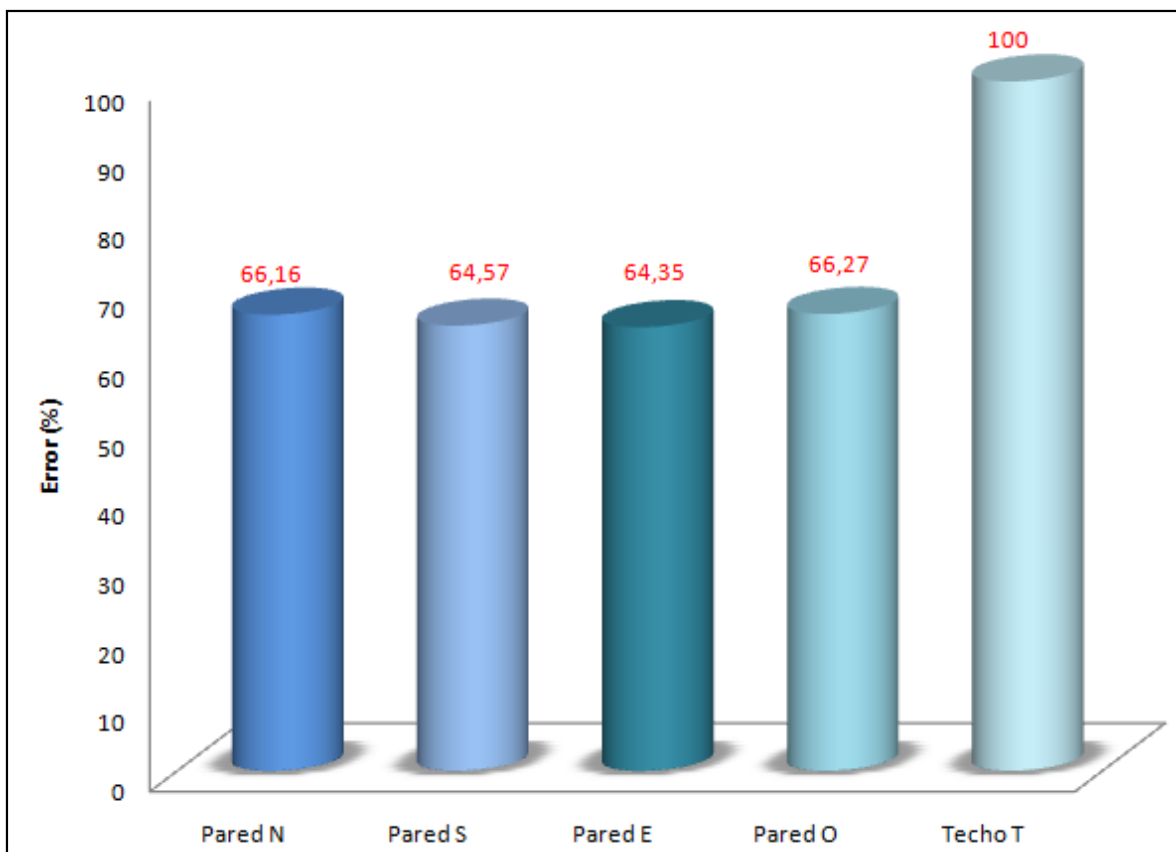
Se realizó la simulación del modelo  $M_2$ , al utilizar la TRV descrita, se consideró un NPS por defecto del programa de 1 000 000 de historias y se obtuvo como resultado que el 25 % de los cuantificadores pasaron las 10 pruebas estadísticas del programa MCNP5, para que el 100 % de los cuantificadores pasen las 10 pruebas estadísticas que realiza el MCNP5 se necesita un mayor número de historias. En la Figura 3.19 se indica el porcentaje de cuantificadores de datos Tallys que no pasaron las 10 pruebas estadísticas para cada valor del número de historias - NPS utilizado.



**Figura 3.19.** Gráfica que expone el porcentaje de número de cuantificadores de datos que pasaron las 10 pruebas estadísticas del programa MCNP5

Como se puede observar en la Figura 3.19, el número de historias requeridas para que todos los cuantificadores de datos pasen las 10 pruebas estadísticas fue de 10 000 000, con este resultado se aseguró que los resultados obtenidos en el modelo digital  $M_2$  fueron estadísticamente confiables.

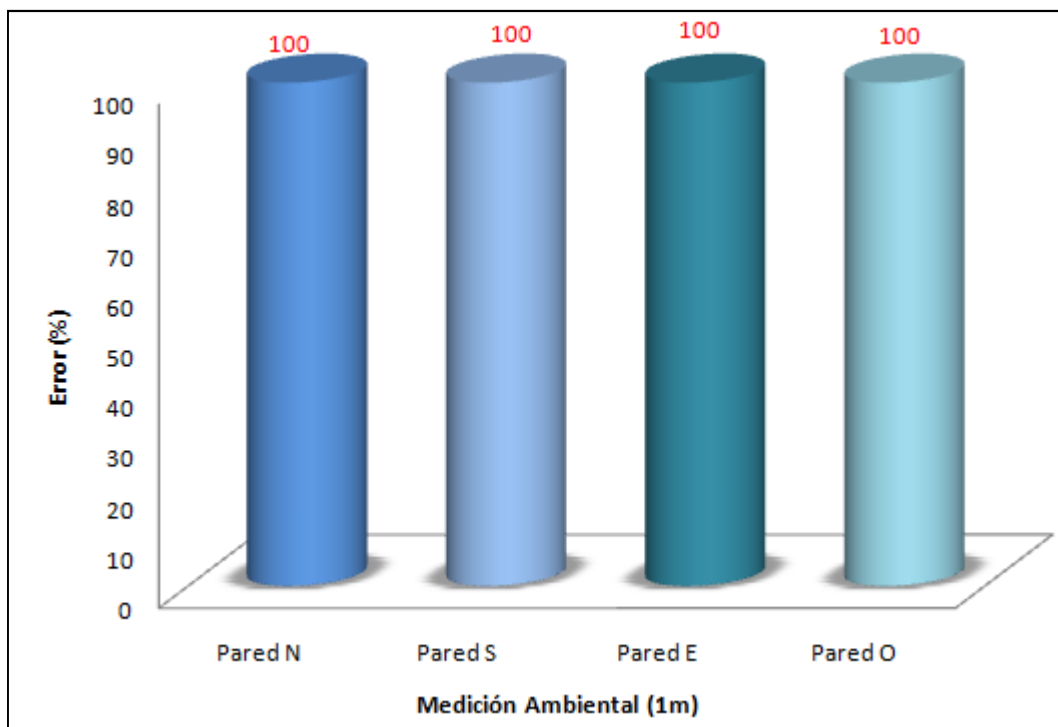
En la Figura 3.20 se exponen los valores de error obtenidos para cada pared del irradiador, el error se calculó al comparar los datos obtenidos de la simulación con los datos experimentales, se colocó con color rojo los valores que exceden el 15 %.



**Figura 3.20.** Ilustración que representa el porcentaje de error en el modelo digital  $M_2$  para la medición al contacto de la tasa de dosis

Como se observa en la Figura 3.20 las paredes presentan un porcentaje de error promedio de 65,4%, el techo presenta el mayor porcentaje de error, ya que en este se encuentran la mayor parte de los puntos de fuga del irradiador. El número de puntos con un error menor al 15 % fue cero.

La Figura 3.21 muestra el porcentaje de error para la medición ambiental en cada pared del irradiador, los porcentajes de error superiores al 15% se identificaron con color rojo.



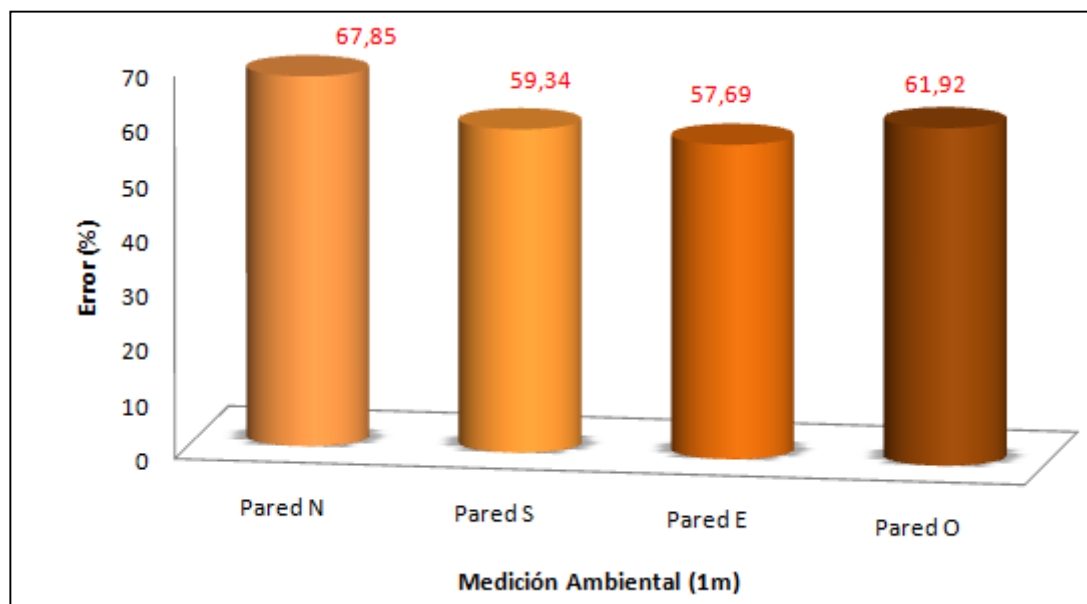
**Figura 3.21.** Ilustración que representa el porcentaje de error en el Modelo digital  $M_2$  para la medición ambiental de la tasa de dosis

Como se puede observar en la Figura 3.21, el porcentaje de error de los resultados obtenidos para la tasa de dosis de los puntos que se encuentran a 1 metro de distancia de las paredes externas del irradiador correspondientes a la tasa de dosis ambiental, es mayor que los registrados para los puntos ubicados en las paredes, cuando este debería ser cercano al error promedio de 65,4%, esto se debe a que el programa MCNP5 al realizar mediciones en 2 sitios alejados uno del otro durante la misma simulación provoca una alteración en los contajes, es por ello que se realizó desde este modelo ( $M_2$ ) en adelante las simulaciones por separado de la tasa de dosis al contacto y ambiental.

Los valores de la tasa de dosis al contacto y ambiental obtenidos para la tasa de dosis al contacto de las paredes del irradiador no varían con los obtenidos en la simulación en conjunto.

En la Figura 3.22 se puede observar el porcentaje de error obtenido para la tasa de dosis ambiental con la simulación por separado es decir al considerar para

esta simulación únicamente los detectores ambientales, el error promedio obtenido es 61,7%, no existen puntos con un error menor al 15%.



**Figura 3.22.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital  $M_2$  para la medición ambiental de la tasa de dosis simulada por separado

Se realizó además la simulación por separado de las paredes del irradiador es decir al colocar únicamente los cuantificadores en una pared a la vez, el tiempo que llevó realizar la simulación del modelo digital al considerar una sola pared fue de 59,3 horas a diferencia de la simulación del modelo digital al considerar todas las paredes, el cual fue cerca de 200 horas, se decidió realizar de aquí en adelante la simulación del modelo digital para cada pared por separado, ya que los datos obtenidos no variaron en relación a los obtenidos al simular todas las paredes

El error medio que se obtuvo con este modelo fue de 67,6 %, a excepción del techo del irradiador donde el porcentaje de error permanece igual al obtenido en el modelo  $M_0$ .

El porcentaje de error del modelo  $M_2$  determina que la TRV utilizada permite acercarse al modelo digital a la realidad, pero se deben considerar otros aspectos

como que la pared al ser de hormigón presenta espacios de aire porosidades en su estructura, aspecto que se tratará en el modelo siguiente.

En la Tabla 3.23 se muestran las características más importantes del modelo  $M_2$  y su comparación con el modelo  $M_1$ .

**Tabla 3.23.** Resumen de la definición del modelo digital  $M_2$

<b>Componentes</b>		<b>Detalles</b>
<b>Paredes de la cámara de irradiación</b>	<b>Material</b>	Hormigón
	<b>Geometría</b>	Paralelepípedos
	<b>Características</b>	División en 5 capas iguales
<b>Detectores</b>	<b>Al contacto</b>	Todos/ Simulación por separado para cada pared
	<b>1 m de distancia</b>	Todos/ Simulación por separado
<b>TRV</b>		División de geometría y Ruleta Rusa
<b>NPS</b>		10 000 000
<b>Número de simulaciones realizadas</b>		21
<b>Porcentaje de error del modelo</b>		67,6%

### **3.3.3 MODELO 3: REDEFINICIÓN DEL MATERIAL PARA LAS DIVISIONES DE LAS PAREDES DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN**

En el modelo  $M_2$  se consideraron a las paredes del irradiador como un solo cuerpo de hormigón sin considerar los espacios de aire que la estructura de hormigón presenta debido a una inadecuada compactación al momento del fraguado, espacios por los cuales los fotones pueden fugar y debido a estos espacios de aire en la estructura de las paredes la tasa de dosis en ciertos puntos es mayor que en otros, como se puede observar en los datos experimentales de la tasa de dosis mostrados en los Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18. Para el modelo  $M_2$  al considerar a las paredes del irradiador como un cuerpo homogéneo, se

obtuvieron valores de tasa de dosis al contacto de las paredes y ambiental semejantes.

Con el fin de acercar el modelo digital a la realidad, en el diseño del modelo M<sub>3</sub> se consideró la porosidad presente en el hormigón y se colocó un espacio de aire en la cuarta sección de la división de las paredes, para determinar el espesor de aire, se requiere determinar la resistencia a la compresión mecánica del hormigón del irradiador, ya que esta propiedad y la porosidad se relacionan de manera inversa (Olivares et al, 2008, p. 2).

Para determinar el espesor de aire en las paredes del irradiador se determinó inicialmente la resistencia a la compresión del hormigón de las paredes la cual se obtuvo de bibliografía el valor de 240 kgf/cm<sup>2</sup> (Olivares, Laffarga y Nadas, 2008, pp.7) correspondiente a la resistencia de muros de bodega. Existen hormigones con mayor resistencia a la compresión utilizados como blindajes para protección radiológica, pero como punto de partida se asume las peores condiciones.

Cabe notar que la resistencia a la compresión depende de la composición del hormigón, es decir de las proporciones de los materiales agua, cemento, granulometría de áridos entre otros, datos que para el irradiador no existían y fue por ello necesario recurrir a datos de bibliografía, además que este tipo de valores se obtienen de un ensayo destructivo de una muestra de hormigón lo cual en este caso no es posible de realizar.

Para el valor de resistencia a la compresión de 240 kgf/cm<sup>2</sup> la porosidad absoluta promedio obtenida de bibliografía es de 21%, la porosidad absoluta (P) es la relación entre el volumen de los huecos de un material y el volumen del mismo (Olivares et al, 2008, p. 8).

$$\frac{V_h}{V_p} * 100 = P\% \quad [3.1]$$

Para determinar el volumen de aire presente en las paredes del irradiador ( $V_h$ ) se calculó el volumen total del irradiador ( $V_T$ ) el cual fue de  $196 \text{ m}^3$  y el volumen de la cámara irradiación ( $V_c$ ) obteniéndose el valor de  $45,6 \text{ m}^3$ .

El volumen de las paredes ( $V_p$ ) resulta de la diferencia entre el volumen total del irradiador y el volumen de la cámara de irradiación dando como resultado  $154,4 \text{ m}^3$ , con este valor se determinó el volumen de la porosidad ( $V_h$ )  $32,42 \text{ m}^3$ , con el volumen total de las paredes como el resultado de la suma de los volúmenes de cada pared, se determinó el espesor de aire correspondiente a 24 cm.

La cuarta división de las paredes fue subdividida en 24 cm de aire y 6 cm de hormigón. Se realizó la simulación del modelo digital y los datos obtenidos presentaron un error superior de 300%, se rechazó esta suposición y se varió el porcentaje de porosidad absoluta con base en datos bibliográficos los cuales se muestran en la Tabla 3.24.

**Tabla 3.24.** Porosidad y características del hormigón ordinario

Porosidad	Característica del hormigón
4-6%	Hormigón compacto y de buena calidad
6% -15%	Hormigón permeable y no apto para ambientes agresivos
Superior al 15 %	Hormigones muy permeables e inadecuados para proteger la armadura a largo plazo

(Olivares et al., 2008, p. 11)

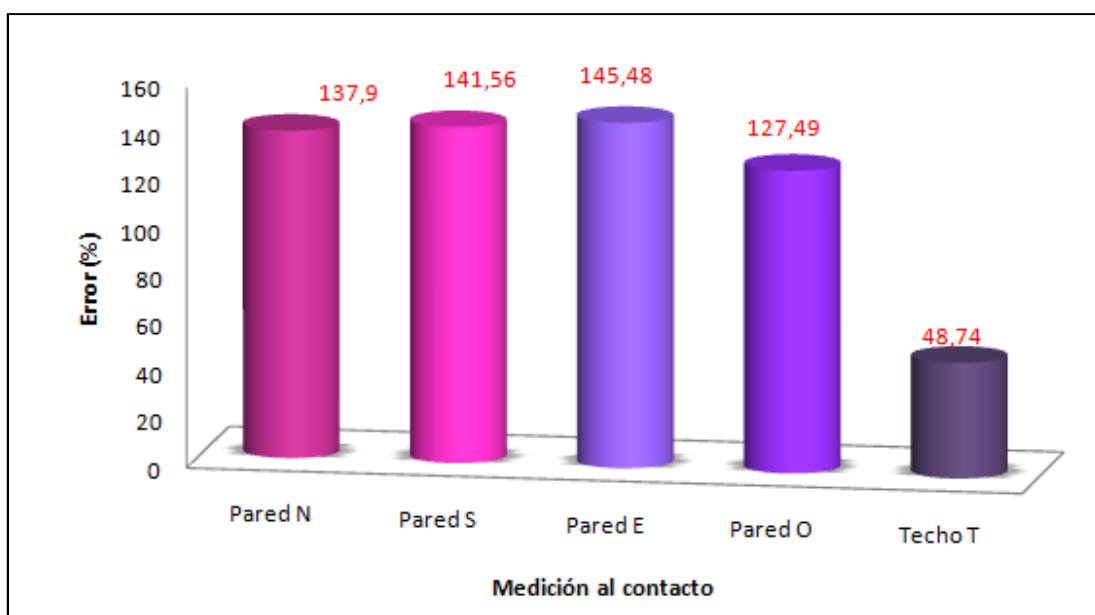
Con base en los porcentajes de porosidad mostrados en la Tabla 3.25 se calculó el espesor del espacio de aire que se ubicó en la cuarta capa de las paredes de hormigón. La definición de las celdas y superficies utilizadas para cada subdivisión se realizó como se indica en la sección 2.2.1



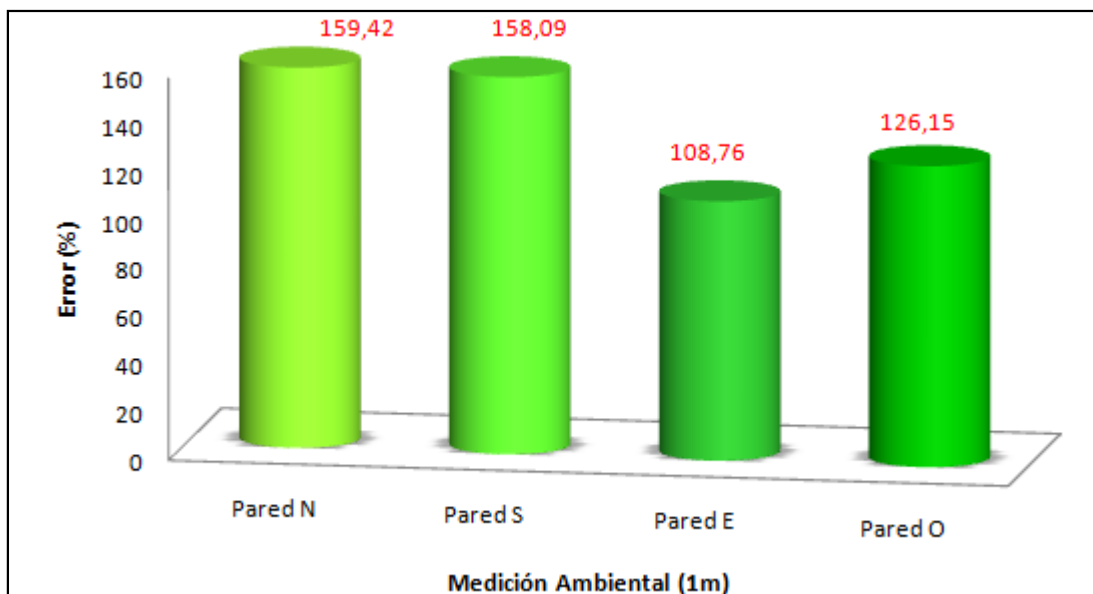
**Tabla 3.25.** Porosidad y características del hormigón ordinario

Modelo	Porcentaje de porosidad	Volumen de poros (m3)	Espesor de aire (cm)
M <sub>3</sub>	21%	32,42	24
M <sub>3.1</sub>	15%	23,16	17
M <sub>3.2</sub>	5%	7,72	6

Para el modelo M<sub>3.1</sub> el valor de error promedio entre los valores obtenidos de la simulación y los valores experimentales en cada pared tanto para la tasa de dosis al contacto y ambiental se muestra en las Figuras 3.23 y 3.24 respectivamente. Se ha colocado de color rojo los valores que exceden del 15%.



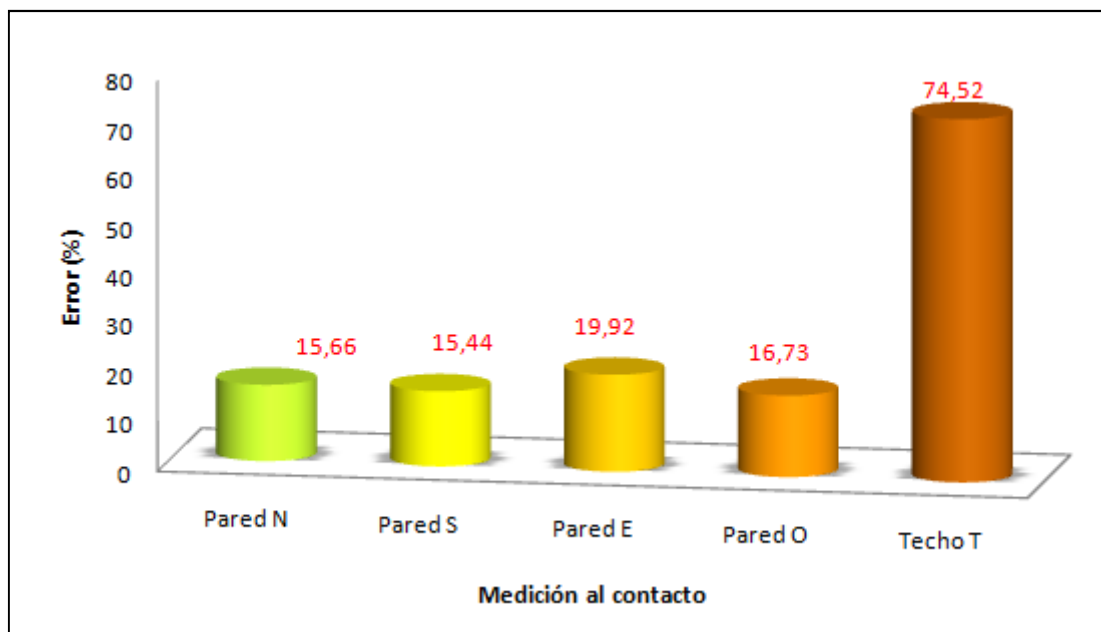
**Figura 3.23.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital M<sub>3.1</sub> para la medición al contacto en las paredes del irradiador



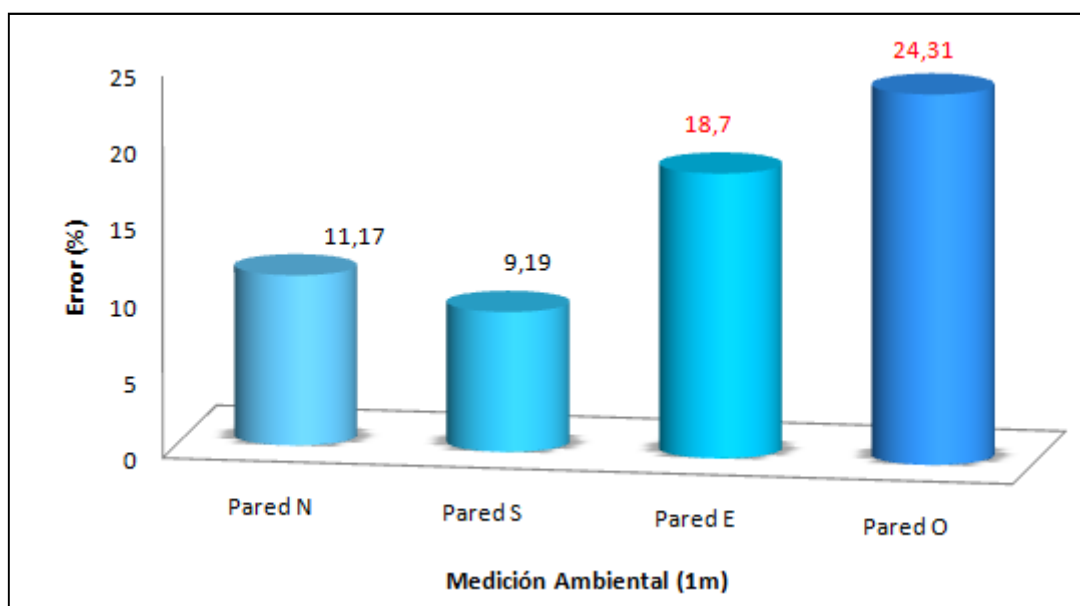
**Figura 3.24.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital  $M_{3.1}$  para la medición ambiental

El porcentaje de error promedio fue de 128,18 % el cuál es menor al obtenido en el modelo  $M_3$  (300%), el número de datos que tiene un error menor al 15 % es 19 de un total de 251 datos correspondiente a un 7,6 %, cabe notar que en el techo la tasa de dosis en los puntos del mallado son significativamente superiores a la tasa de dosis en las paredes del irradiador y es por ello que el porcentaje de error es menor en comparación con las demás paredes, ya que la tasa de dosis tanto al contacto y ambiental promedio es de  $0,32 \mu\text{Sv/h}$ .

En el modelo  $M_{3.2}$  el valor de error promedio entre los valores obtenidos de la simulación y los valores experimentales en cada pared tanto para la tasa de dosis al contacto y ambiental se muestra en las Figuras 3.25 y 3.26 respectivamente. Se ha colocado de color rojo los valores que exceden del 15%.



**Figura 3.25.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital  $M_{3,2}$  para la medición al contacto en las paredes del irradiador



**Figura 3.26.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital  $M_{3,2}$  para la medición ambiental

Con el modelo  $M_{3,2}$  el valor de error promedio fue de 22.85 %, el techo presenta el mayor porcentaje como ya se explicó antes debido a las fugas presentes, el promedio de tasa de dosis es de 0,13  $\mu\text{Sv/h}$ .

El porcentaje de datos que tienen un error menor al 15% es de 55,4%. El modelo  $M_{3,2}$  es el que mejor se ajusta a la realidad, los datos con error mayor al 15% corresponden a puntos de fuga identificados en el mapa experimental, para estos puntos se deberá colocar un espesor mayor de aire en la capa de la pared para que el porcentaje de error disminuya aspecto que se tratará en el modelo siguiente.

En la Tabla 3.26 se muestran las características más importantes del modelo  $M_{3,2}$

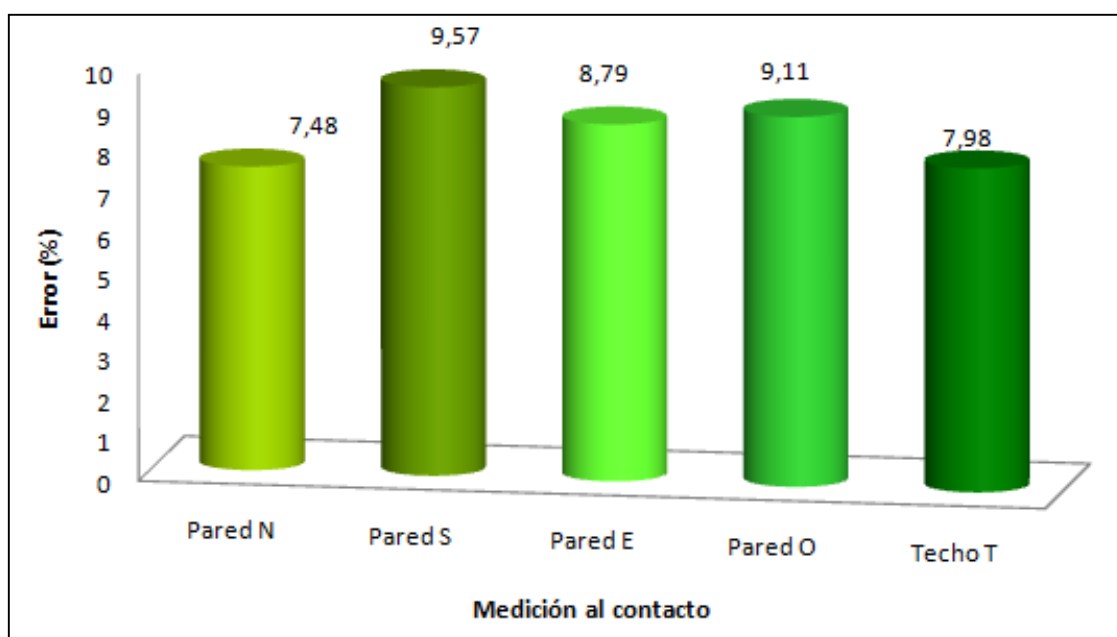
**Tabla 3.26.** Resumen de la definición del modelo digital  $M_{3,2}$

<b>Componentes</b>		<b>Detalles</b>
<b>Paredes de la cámara de irradiación</b>	<b>Material</b>	Hormigón
	<b>Geometría</b>	Paralelepípedos
	<b>Características</b>	División en 5 capas iguales, cuarta capa subdividida en 6 cm de aire y 24 cm de hormigón
<b>Detectores</b>	<b>Al contacto</b>	Todos/ Simulación por separado para cada pared
	<b>1 m de distancia</b>	Todos/ Simulación por separado
<b>TRV</b>		División de geometría y Ruleta Rusa
<b>NPS</b>		10 000 000
<b>Número de simulaciones realizadas</b>		3
<b>Porcentaje de error</b>		22,85%

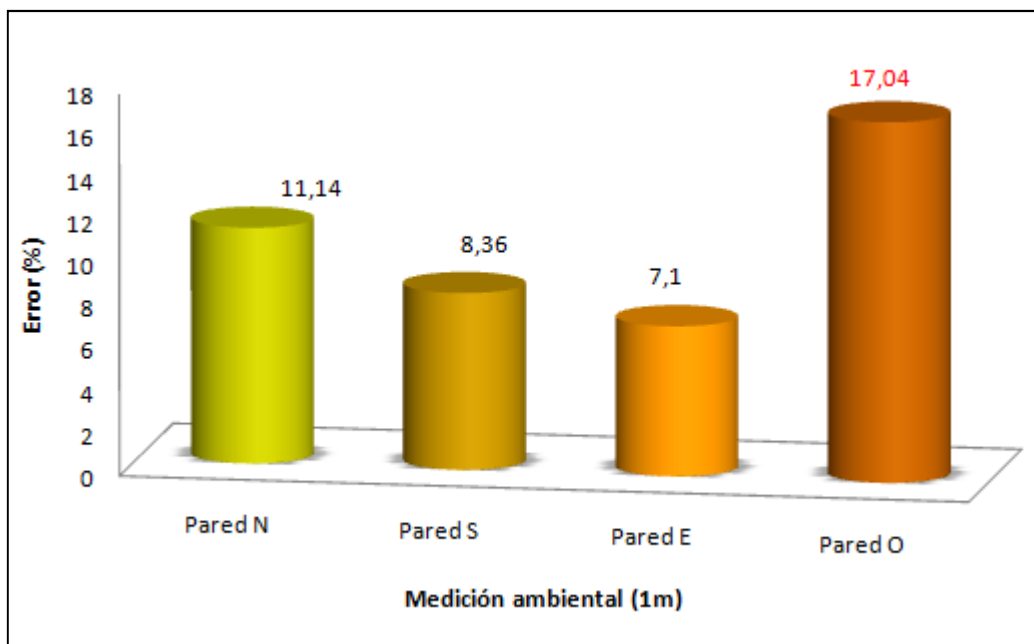
### 3.3.4 MODELO 4: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA

Con el fin de disminuir el error obtenido en el modelo  $M_{3.2}$  se colocó un espacio mayor de aire para los puntos de fuga donde el error fue superior al 15%. Este espacio de aire fue determinado mediante prueba y error ya que no existía un estudio de la resistencia a la compresión mecánica de la pared en los puntos de fuga.

El modelo realizado en este acápite, fue nombrado  $M_4$ , los resultados de la simulación del modelo con los cambios indicados se pueden observar en las Figuras 3.27 y 3.28. Se ha colocado de color rojo los valores que exceden del 15%.



**Figura 3.27.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital  $M_4$  para la medición al contacto en las paredes del radiador



**Figura 3.28.** Ilustración del porcentaje de error en el Modelo digital M<sub>4</sub> para la medición ambiental

El error medio que se obtuvo al comparar los datos obtenidos de la simulación con los experimentales fue de 9.62% y el 85.6% de los puntos cumplen con un porcentaje menor de error del 15%, el restante 14,4% de los datos tienen un error mayor al 15% debido a que en estos puntos con el modelo digital la tasa de dosis es sobre estimada, como ejemplo en el punto PO21 la tasa de dosis experimental fue de 0,10  $\mu\text{Sv/h}$  y la tasa de dosis obtenida en el modelo fue de 0,13  $\mu\text{Sv/h}$  por lo cual se obtiene un porcentaje de error del 24,4%, es por esta razón que los puntos de la dosimetría ambiental de la pared oeste supera el porcentaje del 15 % establecido.

Se concluye que el modelo M<sub>4</sub> es el que mejor se ajusta a la realidad y es el modelo digital a ser utilizado para la simulación de la recarga de la fuente a 100 000 Ci.

En la Tabla 3.27 se muestran las características más importantes del modelo M<sub>4</sub>

**Tabla 3.27.** Resumen de la definición del modelo digital M<sub>4</sub>

<b>Componentes</b>		<b>Detalles</b>
<b>Paredes de la cámara de irradiación</b>	<b>Material</b>	Hormigón
	<b>Geometría</b>	Paralelepípedos
	<b>Características</b>	División en 5 capas iguales, cuarta capa subdividida en 6 cm de aire y 24 cm de hormigón
	<b>Fugas</b>	Celdas con mayor espesor de aire, cuarta subdivisión
<b>Detectores</b>	<b>Al contacto</b>	Todos/ Simulación por separado para cada pared
	<b>1 m de distancia</b>	Todos/ Simulación por separado
<b>TRV</b>		División de geometría y Ruleta Rusa
<b>NPS</b>		10 000 000
<b>Número de simulaciones realizadas</b>		38
<b>Porcentaje de error</b>		9,62%

### **3.4 REDISEÑO DEL BLINDAJE DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN CONSIDERANDO UNA ACTIVIDAD DE 100 000 Ci**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del rediseño del blindaje de la cámara de irradiación considerando una actividad de 100 000 Ci

#### **3.4.1 INTRODUCCIÓN**

Como resultado de la validación del modelo digital del blindaje de la cámara de irradiación de la fuente de Cobalto – 60 se obtuvo el modelo digital (M<sub>4</sub>) cuyos datos simulados fueron comparados con datos experimentales, al considerar una actividad de 2 072,1 Ci y se obtuvo un error promedio menor a 15%, por lo tanto, se considero al modelo como válido para obtener un mapa de dosis del irradiador a una actividad de 100 000 Ci.

### **3.4.2. MAPA DE DOSIS DEL IRRADIADOR AL CONSIDERAR UNA ACTIVIDAD DE 100 000 Ci**

Para calcular la tasa de dosis para cada punto al contacto y a 1 metro de distancia de las paredes del irradiador se utilizó la ecuación 2.14 al considerar una actividad de 100 000 Ci.

#### **3.4.2.1 Mapa de dosis al contacto**

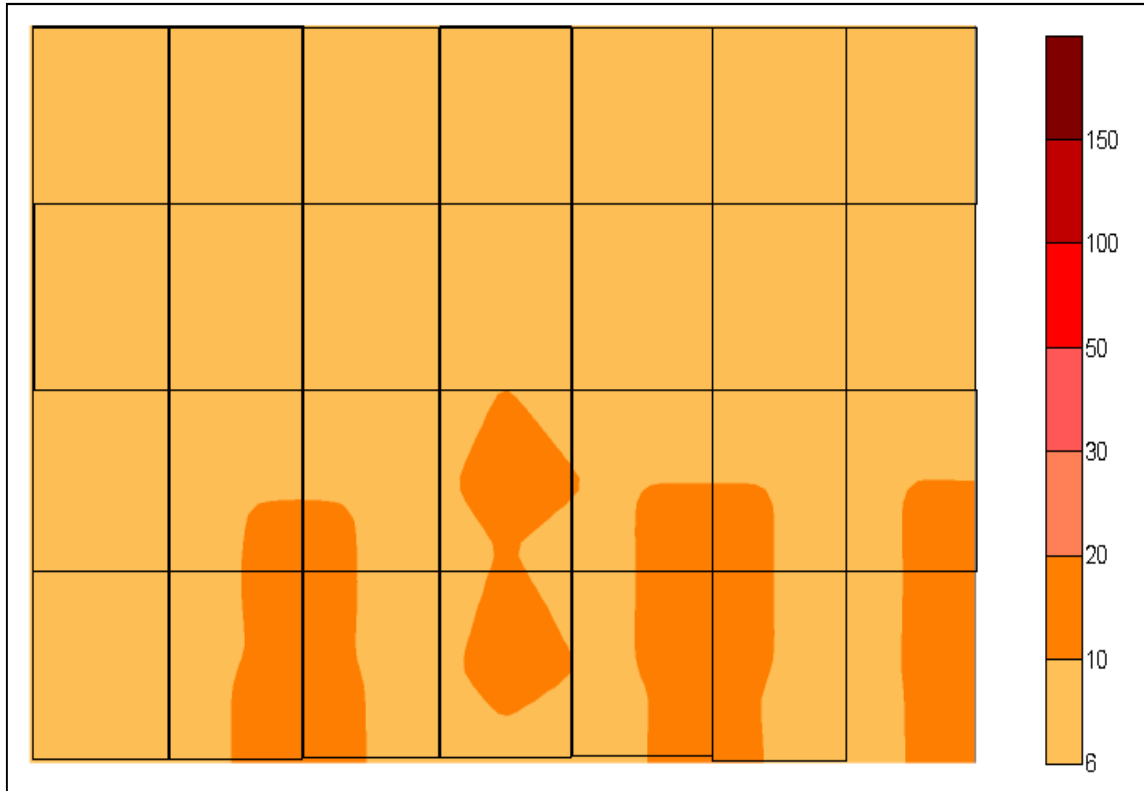
Las Figuras 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 corresponden al esquema del mapa de dosis para las paredes norte, sur, este, oeste y techo respectivamente al considerar una actividad de 100 000 Ci. Los valores de la tasa de dosis en cada punto del mallado para cada pared del irradiador se muestran en el Anexo VII.

##### **a. Pared norte**

En la Figura 3.29 se muestra la representación gráfica del mapa de dosis de la pared norte del irradiador al considerar una actividad de la fuente de 100 000 Ci.

Como se puede observar en la Figura 3.29 la mayor parte de los puntos del mallado en la pared tienen en promedio una tasa de dosis de 6  $\mu\text{Sv/h}$ , los puntos con una tasa de dosis superior a 6  $\mu\text{Sv/h}$  corresponden a los puntos identificados como puntos de fuga, el rango de la tasa de dosis para estos puntos es de 10 a 20  $\mu\text{Sv/h}$ , el punto con la mayor tasa de dosis se ubica en la parte inferior derecha de la pared a un metro de altura, la tasa de dosis en el punto mencionado es de 19,48  $\mu\text{Sv/h}$ .



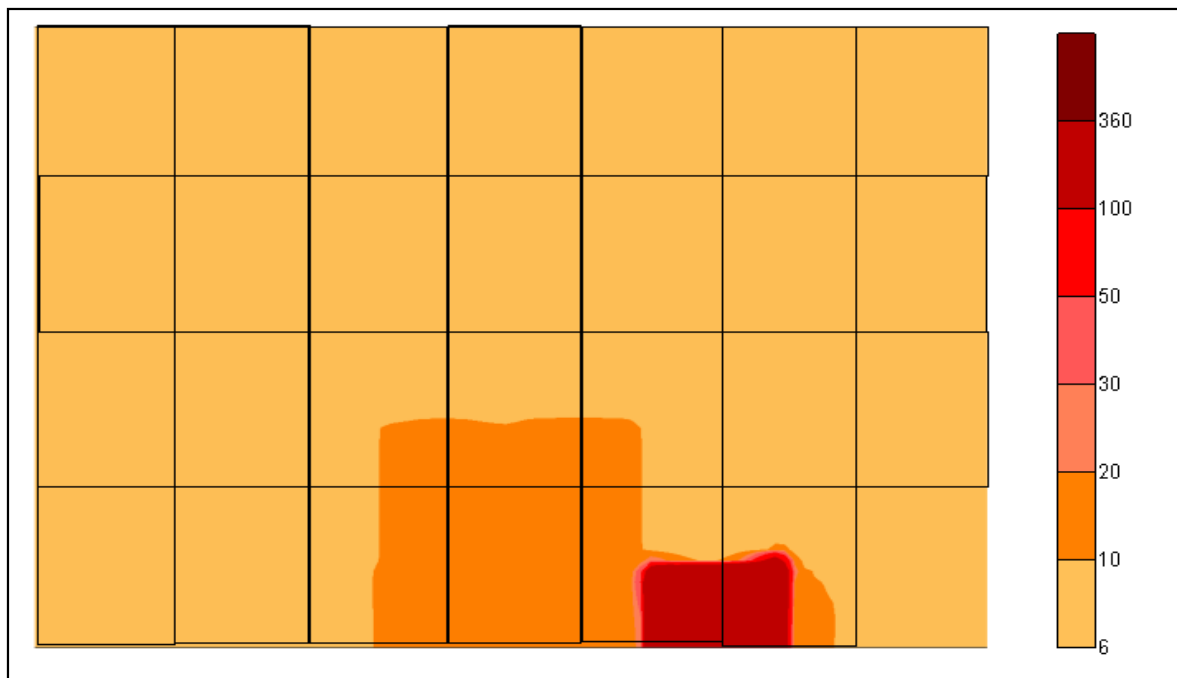


**Figura 3.29.** Mapa de dosis de la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

### b. Pared sur

En la zona central inferior de la pared sur se encuentran los puntos del mallado con un rango de tasa de dosis entre los 10 y 350  $\mu\text{Sv/h}$ , los puntos con la mayor tasa de dosis se encuentran en la parte inferior de la pared como se puede observar en la Figura 3.30 y coinciden con el espacio correspondiente a la puerta del irradiador.

Para los demás puntos del mallado en la pared sur la tasa de dosis es en promedio 6  $\mu\text{Sv/h}$ .



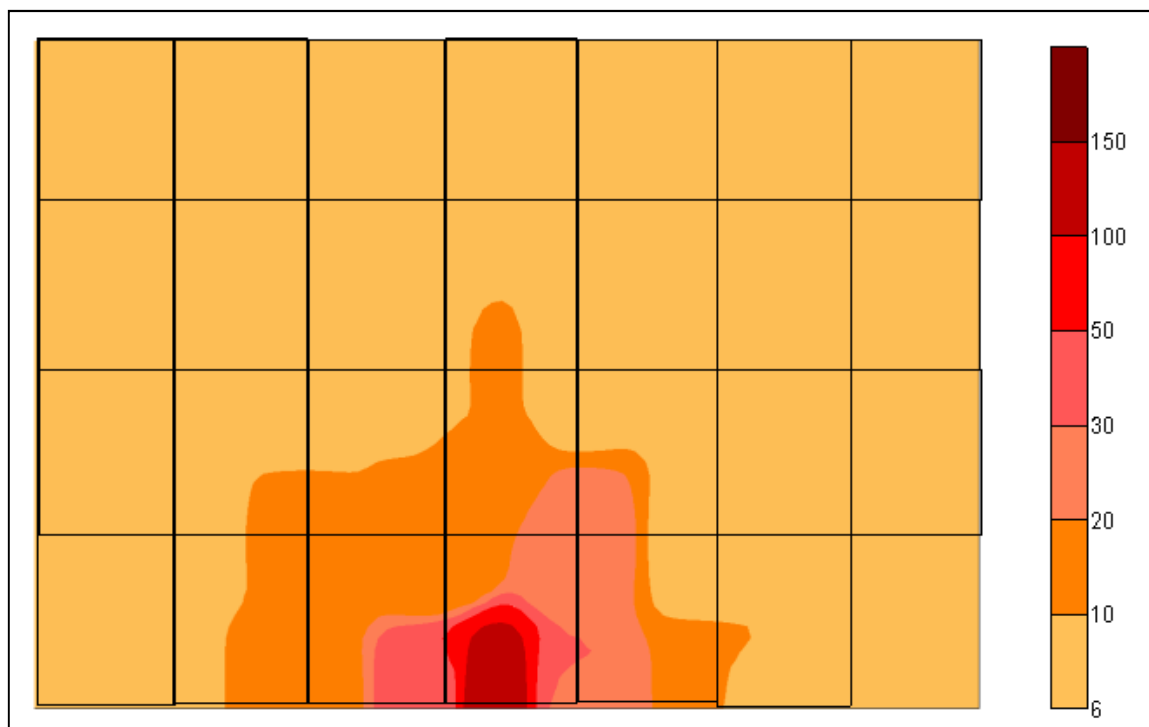
**Figura 3.30.** Mapa de dosis de la pared sur del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

### c. Pared este

En la Figura 3.31 se puede observar la representación gráfica del mapa de dosis de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci de la fuente

La zona central inferior de la pared es la zona donde se identificaron puntos de fuga y el rango de tasa de dosis para esta zona es de 10  $\mu\text{Sv/h}$  a 130  $\mu\text{Sv/h}$ , el punto con mayor tasa de dosis se ubica en la parte central de la pared y cercano al piso.

Para el resto de puntos en el mapa de dosis de la pared este del irradiador la tasa de dosis promedio es de 6  $\mu\text{Sv/h}$ .

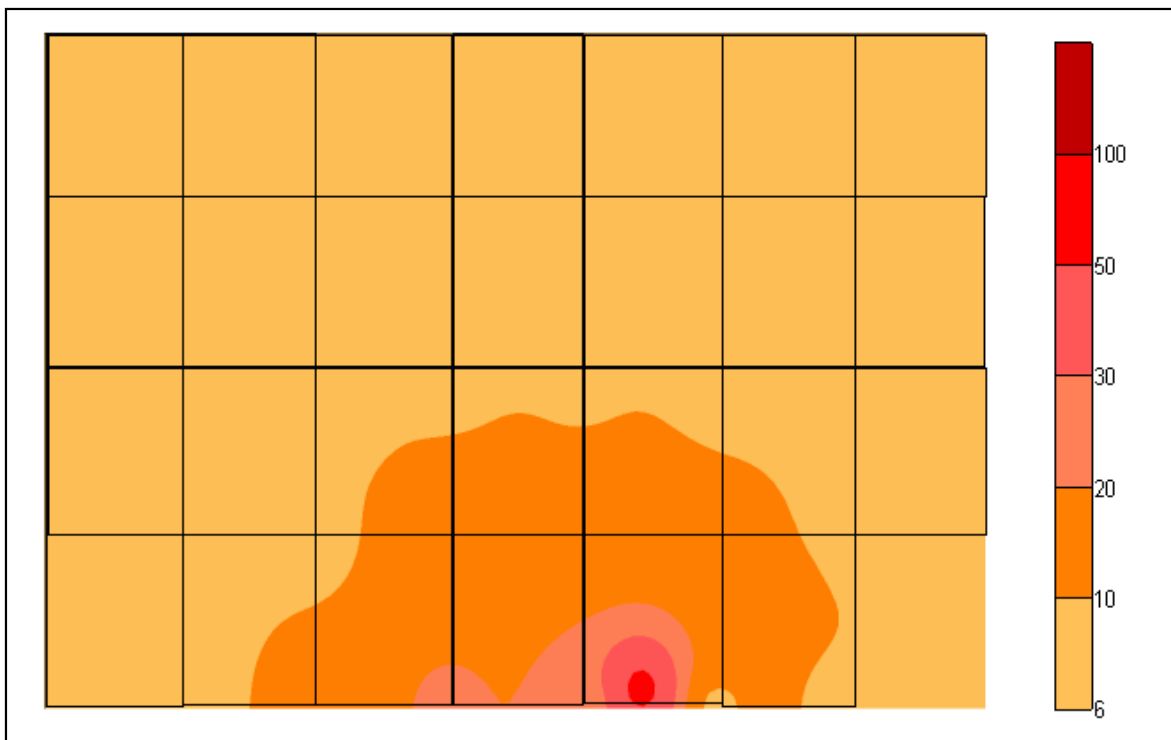


**Figura 3.31.** Mapa de dosis de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

#### d. Pared oeste

En la Figura 3.32 se muestra la representación gráfica del mapa de dosis de la pared oeste del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci.

La zona central inferior de la pared oeste es la zona en la que se identificaron puntos de fuga y es debido a ello que la tasa de dosis en dicha zona supera el promedio de tasa dosis de la pared ( $6 \mu\text{Sv/h}$ ). El rango de tasa de dosis para esta zona esta entre  $10$  y  $50 \mu\text{Sv/h}$ . El punto con la mayor tasa de dosis se encuentra en la parte inferior central de la pared.



**Figura 3.32.** Mapa de dosis de la pared oeste del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

La tendencia en las paredes del irradiador es que en la zona central inferior de la pared hasta una altura en promedio de 1,5 m se distribuyen los puntos de fuga y la ubicación de la zona coincide con la de la cámara de irradiación.

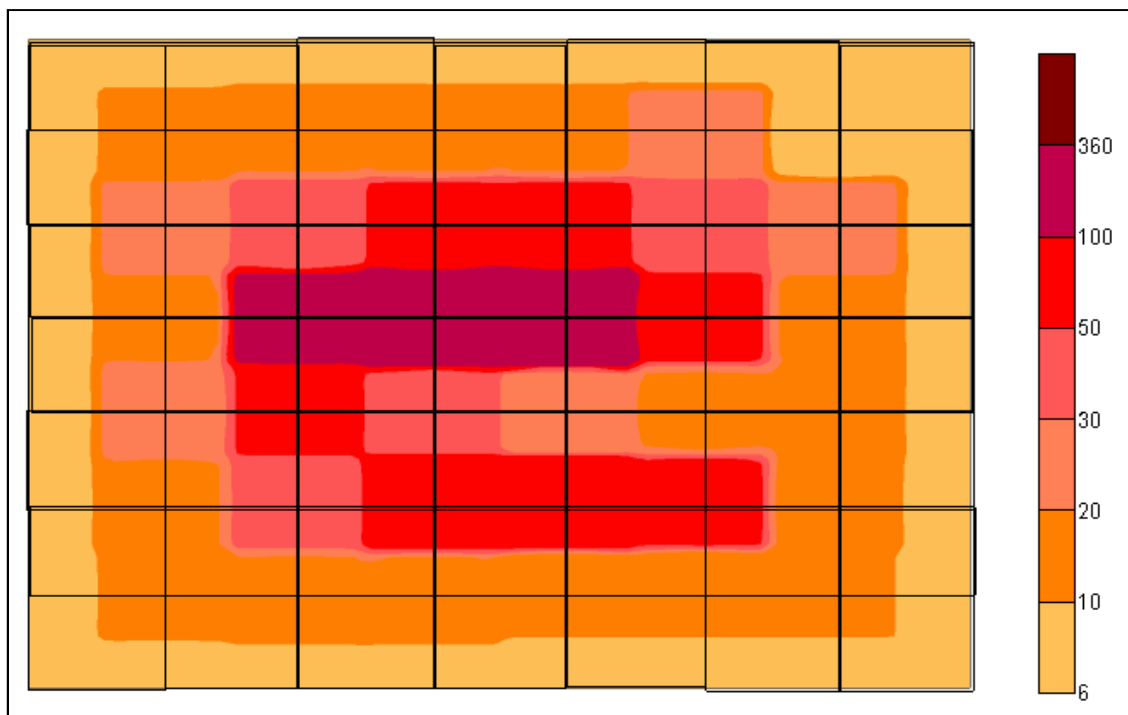
Tanto para los extremos y zona superior de las paredes se tiene una tasa de dosis promedio de 6  $\mu$ Sv/h.

#### e. Techo

La Figura 3.33 corresponde a la representación gráfica del mapa de dosis del techo del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci.

El techo es la estructura que presenta tasa de dosis superiores a las de las paredes del irradiador debido a su configuración estructural, como se puede observar en la Figura 3.33 la zona central del techo es la zona en la cual la tasa

de dosis es de  $350 \mu\text{Sv/h}$  y corresponde a la ubicación de los puntos con la mayor tasa de dosis, a medida que los puntos del mallado se alejan de esta zona el valor de la tasa de dosis disminuye a valores promedio de  $6 \mu\text{Sv/h}$  en sus extremos.



**Figura 3.33.** Mapa de dosis del techo del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

### 3.4.2.2 Mapa de dosis a 1 metro de distancia, mapa de dosis ambiental

Los resultados expuestos en las Tablas 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31 corresponden a los mapas de dosis ambiental para las paredes norte, sur, este y oeste respectivamente obtenidos de la simulación del modelo digital  $M_4$  al considerar una actividad de 100 000 Ci.

### a. Pared Norte y Pared Sur

En las Tablas 3.28 y 3.29 se puede observar que la tasa de dosis ambiental promedio tanto para la pared norte y sur del irradiador es de 6  $\mu\text{Sv/h}$ .

**Tabla 3.28.** Mapa de dosis ambiental de la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
PNEX1	6,00
PNEX2	6,00
PNEX3	6,00
PNEX4	6,00
PNEX5	6,00
PNEX6	6,00
PNEX7	6,00
PNEX8	6,00

**Tabla 3.29.** Mapa de dosis ambiental de la pared sur del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
PSEX1	6,00
PSEX2	6,00
PSEX3	6,00
PSEX4	6,00
PSEX5	6,00
PSEX6	6,00
PSEX7	6,00
PSEX8	6,00

### b. Pared Este

En el mapa de tasa de dosis correspondiente a la pared este se puede observar en la Tabla 3.30 que en los puntos PEEEX4, PEEEX5 y PEEEX6 la tasa de dosis es mayor a 6  $\mu\text{Sv/h}$ , debido a que estos puntos coincidieron con lugares en los que se encontraban puntos de fuga en la pared este del irradiador.

**Tabla 3.30.** Mapa de dosis ambiental de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
PEEX1	6,00
PEEX2	6,00
PEEX3	6,00
PEEX4	10,59
PEEX5	10,59
PEEX6	7,66
PEEX7	6,00
PEEX8	6,00

### c. Pared Oeste

En el mapa de tasa de dosis correspondiente a la pared oeste se puede observar en la Tabla 3.31 que en los puntos POEX4, POEX5 y POEX6 la tasa de dosis es mayor a 6  $\mu\text{Sv/h}$ , debido a que estos puntos coincidieron con lugares en los que se encontraban puntos de fuga en la pared oeste del irradiador.

**Tabla 3.31.** Mapa de dosis ambiental de la pared este del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
POEX1	6,00
POEX2	6,00
POEX3	6,00
POEX4	10,59
POEX5	10,59
POEX6	10,59
POEX7	6,00
POEX8	6,00

### **3.4.3. REDISEÑO DEL BLINDAJE DEL IRRADIADOR PARA UNA ACTIVIDAD DE 100 000 Ci**

Como punto de partida para el rediseño se consideraron las siguientes opciones:

- Que la tasa de dosis sea menor o igual a 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  al contacto y aun metro de distancia de las paredes, conforme a lo establecido por la OIEA para el público en general
- Que la tasa de dosis sea menor o igual a 10  $\mu\text{Sv/h}$  al contacto y a 1 metro de distancia de las paredes, para el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)

#### **3.4.3.1. Rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$**

En el mapa de dosis obtenido para 100 000 Ci se puede observar que en todas las paredes de la cámara de irradiación la tasa de dosis supera el límite de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ , además se observa que el techo del irradiador presenta puntos con tasas



de dosis mayores a las de las paredes, en el techo el promedio de tasa de dosis es de 51,65  $\mu\text{Sv/h}$ , mientras que en las paredes es de 9,9  $\mu\text{Sv/h}$ , debido a que el acceso al techo es restringido mientras la fuente esta en operación, no se requiere de blindaje auxiliar en el techo del irradiador.

Como materiales de blindaje auxiliar para las paredes del irradiador se seleccionó al plomo y el hormigón, los valores del coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ ) para estos materiales, al considerar las energías de los fotones emitidos por el Cobalto - 60, se muestran en la Tabla 3.32.

**Tabla 3.32.** Coeficiente de atenuación lineal para el plomo y hormigón

Material	$\mu(\text{cm}^{-1})$
Plomo	0,6785
Hormigón ordinario	0,1321

(Glasstone J, 2008, p. 365)

En el cálculo del espesor para cada material se consideró el factor de acumulación y la ecuación 1.16.

El detalle de los cálculos del espesor del blindaje auxiliar se encuentra en el Anexo VIII.

Los puntos de la pared con una tasa de dosis de 6  $\mu\text{Sv/h}$  requieren de un espesor de 3,66 cm de plomo o un espesor de 18,83 cm de hormigón.

Estos espesores son referenciales ya que las láminas de plomo se comercializan en espesores estándar como se muestra en el Anexo IX la dificultad que se presenta al trabajar con hormigón es la limitación de espacio físico ya que en la pared externa del irradiador existen dispositivos que no pueden ser retirados.

Se puede considerar la opción de colocar un espesor de 20 cm de hormigón dentro de la cámara de irradiación, lo cual implicaría que el espesor de la puerta debe incrementarse en 20cm, para la ventana se debería utilizar vidrio plomado

ya que existe la necesidad de transparencia óptica, en los agujeros de las paredes se debería seguir trabajando con plomo, el mayor inconveniente que presenta el hormigón es que su densidad no es uniforme, lo cual implica como ya se ha demostrado en la evaluación del blindaje actual del irradiador que al no realizar una adecuada compactación del hormigón podrían existir algunos puntos donde queden atrapadas burbujas de aire lo cual provoca que en estos puntos la tasa de dosis sea mayor a la esperada y no se pueda cumplir con el límite de dosis establecido.

Al trabajar con plomo como blindaje auxiliar no se presenta la limitación de espacio físico, ya que al colocar las placas de plomo en la cámara de irradiación el espacio físico no se reduce como al utilizar hormigón, además tiene buena estabilidad ambiental. Además es el material más utilizado para protección radiológica debido a que en comparación con el hormigón es más uniforme en su densidad (NCRP 151, 2006, p. 71).

Debido a las razones antes expuestas se escogió al plomo como material blindante, en Tabla 3.33 se expone la propuesta de rediseño del blindaje auxiliar al utilizar plomo como material de blindaje.

La colocación de las placas de plomo auxiliares se la realizará al interior de la cámara de irradiación, en la parte interna de las paredes del blindaje del irradiador.

**Tabla 3.33.** Propuesta de rediseño del irradiador al considerar como límite  $0,5 \mu\text{Sv/h}$

<b>Pared</b>	<b>Espesor</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Este</b>	1 in	1x2 m	8
	1 in	2x0,6 m	4
	0,5 in	1x2 m	4
	0,5 in	2x0,6 m	2
	1 in	1x1 m	1
<b>Norte</b>	1 in	1x2 m	8
	1 in	2x0,6 m	4

**Tabla 3.33.** Propuesta de rediseño del irradiador al considerar como límite 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  (continuación...)

<b>Pared</b>	<b>Espesor</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Norte</b>	1 in	1,3x1,2	1
	0,5 in	1,3x1,2	1
<b>Oeste</b>	1 in	1x2 m	8
	1 in	2x0,6 m	4
<b>Sur</b>	1 in	1x2 m	8
	1 in	2x0,6 m	4
	1 in	1,22 x 0,20 m	4

En el Anexo V se presenta el modelo digital que incluye la propuesta de blindaje auxiliar al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ .

### 3.4.3.2. Rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 10 $\mu\text{Sv/h}$

Al considerar el límite de tasa de dosis de 10  $\mu\text{Sv/h}$  los puntos del mapa de dosis que no cumplen con este valor se indican en la Tabla 3.34, donde se muestra la identificación del punto, la tasa de dosis y el espesor del blindaje auxiliar considerando como material blindante al plomo.

**Tabla 3.34.** Puntos de fuga y espesor de blindaje requerido

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>	<b>espesor (cm)</b>	<b>espesor (in)</b>
PNF1	13,05	4,8	1,89
PNF2	10,59	4,5	1,77
PNF3	15,90	5,1	2,01
PNF4	10,59	4,5	1,77
PNF5	15,90	5,1	2,01
PNF6	19,48	5,4	2,13
PNF7	13,05	4,8	1,89

**Tabla 3.34.** Puntos de fuga y espesor de blindaje requerido (continuación...)

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>	<b>espesor (cm)</b>	<b>espesor (in)</b>
PNF8	13,05	4,8	1,89
PSF1	351,67	9,66	3,80
PSF2	10,59	4,50	1,77
PSF3	15,90	5,10	2,01
PSF4	15,90	5,10	2,01
PSF5	351,67	9,66	3,80
PSF6	10,59	4,50	1,77
PSF7	10,59	4,50	1,77
PEF1	15,90	5,10	2,01
PEF2	39,61	6,44	2,54
PEF3	29,94	6,03	2,37
PEF4	19,48	5,4	2,13
PEF5	10,59	4,50	1,77
PEF6	13,05	4,9	1,9
PEF7	23,64	5,68	2,24
PEF8	13,05	4,81	1,89
PEF9	133,82	8,24	3,24
PEF10	13,05	4,81	1,89
PEF11	10,59	4,50	1,77
POF1	13,05	4,81	1,89
POF2	24,13	5,71	2,25
POF3	24,13	5,71	2,25
POF4	15,90	5,10	2,01
POF5	13,05	4,81	1,89
POF6	10,59	4,50	1,77
POF11	57,01	6,98	2,75
POF12	13,05	4,81	1,89
POF13	13,05	4,81	1,89

Los espesores de la Tabla 3.35 son referenciales, ya que las láminas de plomo tienen espesores definidos, los espesores que serán incrementados al modelo digital validado son los mostrados en la Tabla 3.42.

**Tabla 3.35.** Propuesta de rediseño del irradiador considerando como límite 10  $\mu\text{Sv/h}$

<b>Pared</b>	<b>Espesor</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Este</b>	1 in	1x2 m	8
	0,5 in	1x1 m	1
	1 in	1x1 m	1
<b>Norte</b>	1 in	1x1 m	8
	1 in	1x1 m	8
<b>Oeste</b>	1 in	1x1 m	3
	1 in	1x2 m	4
	0.5 in	2x1m	1
<b>Sur</b>	1 in	1x2 m	4
	1 in	1,22x0,20 m	4
	1 in	1x1 m	1

El blindaje auxiliar propuesto se ubicará en la parte interna de las paredes del irradiador. En el Anexo V se presenta el modelo digital que incluye la propuesta de blindaje auxiliar al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 10  $\mu\text{Sv/h}$ .

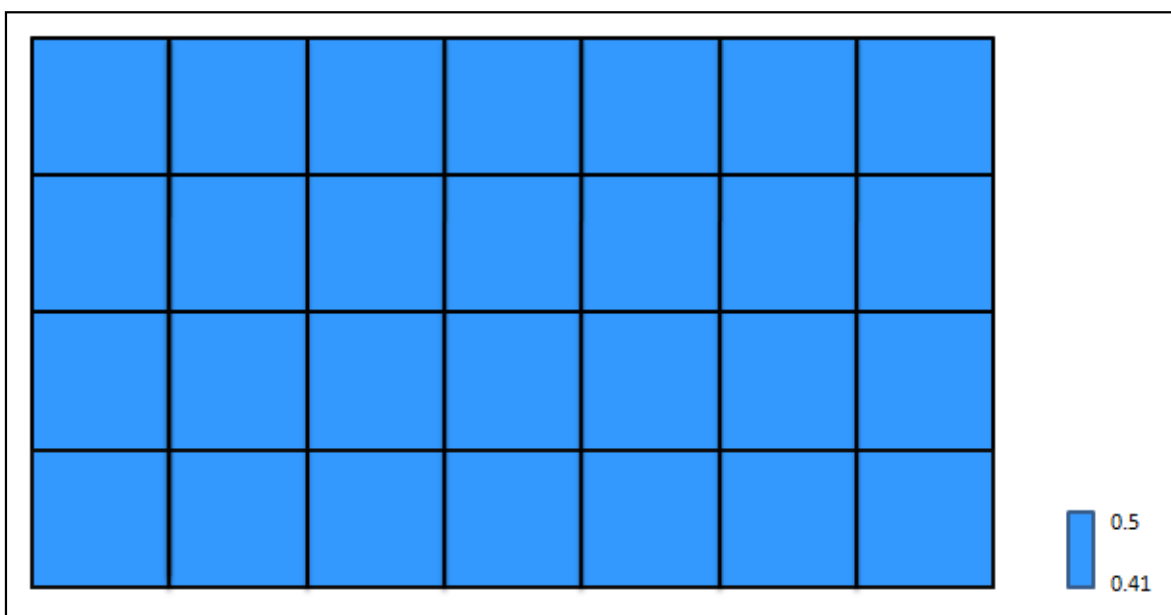
### **3.4.4. MAPA DE LA TASA DE DOSIS AL CONSIDERAR EL REDISEÑO PROPUESTO**

#### **3.4.4.1. Mapa de la tasa de dosis del rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$**

Una vez simulado el modelo digital  $M_4$  con el rediseño propuesto en la sección 3.4.3.1 llamado modelo de rediseño  $M_R$  se obtuvo el mapa de la tasa de dosis al contacto y a 1 metro de distancia de las paredes del irradiador. El 100 % de los puntos cumplen con valores de una tasa de dosis igual o menor a 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  y por

lo tanto el rediseño propuesto es acertado, como se puede observar en la Figura 3.34.

Los valores de tasa de dosis para cada punto al contacto y a 1 metro desde las paredes del irradiador están en el rango de 0,41 a 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ .



**Figura 3.34.** Mapa de dosis de la pared este del irradiador considerando el rediseño propuesto para cumplir con un límite de dosis de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$

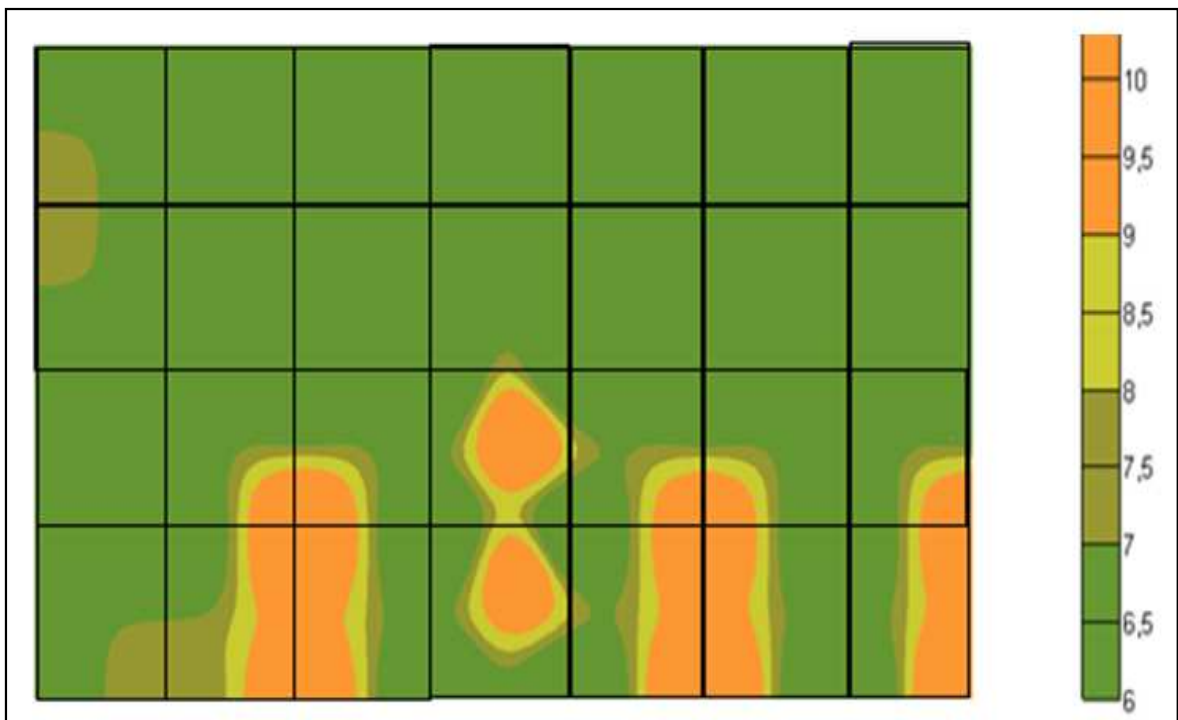
#### **3.4.4.2. Mapa de la tasa de dosis del rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite una tasa de dosis menor o igual a 10 $\mu\text{Sv/h}$**

Los valores de la tasa de dosis para los puntos al contacto y a 1 metro de distancia de las paredes del irradiador, obtenidos de la simulación del modelo digital  $M_4$  con el rediseño propuesto en la sección 3.4.3.2 demuestran que el rediseño propuesto es acertado ya que el 100 % de los puntos donde se colocó el blindaje auxiliar cumplen con valores de tasa de dosis sea menor o igual a 10  $\mu\text{Sv/h}$ .

En las Figuras 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38 se muestra el mapa de la tasa de dosis del rediseño del blindaje del irradiador al considerar una tasa de dosis límite de  $10 \mu\text{Sv/h}$ .

#### a. Pared Norte

El mapa de dosis de la pared norte del irradiador al considerar el blindaje auxiliar para conseguir en todos los puntos de la pared, tasas de dosis iguales o menores a  $10 \mu\text{Sv/h}$  se muestra en la Figura 3.35, donde se puede observar que en la zona central inferior de la pared la tasa de dosis es mayor que en otras zonas de la pared pero no se llega a superar el límite de  $10 \mu\text{Sv/h}$ , es así como se comprueba que el rediseño propuesto es válido.

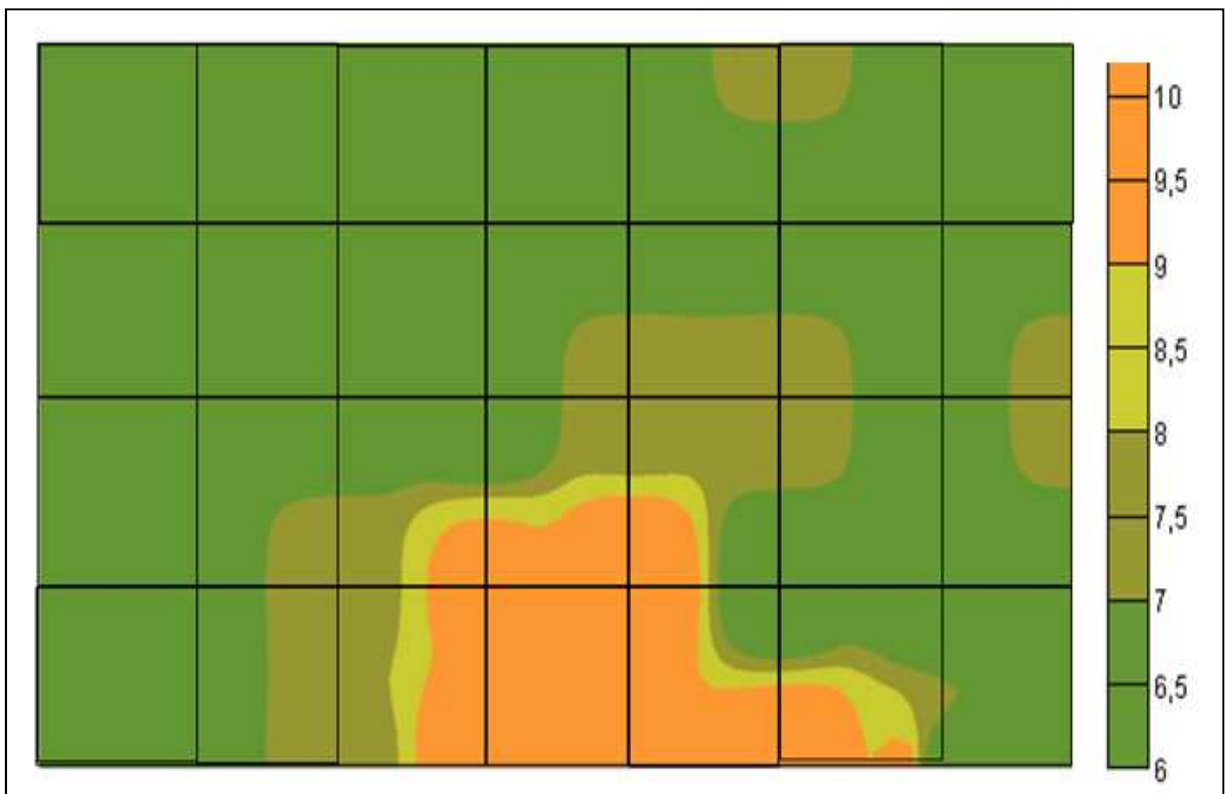


**Figura 3.35.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared norte, al considerar el rediseño propuesto para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a  $10 \mu\text{Sv/h}$

### b. Pared Sur

La Figura 3.36 muestra la representación gráfica del mapa de dosis de la pared sur del irradiador al considerar el blindaje auxiliar para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a  $10\mu\text{Sv/h}$  en todos los puntos de la pared.

La zona en la que la tasa de dosis alcanza un valor de  $10\mu\text{Sv/h}$  está ubicada en la parte central inferior de la pared, la zona superior y los extremos de la pared tiene una tasa de dosis promedio de  $6\mu\text{Sv/h}$ , con ello se comprueba que la propuesta de rediseño fue adecuada.



**Figura 3.36.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared sur, al considerar el rediseño propuesto para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a  $10\mu\text{Sv/h}$

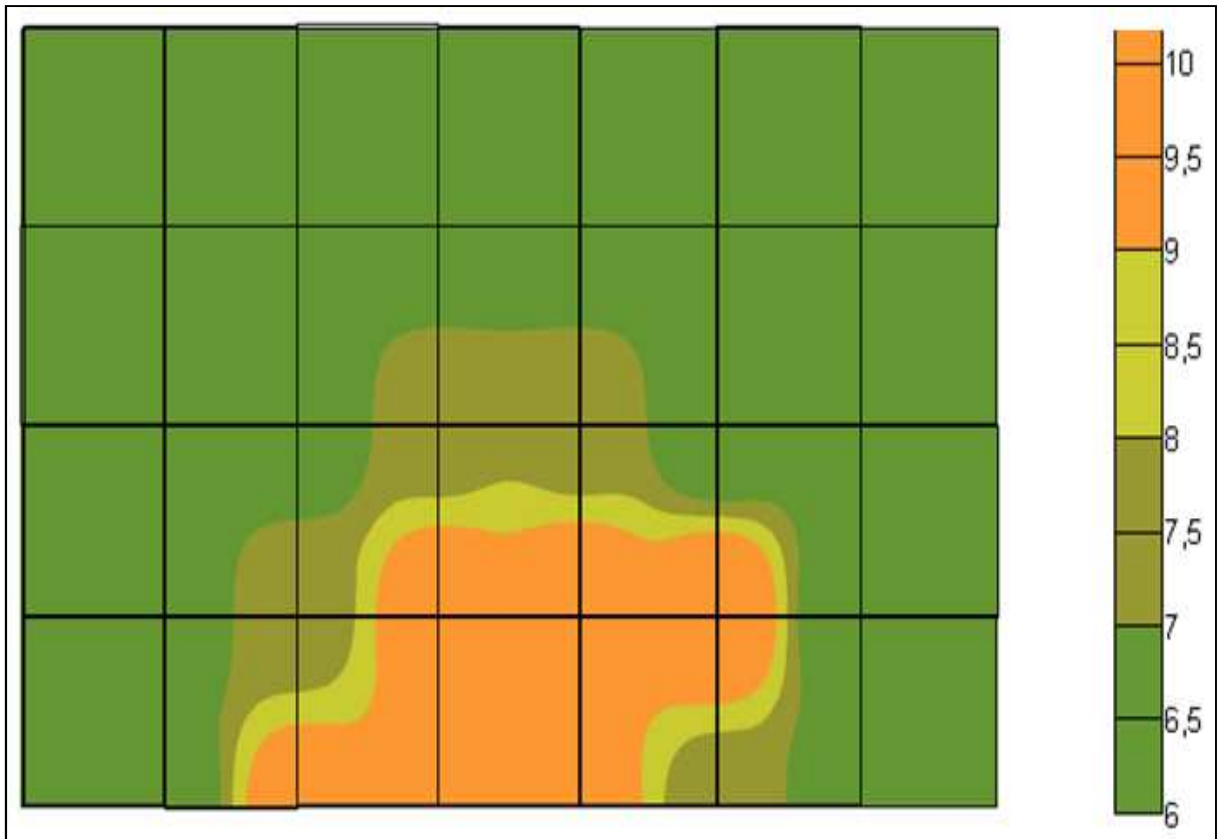
### c. Pared Este

En la pared este se puede observar que en la zona inferior central se encuentran puntos con valores de tasa de dosis de  $10\mu\text{Sv/h}$ , en los extremos y zona superior



de la pared el valor de la tasa de dosis promedio es de  $6 \mu\text{Sv/h}$  como se puede observar en la Figura 3.37.

Con lo descrito anteriormente se confirma la validez del rediseño propuesto.



**Figura 3.37.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared este, al considerar el rediseño propuesto para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a  $10 \mu\text{Sv/h}$

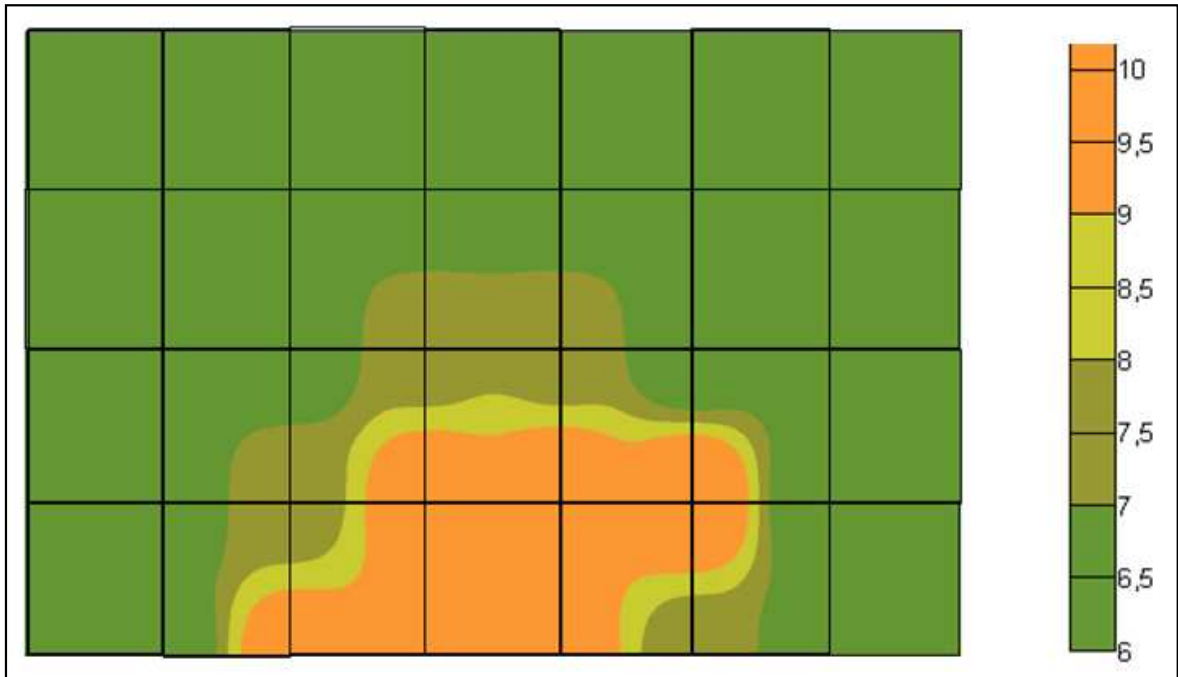
#### d. Pared Oeste

En la Figura 3.38 se puede observar la representación gráfica del mapa de dosis de la pared oeste al considerar el rediseño propuesto para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a  $10 \mu\text{Sv/h}$ .

La zona inferior central de la pared es la zona en la que se presentan valores de tasa de dosis de  $10 \mu\text{Sv/h}$ , en esta zona fue donde se identificaron puntos de fuga

y debido a la propuesta del blindaje auxiliar, estos puntos cumplen con el límite de dosis establecido.

La zona superior y extremos de la pared tienen una tasa de dosis promedio de 6  $\mu\text{Sv/h}$ , lo que comprueba que el rediseño propuesto es válido.



**Figura 3.38.** Representación gráfica del mapa de dosis de la pared oeste, al considerar el rediseño propuesto para alcanzar una tasa de dosis menor o igual a 10  $\mu\text{Sv/h}$

### 3.5 DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN ECONÓMICA

Para la determinación de la inversión económica se solicitaron proformas de láminas de plomo a empresas extranjeras, los costos descritos en las Tablas 3.36 y 3.37 son los costos de las láminas de plomo incluidos impuestos, tasas y colocación de las mismas.

**Tabla 3.36.** Propuesta de rediseño del irradiador al considerar como límite 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ 

<b>Pared</b>	<b>Espesor</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario \$</b>	<b>Valor Total \$</b>
<b>Este</b>	1 in	1x2 m	8	2 240	17 920
	1 in	2x0,6 m	4	2 240	8 960
	0,5 in	1x2 m	4	1 120	4 480
	0,5 in	2x0,6 m	2	1 120	2 240
	1 in	1x1 m	1	1 140	1 140
<b>Norte</b>	1 in	1x2 m	8	2 240	17 920
	1 in	2x0,6 m	4	2 240	8 960
	1 in	1,3x1,2m	1	1 140	1 140
	0,5 in	1,3x1,2m	1	1 140	1 140
<b>Oeste</b>	1 in	1x2 m	8	2 240	17 920
	1 in	2x0,6 m	4	1 120	4 480
<b>Sur</b>	1 in	1x2 m	8	2 240	17 920
	1 in	2x0,6 m	4	1 120	4 480
	1 in	1,22 x 0,20 m	4	1 780	71 201
<b>VALOR TOTAL</b>					<b>179 901</b>

La inversión económica requerida para implementar la propuesta de rediseño del blindaje del irradiador al considerar una tasa de dosis límite de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  es de aproximadamente 180 000 dólares americanos.

En la Tabla 3.37 se describen las cantidades y las dimensiones de las láminas de plomo extras que requieren colocarse sobre las paredes del irradiador para alcanzar una tasa de dosis límite de 10  $\mu\text{Sv/h}$ .

**Tabla 3.37.** Propuesta de rediseño del irradiador considerando como límite 10  $\mu\text{Sv/h}$ 

<b>Pared</b>	<b>Espesor</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario \$</b>	<b>Valor Total \$</b>
<b>Este</b>	1 in	1x2 m	8	2240	17 920
	0,5 in	1x1 m	1	570	570
	1 in	1x1 m	1	1140	1 140
<b>Norte</b>	1 in	1x1 m	8	1140	9 120
	1 in	1x1 m	8	1 140	9 120
<b>Oeste</b>	1 in	1x1 m	3	1140	3 420
	1 in	1x2 m	4	2240	8 690
	0.5 in	2x1m	1	1140	1 140
<b>Sur</b>	1 in	1x2 m	4	2240	8 960
	1 in	1,22x0,20 m	4	1780	7 120
	1 in	1x1 m	1	1140	1 140
<b>VALOR TOTAL</b>					<b>68 340</b>

La inversión económica requerida para el rediseño del blindaje del irradiador al considerar como límite 10  $\mu\text{Sv/h}$  sería aproximadamente 68 400 dólares americanos.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

1. Con la evaluación de la condición actual del blindaje se obtuvo el mapa de dosis al contacto y ambiental de las paredes del irradiador y con ello se identificó los puntos de fuga o puntos calientes que existen en las paredes del irradiador.
2. La zona central inferior de las paredes corresponde a la zona donde se ubican los puntos de fuga en todas las paredes del irradiador, los mismos que coinciden con el espacio de la cámara donde se da la irradiación.
3. La técnica de reducción de varianza fue el método utilizado para obtener contaje en los detectores colocados al contacto y a 1 m de distancia de las paredes de la cámara de irradiación a diferencia del método análogo de resolución.
4. Para evitar la alteración que se provoca durante la simulación en las lecturas de la tasa de dosis ambiental al ser simuladas a la par con la lectura de la tasa de dosis al contacto, estas se realizaron por separado.
5. El análisis de porosidad del hormigón en las paredes del irradiador determinó que el espesor de aire que se debe incrementar en el modelo es de 6 cm, en la cuarta subcapa de las paredes para alcanzar un modelo aproximado a la realidad.
6. El número de historias necesarias para que todos los cuantificadores de datos pasen las 10 pruebas estadísticas realizadas por el programa MCNP5, fue igual a 10 000 000, con ello se asegura que los resultados obtenidos mediante la simulación son estadísticamente confiables.

7. En el modelo digital M<sub>4</sub> el porcentaje de error obtenido al comparar los datos experimentales con los datos simulados fue menor del 10 % por lo tanto, con el modelo digital se obtienen valores cercanos al comportamiento real del irradiador y en consecuencia el modelo digital fue validado.
8. El costo que implica el rediseño al considerar una tasa de dosis de 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  es de aproximadamente 180 000 dólares americanos.
9. El costo del rediseño considerando una tasa de dosis de 10  $\mu\text{Sv/h}$  es de aproximadamente 68 400 dólares americanos.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

1. Realizar estudios no destructivos de la resistencia a la compresión mecánica de las paredes del irradiador, específicamente en los puntos identificados como fugas para conocer la porosidad en esos puntos.
2. Efectuar estudios del blindaje del irradiador considerando fallos en la estructura como fisuras.
3. Realizar un estudio sobre una nueva estructura de blindaje del irradiador, con otro material de blindaje que no sea hormigón ordinario o plomo.
4. Efectuar un estudio del blindaje para la fuente de Cobalto -60 al considerar su transporte y almacenamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agency HSE. (2012). *Radiation shielding*. Recuperado de [http://www.onr.org.uk/operational/tech\\_asst\\_guides/ns-tast-gd-002.pdf](http://www.onr.org.uk/operational/tech_asst_guides/ns-tast-gd-002.pdf)(Enero, 2014)
2. Alcaraz, M. (2010). *Detección de radiación ionizante*. Recuperado de <https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=lecciones.pdf> (Septiembre, 2013)
3. Alcérreca, M. (2009). *América Latina, Situación Actual y Plantas de Irradiación en México*. Recuperado de <http://latu21.latu.org.uy/es/docs/9-Situación-actual-irradiación-gamma-America-Latina.pdf> (Julio,2012)
4. Amirabadi, A. (2013). *Study of neutron and gamma radiation protective shield*. Recuperado de <http://www.issr-journals.org/xplore/ijias/IJIAS-13-156-06.pdf> (Diciembre, 2013)
5. Angelo, J. (2004). *Nuclear Technology*. Westport,Estados Unidos: Greenwood Publishing Group,Inc.
6. Arias, C. (2010). *Magnitudes y unidades empleadas en protección radiológica*. Recuperado de <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2970> (Septiembre, 2013)
7. Attix, F. (2004). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Weinheim, Alemania: Editorial WILEY-VCH.
8. Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). (2003). *Guía AR-1 Factores dosimétricos para irradiación externa y contaminación interna*. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

9. Brosed, A. (2011). *Fundamentos de Física Médica*. Madrid, España: Sociedad Española de Física Médica.
10. Chica, F. (2002). Procedimientos operacionales de protección radiológica para la irradiación externa. Recuperado de <http://www.sgc.gov.co/getattachment/Nucleares/Otrasactividades/memorias-Curso-P-R-.pdf.aspx> (Diciembre, 2013)
11. Chilton, A. Shultis, J. y Faw, R. (1984). *Principles of Radiation Shielding*. New Jersey, Estados Unidos: Prentice-Hall, Inc.
12. CNEA. (2005). *Licencia para el uso de fuentes selladas*. Recuperado de <http://movil.argentina.gob.ar/movil/tramites/716-licencia-para-el-uso-de-fuentes-selladas-en-braquiterapia.php> (Enero, 2013)
13. Comisión de seguridad y salvaguardias. (1998). *Guía para la preparación del informe de seguridad radiológica para instalaciones de rayos X de uso industrial y de investigación*. Recuperado de [http://www.cnsns.gob.mx/sites/all/formatos\\_pdf/guia\\_informe\\_seguridad\\_radiologica.pdf](http://www.cnsns.gob.mx/sites/all/formatos_pdf/guia_informe_seguridad_radiologica.pdf) (Noviembre, 2013)
14. Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica. (1987). *Reglamento de seguridad Radiológica*. Decreto Supremo 3640.
15. Doménech, N. y Haydée, J. (2011). *Seguridad radiológica en la industria, investigación y otros*. Recuperado de <http://www.ceprode.org.sv/staticpages/pdf/spa/doc8026/doc8026-d.pdf> (Septiembre, 2013)
16. Donald, J. (2012). *A guide to the use of lead for radiation shielding*. Recuperado de <http://www.canadametal.com/pdf/radiation-shielding.pdf> (Diciembre, 2013)



17. Escobar, J. (2008). *Detección y medición de radiación*. Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/mednuclear/Detectores.ppt> (Octubre, 2013)
18. Fernández, N. (2009). *La simulación como herramienta de la investigación*. Recuperado de [http://www.gsic.uva.es/wikis/yannis/images/3/3a/MI\\_ArticuloVersionFinal.pdf](http://www.gsic.uva.es/wikis/yannis/images/3/3a/MI_ArticuloVersionFinal.pdf) (Septiembre, 2012)
19. Gallego, E. (2010). *Radiaciones ionizantes y protección radiológica*. Recuperado de [62.43.237.121/nuclear\\_radi.pdf](http://62.43.237.121/nuclear_radi.pdf) (Septiembre, 2013)
20. Glasstone, S. (2011). *Nuclear Reactor Engineering*. Madrid, España: Editorial Reverté S.A.
21. Gómez, J. (2013). *Diseño de un modelo digital en el programa MCNP para la simulación de la dosimetría de la fuente de Cobalto – 60 de la EPN y validación del modelo mediante dosimetría Fricke*. (Tesis de pregrado no publicada). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
22. González, A. (2011). *Seguridad física de las fuentes radiactivas*. Recuperado de [http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull434/Spanish/article8\\_sp.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull434/Spanish/article8_sp.pdf) (Septiembre, 2013)
23. Hussein, E. (2011). *Monte Carlo Particle Transport with the MCNP Code*. Fredericton, Canada: University of New Brunswick.
24. ICRP 103. (2007). *Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Recuperado de [www.icrp.org/docs/P103\\_Spanish.pdf](http://www.icrp.org/docs/P103_Spanish.pdf)
25. Instituto Balseiro, (2010). *Interacción de la Radiación con la Materia*. Recuperado de: <http://www.ib.cnea.gov.ar/~protrad/biblioteca/Interacci%F3n%20de%20la%20Radiaci%F3n%20con%20la%20Materia.pdf> (Agosto, 2013)

26. Instituto Balseiro. (2000). *Magnitudes radiométricas y dosimétricas*. Recuperado de <http://www.ib.cnea.gov.ar/~protrad/biblioteca/Magnitudes%20Radiom%20E9tricas%20y%20Dosim%20E9tricas.pdf> (Septiembre, 2013)
27. Instituto Balseiro. (2000). *Principios de detección de la radiación*. Recuperado de [http://labrad.fisica.edu.uy/docs/Detectores\\_de\\_Radiacion\\_Balseiro.pdf](http://labrad.fisica.edu.uy/docs/Detectores_de_Radiacion_Balseiro.pdf) (Septiembre, 2013)
28. Instituto Balseiro. (2000). *Sistemas de protección para la radiación externa*. Recuperado de <http://www.ib.cnea.gov.ar/~protrad/biblioteca/Blindajes%20de%20Fuentes%20Radiactivas.pdf> (Septiembre, 2013)
29. Iturbe, J. (2011). *Fundamentos de Radioquímica*. México, México: Universidad Autónoma de México.
30. Klieger, P. y Lamond, J. (1994). *Concrete and concrete making materials*. Philadelphia. Estados Unidos: ASTM.
31. Knoll, G. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. (4ta Edición). Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
32. Lamarsh, J. y Baratta, A. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*. (3era Edición). New Jersey, Estados Unidos: Prentice-Hall, Inc.
33. Lenntech BV. (2012). *Elementos químicos ordenados por su densidad*. Delft, Holanda. Recuperado de <http://www.lenntech.es/Tabla-periodica/densidad.htm> (Enero, 2013)
34. Leroy, C. y Rancoita, P. (2008). *Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection*. (2da. ed.). Milán, Italia: World Scientific.

35. Mayles, P., Nahum, A. y Rosenwald, J. C. (2007). *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
36. Mc Conn Jr., R. J., Gesh, C. J., Pagh R. T., Rucker. R. A. y Williams III, R. G. (2011). *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*. (1ra Revisión). Richland, Estados Unidos: Pacific Northwest National Laboratory.
37. McAlister, D. (1995). *Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials*. Recuperado de <http://www.eichrom.com/PDF/gamma-ray-attenuation-white-paper-by-d.m.-rev-4.pdf> (Agosto, 2013)
38. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2012). *Servicios que oferta la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares*. Recuperado de [http://www.energia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2012/08/dnsna\\_-\\_d1\\_d2\\_d3\\_y\\_d4-DNSNA.pdf](http://www.energia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2012/08/dnsna_-_d1_d2_d3_y_d4-DNSNA.pdf) (Agosto, 2012)
39. Moro, V. M. (2005). *Fundamentos de Ingeniería Nuclear*. Madrid, España: Latex.
40. NCRP 151. (2010). *Structural shielding desing and evaluation for megavoltage x- and Gamma – Ray* . Recuperado de [http://www.ncrponline.org/Publications/Press\\_Releases/151press.html](http://www.ncrponline.org/Publications/Press_Releases/151press.html) (Febrero, 2013)
41. NCRP 49. (1976). *Structural shielding desing and evaluation for medical use of x rays and gamma rays of energies up 10 MeV*. Recuperado de [Documentos%20No%20Borrar/Documentos/Downloads/ncrp\\_49\\_c.pdf](Documentos%20No%20Borrar/Documentos/Downloads/ncrp_49_c.pdf) (Diciembre, 2013)

42. Nelson, G. y Reilly, D. (1997). *Gamma-Ray Interactions with Matter*. Washington, DC , Estados Unidos: Federation of American Scientists. Recuperado de <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326397.pdf> (Agosto, 2013)
43. Nuñez, R. y Roglá, L. (2004). La Radiactividad. *Revista Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 59, 51-52.
44. OIEA. (2011). *Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad*. Recuperado de [http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/SupM\\_Pub1531\\_S](http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/SupM_Pub1531_S) (Agosto, 2012)
45. Olivares, J., Laffarga, C. y Nadas, P. (2008). *Resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad*. Recuperado de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/220/266> (Febrero, 2013)
46. Organismo internacional de energía atómica. (2013). *Tecnología de la protección radiológica y seguridad de fuentes de radiación*. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina
47. Ortega, J. (2010). *Física de las radiaciones*. Recuperado de [http://isepvirtual.ceu.es/proteccion\\_radiologica/material/1\\_fisica\\_de\\_las\\_radiaciones.pdf](http://isepvirtual.ceu.es/proteccion_radiologica/material/1_fisica_de_las_radiaciones.pdf) (Septiembre, 2013)
48. Papadakis, S. (2010). *Desarrollo de un código de cálculo basado en el método monte carlo orientado a experimentos neutrónicos*. Recuperado de <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/269/1/1Papadakis.pdf> (Diciembre, 2013)
49. Pascual, A. y Gadea, E. (2001). *NTP 614: Radiaciones ionizantes: normas de protección*. Recuperado de

[www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/.../NTP/.../ntp\\_614.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/.../NTP/.../ntp_614.pdf) (Septiembre, 2013)

50. Podgorsak, E. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Viena, Austria: IAEA.
51. Ragheb, M. (2011). *Gamma Rays Interaction With Matter*. Illinois, Estados Unidos: University of Illinois at Urbana-Champaign. Recuperado de <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Gamma%20Rays%20Interactions%20with%20Matter.pdf> (Agosto, 2013)
52. Rangel, W. (2010). El futuro de la irradiación gamma: Tendencias. *Contacto Nuclear*, N° 57. 38-44.
53. Salgado F. (2010). *Características de la fuente de Cobalto-60*. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
54. Sánchez, G. (2005). *Introducción a la física de la radioterapia*. Recuperado de: <http://www.telecable.es/personales/pgali1/rt2.pdf> (Agosto, 2013)
55. Consejo Supremo de Gobierno. (1979). *Reglamento de seguridad radiológica*. Recuperado de <http://190.152.98.92/PORTAL/SCAN/Seguridadradiologica.pdf> (Enero, 2013)
56. Shani, G. (2000). *Radiation dosimetry: Instrumentation and methods*. (2da edición). Ney York, Estados Unidos: CRC Press LLC.
57. Shultis, J. K. y Faw, R. E. (2011). *An MCNP Primer*. Manhattan, Estados Unidos: Kansas State University.
58. Shultis, J. y Faw, R. (2008). *Fundamentals of nuclear science and engineering*. (2da edición). New York, Estados Unidos: CRC Press.

59. Shultis, J. y Faw, R. (2010). *Radiation shielding and radiological protection*. Recuperado de <https://www.mne.ksu.edu/~jks/books/Ch11fulltext.pdf> (Octubre, 2013)
60. Stabin, M. (2007). *Radiation Protection and Dosimetry*. New York, Estados Unidos: Springer Science.
61. Syed, A. (2007). *Physics and engineering of radiation detection*. San Diego, Estados Unidos: Elsevier.
62. Ternes, T. (2010). *Shielding equations and buildup factors explained*. Recuperado de [www.radprocalculator.com/Files/ShieldingandBuildup.pdf](http://www.radprocalculator.com/Files/ShieldingandBuildup.pdf) (Noviembre, 2013)
63. Tipler, A. y Mosca, G. (1993). *Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo*. (3da ed.). Nueva York, Estados Unidos: Reverté S.A.
64. Tsoulfanidis, N. (1983). (2da edición). Washington, Estados Unidos: Taylor & Francis.
65. Turner, J. (2010). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. (3era edición). Weinheim, Alemania: Wiley-Vch.
66. Wernli, C. (2004), *Dosimetría externa: Magnitudes Operativas y su medición*. Recuperado de: <http://smsr.org.mx/pdf/Dosimet%20externaMO.pdf> (Agosto, 2013)
67. Wernli, C. (2004). *Medidas de la radiaciones ionizantes*. Recuperado de [http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32317/tema\\_5.pdf](http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32317/tema_5.pdf)

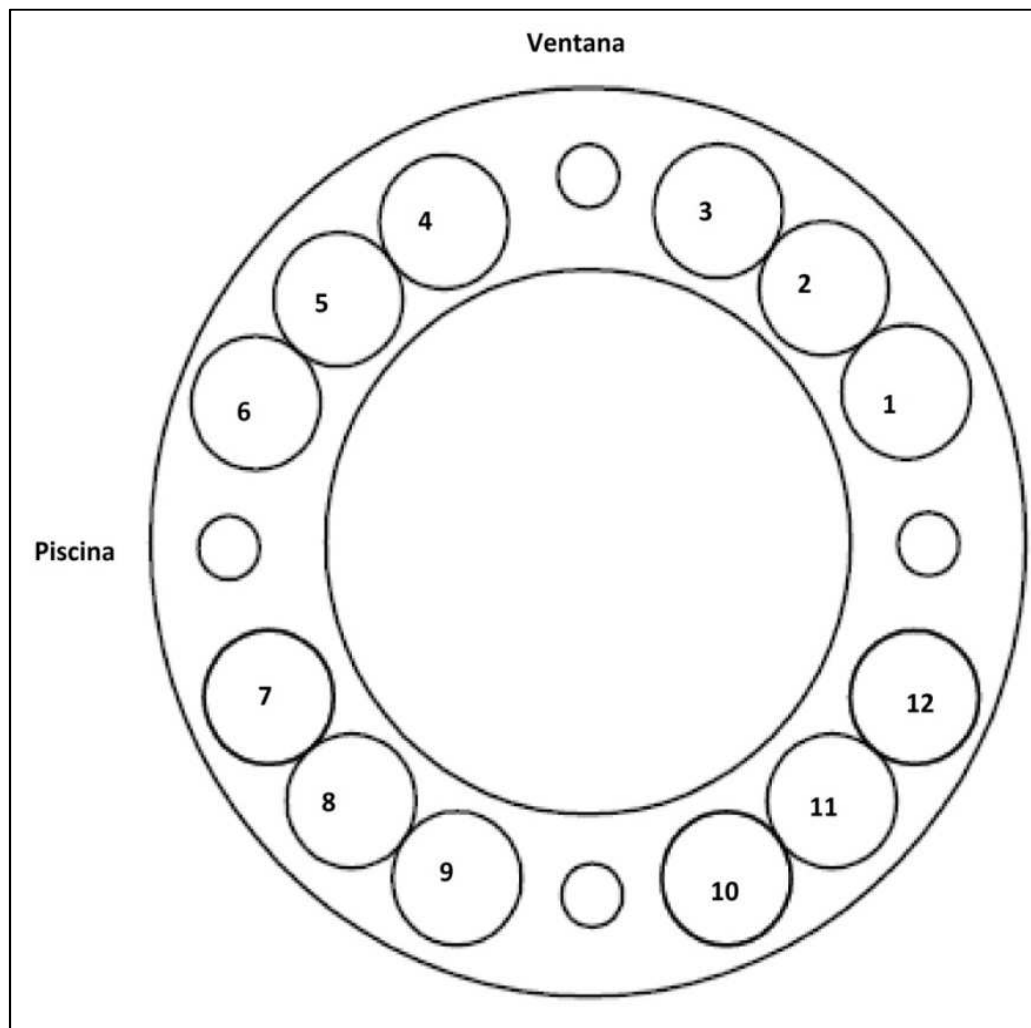
68. White, M. C. (2003). *Photoatomic Data Library MCPLIB04: A New Photoatomic Library Based On Data from ENDF/B-VI Release 8*. Los Álamos, Estados Unidos: Los Álamos Laboratory.
69. X-5 Monte Carlo Team. (2008). *MCNP- A general Monte Carlo N- Particle Transport Code, Version 5*. Recuperado de [http://mcnp-green.lanl.gov/pdf\\_files/MCNP5\\_manual\\_VOL\\_I.pdf](http://mcnp-green.lanl.gov/pdf_files/MCNP5_manual_VOL_I.pdf) (Agosto, 2012)

## **ANEXOS**



## ANEXO I

## DEFINICIÓN DE LA FUENTE EN EL PROGRAMA MCNP5



**Figura AI.1.** Ilustración que representa la distribución real de los lápices de Cobalto-60 (Gómez, 2013, p.54)

**Tabla AI.1** Parámetros utilizados para definir a la fuente de Cobalto-60 con la actividad real de cada lápiz, modelo digital M<sub>5</sub> de Gómez J. (2013)

Variable	Código MCNP	
Celda	CEL=D4 SI4 L 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 SP4 D 0.079 0.08 0.08 0.08 0.081 0.082 0.083 0.086 0.086 0.087 0.087 0.088	
Posición	POS FCEL D5 DS5 L 9.61 3.98 0 7.353 7.353 0 3.98 9.61 0 -3.98 9.61 0 -7.353 7.353 0 -9.61 3.98 0 -9.61 -3.98 0 -7.353 -7.353 0 -3.98 -9.61 0 3.98 -9.61 0 7.353 -7.353 0 9.61 -3.98 0	
Límites axiales	EXT=D3	
	Abajo	SI3 0 30.48 SP3 0 1

## ANEXO II

**MAPA DE DOSIS EXPERIMENTAL DEL BLINDAJE DEL  
IRRADIADOR DE LA EPN**

**Tabla AII.1.** Mapa de dosis correspondiente a la pared norte del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis <sup>H*</sup> (10) ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1	2	3	PROMEDIO		
PN1	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	8,33
PN2	0,16	0,15	0,16	0,16	0,01	4,95
PN3	0,32	0,27	0,32	0,30	0,01	2,86
PN4	0,11	0,12	0,11	0,11	0,06	7,37
PN5	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	9,21
PN6	0,23	0,24	0,23	0,23	0,04	8,91
PN7	0,14	0,12	0,14	0,13	0,01	4,95
PN8	0,32	0,35	0,32	0,33	0,01	7,69
PN11	0,13	0,15	0,13	0,14	0,01	8,33
PN12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	5,09
PN13	0,22	0,23	0,22	0,22	0,02	7,22
PN14	0,11	0,1	0,11	0,11	0,02	5,39
PN15	0,11	0,1	0,11	0,11	0,05	9,22
PN16	0,31	0,26	0,31	0,29	0,01	5,59
PN17	0,11	0,13	0,11	0,12	0,01	8,33
PN18	0,42	0,39	0,42	0,41	0,01	8,33
PN21	0,13	0,15	0,13	0,14	0,01	4,95
PN22	0,14	0,13	0,14	0,14	0,01	4,22
PN23	0,14	0,13	0,14	0,14	0,01	9,09
PN24	0,09	0,09	0,09	0,09	0,01	8,33
PN25	0,1	0,1	0,1	0,10	0,00	0,00
PN26	0,12	0,11	0,12	0,12	0,01	8,45
PN27	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	7,14
PN28	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	9,12

**Tabla AII.1.** Mapa de dosis correspondiente a la pared norte del irradiador  
(continuación...)

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*$ (10) ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1	2	3	PROMEDIO		
PN31	0,17	0,15	0,17	0,16	0,01	5,09
PN32	0,13	0,15	0,13	0,14	0,00	0,00
PN33	0,12	0,13	0,12	0,12	0,00	0,00
PN34	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	5,59
PN35	0,13	0,13	0,13	0,13	0,01	4,95
PN36	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	4,68
PN37	0,13	0,13	0,13	0,13	0,01	5,59
PN38	0,13	0,12	0,13	0,13	0,00	0,00
PN41	0,12	0,14	0,12	0,13	0,01	4,95
PN42	0,11	0,13	0,11	0,12	0,01	4,95
PN43	0,12	0,12	0,12	0,12	0,01	4,68
PN44	0,13	0,14	0,13	0,13	0,01	9,09
PN45	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	8,66
PN46	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00	0,00
PN47	0,12	0,11	0,12	0,12	0,01	4,95
PN48	0,13	0,12	0,13	0,13	0,01	9,09

**Tabla AII.2.** Mapa de dosis correspondiente a la pared sur del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*$ (10) ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estándar	Coeficiente de variación
	1	2	3	PROMEDIO		
PS1	0,13	0,13	0,11	0,12	0,01	4,95
PS2	0,12	0,12	0,11	0,12	0,01	4,95
PS3	0,15	0,18	0,17	0,17	0,01	4,68
PS4	0,33	0,3	0,3	0,31	0,01	9,09
PS5	0,3	0,29	0,28	0,29	0,01	8,66
PS6	7,42	7,35	7,29	7,35	0,00	0,00
PS7	0,1	0,1	0,11	0,10	0,01	4,95

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1	2	3	PROMEDIO		
PS11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,01	8,33
PS12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,01	4,95
PS13	0,18	0,17	0,16	0,17	0,01	2,86
PS14	0,3	0,25	0,29	0,28	0,06	7,37
PS15	0,2	0,21	0,22	0,21	0,06	9,21
PS16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,04	8,91
PS17	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	4,95
PS18	0,11	0,12	0,12	0,12	0,01	7,69
PS21	0,11	0,12	0,1	0,11	0,01	8,33
PS22	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	5,09
PS23	0,12	0,13	0,11	0,12	0,02	7,22
PS24	0,15	0,13	0,13	0,14	0,02	5,39
PS25	0,15	0,15	0,16	0,15	0,05	9,22
PS26	0,16	0,15	0,15	0,15	0,01	5,59
PS27	0,15	0,13	0,14	0,14	0,01	8,33
PS28	0,15	0,14	0,15	0,15	0,01	8,33
PS31	0,11	0,12	0,1	0,11	0,01	4,95
PS32	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	4,22
PS33	0,12	0,12	0,12	0,12	0,01	9,09
PS34	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	8,33
PS35	0,12	0,14	0,12	0,13	0,00	0,00
PS36	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	8,45
PS37	0,11	0,12	0,1	0,11	0,01	7,14
PS38	0,09	0,09	0,09	0,09	0,01	9,12

**Tabla AII.2.** Mapa de dosis correspondiente a la pared sur del irradiador continuación..

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1			PROMEDIO		
PS41	0,11	0,12	0,11	0,11	0,04	8,91
PS42	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	4,95
PS43	0,12	0,12	0,12	0,12	0,01	7,69
PS44	0,12	0,13	0,11	0,12	0,01	8,33
PS45	0,11	0,13	0,11	0,12	0,01	5,09
PS46	0,15	0,15	0,15	0,15	0,02	7,22
PS47	0,1	0,12	0,11	0,11	0,01	5,09
PS48	0,12	0,11	0,1	0,11	0,02	7,22

**Tabla AII.3.** Mapa de dosis correspondiente a la pared este del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1			PROMEDIO		
PE1	0,13	0,11	0,12	0,12	0,01	8,33
PE2	0,11	0,11	0,12	0,11	0,01	4,95
PE3	0,35	0,34	0,36	0,35	0,01	2,86
PE4	0,75	0,85	0,75	0,78	0,06	7,37
PE5	0,65	0,73	0,61	0,66	0,06	9,21
PE6	0,43	0,43	0,5	0,45	0,04	8,91
PE7	0,1	0,11	0,12	0,11	0,01	4,95
PE8	0,12	0,14	0,13	0,13	0,01	7,69
PE11	0,13	0,12	0,11	0,12	0,01	8,33
PE12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	5,09
PE13	0,25	0,25	0,22	0,24	0,02	7,22
PE14	0,27	0,28	0,3	0,28	0,02	5,39
PE15	0,5	0,57	0,6	0,56	0,05	9,22
PE16	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	5,59
PE17	0,12	0,13	0,11	0,12	0,01	8,33
PE18	0,11	0,13	0,12	0,12	0,01	8,33

**Tabla AII.3.** Mapa de dosis correspondiente a la pared este del irradiador  
(continuación...)

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1	2	3	PROMEDIO		
PE21	0,11	0,1	0,12	0,11	0,01	4,95
PE22	0,13	0,14	0,14	0,14	0,01	4,22
PE23	0,12	0,1	0,11	0,11	0,01	9,09
PE24	0,13	0,12	0,11	0,12	0,01	8,33
PE25	0,12	0,11	0,12	0,12	0,00	0,00
PE26	0,15	0,13	0,13	0,14	0,01	8,45
PE27	0,15	0,13	0,14	0,14	0,01	7,14
PE28	0,12	0,14	0,12	0,13	0,01	9,12
PE31	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	5,09
PE32	0,1	0,1	0,1	0,10	0,00	0,00
PE33	0,1	0,1	0,1	0,10	0,00	0,00
PE34	0,1	0,1	0,11	0,10	0,01	5,59
PE35	0,1	0,12	0,11	0,11	0,01	4,95
PE36	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	4,68
PE37	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	5,59
PE38	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00	0,00
PE41	0,12	0,12	0,11	0,12	0,01	4,95
PE42	0,11	0,12	0,12	0,12	0,01	4,95
PE43	0,13	0,12	0,12	0,12	0,01	4,68
PE44	0,11	0,1	0,12	0,11	0,01	9,09
PE45	0,12	0,14	0,14	0,13	0,01	8,66
PE46	0,11	0,12	0,12	0,12	0,00	0,00
PE47	0,11	0,12	0,1	0,11	0,01	4,95
PE48	0,1	0,12	0,11	0,11	0,01	9,09

**Tabla AII.4.** Mapa de dosis correspondiente a la pared oeste del irradiador

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1			PROMEDIO		
PO1	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	4,95
PO2	0,09	0,09	0,09	0,09	0,01	4,22
PO3	0,32	0,3	0,32	0,31	0,01	9,09
PO4	0,55	0,56	0,55	0,55	0,01	8,33
PO5	0,52	0,53	0,52	0,52	0,00	0,00
PO6	0,15	0,16	0,15	0,15	0,01	8,45
PO7	0,1	0,09	0,1	0,10	0,01	7,14
PO8	0,12	0,1	0,11	0,11	0,01	9,12
PO11	0,1	0,12	0,11	0,11	0,01	5,09
PO12	0,1	0,12	0,11	0,11	0,00	0,00
PO13	0,18	0,16	0,18	0,17	0,00	0,00
PO14	0,36	0,34	0,36	0,35	0,01	5,59
PO15	0,25	0,28	0,25	0,26	0,01	4,95
PO16	0,18	0,21	0,2	0,20	0,01	4,68
PO17	0,13	0,14	0,13	0,13	0,01	5,59
PO18	0,14	0,13	0,14	0,14	0,00	0,00
PO21	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	4,95
PO22	0,12	0,12	0,12	0,12	0,01	4,95
PO23	0,13	0,14	0,13	0,13	0,01	4,68
PO24	0,15	0,17	0,15	0,16	0,01	9,09
PO25	0,17	0,15	0,17	0,16	0,01	8,66
PO26	0,1	0,11	0,12	0,11	0,00	0,00
PO27	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	4,95
PO28	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	9,09
PO31	0,17	0,15	0,17	0,16	0,01	4,95
PO32	0,13	0,12	0,13	0,13	0,01	4,68
PO33	0,12	0,12	0,12	0,12	0,01	5,59
PO34	0,12	0,13	0,12	0,12	0,00	0,00
PO35	0,13	0,14	0,13	0,13	0,01	4,95
PO36	0,12	0,11	0,12	0,12	0,01	4,95



**Tabla AII.4.** Mapa de dosis correspondiente a la pared oeste del irradiador  
(continuación...)

PUNTO	Tasa de dosis $\dot{H}^*_{(10)}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )				Desviación estandar	Coeficiente de variación
	1			PROMEDIO		
PO37	0,13	0,12	0,13	0,13	0,01	4,95
PO38	0,13	0,12	0,13	0,13	0,01	4,68
PO41	0,12	0,11	0,12	0,12	0,01	9,09
PO42	0,11	0,12	0,11	0,11	0,01	8,66
PO43	0,12	0,12	0,12	0,12	0,00	0,00
PO44	0,13	0,13	0,13	0,13	0,01	4,95
PO45	0,1	0,11	0,1	0,10	0,01	9,09
PO46	0,11	0,11	0,11	0,11	0,01	4,95
PO47	0,12	0,13	0,12	0,12	0,01	4,68
PO48	0,13	0,11	0,13	0,12	0,01	9,09



Fecha: 13 de enero de 2012

Dosis ambiental	0,16
NR	Dosis (uSv/h)
1	0,17
2	0,37
3	0,25
4	0,23
5	4,00
6	0,17
7	0,25
14	23,00
12	0,10
10	0,13
13	0,48
11	0,25
9	0,22
8	0,22
15	6,50
16	3,40
18	0,14
17	0,10
12	0,45
20	2,18
22	0,31
19	0,33
23	0,20
25	0,13
24	0,17
26	0,19
27	0,14
28	0,13
31	0,08
30	0,18
29	0,20
32	0,17
33	→ 0,15
34	0,08
36	0,32
35	→ 0,35
37	0,13
38	0,21
66	1,20
65	2,30
64	4,90
63	4,60
62	0,90
56	0,28
57	0,42

Dosis ambiental	0,16
NR	Dosis (uSv/h)
58	5,50
59	2,7
60	18,6
61	0,40
30	0,14
18	0,11
28	0,17
50	0,71
51	1,15
52	8,10
53	4,10
54	22,16
55	0,45
49	0,39
48	2,35
47	2,56
46	0,97
45	0,75
44	0,53
39	1,16
40	1,00
41	5,00
42	5,50
43	2,44

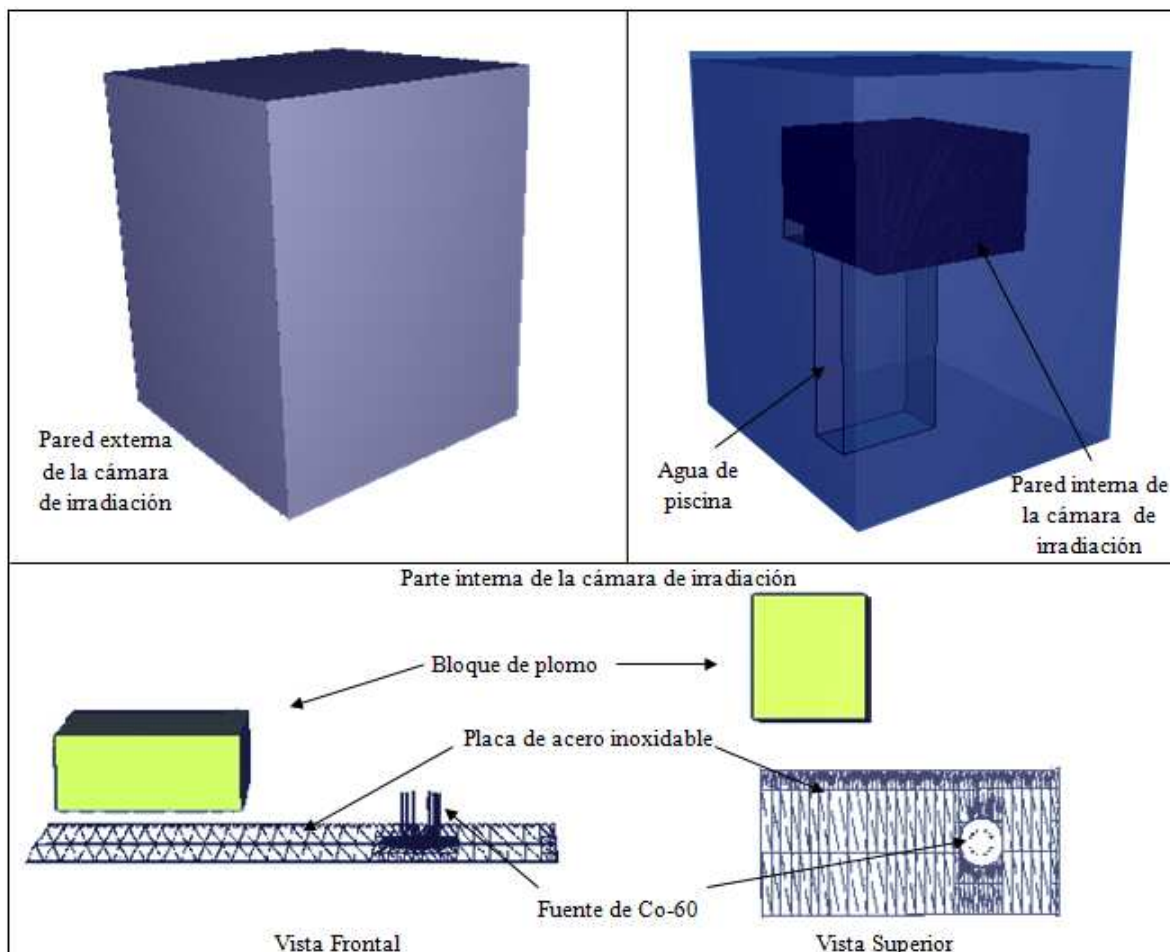
Punto en el techo

Punto en el techo

*Rosa Lante*

## ANEXO IV

### DEFINICIÓN DE LA CÁMARA DE IRRADIACIÓN DE LA FUENTE DE COBALTO – 60



**Figura AIV.1.** Ilustración que representa la definición de la cámara de irradiación de la fuente  
(Gómez, 2012, p.138)

## Modelo digital de la definición de la cámara de irradiación y la fuente de Cobalto – 60

c SIMULACIÓN DE LA DOSIMETRÍA DE LA FUENTE DE COBALTO-60

c cell cards

c

1	316	-8.00	-1	2	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz 1
2	204	-0.001225	-2		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
1						
3	316	-8.00	-3	4	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz 2
4	204	-0.001225	-4		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
2						
5	316	-8.00	-5	6	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz 3
6	204	-0.001225	-6		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
3						
7	316	-8.00	-7	8	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz 4
8	204	-0.001225	-8		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
4						
9	316	-8.00	-9	10	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz 5
10	204	-0.001225	-10		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
5						
11	316	-8.00	-11	12	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
6						
12	204	-0.001225	-12		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
6						
13	316	-8.00	-13	14	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
7						
14	204	-0.001225	-14		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
7						
15	316	-8.00	-15	16	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
8						
16	204	-0.001225	-16		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
8						
17	316	-8.00	-17	18	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
9						
18	204	-0.001225	-18		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
9						
19	316	-8.00	-19	20	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
10						
20	204	-0.001225	-20		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
10						
21	316	-8.00	-21	22	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
11						
22	204	-0.001225	-22		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
11						
23	316	-8.00	-23	24	imp:p=1	\$ Encapsulado Lápiz
12						
24	204	-0.001225	-24		imp:p=1	\$ Región Activa Lápiz
12						

51	100	-4.9	1	-51	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 1
52	100	-4.9	3	-52	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 2
53	100	-4.9	5	-53	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 3
54	100	-4.9	7	-54	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 4
55	100	-4.9	9	-55	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 5
56	100	-4.9	11	-56	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 6
57	100	-4.9	13	-57	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 7
58	100	-4.9	15	-58	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 8
59	100	-4.9	17	-59	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 9
60	100	-4.9	19	-60	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 10
61	100	-4.9	21	-61	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 11
62	100	-4.9	23	-62	imp:p=1	\$ Óxido Lápiz 12
106	122	-1.024	-101	imp:p=1	\$ Celda para tally 6	
116	122	-1.024	-102	imp:p=1	\$ Celda para tally 16	
126	122	-1.024	-103	imp:p=1	\$ Celda para tally 26	
136	122	-1.024	-104	imp:p=1	\$ Celda para tally 36	
146	122	-1.024	-105	imp:p=1	\$ Celda para tally 46	
156	122	-1.024	-106	imp:p=1	\$ Celda para tally 56	
166	122	-1.024	-107	imp:p=1	\$ Celda para tally 66	
176	122	-1.024	-108	imp:p=1	\$ Celda para tally 76	
301	316	-8.00	-301	302	imp:p=1	\$ Placa de acero
inox						
302	204	-0.001225	-302	imp:p=1	\$ Parte interna de la	
fuente						
303	354	-0.998207	-303	imp:p=1	\$ Parte inferior de la	
placa						
304	171	-11.35	-304	imp:p=1	\$ Bloque de plomo	
997	204	-0.001225	-998	#1 #2 #3 #4		
			#5 #6 #7 #8 #9 #10			
			#11 #12 #13 #14 #15			
			#16 #17 #18 #19 #20			
			#21 #22 #23 #24 #106			
			#116 #126 #136 #146			
			#156 #166 #176 #301			
			#302 #304 #211 #212			
			#213 #214 #215 #216			
			#217 #218 #51 #52 #53			
			#54 #55 #56 #57 #58			
			#59 #60 #61 #62	imp:p=1	\$Interior de	
la cámara, Aire						
998	228	-2.35	998	-999	303 #301 #302	imp:p=1 \$Pared de
Concreto						
999	0		999	imp:p=0	\$ Resto de la simulación	
(vacio)						
c surface cards						
1		rcc 9.61 3.98 0 0 0	45.15 0.4025	\$Encapsulado		
Lápiz 1						
2		rcc 9.61 3.98 0 0 0	45.15 0.32	\$Pastillas Lápiz		
1						



55 rcc -7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido  
 Lápiz 5  
 56 rcc -9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido Lápiz  
 6  
 57 rcc -9.61 -3.98 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido Lápiz  
 7  
 58 rcc -7.353 -7.353 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido  
 Lápiz 8  
 59 rcc -3.98 -9.61 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido Lápiz  
 9  
 60 rcc 3.98 -9.61 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido Lápiz  
 10  
 61 rcc 7.353 -7.353 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido  
 Lápiz 11  
 62 rcc 9.61 -3.98 0 0 0 45.15 0.4525 \$Óxido Lápiz  
 12  
 101 rcc 0 100 20 0 0 10 2.25 \$Cilindro para tally 6  
 Norte  
 102 rcc 0 -100 20 0 0 10 2.25 \$Cilindro para tally  
 16 Sur  
 103 rcc 100 0 20 0 0 10 2.25 \$Cilindro para tally  
 26 Este  
 104 rcc -100 0 20 0 0 10 2.25 \$Cilindro para tally  
 36  
 302 rcc 0 0 0 0 0 -0.5 20 \$Parte interna de la  
 fuente  
 303 rpp -200 60 -61 61 -455 -0.5 \$Pared inferior  
 de la placa  
 304 rpp -200 -100 100 200 0 50 \$Bloque de plomo  
 998 rpp -200 200 -200 200 0 260 \$Pared Interna de  
 la Cámara  
 999 rpp -350 350 -350 350 -455 410 \$Pared externa  
 de la cámara

mode p

c Materiales

c

c Aire

m204 7000.04p -0.755636  
 8000.04p -0.231475  
 18000.04p -0.012889

c Concreto ordinario (NBS 03)

m228 1000.04p -0.008485  
 6000.04p -0.050064  
 8000.04p -0.473483  
 12000.04p -0.024183  
 13000.04p -0.036063  
 14000.04p -0.145100  
 16000.04p -0.002970  
 19000.04p -0.001697  
 20000.04p -0.246924



```

        26000.04p -0.011031
c   Acero Inoxidable 316 L
m316  6000.04p -0.000300
        14000.04p -0.010000
        15000.04p -0.000450
        16000.04p -0.000300
        24000.04p -0.170000
        25000.04p -0.020000
        26000.04p -0.653950
        28000.04p -0.120000
        42000.04p -0.025000
c   Agua Líquida
m354  1000.04p -0.111894
        8000.04p -0.888106
c   Plomo
m171  82000.04p -1.000000
c   Vidrio Pirx
m143  5000.04p -0.040064
        8000.04p -0.539562
        11000.04p -0.028191
        13000.04p -0.011644
        14000.04p -0.377220
        19000.04p -0.003321
c   Solución Fricke
m122  1000.04p -0.108259
        7000.04p -0.000027
        8000.04p -0.878636
        11000.04p -0.000022
        16000.04p -0.012968
        17000.04p -0.000034
        26000.04p -0.000054
c   Óxido de Cromo
m100  24000.04p -0.619
        8000.04p -0.381
c
c Definición de la fuente
c
sdef cel=d4 par=2 pos fcel d5 axs=0 0 1 erg=d1 rad=d2
ext=d3
si1 L 1.173 1.332 $ Energía de los gammas en MeV
sp1  0.5 0.5 $ Probabilidad de los gammas
SI2 0 0.32 $ Distribución radial plana
SP2 -21 1
si3  0 30.48 $ Distribución axial plana
sp3  0 1
si4 L 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 $Región Activa
sp4 D 0.079 0.08 0.08 0.08 0.081 0.082 0.083 0.086 0.086
0.087 0.087 0.088 $Probabilidad
ds5 L 9.61 3.98 0
        7.353 7.353 0
        3.98 9.61 0

```

-3.98 9.61 0  
-7.353 7.353 0  
-9.61 3.98 0  
-9.61 -3.98 0  
-7.353 -7.353 0  
-3.98 -9.61 0  
3.98 -9.61 0  
7.353 -7.353 0  
9.61 -3.98 0

**ANEXO V**

**ARCHIVOS DE ENTRADA DESARROLLADOS EN EL  
PROGRAMA MCNP5**

## ANEXO V A

Archivo de entrada del modelo digital M<sub>0</sub>

```

c SIMULACION DE LA DOSIMETRIA DE LA FUENTE DE COBALTO-60
c cell cards
c
  1  316 -8.00      -1 2  imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 1
2  204 -0.001225  -2   imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 1
  3  316 -8.00      -3 4  imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 2
  4  204 -0.001225  -4   imp:p=1 $ Region Activa Lapiz
2
  5  316 -8.00      -5 6  imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 3
  6  204 -0.001225  -6   imp:p=1 $ Region Activa Lapiz
3
  7  316 -8.00      -7 8  imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 4
  8  204 -0.001225  -8   imp:p=1 $ Region Activa Lapiz
4
  9  316 -8.00      -9 10 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 5
10  204 -0.001225  -10  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 5
11  316 -8.00      -11 12 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 6
12  204 -0.001225  -12  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 6
13  316 -8.00      -13 14 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 7
14  204 -0.001225  -14  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 7
15  316 -8.00      -15 16 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 8
16  204 -0.001225  -16  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 8
17  316 -8.00      -17 18 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 9
18  204 -0.001225  -18  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 9
19  316 -8.00      -19 20 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 10
20  204 -0.001225  -20  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 10
21  316 -8.00      -21 22 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 11
22  204 -0.001225  -22  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 11
23  316 -8.00      -23 24 imp:p=1 $ Encapsulado lapiz 12
24  204 -0.001225  -24  imp:p=1 $ Region Activa Lapiz 12
51  100 -4.9        1 -51 imp:p=1 $ Oxido lapiz 1
52  100 -4.9        3 -52 imp:p=1 $ Oxido lapiz 2
53  100 -4.9        5 -53 imp:p=1 $ Oxido lapiz 3
54  100 -4.9        7 -54 imp:p=1 $ Oxido lapiz 4
55  100 -4.9        9 -55 imp:p=1 $ Oxido lapiz 5
56  100 -4.9       11 -56 imp:p=1 $ Oxido lapiz 6
57  100 -4.9       13 -57 imp:p=1 $ Oxido lapiz 7
58  100 -4.9       15 -58 imp:p=1 $ Oxido lapiz 8
59  100 -4.9       17 -59 imp:p=1 $ Oxido lapiz 9
60  100 -4.9       19 -60 imp:p=1 $ Oxido lapiz 10
61  100 -4.9       21 -61 imp:p=1 $ Oxido lapiz 11
62  100 -4.9       23 -62 imp:p=1 $ Oxido lapiz 12
301  316 -8.00      -301 302 imp:p=1 $ Placa de acero
inox
302  204 -0.001225  -302 imp:p=1 $ Parte interna de la
fuente

```

```

303 354 -0.998207 -303 imp:p=1 $ Parte inferior d e la
placa
304 171 -11.35 -304 imp:p=1 $ Bloque de plomo
996 204 -0.001225 -998 #1 #2 #3 #4
#5 #6 #7 #8 #9 #10
#11 #12 #13 #14 #15
#16 #17 #18 #19 #20
#21 #22 #23 #24 #51 #52 #53
#54 #55 #56 #57 #58
#59 #60 #61 #62 imp:p=1 $Interior de
la camara, Aire
105 354 -0.998207 -995 imp:p=1 $ piscina
997 228 -2.35 998 -999 303 #301 #302 imp:p=1
$Pared de Concreto
998 204 -0.001225 999 -997 #105 #104 imp:p=1 $ espacio
libre fuera de la camara
999 0 997 imp:p=0 $ Resto de la
simulacion(vacio)

```

## c surface cards

```

1 rcc 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz 1
2 rcc 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas Lapiz
1
3 rcc 7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz 2
4 rcc 7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 2
5 rcc 3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz 3
6 rcc 3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 3
7 rcc -3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz 4
8 rcc -3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 4
9 rcc -7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.4025
$Encapsulado Lapiz 5
10 rcc -7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 5
11 rcc -9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz 6
12 rcc -9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 6
13 rcc -9.61 -3.98 0 0 0 45.15 0.4025 $Encapsulado
Lapiz7
14 rcc -9.61 -3.98 0 0 0 45.15 0.32 $Pastillas
Lapiz 7
15 rcc -7.353 -7.353 0 0 0 45.15 0.4025
$Encapsulado Lapiz8

```

16	rcc	-7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 8									
17	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz9									
18	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 9									
19	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 10									
20	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 10									
21	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 11									
22	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 11									
23	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 12									
24	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 12									
51	rcc	9.61	3.98	0	0	0	45.15	0.4025	\$Oxido Lapiz 1
52	rcc	7.353	7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
2									
53	rcc	3.98	9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 3
54	rcc	-3.98	9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 4
55	rcc	-7.353	7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
5									
56	rcc	-9.61	3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 6
57	rcc	-9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
7									
58	rcc	-7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido
Lapiz 8									
59	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
9									
60	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
10									
61	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
11									
62	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
12									
301	rpp	-200	70	-61	61	-0.5	0		\$Placa de acero
302	rcc	0	0	0	0	0	-0.5	20	\$Parte interna de la fuente
303	rpp	-200	60	-61	61	-455	-0.5		\$Pared inferior de la placa
304	rpp	-200	-100	100	200	0	50		\$Bloque de plomo
998	rpp	-200	200	-200	200	0	260		\$Pared Interna de la Camara
999	rpp	-350	350	-350	350	-455	410		\$Pared externa de la camara
997	rpp	-1150	700	-650	650	-455	700		\$ aire fuera de la cámara

995 rpp -850 -350 -134 134 -455 -0.5 \$ piscina  
 exterior de la camara

mode p

c Materiales

c

c Aire

m204 7000.04p -0.755636  
 8000.04p -0.231475  
 18000.04p -0.012889

c Concreto ordinario (NBS 03)

m228 1000.04p -0.008485  
 6000.04p -0.050064  
 8000.04p -0.473483  
 12000.04p -0.024183  
 13000.04p -0.036063  
 14000.04p -0.145100  
 16000.04p -0.002970  
 19000.04p -0.001697  
 20000.04p -0.246924  
 26000.04p -0.011031

c Acero Inoxidable 316 L

m316 6000.04p -0.000300  
 14000.04p -0.010000  
 15000.04p -0.000450  
 16000.04p -0.000300  
 24000.04p -0.170000  
 25000.04p -0.020000  
 26000.04p -0.653950  
 28000.04p -0.120000  
 42000.04p -0.025000

c Agua Líquida

m354 1000.04p -0.111894  
 8000.04p -0.888106

c Plomo

m171 82000.04p -1.000000

c Oxido de Cromo

m100 24000.04p -0.619  
 8000.04p -0.381

c

c Definicion de la fuente

c

sdef cel=d4 par=2 pos fcel d5 axs=0 0 1 erg=d1 rad=d2  
 ext=d3

si1 L 1.173 1.332 \$ Energia de los gammas en MeV

sp1 0.5 0.5 \$ Probabilidad de los gammas

SI2 0 0.32 \$ Distribucion radial plana

SP2 -21 1

si3 0 30.48 \$ Distribucion axial plana

sp3 0 1

si4 L 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 \$Region Activa

sp4 D 0.079 0.08 0.08 0.08 0.081 0.082 0.083 0.086 0.086  
 0.087 0.087 0.088 \$Probabilidad

ds5 L 9.61 3.98 0  
 7.353 7.353 0  
 3.98 9.61 0  
 -3.98 9.61 0  
 -7.353 7.353 0  
 -9.61 3.98 0  
 -9.61 -3.98 0  
 -7.353 -7.353 0  
 -3.98 -9.61 0  
 3.98 -9.61 0  
 7.353 -7.353 0  
 9.61 -3.98 0

c Tallies de deposicion de energia

F5:P 350 -350 0 10 \$ Detector PE1  
 F5:P 350 -350 0 10 \$ Detector PE1  
 F15:P 350 -250 0 10 \$ Detector PE2  
 F25:P 350 -150 0 10 \$ Detector PE3  
 F35:P 350 -50 0 10 \$ Detector PE4  
 F45:P 350 50 0 10 \$ Detector PE5  
 F55:P 350 150 0 10 \$ Detector PE6  
 F65:P 350 250 0 10 \$ Detector PE7  
 F75:P 350 350 0 10 \$ Detector PE8  
 F85:P 350 -350 100 10 \$ Detector PE11  
 F95:P 350 -250 100 10 \$ Detector PE12  
 F105:P 350 -150 100 10 \$ Detector PE13  
 F115:P 350 -50 100 10 \$ Detector PE14  
 F125:P 350 50 100 10 \$ Detector PE15  
 F135:P 350 150 100 10 \$ Detector PE16  
 F145:P 350 250 100 10 \$ Detector PE17  
 F155:P 350 350 100 10 \$ Detector PE18  
 F165:P 350 -350 200 10 \$ Detector PE21  
 F175:P 350 -250 200 10 \$ Detector PE22  
 F185:P 350 -150 200 10 \$ Detector PE23  
 F195:P 350 -50 200 10 \$ Detector PE24  
 F205:P 350 50 200 10 \$ Detector PE25  
 F215:P 350 150 200 10 \$ Detector PE26  
 F225:P 350 250 200 10 \$ Detector PE27  
 F235:P 350 350 200 10 \$ Detector PE28  
 F245:P 350 -350 300 10 \$ Detector PE31  
 F255:P 350 -250 300 10 \$ Detector PE32  
 F265:P 350 -150 300 10 \$ Detector PE33  
 F275:P 350 -50 300 10 \$ Detector PE34  
 F285:P 350 50 300 10 \$ Detector PE35  
 F295:P 350 150 300 10 \$ Detector PE36  
 F305:P 350 250 300 10 \$ Detector PE37  
 F315:P 350 350 300 10 \$ Detector PE38  
 F325:P 350 -350 400 10 \$ Detector PE41  
 F335:P 350 -250 400 10 \$ Detector PE42  
 F345:P 350 -150 400 10 \$ Detector PE43



F355:P 350 -50 400 10 \$ Detector PE44  
F365:P 350 50 400 10 \$ Detector PE45  
F375:P 350 150 400 10 \$ Detector PE46  
F385:P 350 250 400 10 \$ Detector PE47  
F395:P 350 350 400 10 \$ Detector PE48  
F405:P -350 -350 0 10 \$ Detector PS1  
F415:P -250 -350 0 10 \$ Detector PS2  
F425:P -150 -350 0 10 \$ Detector PS3  
F435:P -50 -350 0 10 \$ Detector PS4  
F445:P 50 -350 0 10 \$ Detector PS5  
F455:P 150 -350 0 10 \$ Detector PS6  
F465:P 250 -350 0 10 \$ Detector PS7  
F475:P 350 -350 0 10 \$ Detector PS8  
F485:P -350 -350 100 10 \$ Detector PS11  
F495:P -250 -350 100 10 \$ Detector PS12  
F505:P -150 -350 100 10 \$ Detector PS13  
F515:P -50 -350 100 10 \$ Detector PS14  
F525:P 50 -350 100 10 \$ Detector PS15  
F535:P 150 -350 100 10 \$ Detector PS16  
F545:P 250 -350 100 10 \$ Detector PS17  
F555:P 350 -350 100 10 \$ Detector PS18  
F565:p -350 -350 200 10 \$ Detector PS21  
F575:p -250 -350 200 10 \$ Detector PS22  
F585:p -150 -350 200 10 \$ Detector PS23  
F595:p -50 -350 200 10 \$ Detector PS24  
F605:p 50 -350 200 10 \$ Detector PS25  
F615:p 150 -350 200 10 \$ Detector PS26  
F625:p 250 -350 200 10 \$ Detector PS27  
F635:p 350 -350 200 10 \$ Detector PS28  
F645:p -350 -350 300 10 \$ Detector PS31  
F655:p -250 -350 300 10 \$ Detector PS32  
F665:p -150 -350 300 10 \$ Detector PS33  
F675:p -50 -350 300 10 \$ Detector PS34  
F685:p 50 -350 300 10 \$ Detector PS35  
F695:p 150 -350 300 10 \$ Detector PS36  
F705:p 250 -350 300 10 \$ Detector PS37  
F715:p 350 -350 300 10 \$ Detector PS38  
F725:P -350 -350 400 10 \$ Detector PS41  
F735:P -250 -350 400 10 \$ Detector PS42  
F745:P -150 -350 400 10 \$ Detector PS43  
F755:P -50 -350 400 10 \$ Detector PS44  
F765:P 50 -350 400 10 \$ Detector PS45  
F775:P 150 -350 400 10 \$ Detector PS46  
F785:P 250 -350 400 10 \$ Detector PS47  
F795:P 350 -350 400 10 \$ Detector PS48  
F805:P -350 350 0 10 \$ Detector PO1  
F815:P -350 250 0 10 \$ Detector PO2  
F825:P -350 150 0 10 \$ Detector PO3  
F835:P -350 50 0 10 \$ Detector PO4  
F845:P -350 -50 0 10 \$ Detector PO5  
F855:P -350 -150 0 10 \$ Detector PO6

F865:P -350 -250 0 10 \$ Detector P07  
F875:P -350 -350 0 10 \$ Detector P08  
F885:P -350 350 100 10 \$ Detector P011  
F895:P -350 250 100 10 \$ Detector P012  
F905:P -350 150 100 10 \$ Detector P013  
F915:P -350 50 100 10 \$ Detector P014  
F925:P -350 -50 100 10 \$ Detector P015  
F935:P -350 -150 100 10 \$ Detector P016  
F945:P -350 -250 100 10 \$ Detector P017  
F955:P -350 -350 100 10 \$ Detector P018  
F965:P -350 350 200 10 \$ Detector P021  
F975:P -350 250 200 10 \$ Detector P022  
F985:P -350 150 200 10 \$ Detector P023  
F995:P -350 50 200 10 \$ Detector P024  
F1005:P -350 -50 200 10 \$ Detector P025  
F1015:P -350 -150 200 10 \$ Detector P026  
F1025:P -350 -250 200 5 \$ Detector P027  
F1035:P -350 -350 200 5 \$ Detector P028  
F1045:P -350 350 300 5 \$ Detector P031  
F1055:P -350 250 300 5 \$ Detector P032  
F1065:P -350 150 300 5 \$ Detector P033  
F1075:P -350 50 300 5 \$ Detector P034  
F1085:P -350 -50 300 5 \$ Detector P035  
F1095:P -350 -150 300 5 \$ Detector P036  
F1105:P -350 -250 300 5 \$ Detector P037  
F1115:P -350 -350 300 5 \$ Detector P038  
F1125:P -350 350 400 5 \$ Detector P041  
F1135:P -350 250 400 5 \$ Detector P042  
F1145:P -350 150 400 5 \$ Detector P043  
F1155:P -350 50 400 5 \$ Detector P044  
F1165:P -350 -50 400 5 \$ Detector P045  
F1175:P -350 -150 400 5 \$ Detector P046  
F1185:P -350 -250 400 5 \$ Detector P047  
F1195:P -350 -350 400 5 \$ Detector P048  
F1205:P 350 350 0 5 \$ Detector PN1  
F1215:P 250 350 0 5 \$ Detector PN2  
F1225:P 150 350 0 5 \$ Detector PN3  
F1235:P 50 350 0 5 \$ Detector PN4  
F1245:P -50 350 0 5 \$ Detector PN5  
F1255:P -150 350 0 5 \$ Detector PN6  
F1265:P -250 350 0 5 \$ Detector PN7  
F1275:P -350 350 0 5 \$ Detector PN8  
F1285:P 350 350 100 5 \$ Detector PN11  
F1295:P 250 350 100 5 \$ Detector PN12  
F1305:P 150 350 100 5 \$ Detector PN13  
F1315:P 50 350 100 5 \$ Detector PN14  
F1325:P -50 350 100 5 \$ Detector PN15  
F1335:P -150 350 100 5 \$ Detector PN16  
F1345:P -250 350 100 5 \$ Detector PN17  
F1355:P -350 350 100 5 \$ Detector PN18  
F1365:P 350 350 200 5 \$ Detector PN21

F1375:P 250 350 200 5 \$ Detector PN22  
 F1385:P 150 350 200 5 \$ Detector PN23  
 F1395:P 50 350 200 5 \$ Detector PN24  
 F1405:P -50 350 200 5 \$ Detector PN25  
 F1415:P -150 350 200 5 \$ Detector PN26  
 F1425:P -250 350 200 5 \$ Detector PN27  
 F1435:P -350 350 200 5 \$ Detector PN28  
 F1445:P 350 350 300 5 \$ Detector PN31  
 F1455:P 250 350 300 5 \$ Detector PN32  
 F1465:P 150 350 300 5 \$ Detector PN33  
 F1475:P 50 350 300 5 \$ Detector PN34  
 F1485:P -50 350 300 5 \$ Detector PN35  
 F1495:P -150 350 300 5 \$ Detector PN36  
 F1505:P -250 350 300 5 \$ Detector PN37  
 F1515:P -350 350 300 5 \$ Detector PN38  
 F1525:P 350 350 400 5 \$ Detector PN41  
 F1535:P 250 350 400 5 \$ Detector PN42  
 F1545:P 150 350 400 5 \$ Detector PN43  
 F1555:P 50 350 400 5 \$ Detector PN44  
 F1565:P -50 350 400 5 \$ Detector PN45  
 F1575:P -150 350 400 5 \$ Detector PN46  
 F1585:P -250 350 400 5 \$ Detector PN47  
 F1595:P -350 350 400 5 \$ Detector PNEX1  
 F1605:P 450 -350 140 10 \$ Detector PEEEX2  
 F1615:P 450 -250 140 10 \$ Detector PEEEX3  
 F1625:P 450 -150 140 10 \$ Detector PEEEX4  
 F1635:P 450 -50 140 10 \$ Detector PEEEX5  
 F1645:P 450 50 140 10 \$ Detector PEEEX6  
 F1655:P 450 150 100 10 \$ Detector PEEEX7  
 F1665:P 350 250 100 10 \$ Detector PEEEX8  
 F1595:P -350 350 400 5 \$ Detector PNEX1  
 F1605:P 450 -350 140 10 \$ Detector PNEX2  
 F1615:P 450 -250 140 10 \$ Detector PNEX3  
 F1625:P 450 -150 140 10 \$ Detector PNEX4  
 F1635:P 450 -50 140 10 \$ Detector PNEX5  
 F1645:P 450 50 140 10 \$ Detector PNEX6  
 F1655:P 450 150 100 10 \$ Detector PNEX7  
 F1665:P 350 250 100 10 \$ Detector PNEX8  
 F1595:P -350 350 400 5 \$ Detector PSEX1  
 F1605:P 450 -350 140 10 \$ Detector PSEX2  
 F1615:P 450 -250 140 10 \$ Detector PSEX3  
 F1625:P 450 -150 140 10 \$ Detector PSEX4  
 F1635:P 450 -50 140 10 \$ Detector PSEX5  
 F1645:P 450 50 140 10 \$ Detector PSEX6  
 F1655:P 450 150 100 10 \$ Detector PSEX7  
 F1665:P 350 250 100 10 \$ Detector PSEX8

c

c

c Factores de conversión de fluencia de fotones en dosis equivalente ambiental H\*(10).

c Unidades: Sv\*cm<sup>2</sup>

c

de4	0.010	0.015	0.020	0.030	0.040
	0.050	0.060	0.080	0.100	0.150
	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600
	0.800	1.000	1.500	2.000	3.000
	4.000	5.000	6.000	8.000	10.000

c

df4	6.100E-14	8.300E-13	1.050E-12	8.100E-13	6.400E-13
	5.500E-13	5.100E-13	5.300E-13	6.100E-13	8.900E-13
	1.200E-12	1.800E-12	2.380E-12	2.930E-12	3.440E-12
	4.380E-12	5.200E-12	6.900E-12	8.600E-12	1.110E-11
	1.340E-11	1.550E-11	1.760E-11	2.160E-11	2.560E-11

nps 1000000

## ANEXO V B

Archivo de entrada del modelo digital M<sub>4</sub>

C SIMULACION DE LA DOSIMETRIA DE LA FUENTE DE COBALTO-60

c cell cards

c

1	316	-8.00		-1	2	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 1
2	204	-0.001225	-2			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 1
3	316	-8.00		-3	4	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 2
4	204	-0.001225	-4			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz
2							
5	316	-8.00		-5	6	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 3
6	204	-0.001225	-6			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz
3							
7	316	-8.00		-7	8	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 4
8	204	-0.001225	-8			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz
4							
9	316	-8.00		-9	10	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 5
10	204	-0.001225	-10			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 5
11	316	-8.00		-11	12	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 6
12	204	-0.001225	-12			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 6
13	316	-8.00		-13	14	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 7
14	204	-0.001225	-14			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 7
15	316	-8.00		-15	16	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 8
16	204	-0.001225	-16			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 8
17	316	-8.00		-17	18	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 9
18	204	-0.001225	-18			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 9
19	316	-8.00		-19	20	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 10
20	204	-0.001225	-20			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 10
21	316	-8.00		-21	22	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 11
22	204	-0.001225	-22			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 11
23	316	-8.00		-23	24	imp:p=1	\$ Encapsulado lapiz 12
24	204	-0.001225	-24			imp:p=1	\$ Region Activa Lapiz 12
51	100	-4.9	1	-51		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 1
52	100	-4.9	3	-52		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 2
53	100	-4.9	5	-53		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 3
54	100	-4.9	7	-54		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 4
55	100	-4.9	9	-55		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 5
56	100	-4.9	11	-56		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 6
57	100	-4.9	13	-57		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 7
58	100	-4.9	15	-58		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 8
59	100	-4.9	17	-59		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 9
60	100	-4.9	19	-60		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 10
61	100	-4.9	21	-61		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 11
62	100	-4.9	23	-62		imp:p=1	\$ Oxido lapiz 12
63	228	-2.35	-63	998	#301 #302 #303	imp:p=2	\$primera
capa de cemento							
64	228	-2.35	-64	63	#301 #302 #303	imp:p=64	
\$segunda capa de cemento							

67 228 -0.001225 -67 64 #301 #302 #303 imp:p=1024  
 \$tercera capa de cemento  
 68 228 -2.35 -68 67 #301 #302 #303 imp:p=65536  
 \$cuarta capa de cemento  
 301 316 -8.00 -301 302 imp:p=1 \$ Placa de acero  
 inox  
 302 204 -0.001225 -302 imp:p=1 \$ Parte interna de la  
 fuente  
 303 354 -0.998207 -303 imp:p=1 \$ Parte inferior d e la  
 placa  
 304 171 -11.35 -304 imp:p=1 \$ Bloque de plomo  
 996 204 -0.001225 -998 #1 #2 #3 #4  
 #5 #6 #7 #8 #9 #10  
 #11 #12 #13 #14 #15  
 #16 #17 #18 #19 #20  
 #21 #22 #23 #24 #51 #52 #53  
 #54 #55 #56 #57 #58  
 #59 #60 #61 #62 imp:p=1 \$Interior de  
 la camara, Aire  
 105 354 -0.998207 -995 imp:p=67108864 \$ piscina  
 997 228 -2.35 68 -999 #301 #302 #303  
 imp:p=2097152 \$quinta capa Pared de Concreto  
 998 204 -0.001225 999 -997 #105 imp:p=67108864 \$  
 espacio libre fuera de la camara  
 999 0 997 imp:p=0 \$ Resto de la  
 simulacion(vacio)

c surface cards

1 rcc 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4025 \$Encapsulado  
 Lapiz 1  
 2 rcc 9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.32 \$Pastillas Lapiz  
 1  
 3 rcc 7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.4025 \$Encapsulado  
 Lapiz 2  
 4 rcc 7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.32 \$Pastillas  
 Lapiz 2  
 5 rcc 3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.4025 \$Encapsulado  
 Lapiz 3  
 6 rcc 3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.32 \$Pastillas  
 Lapiz 3  
 7 rcc -3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.4025 \$Encapsulado  
 Lapiz 4  
 8 rcc -3.98 9.61 0 0 0 45.15 0.32 \$Pastillas  
 Lapiz 4  
 9 rcc -7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.4025  
 \$Encapsulado Lapiz 5  
 10 rcc -7.353 7.353 0 0 0 45.15 0.32 \$Pastillas  
 Lapiz 5  
 11 rcc -9.61 3.98 0 0 0 45.15 0.4025 \$Encapsulado  
 Lapiz 6

12	rcc	-9.61	3.98	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 6									
13	rcc	-9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz7									
14	rcc	-9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 7									
15	rcc	-7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado Lapiz8
Lapiz 8									
16	rcc	-7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 8									
17	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz9									
18	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 9									
19	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 10									
20	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 10									
21	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 11									
22	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 11									
23	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4025	\$Encapsulado
Lapiz 12									
24	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.32	\$Pastillas
Lapiz 12									
51	rcc	9.61	3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 1
52	rcc	7.353	7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
2									
53	rcc	3.98	9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 3
54	rcc	-3.98	9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 4
55	rcc	-7.353	7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
5									
56	rcc	-9.61	3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz 6
57	rcc	-9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
7									
58	rcc	-7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido
Lapiz 8									
59	rcc	-3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
9									
60	rcc	3.98	-9.61	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
10									
61	rcc	7.353	-7.353	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
11									
62	rcc	9.61	-3.98	0	0	0	45.15	0.4525	\$Oxido Lapiz
12									
63	rpp	-230	230	-230	230	-455	290		\$sespesor1 30 cm
64	rpp	-260	260	-260	260	-455	320		\$sespesor2 30 cm
67	rpp	-290	290	-290	290	-455	350		\$sespesor3 30 cm
68	rpp	-320	320	-320	320	-455	380		\$sespesor4 30 cm
301	rpp	-200	70	-61	61	-0.5	0		\$Placa de acero

302            rcc 0 0 0 0 0 -0.5 20    \$Parte interna de la  
 fuente  
 303            rpp -200 60 -61 61 -455 -0.5    \$Pared inferior de  
 la placa  
 304            rpp -200 -100 100 200 0 50    \$Bloque de plomo  
 998            rpp -200 200 -200 200 0 260    \$Pared Interna de  
 la Camara  
 999            rpp -350 350 -350 350 -455 410    \$Pared externa de  
 la camara  
 997            rpp -1150 700 -650 650 -455 700    \$ aire fuera de  
 la cámar  
 995            rpp -850 -350 -134 134 -455 -0.5    \$ piscina  
 exterior de la camara

mode p

c Materiales

c

c    Aire

m204    7000.04p -0.755636  
          8000.04p -0.231475  
          18000.04p -0.012889

c    Concreto REGULAR

m228    1000.04p -0.010000  
          8000.04p -0.0532000  
          11000.04p -0.021365  
          13000.04p -0.034000  
          14000.04p -0.337000  
          20000.04p -0.044000  
          26000.04p -0.014000

c    Acero Inoxidable 316 L

m316    6000.04p -0.000300  
          14000.04p -0.010000  
          15000.04p -0.000450  
          16000.04p -0.000300  
          24000.04p -0.170000  
          25000.04p -0.020000  
          26000.04p -0.653950  
          28000.04p -0.120000  
          42000.04p -0.025000

c    Agua Líquida

m354    1000.04p -0.111894  
          8000.04p -0.888106

c    Plomo

m171 82000.04p -1.000000

c Oxido de Cromo

m100 24000.04p -0.619  
          8000.04p -0.381

c

c Definicion de la fuente

c



```

sdef cel=d4 par=2 pos fcel d5 axs=0 0 1 erg=d1 rad=d2
ext=d3
si1 L 1.173 1.332 $ Energia de los gammas en MeV
sp1 0.5 0.5 $ Probabilidad de los gammas
SI2 0 0.32 $ Distribucion radial plana
SP2 -21 1
si3 0 30.48 $ Distribucion axial plana
sp3 0 1
si4 L 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 $Region Activa
sp4 D 0.079 0.08 0.08 0.08 0.081 0.082 0.083 0.086 0.086
0.087 0.087 0.088 $Probabilidad
ds5 L 9.61 3.98 0
7.353 7.353 0
3.98 9.61 0
-3.98 9.61 0
-7.353 7.353 0
-9.61 3.98 0
-9.61 -3.98 0
-7.353 -7.353 0
-3.98 -9.61 0
3.98 -9.61 0
7.353 -7.353 0
9.61 -3.98 0

c Tallies de deposicion de energia
F5:P 350 -350 0 5 $ Detector PE1
F15:P 350 -250 0 5 $ Detector PE2
F25:P 350 -150 0 5 $ Detector PE3
F35:P 350 -50 0 5 $ Detector PE4
F45:P 350 50 0 5 $ Detector PE5
F55:P 350 150 0 5 $ Detector PE6
F65:P 350 250 0 5 $ Detector PE7
F75:P 350 350 0 5 $ Detector PE8
F85:P 350 -350 100 5 $ Detector PE11
F95:P 350 -250 100 5 $ Detector PE12
F105:P 350 -150 100 5 $ Detector PE13
F115:P 350 -50 100 5 $ Detector PE14
F125:P 350 50 100 5 $ Detector PE15
F135:P 350 150 100 5 $ Detector PE16
F145:P 350 250 100 5 $ Detector PE17
F155:P 350 350 100 5 $ Detector PE18
F165:P 350 -350 200 5 $ Detector PE21
F175:P 350 -250 200 5 $ Detector PE22
F185:P 350 -150 200 5 $ Detector PE23
F195:P 350 -50 200 5 $ Detector PE24
F205:P 350 50 200 5 $ Detector PE25
F215:P 350 150 200 5 $ Detector PE26
F225:P 350 250 200 5 $ Detector PE27
F235:P 350 350 200 5 $ Detector PE28
F245:P 350 -350 300 5 $ Detector PE31
F255:P 350 -250 300 5 $ Detector PE32
F265:P 350 -150 300 5 $ Detector PE33

```

F275:P 350 -50 300 5 \$ Detector PE34  
F285:P 350 50 300 5 \$ Detector PE35  
F295:P 350 150 300 5 \$ Detector PE36  
F305:P 350 250 300 5 \$ Detector PE37  
F315:P 350 350 300 5 \$ Detector PE38  
F325:P 350 -350 400 5 \$ Detector PE41  
F335:P 350 -250 400 5 \$ Detector PE42  
F345:P 350 -150 400 5 \$ Detector PE43  
F355:P 350 -50 400 5 \$ Detector PE44  
F365:P 350 50 400 5 \$ Detector PE45  
F375:P 350 150 400 5 \$ Detector PE46  
F385:P 350 250 400 5 \$ Detector PE47  
F395:P 350 350 400 5 \$ Detector PE48  
F325:P 350 -350 400 10 \$ Detector PE41  
F335:P 350 -250 400 10 \$ Detector PE42  
F345:P 350 -150 400 10 \$ Detector PE43  
F355:P 350 -50 400 10 \$ Detector PE44  
F365:P 350 50 400 10 \$ Detector PE45  
F375:P 350 150 400 10 \$ Detector PE46  
F385:P 350 250 400 10 \$ Detector PE47  
F395:P 350 350 400 10 \$ Detector PE48  
F405:P -350 -350 0 10 \$ Detector PS1  
F415:P -250 -350 0 10 \$ Detector PS2  
F425:P -150 -350 0 10 \$ Detector PS3  
F435:P -50 -350 0 10 \$ Detector PS4  
F445:P 50 -350 0 10 \$ Detector PS5  
F455:P 150 -350 0 10 \$ Detector PS6  
F465:P 250 -350 0 10 \$ Detector PS7  
F475:P 350 -350 0 10 \$ Detector PS8  
F485:P -350 -350 100 10 \$ Detector PS11  
F495:P -250 -350 100 10 \$ Detector PS12  
F505:P -150 -350 100 10 \$ Detector PS13  
F515:P -50 -350 100 10 \$ Detector PS14  
F525:P 50 -350 100 10 \$ Detector PS15  
F535:P 150 -350 100 10 \$ Detector PS16  
F545:P 250 -350 100 10 \$ Detector PS17  
F555:P 350 -350 100 10 \$ Detector PS18  
F565:p -350 -350 200 10 \$ Detector PS21  
F575:p -250 -350 200 10 \$ Detector PS22  
F585:p -150 -350 200 10 \$ Detector PS23  
F595:p -50 -350 200 10 \$ Detector PS24  
F605:p 50 -350 200 10 \$ Detector PS25  
F615:p 150 -350 200 10 \$ Detector PS26  
F625:p 250 -350 200 10 \$ Detector PS27  
F635:p 350 -350 200 10 \$ Detector PS28  
F645:p -350 -350 300 10 \$ Detector PS31  
F655:p -250 -350 300 10 \$ Detector PS32  
F665:p -150 -350 300 10 \$ Detector PS33  
F675:p -50 -350 300 10 \$ Detector PS34  
F685:p 50 -350 300 10 \$ Detector PS35  
F695:p 150 -350 300 10 \$ Detector PS36

F705:p 250 -350 300 10 \$ Detector PS37  
F715:p 350 -350 300 10 \$ Detector PS38  
F725:P -350 -350 400 10 \$ Detector PS41  
F735:P -250 -350 400 10 \$ Detector PS42  
F745:P -150 -350 400 10 \$ Detector PS43  
F755:P -50 -350 400 10 \$ Detector PS44  
F765:P 50 -350 400 10 \$ Detector PS45  
F775:P 150 -350 400 10 \$ Detector PS46  
F785:P 250 -350 400 10 \$ Detector PS47  
F795:P 350 -350 400 10 \$ Detector PS48  
F805:P -350 350 0 10 \$ Detector PO1  
F815:P -350 250 0 10 \$ Detector PO2  
F825:P -350 150 0 10 \$ Detector PO3  
F835:P -350 50 0 10 \$ Detector PO4  
F845:P -350 -50 0 10 \$ Detector PO5  
F855:P -350 -150 0 10 \$ Detector PO6  
F865:P -350 -250 0 10 \$ Detector PO7  
F875:P -350 -350 0 10 \$ Detector PO8  
F885:P -350 350 100 10 \$ Detector PO11  
F895:P -350 250 100 10 \$ Detector PO12  
F905:P -350 150 100 10 \$ Detector PO13  
F915:P -350 50 100 10 \$ Detector PO14  
F925:P -350 -50 100 10 \$ Detector PO15  
F935:P -350 -150 100 10 \$ Detector PO16  
F945:P -350 -250 100 10 \$ Detector PO17  
F955:P -350 -350 100 10 \$ Detector PO18  
F965:P -350 350 200 10 \$ Detector PO21  
F975:P -350 250 200 10 \$ Detector PO22  
F985:P -350 150 200 10 \$ Detector PO23  
F995:P -350 50 200 10 \$ Detector PO24  
F1005:P -350 -50 200 10 \$ Detector PO25  
F1015:P -350 -150 200 10 \$ Detector PO26  
F1025:P -350 -250 200 5 \$ Detector PO27  
F1035:P -350 -350 200 5 \$ Detector PO28  
F1045:P -350 350 300 5 \$ Detector PO31  
F1055:P -350 250 300 5 \$ Detector PO32  
F1065:P -350 150 300 5 \$ Detector PO33  
F1075:P -350 50 300 5 \$ Detector PO34  
F1085:P -350 -50 300 5 \$ Detector PO35  
F1095:P -350 -150 300 5 \$ Detector PO36  
F1105:P -350 -250 300 5 \$ Detector PO37  
F1115:P -350 -350 300 5 \$ Detector PO38  
F1125:P -350 350 400 5 \$ Detector PO41  
F1135:P -350 250 400 5 \$ Detector PO42  
F1145:P -350 150 400 5 \$ Detector PO43  
F1155:P -350 50 400 5 \$ Detector PO44  
F1165:P -350 -50 400 5 \$ Detector PO45  
F1175:P -350 -150 400 5 \$ Detector PO46  
F1185:P -350 -250 400 5 \$ Detector PO47  
F1195:P -350 -350 400 5 \$ Detector PO48  
F1205:P 350 350 0 5 \$ Detector PN1

F1215:P 250 350 0 5 \$ Detector PN2  
F1225:P 150 350 0 5 \$ Detector PN3  
F1235:P 50 350 0 5 \$ Detector PN4  
F1245:P -50 350 0 5 \$ Detector PN5  
F1255:P -150 350 0 5 \$ Detector PN6  
F1265:P -250 350 0 5 \$ Detector PN7  
F1275:P -350 350 0 5 \$ Detector PN8  
F1285:P 350 350 100 5 \$ Detector PN11  
F1295:P 250 350 100 5 \$ Detector PN12  
F1305:P 150 350 100 5 \$ Detector PN13  
F1315:P 50 350 100 5 \$ Detector PN14  
F1325:P -50 350 100 5 \$ Detector PN15  
F1335:P -150 350 100 5 \$ Detector PN16  
F1345:P -250 350 100 5 \$ Detector PN17  
F1355:P -350 350 100 5 \$ Detector PN18  
F1365:P 350 350 200 5 \$ Detector PN21  
F1375:P 250 350 200 5 \$ Detector PN22  
F1385:P 150 350 200 5 \$ Detector PN23  
F1395:P 50 350 200 5 \$ Detector PN24  
F1405:P -50 350 200 5 \$ Detector PN25  
F1415:P -150 350 200 5 \$ Detector PN26  
F1425:P -250 350 200 5 \$ Detector PN27  
F1435:P -350 350 200 5 \$ Detector PN28  
F1445:P 350 350 300 5 \$ Detector PN31  
F1455:P 250 350 300 5 \$ Detector PN32  
F1465:P 150 350 300 5 \$ Detector PN33  
F1475:P 50 350 300 5 \$ Detector PN34  
F1485:P -50 350 300 5 \$ Detector PN35  
F1495:P -150 350 300 5 \$ Detector PN36  
F1505:P -250 350 300 5 \$ Detector PN37  
F1515:P -350 350 300 5 \$ Detector PN38  
F1525:P 350 350 400 5 \$ Detector PN41  
F1535:P 250 350 400 5 \$ Detector PN42  
F1545:P 150 350 400 5 \$ Detector PN43  
F1555:P 50 350 400 5 \$ Detector PN44  
F1565:P -50 350 400 5 \$ Detector PN45  
F1575:P -150 350 400 5 \$ Detector PN46  
F1585:P -250 350 400 5 \$ Detector PN47  
F1595:P -350 350 400 5 \$ Detector PNEX1  
F1605:P 450 -350 140 10 \$ Detector PEEEX2  
F1615:P 450 -250 140 10 \$ Detector PEEEX3  
F1625:P 450 -150 140 10 \$ Detector PEEEX4  
F1635:P 450 -50 140 10 \$ Detector PEEEX5  
F1645:P 450 50 140 10 \$ Detector PEEEX6  
F1655:P 450 150 100 10 \$ Detector PEEEX7  
F1665:P 350 250 100 10 \$ Detector PEEEX8  
F1595:P -350 350 400 5 \$ Detector PNEX1  
F1605:P 450 -350 140 10 \$ Detector PNEX2  
F1615:P 450 -250 140 10 \$ Detector PNEX3  
F1625:P 450 -150 140 10 \$ Detector PNEX4  
F1635:P 450 -50 140 10 \$ Detector PNEX5

```

F1645:P 450 50 140 10 $ Detector PNEX6
F1655:P 450 150 100 10 $ Detector PNEX7
F1665:P 350 250 100 10 $ Detector PNEX8
F1595:P -350 350 400 5 $ Detector PSEX1
F1605:P 450 -350 140 10 $ Detector PSEX2
F1615:P 450 -250 140 10 $ Detector PSEX3
F1625:P 450 -150 140 10 $ Detector PSEX4
F1635:P 450 -50 140 10 $ Detector PSEX5
F1645:P 450 50 140 10 $ Detector PSEX6
F1655:P 450 150 100 10 $ Detector PSEX7
F1665:P 350 250 100 10 $ Detector PSEX8

```

c

c

c Factores de conversión de fluencia de fotones en dosis  
equivalente ambiental H\*(10).

c Unidades: Sv\*cm<sup>2</sup>

c

```

de0      0.010 0.015 0.020 0.030 0.040
          0.050 0.060 0.080 0.100 0.150
          0.200 0.300 0.400 0.500 0.600
          0.800 1.000 1.500 2.000 3.000
          4.000 5.000 6.000 8.000 10.000

```

c

```

df0      6.100E-14 8.300E-13 1.050E-12 8.100E-13 6.400E-13
          5.500E-13 5.100E-13 5.300E-13 6.100E-13 8.900E-13
          1.200E-12 1.800E-12 2.380E-12 2.930E-12 3.440E-12
          4.380E-12 5.200E-12 6.900E-12 8.600E-12 1.110E-11
          1.340E-11 1.550E-11 1.760E-11 2.160E-11 2.560E-11

```

nps 1000000

print 120 20

## ANEXO VI

### TÉCNICA DE REDUCCIÓN DE VARIANZA DE LA DIVISIÓN DE LA GEOMETRÍA

En modelos digitales donde muy pocas partículas de la fuente alcanzan al detector o la zona de recuento se puede forzar a la partícula a que alcance la región de conteo asignando a cada partícula un peso y al ser la partícula forzada hacia esta región el peso de la partícula se reduce de manera tal que el promedio de los pesos que alcanzan al detectores es igual al esperado en la simulación análoga o método básico.

Además las técnicas de reducción de varianza reducen el tiempo de cómputo requerido para obtener resultados con suficiente precisión en un considerable menor tiempo.

La técnica de reducción de varianza de la división de la geometría es considerada un método de control de población, ya que se requiere dividir la geometría y mantener más o menos constante la población de partículas que atraviesan estas superficies. Cada celda en la configuración de la geometría se le asigna una importancia (imp) El número asignado debe ser proporcional al valor estimado de población de partículas en la celda.

El output del programa contiene más información para ayudar al usuario a comprender el muestreo de la población.

Las técnicas de reducción de varianza mejoran la toma de muestras de las partículas, trabajan conjuntamente sin alterar una con otra, en la tabla de la figura de mérito indica cuando el muestreo de partículas es pobre.

**ANEXO VII**

**MAPA DE DOSIS AL CONTACTO DE LAS PAREDES DEL  
IRRADIADOR OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIÓN EN EL  
PROGRAMA MCNP5 AL CONSIDERAR UNA ACTIVIDAD DE  
100 000 Ci**

**TablaAVII.1** Mapa de dosis correspondiente a la pared norte del irradiador al considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math>(<math>\mu</math>Sv/h)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu</math>Sv/h)</b>
PN1	6,00	PN25	6,00
PN2	7,66	PN26	6,00
PN3	13,05	PN27	6,00
PN4	6,00	PN28	6,00
PN5	6,00	PN31	6,00
PN6	10,59	PN32	7,66
PN7	6,00	PN33	6,00
PN8	15,90	PN34	6,00
PN11	6,00	PN35	6,00
PN12	6,00	PN36	6,00
PN13	10,59	PN37	6,00
PN14	6,00	PN38	6,00
PN15	6,00	PN41	6,00
PN16	15,90	PN42	6,00
PN17	6,00	PN43	6,00
PN18	19,48	PN44	6,00
PN21	6,00	PN45	6,00
PN22	6,00	PN46	6,00
PN23	6,00	PN47	6,00
PN24	6,00	PN48	6,00

**TablaA VII.2.** Mapa de dosis correspondiente a la pared sur del irradiadoral considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math>(<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
PS1	6,00	PS25	7,66
PS2	6,00	PS26	7,66
PS3	7,66	PS27	6,00
PS4	15,90	PS28	7,66
PS5	15,90	PS31	6,00
PS6	351,67	PS32	6,00
PS7	6,00	PS33	6,00
PS8	6,00	PS34	6,00
PS11	6,00	PS35	6,00
PS12	6,00	PS36	6,00
PS13	7,66	PS37	6,00
PS14	10,59	PS38	6,00
PS15	10,59	PS41	6,00
PS16	6,00	PS42	6,00
PS17	6,00	PS43	6,00
PS18	6,00	PS44	6,00
PS21	6,00	PS45	6,00
PS22	6,00	PS46	7,66
PS23	6,00	PS47	6,00
PS24	6,00	PS48	6,00



**TablaAVII.3.** Mapa de dosis correspondiente a la pared este del irradiadoral considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math>(<math>\mu</math>Sv/h)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu</math>Sv/h)</b>
PE1	6,00	PE25	6,00
PE2	6,00	PE26	6,00
PE3	15,90	PE27	6,00
PE4	39,61	PE28	6,00
PE5	29,94	PE31	6,00
PE6	19,48	PE32	6,00
PE7	6,00	PE33	6,00
PE8	6,00	PE34	6,00
PE11	6,00	PE35	6,00
PE12	6,00	PE36	6,00
PE13	10,59	PE37	6,00
PE14	13,05	PE38	6,00
PE15	23,64	PE41	6,00
PE16	6,00	PE42	6,00
PE17	6,00	PE43	6,00
PE18	6,00	PE44	6,00
PE21	6,00	PE45	6,00
PE22	6,00	PE46	6,00
PE23	6,00	PE47	6,00
PE24	6,00	PE48	6,00

**TablaAVII.4.** Mapa de dosis correspondiente a la pared oeste del irradiadoral considerar una actividad de 100 000 Ci

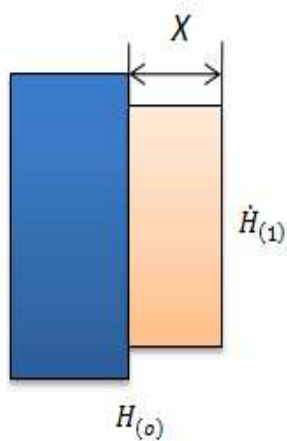
<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math>(<math>\mu</math>Sv/h)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu</math>Sv/h)</b>
PE1	6,00	PE25	7,66
PE2	6,00	PE26	6,00
PE3	13,05	PE27	6,00
PE4	24,13	PE28	6,00
PE5	24,13	PE31	7,66
PE6	7,66	PE32	6,00
PE7	6,00	PE33	6,00
PE8	6,00	PE34	6,00
PE11	6,00	PE35	6,00
PE12	6,00	PE36	6,00
PE13	7,66	PE37	6,00
PE14	15,90	PE38	6,00
PE15	13,05	PE41	6,00
PE16	10,59	PE42	6,00
PE17	6,00	PE43	6,00
PE18	6,00	PE44	6,00
PE21	6,00	PE45	6,00
PE22	6,00	PE46	6,00
PE23	6,00	PE47	6,00
PE24	7,66	PE48	6,00

**TablaAIX.4.** Mapa de dosis correspondiente al techo del irradiadoral considerar una actividad de 100 000 Ci

<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math>(<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Tasa de dosis <math>\dot{H}^*_{(10)}</math> (<math>\mu\text{Sv/h}</math>)</b>
T1	13,05	T25	351,67
T2	19,48	T26	351,67
T3	19,48	T27	57,01
T4	10,59	T28	19,48
T5	10,59	T31	23,64
T6	10,59	T32	39,61
T7	19,48	T33	57,01
T8	39,61	T34	57,01
T11	86,31	T35	39,61
T12	86,31	T36	23,64
T13	57,01	T37	13,05
T14	15,90	T38	19,48
T15	23,64	T41	19,48
T16	57,01	T37	19,48
T17	39,61	T37	23,64
T18	23,64	T37	19,48
T21	19,48		
T22	19,48		
T23	19,48		
T24	133,82		

## ANEXO VIII

### CÁLCULO DEL BLINDAJE AUXILIAR



$$\dot{H}_{(1)} = \dot{H}_{(o)} e^{-\mu x} \longrightarrow X_1$$

Factor de acumulación

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$\dot{H}_{(1)} = \dot{H}_{(o)} e^{-\mu x} \cdot B \longrightarrow X_2$$



PARED ESTE (OFICINA)				Dosis 0.5 uSv/h		Dosis 10 uSv/h	
	actividad actual 2072.1 Ci (22/07/2013)	actividad 100 000 Ci		Espesor		Espesor cm	
PUNTO	Tasa de dosis uSv/h	Dato MCNP	Tasa de dosis uSv/h	Pb cm	pb pulgadas	Pb	Hormigón
PE1	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE2	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE3	0,33	5,97E-25	15,90	5,09858	2,01	0,6833538	3,4344854
PE4	0,82	1,49E-24	39,61	6,4441	2,54	2,0288717	10,196959
PE5	0,62	1,12E-24	29,94	6,03162	2,37	1,6163928	8,1238704
PE6	0,40	7,31E-25	19,48	5,39793	2,13	0,9826979	4,9389666
PE7	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE8	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE11	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE12	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE13	0,22	3,97E-25	10,59	4,49926	1,77	0,0840336	0,4223467
PE14	0,27	4,90E-25	13,05	4,80707	1,89	0,3918444	1,969381
PE15	0,49	8,87E-25	23,64	5,68327	2,24	1,2680461	6,373106
PE16	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE17	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE18	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE21	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE22	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE23	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE24	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE25	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE26	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE27	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE28	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE31	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE32	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE33	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE34	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE35	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE36	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0
PE37	0,12	2,25E-25	6,00	3,6635	1,44	0	0

## ANEXO IX

### CATÁLOGO DE LÁMINAS DE PLOMO



Radiation Protection Products uses only the purest lead available for our Sheet Lead and Lead Bricks. Absolutely no refining takes place at our facility, making us one of the cleanest, most environmentally friendly radiation shielding providers in the industry, providing you with the highest quality sheet lead available.



If you have any questions about the Sheet Lead we can provide, please contact Radiation Protection Products.

### NOMINAL SHEET LEAD SIZES AND WEIGHTS\*

Actual Thickness	Pounds Per Sq. Ft.	App. Thickness in inches	
		Decimal	Fraction
	1	.0156	1/64 - 5mm
	1 1/2	.0234	1/128
	2	.0312	1/32
	2 1/2	.0391	5/128 - 1.0 mm
	3	.0469	3/64
	3 1/2	.0547	7/128
	4	.0625	1/16 - 1.50mm
	5	.0781	5/64 - 2.1mm
	6	.0837	3/32 - 2.5mm
	7 1/2	.1250	1/8
	10	.1563	5/32
	12	.1875	3/16
	14	.2188	7/32
	15	.2500	1/4
	20	.3553	1/5
	24	.4000	2/5
	30	.5000	1/2
	40	.6667	2/3
	60	1.000	1

*\*The weights given apply to common lead only. Other types of lead, such as antimonial or hard lead, weigh slightly less for a given thickness.*