



T  
502-82  
JIM  
C.2  
D-31545

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DEL LITORAL**

**INSTITUTO DE CIENCIAS FISICAS**

**SOCIEDAD DE LUCHA CONTRA EL CANCER  
DEL ECUADOR (SOLCA)  
INSTITUTO ONCOLOGICO NACIONAL  
"Dr. Juan Tanca Marengo"**

**DEPARTAMENTO DE FISICA MEDICA  
Y SEGURIDAD RADIOLOGICA**

**MAESTRIA RESIDENCIA EN FISICA MEDICA**

**Tesis para la obtención del Grado de:**

**MAGISTER EN FISICA MEDICA**

**"Metodología para la verificación de la dosis planeada en  
pacientes a irradiarse con campos asimétricos regulares  
mediante aceleradores lineales"**

Presentada por:  
**Ernesto Jiménez Sotomayor**

Guayaquil - Ecuador  
Septiembre del 2002

## AGRADECIMIENTO



A la ***Dra. Rosalía Durán S.*** por su acertada dirección y apoyo permanente para la realización de este trabajo. Al ***Dr. Juan Carlos Celi*** quien originalmente me propuso el presente tema de tesis. A cada uno de los miembros y amigos del ***Departamento de Física Médica y Seguridad Radiológica*** por su siempre desinteresada colaboración. A los ***Directivos del Instituto Oncológico Nacional "Dr. Juan Tanca Marengo"***, representados en la persona del ***Sr. Dr. Gustavo Calderón Von Buchwald***, Presidente de la Institución, por la confianza en mi depositada.





*A mi esposa e hijas*

*A mis padres  
y hermanos*

## TRIBUNAL DE GRADUACION



Dra. Rosalía Durán Sarduy  
Directora de Tesis



M.C. Eduardo Molina Grazziani



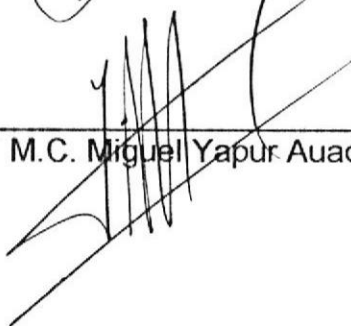
M.C. Florencio Pinela Contreras



Dr. Edy Ayala Amaya



Dr. Manuel Contreras Rojas

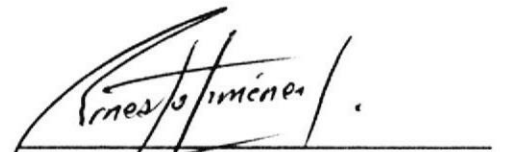


M.C. Miguel Yapur Auad

## DECLARACIÓN EXPRESA



"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL y al INSTITUTO ONCOLOGICO NACIONAL "Dr. Juan Tanca Marengo".



Fís. Ernesto Jiménez Sotomayor



## RESUMEN

En éste trabajo se implementa un método rutinario para calcular las tasas de dosis en campos regulares asimétricos con o sin cuña; y en última instancia, las unidades monitoras de los planes de tratamiento con haces de rayos x de 6 y 18 MV con un acelerador lineal Mevatron K. Se encuentra un formalismo para el cálculo de tasas de dosis y se determinan experimentalmente los factores pertinentes al mismo, para lo cual se utilizan únicamente razones de dosis en el eje central.

## INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>TRIBUNAL DE GRADUACION</b>	<b>iv</b>
<b>DECLARACION EXPRESA</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>vi</b>
<b>INDICE GENERAL</b>	<b>vii</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>xi</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>xiv</b>
<b>INDICE DE APENDICES</b>	<b>xviii</b>
<b>INDICE DE ABREVIATURAS</b>	<b>xix</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. Marco teórico para la dosimetría de campos asimétricos</b>	<b>7</b>
1.1 Generalidades: Producción y características del haz de radiación	7
1.1.1 Producción de fotones por bremsstrahlung.	10
1.1.2 Efectos del diseño del blanco.	11
1.1.3 Absorbente de electrones.	13
1.1.4 Filtro aplanador	14



1.1.5	Cámara para monitoreo del haz.	17
1.1.6	Colimadores	17
1.2	Colimación simétrica y colimación asimétrica. Implicaciones dosimétricas.	20
1.3	Principales métodos para considerar la variación en la calidad del haz	22
1.3.1	Por mediciones de coeficientes de atenuación en configuración de haz estrecho	22
1.3.2	Método del factor de corrección de dispersión	26
1.3.3	Método del perfil primario.	28

## CAPITULO II

### 2. Formalismo para el cálculo de las tasas de dosis en campos asimétricos regulares

2.1	Razones fuera del centro del haz.	31
2.1.1	Factor del perfil primario y factor de frontera	32
2.1.1.1	Factor de perfil primario.	33
2.1.1.2	Factor de frontera.	33
2.1.2	Factor de perfil de cuña.	36
2.2	Corrección del método de cálculo del <i>POCR</i>	39
2.2.1	Dispersión en el colimador.	39



2.2.2	Factor de dispersión total	43
2.2.3	Perfiles del centro de campo.	44
2.2.4	Método de corrección de borde de campo para obtener los <i>POCR</i> .	46
2.3	Formalismo para el cálculo de la dosis en un punto cualquiera de un campo asimétrico regular.	51

### CAPITULO III

<b>3.</b>	<b>Instrumentos de medición y resultados experimentales.</b>	<b>57</b>
3.1	Condiciones de medición.	57
3.2	Factor de dispersión en el colimador y en el maniquí $S_{c,p}$	61
3.3	Razones tejido maniquí <i>TPR</i>	62
3.4	Factores de borde de campo <i>FEC</i>	64
3.5	Factores del perfil primario <i>POCR</i>	66
3.6	Factores de frontera <i>BF</i>	68
3.7	Factores de perfil de cuña <i>WPF</i>	70



### CAPITULO IV

<b>4.</b>	<b>Verificación y discusión de los resultados experimentales</b>	<b>73</b>
4.1	Generación de perfiles para campos asimétricos	

	basados en las tablas calculadas.	73
4.1.1	Perfiles para campos asimétricos abiertos	75
4.1.2	Perfiles para campos asimétricos con cuña	80
4.2	Tasas de dosis.	84
4.2.1	Campos abiertos	84
4.2.2	Campos con cuñas	93
4.2.3	Campos con bloqueo doble	95
4.3	Discusión de los resultados	96
<b>Conclusiones</b>		<b>99</b>
<b>Sugerencias y recomendaciones</b>		<b>103</b>
<b>APENDICES</b>		<b>106</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>140</b>







## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla I</b>	Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados para fotones de 6 MV.	77
<b>Tabla II</b>	Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados para fotones 18 MV.	78
<b>Tabla III</b>	Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados en campos con cuñas para fotones de 6 MV.	81
<b>Tabla IV</b>	Máximas diferencias encontradas entre los perfiles de dosis medidos y calculados en campos con cuñas para fotones de 18 MV.	82
<b>Tabla V</b>	Discrepancias promedio entre las tasas de dosis calculadas por el formalismo propuesto y los cálculos del sistema de planificación Helax para campos abiertos.	92
<b>Tabla VI</b>	Mediciones y cálculos de las tasas de dosis en campos hemibloqueados con cuñas en puntos fuera del eje central. En las dos últimas columnas se incluyen los cálculos efectuados con el planificador Helax.	94
<b>Tabla VII</b>	Mediciones y cálculos de las tasas de dosis en campos con bloqueo doble. En las dos últimas columnas se incluyen los cálculos efectuados con el planificador Helax.	96
<b>Tabla B.I</b>	Factores de dispersión del colimador y del maniquí $S_{c,p}$ para 6 y 18 MV como una función del lado del campo	117

	cuadrado S.	
<b>Tabla C.I</b>	Factores de borde de campo para 6 MV y 18 MV para el campo de 40x40 cm <sup>2</sup>	119
<b>Tabla D.I</b>	Factores de perfil primario para 6 MV y 18 MV en función de la profundidad $d$ y de la distancia al eje del colimador.	121
<b>Tabla E.I</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 6 MV a la profundidad de 1.5 cm	123
<b>Tabla E.II</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 6 MV a la profundidad de 5 cm	124
<b>Tabla E.III</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 6 MV a la profundidad de 10 cm	125
<b>Tabla E.IV</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 6 MV a la profundidad de 20 cm	126
<b>Tabla E.V</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 18 MV a la profundidad de 3 cm	127
<b>Tabla E.VI</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 18 MV a la profundidad de 5 cm	128
<b>Tabla E.VII</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 18 MV a la profundidad de 10 cm	129
<b>Tabla E.VIII</b>	Factores de frontera $BF(s,d,wxh)$ para 18 MV a la profundidad de 20 cm	130
<b>Tabla F.I</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 6 MV y cuña de 15°	132
<b>Tabla F.II</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 6 MV y cuña de 30°	133
<b>Tabla F.III</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 6 MV y cuña de	134

	45°.	
<b>Tabla F.IV</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 6 MV y cuña de 60°.	135
<b>Tabla F.V</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 18 MV y cuña de 15°.	136
<b>Tabla F.VI</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 18 MV y cuña de 30°.	137
<b>Tabla F.VII</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 18 MV y cuña de 45°.	138
<b>Tabla F.VIII</b>	Factores de perfil de cuña $W(l,d)$ para 18 MV y cuña de 60°.	139





## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Cálculos de tiempo de tratamiento para $^{60}\text{Co}$ con el sistema de planificación Helax.	3
<b>Figura 1.2</b>	Discrepancia en el cálculo de las UM con el planificador Helax respecto a los cálculos manuales	3
<b>Figura 1.1</b>	Principales componentes de la cabeza del Mevatron K	8
<b>Figura 1.2</b>	Perfiles transversales a las profundidades de $d_{max}$ , 10 cm y 20 cm para un campo de $40 \times 40 \text{ cm}^2$	16
<b>Figura 1.3</b>	Fotografía del colimador multiláminas del Mevatron K y vista BEV de los colimadores.	19
<b>Figura 1.4</b>	Esquema para determinar experimentalmente el índice de calidad fuera del eje central; y, variación del índice de calidad $I_q(r)$ con la distancia al eje del colimador, para distintos haces de fotones.	24
<b>Figura 2.1</b>	Vista de un campo asimétrico dual y definición de los parámetros de los factores de frontera $BF$	35
<b>Figura 2.2</b>	Esquema para representar a los parámetros geométricos de un campo asimétrico para determinar $S_c$ , el cual se define para un campo cuadrado de lado $l$ , y a distancia fuente isocentro $DFI$ .	40
<b>Figura 2.3</b>	Esquema para representar los parámetros geométricos del haz desde una vista BEV para el caso de campos asimétricos duales	41
<b>Figura 2.4</b>	Dosis relativas en aire para campos cuadrados tanto para configuraciones simétricas como asimétricas.	42

<b>Figura 2.5</b>	Mediciones de dosis relativa en maniquí de poliestireno para campos cuadrados tanto para configuraciones simétricas como asimétricas.	44
<b>Figura 2.6</b>	Esquema para la definición del <i>FEC</i>	46
<b>Figura 2.7</b>	Esquema para deducir la razón de dosis $D(d,S')/D(d,S)$ , en un punto sobre el eje central del colimador ubicado en el isocentro ( <i>DFI</i> ), por efecto del cambio de tamaño de campo desde <i>S</i> a <i>S'</i>	47
<b>Figura 2.8</b>	Configuración para la medición de perfiles diagonales $OCR(d,r,40)$	49
<b>Figura 2.9</b>	Esquema para el cálculo de la tasa de dosis en maniquí a partir de la tasa de dosis en aire en las condiciones de referencia.	53
<b>Figura 2.10</b>	Esquema para el cálculo de la tasa de dosis en aire en función de la tasa de dosis en el maniquí, y para el cálculo del factor de dispersión del colimador $S_c(S_R \rightarrow S'_T)$	54
<b>Figura 3.1</b>	Fotografías de los componentes básicos del sistema de dosimetría relativa.	59
<b>Figura 3.2</b>	Factor de dispersión en el colimador y en el maniquí para las energías de 6 MV y 18 MV	62
<b>Figura 3.3</b>	Razones tejido maniquí en función del lado <i>S</i> del campo cuadrado para 6 MV y 18 MV.	63
<b>Figura 3.4</b>	Factores de corrección de borde de campo $FEC(d,x,40)$ como una función de la desviación <i>x</i> desde el eje de rotación del colimador	65
<b>Figura 3.5</b>	Comparación entre los perfiles diagonales para campos	66



	simétricos de 40x40 cm <sup>2</sup> , y los perfiles primarios calculados por el método <i>FEC</i> , para fotones de 6 MV y 18 MV	
<b>Figura 3.6</b>	Factores de frontera <i>BF</i> para rayos x de 6 MV como una función de la distancia del borde de campo <i>s</i> , profundidad y tamaño de campo.	69
<b>Figura 3.7</b>	Factores de frontera <i>BF</i> para rayos x de 18 MV como una función de la distancia del borde de campo <i>s</i> , profundidad y tamaño de campo.	70
<b>Figura 3.8</b>	Factores de perfil de cuña para fotones de 6 MV en función de la distancia lateral <i>l</i> medida desde el eje central del colimador.	71
<b>Figura 3.9</b>	Factores de perfil de cuña para fotones de 18 MV en función de la distancia lateral <i>l</i> medida desde el eje central del colimador.	72
<b>Figura 4.1</b>	Regiones o zonas del haz de radiación según el TG 53 (AAPM)	74
<b>Figura 4.2</b>	Perfiles para campos asimétricos con energía de 6 MV medidos a distancia fuente superficie ( <i>SSD</i> ) de 95 cm.	76
<b>Figura 4.3</b>	Perfiles para campos asimétricos con la energía de 18 MV medidos a distancia fuente superficie ( <i>SSD</i> ) de 90 cm.	79
<b>Figura 4.4</b>	Perfiles para cuñas con la energía de 6 MV, con <i>SSD</i> = 95 cm y a una profundidad de 5 cm.	81
<b>Figura 4.5</b>	Perfiles para cuñas obtenidos con la energía de 18 MV, con <i>SSD</i> = 90 cm y a una profundidad de 5 cm.	83
<b>Figura 4.6</b>	Comparación entre las tasas de dosis medidas, las	86

	calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica isocéntrica ( <i>DFI</i> ).	
<b>Figura 4.7</b>	Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica fija ( <i>SSD</i> ).	87
<b>Figura 4.8</b>	Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica isocéntrica ( <i>DFI</i> ).	90
<b>Figura 4.9</b>	Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica fija ( <i>SSD</i> ).	91
<b>Figura A.1</b>	Esquema para la definición del <i>PDP</i>	107
<b>Figura A.2</b>	Esquema para la definición del <i>TAR</i>	108
<b>Figura A.3</b>	Esquemas para las definiciones del <i>TPR</i> y <i>TMR</i>	112
<b>Figura A.4</b>	Esquema para determinar la relación entre el <i>PDP</i> y el <i>TMR</i>	113



## INDICE DE APENDICES

<b>Apéndice A:</b>	Razones de dosis en el eje central	105
<b>A.1</b>	Porcentaje de dosis en profundidad ( <i>PDP</i> )	107
<b>A.2</b>	Razón tejido aire ( <i>TAR</i> )	108
<b>A.2.1</b>	Factor de retrodispersión ( <i>BSF</i> )	110
<b>A.3</b>	Razón dispersión – aire ( <i>SAR</i> )	110
<b>A.4</b>	Razón tejido – maniquí ( <i>TPR</i> ) y razón tejido – máximo ( <i>TMR</i> ).	111
<b>A.5</b>	Relación entre el <i>PDP</i> y el <i>TMR</i>	113
<b>Apéndice B:</b>	Factores de dispersión del colimador y maniqui	116
<b>Apéndice C:</b>	Tablas de factores de borde de campo <i>FEC(d,l,40)</i>	118
<b>Apéndice D:</b>	Tablas de perfiles primarios <i>POCR(d,r)</i>	120
<b>Apéndice E:</b>	Tablas de factores de frontera <i>BF(s,d,w×h)</i>	122
<b>Apéndice F:</b>	Tablas de factores de perfil de cuña <i>WPF(l,d)</i>	131







## INDICE DE ABREVIATURAS

$BF$	Factor de frontera
$BSF$	Factor de retrodispersión
$CAX$	Eje del colimador
$COF$	Centro del campo
$d$	Profundidad de tratamiento o de cálculo en el maniquí
$D_{aire}$	Dosis en aire
$D_{as,P}$	Dosis en el punto $P$ para un campo asimétrico.
$\dot{D}_{asim}$	Tasa de dosis en agua para un campo asimétrico
$\dot{D}_{sim}$	Tasa de dosis en agua para un campo simétrico

$\dot{D}_{AIR}$	Tasa de dosis en aire
$DFI$	Distancia fuente isocentro de radiación (100 cm)
$d_{max}$	Profundidad de dosis máxima
$D_{max}$	Dosis máxima
$d_{ref}$	Profundidad de referencia
$f$	Distancia fuente superficie del maniquí (cualquiera)
$FCP$	Perfil del centro del campo
$FEC$	Factor de corrección de borde de campo.
$f_R$	Distancia de referencia entre la fuente y la cámara
$f_T$	Distancia entre la fuente y el punto de tratamiento
$HVL$	Calidad del haz expresada como la capa hemirreductora en centímetros de agua.
$I_a(r)$	Índice de calidad a la distancia $r$ desde el eje del colimador
$OAF$	Factor fuera del eje en aire
$OCR$	Razón fuera del centro del campo o fuera del eje del colimador
$PDP$	Porcentaje de dosis en profundidad
$POCR$	Factor de perfil primario.
$r$	Distancia desde el eje del colimador
$s$	Distancia desde la frontera del campo
$SAR$	Razón dispersión – aire.



$S_c$	Factor de dispersión del colimador
$S_{c,p}$	Factor de dispersión del colimador y maniquí
$S_p$	Factor de dispersión del maniquí
$S_R$	Tamaño de campo a la profundidad de referencia
$SSD$	Distancia fuente superficie fija (100 cm para el Mevatron K)
$S_T$	Tamaño de campo a la profundidad de tratamiento
$S'_T$	Tamaño del campo de tratamiento al nivel de la distancia de referencia.
$TAR$	Razón tejido aire.
$TMR$	Razón tejido – máximo
$TPR$	Razón tejido – maniquí
$(W)OCR$	Razón fuera del eje central para un campo abierto o con cuña





## INTRODUCCION

Un colimador de mordazas asimétricas tiene una o más mordazas que pueden moverse independientemente de las demás. Esto permite el bloqueo de una porción del campo de un lado sin afectar a la configuración de la mordaza opuesta.

Este rasgo encuentra muchas aplicaciones clínicas. Puede ser utilizado para cambiar asimétricamente las dimensiones del campo, ajuste de campos adyacentes y también de hemibloqueos que permiten eliminar la divergencia del haz en la unión de campos. Aunque estas funciones tradicionalmente se han efectuado con protecciones de cerrobend colocadas sobre parrillas, las mordazas independientes permiten reducir ostensiblemente el tiempo de posicionamiento del paciente y además evita que el tecnólogo médico manipule bloques pesados. (7), (17), (20).

Normalmente, tanto los cálculos de dosis como las distribuciones de isodosis requieren de datos básicos que se miden en condiciones de colimación simétrica. Sin embargo, una configuración de mordazas asimétricas, produce cambios en la dosis en profundidad que no pueden predecirse con facilidad (22)

El propósito de este trabajo es, establecer un procedimiento que permita calcular de manera práctica la tasa de dosis en un punto cualquiera dentro del campo asimétrico y en última instancia determinar las unidades monitoras en los planes de tratamiento; esto, como parte de los procedimientos de control de calidad que se llevan a cabo en el Departamento de Física Médica y Seguridad Radiológica del Instituto Oncológico Nacional, previo a la ejecución del plan de tratamiento.

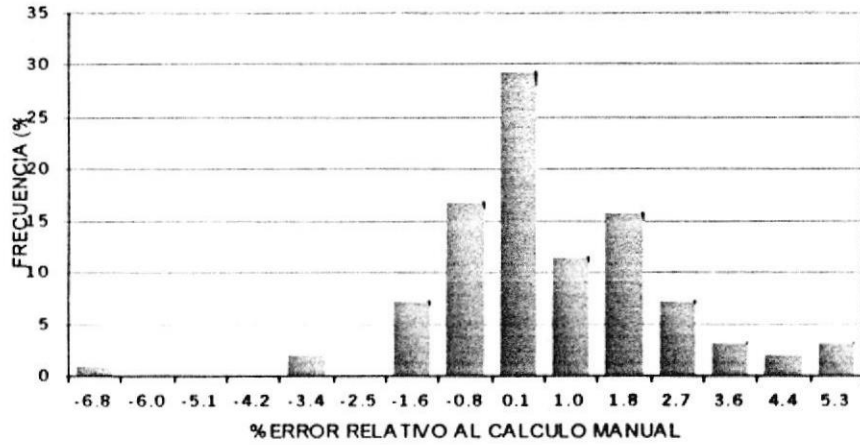
La necesidad de que el Departamento de Física Médica disponga de tal procedimiento surge fundamentalmente por lo siguiente:

En un estudio interno realizado en el Departamento arriba mencionado, a fin de establecer las discrepancias entre los cálculos "manuales" de las unidades de monitor (y tiempos de tratamiento) y los cálculos realizados por el sistema de planificación Helax (Helax AB, Uppsala, Suecia), tal como lo establece el protocolo de control de calidad IAEA-TECDOC-1151 (15); se encontró que, de 50 pacientes planeados para tratamiento con  $^{60}\text{Co}$  con campos simétricos, las discrepancias alcanzadas entre ambos cálculos en un punto sobre el eje central del colimador fueron del 6.8%, con una desviación estándar de la muestra del 3.8%. La distribución correspondiente se muestra en la figura I.1.



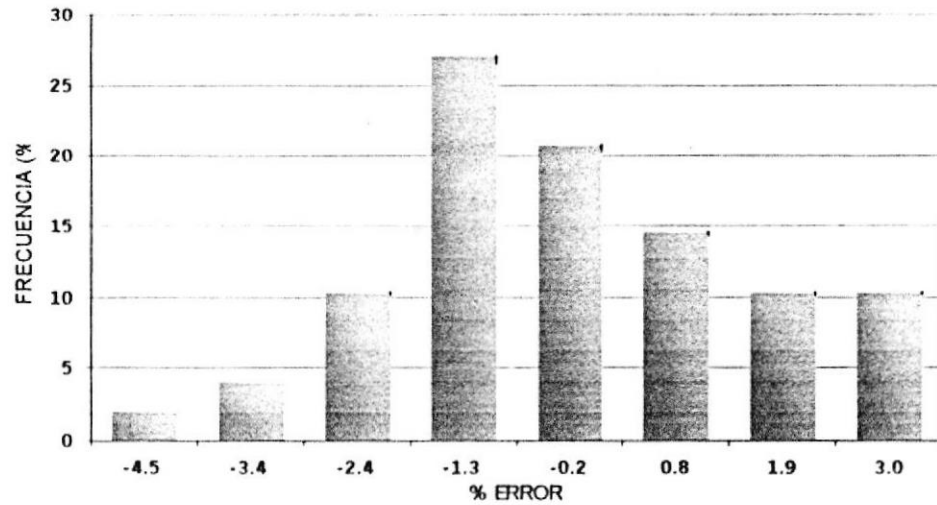


**CALCULOS DE TIEMPO DE TRATAMIENTO PARA Co-60 CON EL HELAX**



**Figura I1**

**DISCREPANCIA EN EL CALCULO DE LAS UM CON EL HELAX RESPECTO A LOS CALCULOS MANUALES**



**Figura I.2**

En el caso de pacientes a tratarse con campos simétricos en puntos sobre el eje del colimador y rayos x de 6 y 18 MV (cincuenta en total), se encontraron

discrepancias menos pronunciadas que con  $^{60}\text{Co}$  entre los cálculos manuales de las unidades monitoras y los que efectúa el planificador Helax, pues ellas no sobrepasaron del 4.5% con una desviación estándar de la muestra del 1.9% tal como se representa en la figura I.2:

Es de acotar que para dicho estudio no se discriminaron entre los planes de tratamiento efectuados con simulación convencional y planes con simulación tridimensional, pues en la primera el planificador asume que la densidad de todos los tejidos es igual a la unidad mientras que, en el segundo caso el planificador corrige sus cálculos por inhomogeneidad (17). Así pues, muchas de las discrepancias mostradas en las figuras I.1 e I.2 entre los tiempos de tratamiento o unidades monitoras calculados por el sistema de planificación Helax y, aquellos calculados mediante el uso de las tablas obtenidas experimentalmente (cálculo manual) y que caracterizan a cada calidad de radiación, se puede atribuir a la inhomogeneidad, la cual no se considera en los cálculos manuales. Sin embargo, al inhabilitar esta opción de cálculo en el planificador los acuerdos no mejoraron en la mayor parte de los casos en más del 1%, salvo en aquellos casos en que los campos irradiados involucran volúmenes considerables de tejido óseo o tejido pulmonar. Por lo tanto, estas discrepancias son atribuibles a la precisión del algoritmo de cálculo del sistema de planificación.



Estos resultados previos hacen necesario que se establezca un método de cálculo de tasas de dosis en campos de tipo asimétrico ya sea en puntos sobre el eje central o fuera del mismo, por lo que se debe desarrollar un formalismo de aplicación rutinaria.

Las configuraciones de campos asimétricos son muy frecuentes en situaciones clínicas tales como en técnicas de irradiación de mama, donde los campos tangenciales aplicados son hemibloqueados y el punto de cálculo de la dosis no se encuentra sobre el eje del colimador. Lo propio ocurre en campos supraclaviculares donde se requieren protecciones centrales y la prescripción de la dosis es en el ápex de la axila (4), (22), (23), (24), (27), (35).

Esta tesis ha sido estructurada de la siguiente manera:

En la parte inicial se aborda la parte teórica que justifica el formalismo a utilizar, previamente se hace una aproximación a métodos alternativos. Seguidamente se hace una descripción de la instrumentación empleada en la adquisición de las mediciones así como las condiciones en que éstas se efectuaron, luego se representan gráficamente los resultados y, finalmente, se los emplea para calcular tasas de dosis para distintas configuraciones de campos asimétricos regulares abiertos o con cuñas, que se comparan tanto con los valores





experimentales como con los cálculos efectuados por el planificador Helax. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de este estudio, en las que se incluye toda la experiencia asimilada a lo largo de este trabajo.



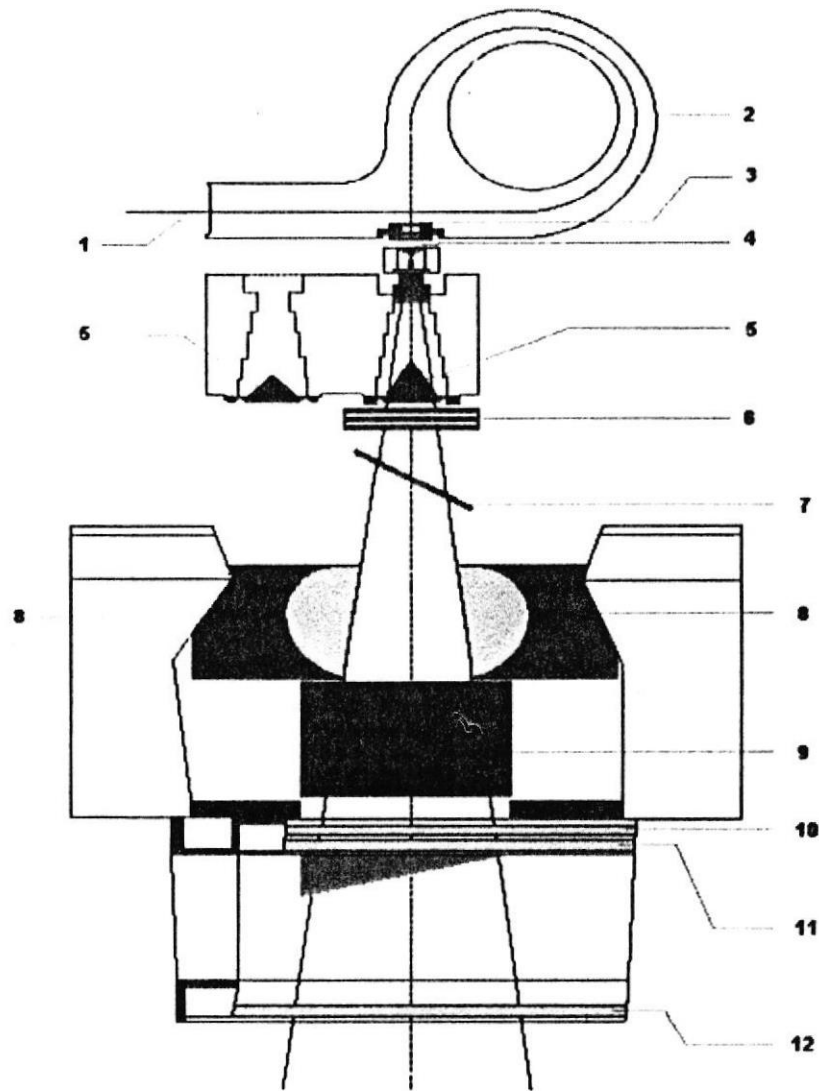
## CAPITULO I

### 1. MARCO TEORICO PARA LA DOSIMETRÍA DE CAMPOS ASIMÉTRICOS

#### 1.1 Generalidades: Producción y características del haz de radiación

Cuando el haz primario de electrones sale de la guía onda, éste se encuentra definido por algunos parámetros: corriente del haz, energía promedio de los electrones, dispersión energética promedio de los electrones, diámetro del haz, dispersión angular, ancho del pulso y frecuencia del pulso. Los valores de dichos parámetros están determinados por la guía de onda y estructura aceleradora.





**Figura 1.1:** Principales componentes de la cabeza del Mevatron K. 1. Haz de electrones que emerge de la guía de onda. 2. Campo magnético para cambiar la trayectoria del haz de electrones en  $270^\circ$ . 3. Ventana de salida del haz de electrones. 4. El blanco, donde se generan fotones por bremsstrahlung. 5. Filtros aplanadores, uno para cada energía de fotones. 6. Cámara de monitoreo para verificación electrónica del haz. 7. Espejo para posicionar ópticamente el campo de radiación. 8. Mordazas o colimadores superiores (Y). 9. Colimador multilaminado (X). 10. Retícula para ubicar ópticamente el centro del campo. 11. Cuña. 12. Parrilla portabloques.

La primera modificación del haz primario se produce cuando el haz atraviesa un campo magnético (conocido como *bending magnet*) que le induce a seguir una trayectoria curva de 270° con el fin de enfocarlo al haz, inicialmente paralelo, en un punto perpendicular a la dirección inicial. (Figura 1.1)

Una vez que el haz deja la ventana de salida y dependiendo del modo de operación del acelerador: fotones o electrones, éste pasa por otros componentes. En el modo de fotones el haz pasa a través de la ventana de la guía onda, el blanco de rayos x (*target*), el absorbente de electrones, el filtro aplanador, compensador, cámara monitora y los colimadores secundarios o mordazas. Para el modo de electrones, el haz pasa a través de la ventana de salida, una lámina dispersora primaria, una lámina dispersora secundaria, la cámara monitora y finalmente el haz queda definido por las mordazas y el aplicador para electrones. En este último caso la dispersión en aire es muy significativa (16),(31).

En cada paso de este proceso el haz se contamina con radiación indeseable, y su promedio de energía se va degradando.

A continuación se hará una breve referencia del efecto que produce cada uno de estos componentes sobre el haz primario de electrones.



### 1.1.1 Producción de fotones por bremsstrahlung.

Como se indicó anteriormente, el haz creado por la guía de onda es un haz de electrones, y con él se crea el de fotones.

Para crear el haz de fotones, se permite que los electrones de alta energía impacten en un blanco denso, donde, por un proceso de interacción entre los electrones que inciden a alta velocidad y los núcleos del blanco, los electrones pierden su energía en forma de fotones. Este efecto es llamado bremsstrahlung (11), (24).

La eficiencia en la producción de bremsstrahlung en un blanco de espesor y material dados es empíricamente proporcional a la energía máxima del electrón elevado a la potencia 2.7, por lo que cuando la energía de los electrones incidentes se incrementa, el número de rayos x producidos aumenta extremadamente rápido, mientras que a bajas energías la producción de unos pocos rayos x viene a ser más problemática pues se requiere de una alta corriente de electrones para obtener una baja tasa de dosis (36). En un típico acelerador dual de fotones (tal como el Mevatron K), la corriente del haz para el modo de baja energía puede ser tanto como 15 veces el valor de la corriente de alta energía (36)



La naturaleza de la distribución de los fotones depende del número atómico del material del blanco. Otra consecuencia del bremsstrahlung es el ensanchamiento de la distribución espectral. Los rayos x no son monocromáticos, sino que tienen una distribución de intensidad que depende de la energía, cuyo pico se produce aproximadamente a 0.3 veces el valor máximo de la energía incidente del electrón, y por lo tanto, la máxima energía de los fotones no es más alta que la máxima energía incidente de los electrones. (36)

Puesto que el haz de fotones resultante tiene un pico agudo, cuya mayor intensidad es a lo largo de la dirección de incidencia del haz de electrones que a un ángulo fuera del mismo, y tomando en cuenta que para fines clínicos se requiere de un haz de fotones que tenga una distribución de intensidad uniforme sobre un área extensa, es necesario insertar dentro de él un componente denominado filtro aplanador, el cual permite la atenuación diferencial del haz en función del ángulo. (11), (24).

### 1.1.2 Efectos del diseño del blanco.



Hay dos factores que son importantes: el material del blanco y su espesor. El blanco debe ser diseñado de tal manera que se obtenga suficiente eficiencia en

la producción de bremsstrahlung, amplia dispersión angular media de los rayos x, y un espectro que varíe tanto como sea posible hacia las más altas energías. La producción del bremsstrahlung varía como el cuadrado del número atómico del material blanco ( $Z^2$ ), por lo que resultan apropiados los materiales de mayor número atómico (11). El Mevatron K utiliza blancos de oro ( $Z=79$ ) o tantalio ( $Z=73$ ), los cuales difieren muy poco en lo que a calidad del haz se refiere, pero difieren notablemente en la eficiencia para producir rayos x (36)

El espesor del blanco por otro lado disminuye la eficiencia y la dispersión angular, pero en cambio permite mejorar el espectro lo que desde el punto de vista clínico representa dosis en superficie más bajas. (3).

El perfil del haz, es una medición de la intensidad del haz en función de la distancia desde el eje central del haz, es aproximadamente una gaussiana antes de alcanzar el filtro aplanador. El perfil es altamente dependiente de la energía de los electrones incidentes en el blanco. El ángulo subtendido por las intersecciones de los puntos del 50% de la dosis máxima ( $\theta_{1/2}$ ), decrece con el incremento de la energía, y se describe aproximadamente por la fórmula empírica  $\theta_{1/2} = 30 (E_{e,max})^{0.65}$  ( $E_{e,max}$  expresada en MeV). De esta forma un pequeño cambio en la energía produce un cambio considerable en el ángulo de



dispersión. Así por ejemplo, para energías entre 21 MeV a 25 MeV la media del ángulo de dispersión se contrae en un 12%. (11), (24), (36)

En términos prácticos, la envolvente de dispersión determina la naturaleza del filtro aplanador, del cual se hace referencia en el literal 1.1.4. Si el haz es muy estrecho se requerirá que el filtro también lo sea, lo cual hace que el diseño, ajuste y posicionamiento del filtro sea extremadamente crítico, por lo que el sistema se vuelve menos confiable. La solución a esto es incrementar el espesor del blanco, que en el caso del Mevatron K es de 0.401 cm, esto permite aumentar el ángulo promedio de dispersión, aunque lleve consigo una degradación del espectro y un aumento en la contaminación por neutrones creados en el blanco. (36)

### 1.1.3 Absorbente de electrones.



Es el siguiente componente luego del blanco. Cuando este último es delgado un porcentaje de los electrones incidentes pasa sin interactuar con los núcleos, por lo que es necesario insertar en la trayectoria del haz un componente llamado absorbente de electrones. El absorbente es, en contraste al del blanco, de un bajo número atómico. El Mevatron K utiliza pequeños cilindros de aluminio ( $Z=13$ ) y de carbón ( $Z=6$ ) que permiten la absorción de los electrones sin



producción adicional de bremsstrahlung, dejando que pasen los rayos x provenientes del blanco con poca atenuación. (3),(36)

#### 1.1.4 Filtro aplanador

Como se dijo antes, los rayos x creados por bremsstrahlung en el blanco tienen un pico de intensidad, por lo que el haz necesita ser diferencialmente atenuado con respecto al eje del haz para así dar lugar a una distribución de dosis uniforme con fines clínicos. El filtro aplanador es una pieza de metal de forma cónica por el que atraviesa el haz, el cual se atenúa mayormente sobre el eje central y en menor medida cuando se aleja de él.

Teóricamente, la mejor elección es utilizar un material de bajo número atómico debido a que las consideraciones son las mismas que para el absorbente de electrones. Un bajo número atómico significa que 1) los electrones extraviados no podrían producir rayos x dentro del filtro, 2) podrían producirse algunos electrones dentro del filtro y, 3) el haz podría "endurecerse" debido a una mayor absorción de fotones de baja energía. El endurecimiento del haz es un factor crítico ya que representa un cambio en la calidad espectral. Así, cuando el haz atraviesa el material, se absorben los rayos x y su intensidad decrece, pero como los fotones de baja energía se absorben más que los de alta energía, el



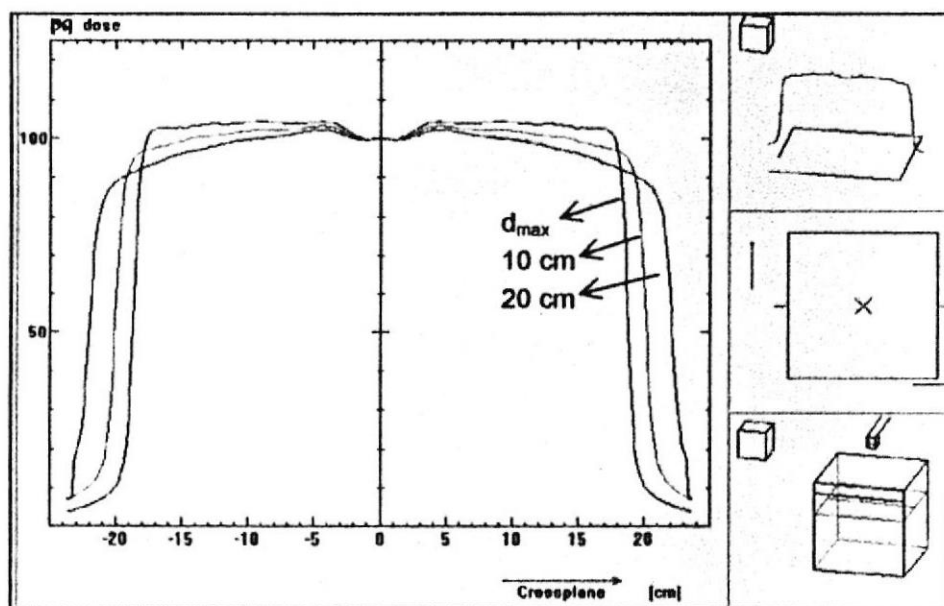
promedio de la energía del espectro se incrementa y como consecuencia se obtiene que la calidad de rayos x es más penetrante (36).

Desde el punto de vista del diseño del acelerador lineal, un filtro aplanador de bajo número atómico ocuparía un espacio muy grande dentro de la cabeza del acelerador, haciendo que su posicionamiento sea impreciso. La solución a esto es utilizar un material de número atómico de un valor intermedio tal como el del acero inoxidable ( $Z=26$ ), con lo que se consigue balancear los requerimientos mecánicos con la calidad del haz. (36).

Un punto importante a tomar en cuenta en lo referente al blanco y filtro aplanador, es que ellos conjuntamente crean un haz que varía en su calidad en función de la distancia fuera del eje. Al producirse el bremsstrahlung hay un pico de intensidad dirigido directamente a lo largo del eje central y, una disminución de la energía de los fotones a medida que estos se alejan del eje la cual es función de la interacción de los electrones con los núcleos. Adicionalmente, el filtro aplanador exagera las diferencias en la calidad del haz debido a la mayor cantidad de material sobre el eje central, de tal forma que aumenta la dureza del haz sobre el eje central más que en los puntos distantes al mismo. (15), (22).



Las diferencias en el espectro y en su dureza traen como consecuencia que las dosis en profundidad sean menos penetrantes fuera del eje, por lo que un filtro aplanador en particular puede ser diseñado para dar una distribución de dosis plana ideal a una sola profundidad, que en el caso del Mevatron K es de 10 cm en agua. Como consecuencia de esto se observa que en los perfiles obtenidos en campos grandes y a profundidades de dosis máxima ( $d_{max}$ ) sean visibles los "cuernos" (zonas alejadas del centro del campo de radiación con dosis relativas elevadas), mientras que a 20 cm de profundidad los perfiles tienden a tener hombros caídos como se observa en la figura 1.2. (9), (36).



**Figura 1.2:** Perfiles transversales a las profundidades de  $d_{max}$ , 10 cm y 20 cm para un campo de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , obtenidos en el Mevatron K a una distancia entre la fuente y la superficie del maniquí de 90 cm.

### 1.1.5 Cámara para monitoreo del haz

Una vez que el haz ha pasado por el filtro aplanador está casi listo para su uso clínico por lo que necesita ser monitoreado. La cámara monitora para rayos x, es una cámara plana de transmisión (hay otra cámara para haces de electrones) consiste de algunas placas cerámicas que encierran un volumen sellado colector de la ionización con una placa de alto voltaje entre ellas (3), (19). Lo particular de esta cámara es que está dividida en seis volúmenes colectores: una placa grande que abarca el diámetro entero del haz llamada monitor 1, una segunda placa subdividida en un segmento central con su respectivo electrodo llamada monitor 2 y cuatro segmentos anulares que le rodean. De esta manera las lecturas del monitor 2 se comparan con los segmentos externos para comparar la planicidad del haz, mientras que, la simetría del haz se verifica por comparación de las lecturas de los segmentos opuestos (3), (11), (36). Cabe resaltar que estas cámaras son importantes para el control electrónico del haz de radiación, pero desde el punto de vista físico la especificación tanto de la planicidad como de la simetría del haz se establecen con mediciones independientes del equipo de acuerdo a determinados protocolos. (18), (31)

### 1.1.6 Colimadores



Conforman la última etapa antes de la utilización clínica del haz, y se los utiliza para definir el tamaño de campo y la forma. Debido a que su objetivo es la absorción de radiaciones muy penetrantes son muy gruesos y de un material muy denso. Los colimadores del Mevatron K son de tungsteno ( $Z=74$ ) lo cual permite la protección del paciente de rayos x indeseables, pero trae como consecuencia la producción de neutrones térmicos para las energías de 10 MeV en adelante. (3), (36)

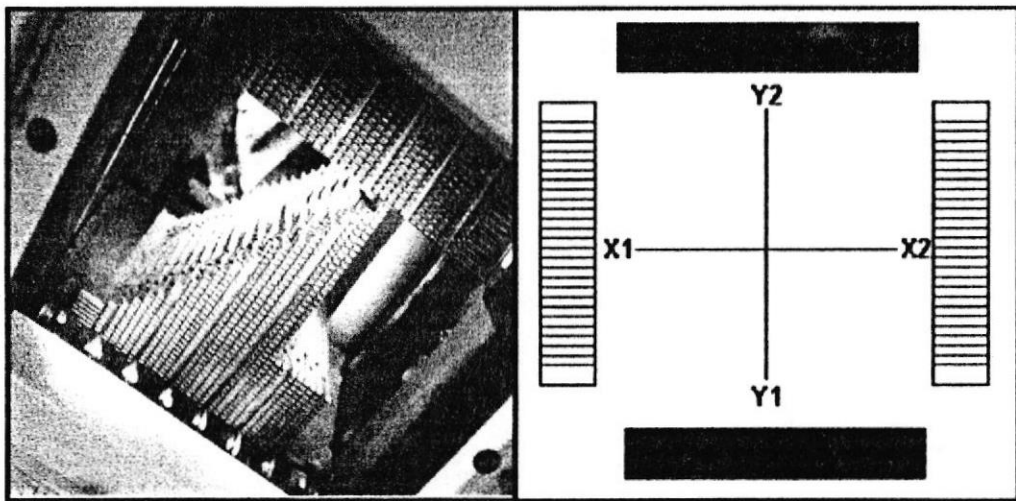
Otra consecuencia del uso de colimadores de tungsteno es que hay una pequeña cantidad de rayos x que no se absorben sino que se retrodispersan dentro del haz con baja energía. Esto conlleva a una menor penetración del haz y a exagerar los "cuernos" en los perfiles a bajas profundidades. De manera similar, cuando las mordazas se utilizan para colimar haces de electrones el tungsteno actúa como un blanco para bremsstrahlung convirtiendo muchos electrones en rayos x que se dispersan dentro del haz (24).

Los colimadores están compuestos por dos pares de mordazas que se ubican en dos direcciones mutuamente perpendiculares (figura 1.3).

Las mordazas superiores se encuentran en la dirección sagital del acelerador y conforman los tamaños de campo Y medidos a nivel del isocentro del equipo



(punto en el espacio donde se interceptan todos los ejes de rotación del equipo, y que en el Mevatron K tiene un valor nominal de 100 cm medido desde el blanco). Cada mordaza es un bloque de tungsteno con un espesor de 7.6 cm que se mueve individualmente entre posiciones que van de +20 cm hasta -2 cm.



**Figura 1.3:** A la izquierda fotografía del colimador multiláminas del Mevatron K. A la derecha una vista BEV de los colimadores.

El par de mordazas inferiores son colimadores multiláminas donde cada mordaza está conformada por 29 láminas que se mueven independientemente entre las posiciones +20 y -10 cm. Su espesor individual al isocentro es de 1 cm con excepción de las láminas extremas que son de 2 cm.

El sistema de coordenadas del colimador está definido con el gantry y colimador a  $0^\circ$ , de tal forma que visto desde la posición del blanco de cara al gantry se configura de la forma indicada en la figura 1.3. (Esta vista se conoce como *Beam eye view* o en forma simplificada *BEV*). (5),(37).

## **1.2. Colimación simétrica y colimación asimétrica. Implicaciones dosimétricas.**

Antes de la incorporación de los aceleradores lineales en el Departamento de Radioterapia del Instituto Oncológico Nacional (SOLCA), los tratamientos de radioterapia externa se efectuaban únicamente con una unidad de  $^{60}\text{Co}$ , cuyo tipo de colimación es simétrica, lo cual implicaba que para el caso de tratamientos de cáncer de mama donde se requieren técnicas para el ajuste de campos paralelo opuestos era necesario construir grandes bloques de cerrobend a fin de conseguir campos hemibloqueados, la otra alternativa era considerar la divergencia del haz, aun cuando esto produce zonas "calientes" de irradiación (4),(26).

Con el advenimiento de los aceleradores lineales cuyos colimadores permiten la configuración asimétrica, este problema fue resuelto, pues gracias a esta facilidad las nuevas técnicas de irradiación de mama permiten





configurar los tres campos (dos tangenciales y un supraclavicular) a partir de un solo punto (35).

Sin embargo, en los protocolos de dosimetría que se han publicado hasta la actualidad se consideran sólo haces simétricos, que aplican la dosis absorbida a mediciones realizadas a lo largo del eje del haz de un campo cuadrado y simétrico de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (1), (19), (32). Para el caso de campos asimétricos no hay acuerdos para la definición de "eje del haz" ni tampoco hay recomendaciones para los cálculos de dosis.

El conocimiento de la distribución de dosis y la tasa de dosis de referencia de campos asimétricos son fundamentales para su uso en la práctica clínica. Muchos autores han propuesto métodos computacionales para obtener las curvas de isodosis para haces asimétricos, para lo cual involucran modificaciones a los datos en el eje central<sup>1</sup> que toman en cuenta las variaciones de la calidad del haz fuera del mismo.

El primero en describir el efecto de la colimación asimétrica del haz sobre la distribución de la dosis fue *Loshek*, quien demostró que la energía efectiva del

---

<sup>1</sup> Específicamente, los datos en el eje central a los que se hace referencia son: los porcentajes de dosis en profundidad (*PDP*), razón tejido aire (*TAR*), razón tejido maniquí (*TPR*), razón tejido máximo (*TMR*). La definición de estas razones se presentan en el apéndice A.



haz de rayos x de los aceleradores lineales cambia en función de la posición de medición en el haz, debido a la filtración no uniforme en el filtro aplanador. El cambio es tal que la calidad del haz decrece cuando la distancia desde el eje central se incrementa, debido al endurecimiento diferencial del haz en el filtro aplanador cónico, lo que genera errores en las dosis calculadas con técnicas convencionales para campos de formas alargadas e irregulares (15), (16), (22).

### **1.3 Principales métodos para considerar la variación en la calidad del haz**

A continuación se describen los principales métodos para modelar el cambio en la calidad del haz primario.

#### **1.3.1 Por mediciones de coeficientes de atenuación en configuración de haz estrecho**

La medición de la capa hemirreductora (*HVL*) en puntos fuera del eje central del colimador, permite calcular la atenuación primaria del haz en los puntos fuera del eje (16),(39).

Este método conlleva complicaciones experimentales pues se requiere de una cámara de ionización de volumen pequeño tal como de  $0.2 \text{ cm}^3$ , pues es



necesario tener una buena geometría para la medición de la *HVL* y adicionalmente tener muy bien caracterizado el material que funge de atenuador.

En su lugar se podría utilizar los resultados de *Molto y cols.*(29), quienes obtuvieron una relación muy simple, dada por la ecuación (1.1), entre el coeficiente de atenuación lineal medido en aire  $\mu_0$  y el índice de calidad *I* del haz, este último definido como la tasa de ionización medida a 20 cm y 10 cm de profundidad para un campo de 10 x 10 cm<sup>2</sup> sobre el eje central del haz.

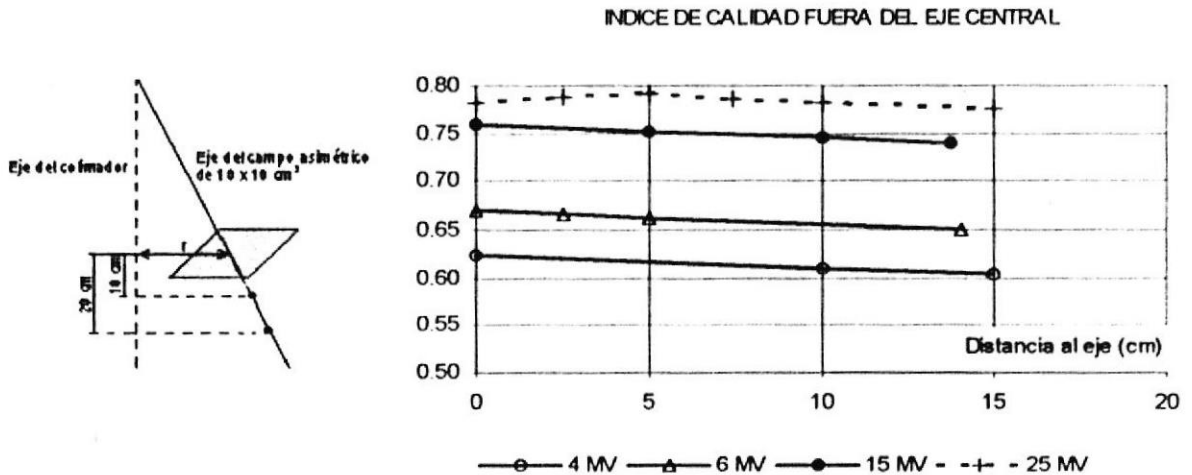
$$\log_{10}(\mu_0) = -aI + b \quad (1.1)$$

$$\text{con } a = 1.516 \text{ y } b = -0.314$$

*Molto* también determinó experimentalmente cómo varía el índice de calidad del haz en los puntos a una distancia *r* fuera del eje central  $I_a(r)$ , definido como la tasa de ionización a 20 cm y 10 cm de profundidad medidas en el eje oblicuo de un campo asimétrico de 10 x 10 cm<sup>2</sup>. Sus resultados se muestran en la figura 1.4.



Por lo tanto, al determinar experimentalmente el índice de calidad fuera del eje del haz queda definido el coeficiente de atenuación lineal  $\mu_0$  por aplicación directa de la ecuación (1.1).



**Figura 1.4.** Izquierda, esquema para determinar experimentalmente el índice de calidad fuera del eje central. Derecha, variación del índice de calidad  $I_a(r)$  con la distancia al eje del colimador, para distintos haces de fotones. Los índices de calidad sobre el eje son 0.624, 0.670, 0.760 y 0.781 respectivamente. (Tomado de la referencia (29))

Para calcular la dosis, en el medio en un punto sobre el eje central, se utiliza el método de separación de la dosis primaria y la dosis dispersa, el cual es particularmente útil para la dosimetría de campos irregulares (11), (12), (24)

$$D_p = D_{\text{primaria}} + D_{\text{dispersa}} \quad (1.2)$$

$$D_p = D_{\text{aire}} (TAR(d, \theta) + SAR(w, d))$$

donde  $D_{aire}$  es la dosis medida en aire, y los términos  $TAR(d,0)$  y  $SAR(w,d)$  están definidos en el apéndice A.

*Cundiff y cols.* incorporaron el cambio en la intensidad del haz en aire en puntos fuera del rayo central (factor fuera del eje en aire (*OAF*)), bajo el supuesto de que la energía del haz no es una función de la posición en el haz, de esta manera la dosis en un punto arbitrario  $P$  en el maniquí o material se calcula como:

$$D_p = D_{aire} OAF [TAR(d,0) + SAR(w,d)] \quad (1.3)$$

Evidentemente la ecuación (1.3) debe incluir los factores modificadores del haz (transmisión de la parrilla, inverso del cuadrado, etc.), pero se omiten por simplicidad.

Posteriormente, *Hanson y cols.* modificaron esta técnica considerándolo al  $TAR(d,0)$  también como una función de la posición en el haz (15),(16):

$$TAR(d,0,r) = \exp[-0.693(d - d_{max})/HVL(r)] \quad (1.4)$$

donde:

$d$  profundidad del punto de referencia

$d_{max}$  profundidad de dosis máxima



$r$  distancia radial desde el eje central del haz al punto de cálculo  $P$

$HVL(r)$  calidad del haz expresada como la capa hemirreductora en centímetros de agua.

La modificación de *Hanson y cols.* a la ecuación (1.3) consiste en sustituir  $TAR(d,0)$  con  $TAR(d,0,r)$  de la ecuación (1.4), para lo cual a su vez es necesario determinar el  $HVL(r)$  cuyo valor bien podría ser determinado mediante el método propuesto por *Molto*, o bien por mediciones directas del  $HVL(r)$  mediante el método propuesto por *Hanson y col.*, cuyo valor demostraron se ajusta a una relación lineal con la distancia al eje central. De esta forma sería posible construir una familia de curvas que permita calcular un factor de corrección para el  $TAR(d,0)$ .

Esta técnica sin embargo, requiere de cálculos del  $SAR(w,d)$  mediante el método de *Clarkson* (4),(11),(24), por lo que no resulta práctico en cálculos para verificaciones de rutina, y por lo tanto, no se ajusta con el objetivo buscado en este trabajo, pues es más conveniente si se utiliza métodos computacionales (12).

### 1.3.2 Método del factor de corrección de dispersión



En 1950 *Day* sugirió que la dosis a la profundidad  $d$  a lo largo de un punto sobre el eje central, es el promedio de las dosis en el eje central para cuatro campos rectangulares centrados en el mismo punto (2), (11), (24), (25), (34). Este fue un intento de *Day* para calcular el campo equivalente de campos rectangulares tomando como referencia los datos de campos cuadrados.

*Kwa y col.* (25) han propuesto el uso de un factor de corrección basado en el principio de *Day* para el cálculo del cuadrado equivalente. Este método modifica los datos del perfil del haz de campos simétricos con un factor de corrección de dispersión, determinado empíricamente, que da un buen acuerdo con los datos medidos, y que se expresa como la media geométrica de las dosis de los campos rectangulares determinados por la técnica del campo equivalente de *Day*. Este se define como:

$$SCF(AW \times AL, W \times L, P) = \frac{D_{as,P}(AW \times AL)}{D_{s,P}(W \times L)} \quad (1.4)$$

donde  $D_{as,P}(AW \times AL)$  es la dosis en el punto  $P$  para el campo asimétrico y  $D_{s,P}(W \times L)$  es la dosis en el mismo punto para el campo simétrico. Ambas se calculan sin tomar en cuenta la razón fuera del eje central.



Este método que originalmente fue desarrollado para cálculos de dosis a lo largo de un solo eje, (campos asimétricos simples), se hizo extensivo para campos asimétricos duales (campos asimétricos conformados por ambos pares de mordazas) y asimétricos irregulares (2).

En principio este método es muy simple, y además como sus autores demostraron, tiene una precisión extraordinaria pues el acuerdo logrado entre las mediciones de dosis y los cálculos estuvo dentro del 0.5% para campos asimétricos regulares y dentro del 1% para campos asimétricos irregulares.

Sin embargo la gran cantidad de cálculos que representa la aplicación del método de *Day* para la determinación del factor de corrección de dispersión lo convierten en un método poco práctico para cálculos de rutina.

### 1.3.3 Método del perfil primario.

A partir de la descripción de los efectos de la colimación asimétrica en las distribuciones de dosis, además de las técnicas que se mencionaron anteriormente para el cálculo de la dosis en los puntos fuera del eje central, también se ha sugerido que tales cálculos podrían hacerse como si ellos fuesen sobre el eje central (22), (24), esto es, utilizando funciones de dosimetría



estándar medidas sobre el eje central<sup>2</sup>, y multiplicando a la tasa de dosis calculada por la razón fuera del centro o fuera del eje  $OCR(x,d)$ . (La nomenclatura  $OCR$  es por las iniciales del inglés *off center ratio*). La función  $OCR(x,d)$  es dependiente de la distancia  $x$  fuera del eje, de la profundidad  $d$ , y también del tamaño de campo equivalente. Las primeras y quizás simples recomendaciones fueron igualar los  $OCR(x,d)$  con los datos de los perfiles a lo largo de los principales ejes para los campos más grandes que sean posible obtener (35).

Sin embargo, se ha determinado que aunque los datos de los perfiles incluyen las variaciones de la calidad y de la intensidad del haz fuera del eje, también contienen los cambios en la contribución de dispersión dentro del maniquí (27). Este efecto oculta la "verdadera" razón fuera del eje en los puntos cerca del borde del perfil, como se constatará en el capítulo III.

A fin de extraer la "verdadera" razón fuera del eje, *Chui y Mohan* (9), (10) separaron el  $OCR(x,d)$  en el producto de dos factores: Un factor que describe el perfil del haz para un campo infinito, esto es sin el efecto de los colimadores y, un factor que describe la forma del haz en la vecindad de la frontera del campo definida por los colimadores.

---

<sup>2</sup>  $TMR, TPR, TAR, BSF, PDP, S_p, S_c, S_{cp}$ , etc





Debido a que este método es la base de este trabajo, se definirá en un capítulo aparte cada uno de estos factores para, luego de realizarles ciertas modificaciones, incorporarlas al formalismo final que permite el cálculo de las tasas de dosis en campos asimétricos regulares, que es lo que constituye nuestro objetivo final.





## CAPITULO II

### 2. FORMALISMO PARA EL CÁLCULO DE LAS TASAS DE DOSIS EN CAMPOS ASIMÉTRICOS REGULARES

En este capítulo se hace una exhaustiva descripción del formalismo a aplicar para el cálculo de la dosis en campos asimétricos. Para ello, es necesario primeramente definir los parámetros que los describen.

#### 2.1 Razón fuera del centro del haz.

Se la denota como *OCR* (acrónimo del inglés de *off center ratio*), y se la define como la razón entre la dosis en un punto  $(x, y)$  a una profundidad  $d$  y la dosis en

el punto correspondiente sobre el eje del colimador (a la misma profundidad) (9)

$$OCR(x, y, d) = \frac{D(x, y, d)}{D(0, 0, d)} \quad (2.1)$$

Experimentalmente se la obtiene por medición de dosis relativas en un plano paralelo que pasa por el eje del colimador para un determinado tamaño de campo.

Tradicionalmente el  $OCR(x, y, d)$  en un punto fuera del plano central se ha calculado multiplicando el  $OCR$  a lo largo del campo por el  $OCR$  a lo ancho del mismo, es decir  $OCR(x, y, d) = OCR(x, 0, d) * OCR(0, y, d)$  (41), lo cual se ha demostrado que da resultados erróneos en el caso de aceleradores lineales (linacs) en cuyos perfiles se producen "cuernos". En ese sentido, se ha desarrollado otro método alternativo que permite el cálculo del  $OCR$ . (9), (10)

### 2.1.1 Factor del perfil primario y factor de frontera

*Chui y Mohan* proponen un método para determinar los  $OCR$  en los cálculos de dosis tridimensionales (9). Para ello consideran al perfil para un campo abierto como el producto de dos componentes: *un perfil primario (POCR)*, que describe



el perfil del haz para un campo infinito, y un *factor de frontera (BF)*, que describe la forma del perfil del haz en la región del borde del campo finito definido por las mordazas del colimador.

#### **2.1.1.1 Factor de perfil primario**

Como sus autores concibieron a este método, se supone que el *POCR* es una función de la distancia radial del rayo central y de la profundidad en el maniquí. Idealmente el *POCR* para un linac debería medirse para un campo infinitamente grande, pero dado que esto no es posible se lo obtiene midiendo los perfiles del haz a lo largo de la diagonal del campo más grande disponible y a algunas profundidades. Para eliminar los efectos de los colimadores se utilizan sólo los puntos de hasta el 90% del tamaño de campo utilizado. Los *POCR* para distancias radiales mayores se obtendrían por extrapolación. Sin embargo, como se verificará en el capítulo III esta concepción genera errores considerables en el cálculo del perfil, debido a la reducción en la dispersión en el maniquí a medida que aumenta la distancia fuera del eje.

#### **2.1.1.2 Factor de frontera**



El factor de frontera describe la forma del perfil del haz cerca del borde del campo, y se define como la razón del  $OCR(X, d, w \times h)$  en un punto  $P$  a la profundidad  $d$  y a una distancia  $X$  desde el eje central del haz de un campo finito de dimensiones  $w \times h$ , dividido para el  $OCR$  a la misma profundidad y distancia pero para un campo infinito (es decir el  $POCR$ ) (8),(9),(10):

$$BF = \frac{OCR(X, d, w \times h)}{OCR(X, d, \infty \times \infty)} \quad (2.2)$$

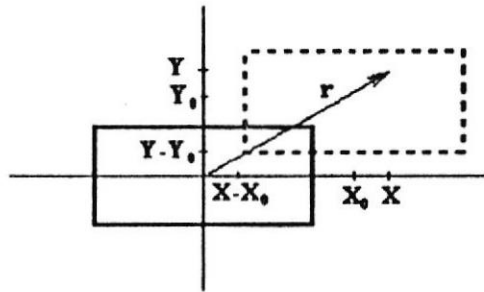


Experimentalmente los  $BF$  se obtienen midiendo los perfiles del haz en un plano central a algunas profundidades, para algunos anchos y largos de campo y dividiéndolo por los  $POCR$  a la profundidad correspondiente (9).

En el caso en que un solo par de mordazas conformen un campo asimétrico con desplazamiento  $X_0$  desde el eje del colimador, entonces el factor de frontera se puede expresar como (8):

$$BF(X - X_0, d, w \times h) = \frac{OCR(X - X_0, d, w \times h)}{POCR(X - X_0, d)} \quad (2.3)$$

donde el  $OCR$  y  $POCR$  deben normalizarse a 1.0 cuando  $X = X_0$ .



**Figura 2.1:** Vista de un campo asimétrico dual y definición de los parámetros de los factores de frontera *BF*

En el caso de campos asimétricos duales (figura 2.1), para el cálculo del factor de frontera en un punto  $r$  de coordenadas  $(X, Y)$  de un campo asimétrico cuyo centro tiene por coordenadas  $(X_0, Y_0)$  respecto del eje del colimador, cada par de mordazas induce un factor de frontera que es multiplicativo (8), (9), (10), entonces:

$$BF = BF(X - X_0, d, w \times h) BF(Y - Y_0, d, w \times h) \quad (2.4)$$

Puesto que por definición el factor de frontera describe la forma del haz cerca del borde del campo definido por los colimadores, se hace un cambio de sistema de referencia cuyo origen se ubique en el borde del campo, entonces:

$$BF = BF(s, d, w \times h), \quad (2.5)$$

donde  $s_i$  es la distancia desde la  $i$ -ésima frontera del campo, y por lo tanto toma valores que van de 1 a 4 (debido a que hay 4 mordazas independientes).

Una vez definidos los factores de perfil primario y los factores de frontera, el perfil para un campo finito de tamaño  $w \times h$  se calcula de acuerdo a lo expresado en el literal 2.1.1. como: (9)

$$OCR(r, d, w \times h) = POOCR(r, d) * \prod_i BF(s_i, d, w \times h), \quad (i = 1..4) \quad (2.6)$$

Es importante destacar que las variaciones en la calidad del haz ya están incluidas en los perfiles, por lo que no hay necesidad de mediciones adicionales u otros cálculos y los OCR se calculan tomando en cuenta las posiciones de las cuatro mordazas

### 2.1.2 Factor de perfil de cuña

Los filtros de cuña son bloques absorbentes que se interponen en el haz con el fin de modificar la distribución de isodosis. La forma de este absorbente produce un decrecimiento progresivo en la intensidad del haz, o lo que es equivalente, la calidad del haz se altera debido a que se atenúan los fotones de baja energía



(endurecimiento del haz), y en menor extensión debido a la dispersión Compton en el material de la cuña, lo cual resulta en una degradación de la energía (suavizamiento del haz) (24).

Sin embargo, pese a que los filtros de cuña producen algún cambio en la calidad del haz, se ha determinado que el efecto no es lo suficientemente importante como para alterar los parámetros de cálculo tales como el cuadrado equivalente y factor de retrodispersión, por lo que se suponen iguales a los de los campos abiertos. Esta suposición también es válida para los porcentajes de dosis en profundidad, *TAR* y *TPR* para profundidades inferiores a 10 cm. (24)

Para describir el cambio de los *POCR* por efecto de la cuña se utiliza el factor llamado factor de perfil de cuña *WPF*, definido como la razón entre la dosis en un punto para el campo más grande con cuña (idealmente infinito) y la dosis en el mismo punto para un campo abierto del mismo tamaño (9).

Para obtener el *WPF* se miden los perfiles del haz con el campo más grande que es posible configurar con la cuña, y el perfil de un campo del mismo tamaño pero sin cuña, entonces el *WPF* viene dado por (9):





$$WPF(l,d) = \frac{OCR(l,d)}{WOCR(l,d)} \quad (2.7)$$

donde:

$OCR(l,d)$  es la relación fuera del eje central para un campo abierto del tamaño más grande posible en que se permite utilizar la cuña, a la distancia  $l$  desde el eje central y a la profundidad  $d$ .

$WOCR(l,d)$  es la relación fuera del eje central para el campo con cuña en las mismas condiciones en las que se mide el  $OCR(l,d)$ .

Finalmente, la definición del factor de perfil de cuña se incorpora a la expresión (2.6) para el cálculo del  $OCR$  de un campo abierto, con lo cual la razón fuera del eje central para un campo abierto o con cuña, y denotado como  $(W)OCR$  es: (9)

$$(W)OCR = POCR(r,d) * WPF(l,d) * \prod_i BF(s_i, d, w, h), \quad (i = 1..4) \quad (2.8)$$

De esta manera, con la determinación del perfil bastaría ahora aplicarla a algún formalismo de cálculo de la tasa de dosis en el eje central, para determinar la dosis en cualquier punto de un campo asimétrico. Sin embargo, aun es necesaria una modificación adicional al método de cálculo del  $POCR$ .



## 2.2 Corrección del método de cálculo del *POCR*

Como ya se mencionó anteriormente, las mediciones de perfiles transversales o perfiles diagonales decrecen rápidamente debido a la reducción de la dispersión en la vecindad del borde del campo y, si se utiliza para modelar el *POCR* sin corrección, se pueden introducir errores significativos para grandes campos asimétricos formados con colimadores asimétricos duales.

El sustento que permite incorporar un factor llamado de corrección de borde de campo (*FEC*) ha sido formulado por *Cadman*, el mismo que se fundamenta en el efecto que tiene la colimación asimétrica dual en la dispersión tanto en el colimador como en el maniquí. (7)

### 2.2.1 Dispersión en el colimador

La tasa de fluencia energética, tasa de dosis en el espacio libre, o tasa de exposición, la cual se mide en aire depende del tamaño de campo (también se la llama salida del haz), cuando el tamaño de campo se incrementa, la tasa de dosis también se incrementa debido al aumento de la dispersión en el colimador que se suma al haz primario (11), (22), (24).



El factor de dispersión del colimador, denotado por  $S_c$  se define como la relación entre la tasa de dosis en aire para un campo cuadrado de lado  $l$  y un campo de referencia con centro en el eje del colimador. (22), (24).

$$S_c(l) = \frac{\dot{D}_{aire}(l \times l)}{\dot{D}_{aire}(10 \times 10)} \quad (2.9)$$

Con base en la figura 2.2 Khan y cols. han definido este factor para el caso de un par de colimadores asimétricos como (22):

$$S_c(l, x) = \frac{\dot{D}_{aire}(l \times l, x)}{\dot{D}_{aire}(10 \times 10)OAF(x)} \quad (2.10)$$

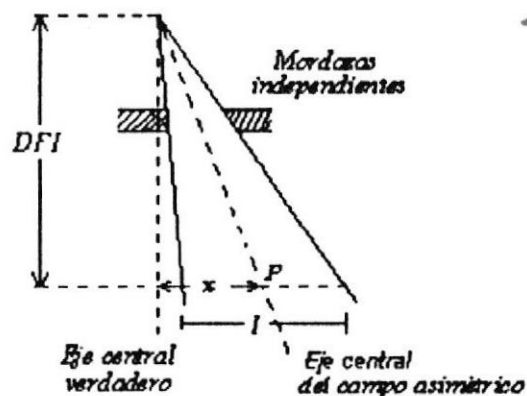
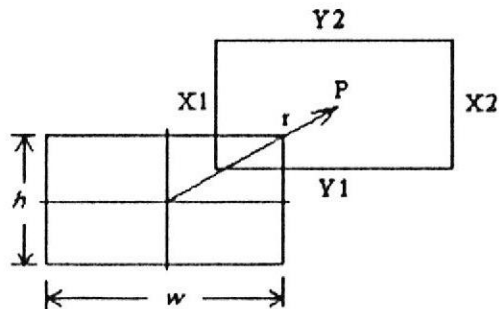


Figura 2.2: Esquema para representar a los parámetros geométricos de un campo asimétrico para determinar  $S_c$ , el cual se define para un campo cuadrado de lado  $l$ , y a distancia fuente isocentro  $DFI$ .

Donde  $OAF(x)$  es la razón fuera del eje en aire, es decir la razón entre la tasa de dosis en aire en un punto  $P$  ubicado a una distancia  $x$  y el punto correspondiente ubicado sobre el eje del colimador, con el mismo campo en ambos casos.



**Figura 2.3:** Esquema para representar los parámetros geométricos del haz desde una vista BEV para el caso de campos asimétricos duales.

La figura 2.3 permite extender esta última definición para el caso de colimadores asimétricos duales, de tal manera que:

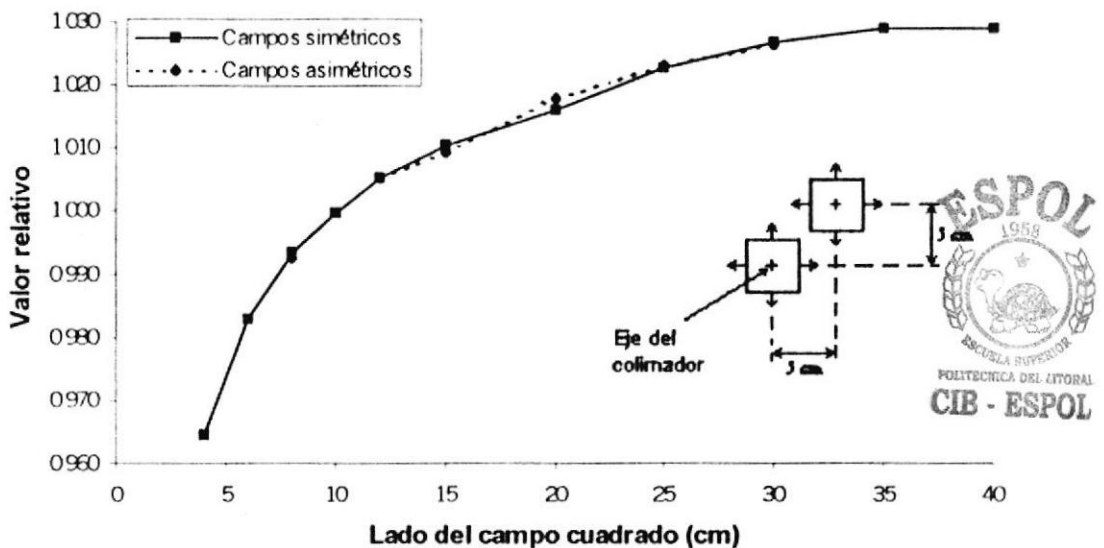
$$S_c(w, h, r) = \frac{\dot{D}_{aire}(w \times h, r)}{\dot{D}_{aire}(10 \times 10) OAF(r)} \quad (2.11)$$



$w$  y  $h$  son las aperturas del campo colimado para las mordazas inferiores ( $X1$  y  $X2$ ) y mordazas superiores ( $Y1$  e  $Y2$ ) respectivamente, y  $r$  es la distancia radial del centro del campo asimétrico (punto  $P$  de la figura 2.3) al eje de rotación del

colimador en un plano perpendicular al eje del isocentro; y el  $OAF(r)$  es la relación fuera del eje del colimador, es decir la tasa de dosis en aire en el punto  $P$  relativo al isocentro del campo abierto.

Con base en estas definiciones, se ha demostrado que los factores de salida en aire para campos asimétricos generados por mordazas independientes, son muy cercanos a aquellos de los campos simétricos de las mismas dimensiones y, por lo tanto, el cambio en la dispersión en el colimador  $S_c$  con el tamaño del campo es independiente de la desviación del campo (7),(22),(30), esto se refleja en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** Dosis relativas en aire para campos cuadrados tanto para configuraciones simétricas como asimétricas. Los valores están normalizados a 1.00 para el campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  en ambas configuraciones. La figura adjunta muestra los centros de los campos para cada medición. Tomado de la referencia (30).

### 2.2.2 Factor de dispersión total

Para campos simétricos el factor de dispersión total  $S_{c,p}$  se define como la razón entre la tasa de dosis medida en maniquí en el isocentro a una profundidad de referencia para un campo cuadrado de lado  $l$ , y la tasa de dosis en el mismo punto y profundidad para un campo de referencia de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ : (22), (24).

$$S_{c,p}(l) = \frac{\dot{D}(l \times l)}{\dot{D}(10 \times 10)} \quad (2.12)$$

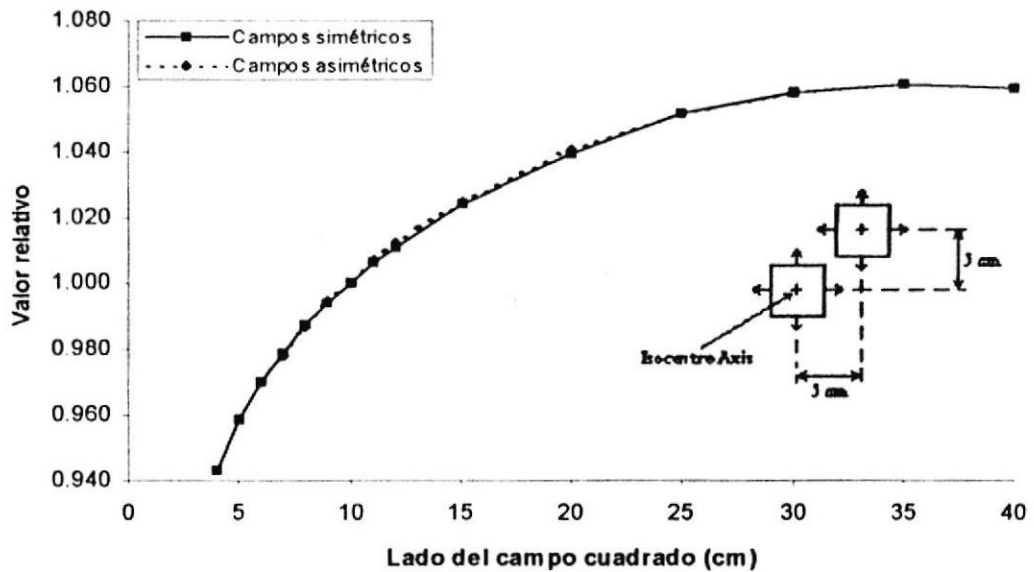
Desde el punto de vista físico, el  $S_{c,p}$  contiene tanto a la dispersión en el colimador  $S_c$  como a la dispersión en el maniquí  $S_p$ . Esta última relaciona los cambios en la dispersión por efecto del volumen de maniquí que se irradia desde una apertura fija del colimador. La relación entre estos tres factores está dada por: (7), (22), (24)

$$S_p(l) = \frac{S_{c,p}(l)}{S_c(l)} \quad (2.13)$$



Igual que antes, en el caso de campos asimétricos duales se ha generalizado la definición de  $S_{c,p}$  pero con las tasas de dosis medidas en los centros de los

campos asimétricos, en cuyo caso, también se ha demostrado que estos factores son idénticos a los factores  $S_{c,p}$  medidos sobre el eje central (figura 2.5), lo cual ha sugerido que el cambio en la dispersión total también es independiente de la desviación del centro de campo (7),(22),(30).



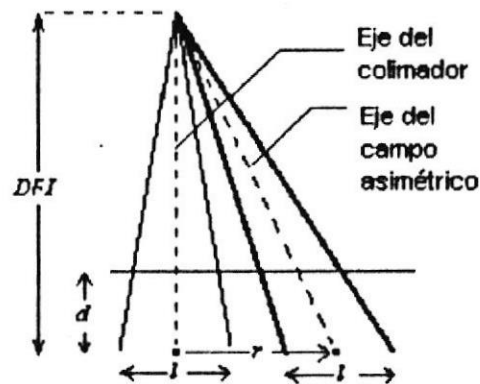
**Figura 2.5:** Mediciones de dosis relativa en maniquí de poliestireno para campos cuadrados tanto para configuraciones simétricas como asimétricas. Los valores están normalizados a 1.00 para el campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  en ambas configuraciones. La figura adjunta muestra los centros de los campos para cada medición. Tomado de la referencia (30).

### 2.2.3 Perfiles del centro de campo

El perfil del centro de campo denotado por  $FCP$  para una distancia fuera del eje y profundidad dada, se define como la relación de la dosis medida en el centro de un campo cuadrado asimétrico desviado del eje de rotación del colimador,



para la dosis en el centro del campo simétrico del mismo tamaño pero centrado en el eje de rotación del colimador (figura 2.6). Los valores de  $FCP$  representan la dosis relativa entre el centro de los campos asimétrico y simétrico de las mismas dimensiones y a la misma profundidad (7).



**Figura 2.6:** Esquema para la definición del  $FEC$ ,  $r$  es la desviación de los centros entre los campos simétricos y asimétricos, y  $d$  es la profundidad de medición.

Al determinar los  $FCP$  para diferentes tamaños de campo y profundidades, *Cadman* obtuvo un resultado muy importante, y es que para una misma profundidad estos valores no variaron en más de un 1%, significando con ello que los  $FCP$  para cualquier tamaño de campo entre  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  y  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  pueden proveer una representación precisa del  $POCR$ . Esta es la base del método denominado de corrección de borde de campo, el cual se describe a continuación (7).



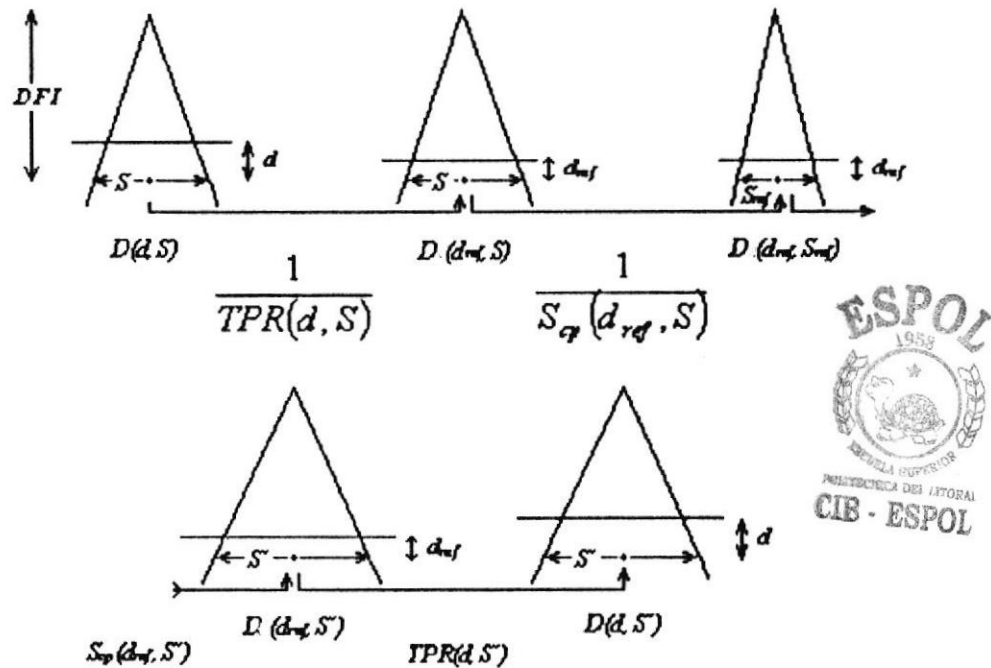
### 2.2.4 Método de corrección de borde de campo para obtener los *POCR*

Este modelo requiere un conjunto mínimo de datos de campos simétricos, lo cual incluye perfiles, *TPR* y factores de dispersión en el colimador y en el maniquí. Con este método se manipulan perfiles de campos simétricos de 40x40 cm<sup>2</sup> para representar los *FCP* que se podrían obtener utilizando tamaños de campo de 40x40 cm<sup>2</sup> con distintas desviaciones del centro de campo. Se hace notar que, en la práctica no es posible medir un *FCP* para un campo de 40x40 cm<sup>2</sup>, debido a la forma como se definió en el literal 2.2.3, pues los movimientos del colimador son limitados. De nuevo, se arguye que utilizando los *FCP* para cualquier tamaño de campo desde 3x3 cm<sup>2</sup> hasta 30x30 cm<sup>2</sup> se puede tener una representación precisa del *POCR*; este argumento se extendió para calcular un *FCP* de 40x40 cm<sup>2</sup> que permita modelar el *POCR* (7).

En la figura 2.7 se considera el cambio relativo en la dosis  $D(d, S')/D(d, S)$  para un punto sobre el eje central a la profundidad  $d$  debida a la variación de un tamaño de campo cuadrado de lado  $S$  a otro de lado  $S'$ . Con ella se deduce que:

$$\frac{D(d, S')}{D(d, S)} = \frac{S_{cp}(d_{ref}, S') IPR(d, S')}{S_{cp}(d_{ref}, S) IPR(d, S)} \quad (2.14)$$





**Figura 2.7:** Esquema para deducir la relación de dosis  $D(d, S')/D(d, S)$ , en un punto sobre el eje central del colimador ubicado en el isocentro ( $DFI$ ), por efecto del cambio de tamaño de campo desde  $S$  a  $S'$ . El subíndice *ref* se refiere a valores referenciales.

$S_{c,p} = S_c \times S_p$  y representa el cambio total en la dispersión (dispersión en el colimador y en el maniquí, como se explicó en el punto 2.2.2). Este factor se mide para un tamaño de campo en particular y a la profundidad de referencia  $d_{ref}$ . ( $S_{c,p}$  también es conocido como el *factor de abertura de campo en maniquí*)

De acuerdo al método propuesto por *Cadman*, si se supone que el efecto de cada una de las mordazas del colimador en la dosis en el punto central del eje es idéntica y multiplicativa, entonces el cambio de la dosis en un punto sobre el eje central a una profundidad  $d$  debida al movimiento en una distancia  $x$  de una

sola mordaza, podría obtenerse tomando la raíz cuarta de la ecuación (2.14) con un campo cuadrado que tenga lados de longitud  $S' = S + 2x$ . De esta forma se introduce el factor de corrección de borde del campo  $FEC(d, x, S)$  (7),(8):

$$FEC(d, x, S) = \sqrt[4]{\frac{S_{cp}(d_{ref}, S + 2x)IPR(d, S + 2x)}{S_{cp}(d_{ref}, S)IPR(d, S)}} \quad (2.15)$$

La distancia  $x$  es positiva si la mordaza se mueve alejándose del centro del campo y negativa si el movimiento es hacia el centro del mismo.

El  $FEC(d, x, 40)$  representa el cambio relativo de la dosis en un punto a una profundidad  $d$  en el centro de un campo de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , debido al movimiento de una sola mordaza en una distancia  $x$ . Como se indicó previamente en el literal 2.2.2, los  $S_{c,p}$  en esencia son independientes de la posición de la desviación del centro del campo a una profundidad en particular, entonces los  $FEC(d, x, 40)$  deberían ser validos para cualquier desviación del centro del campo (7).

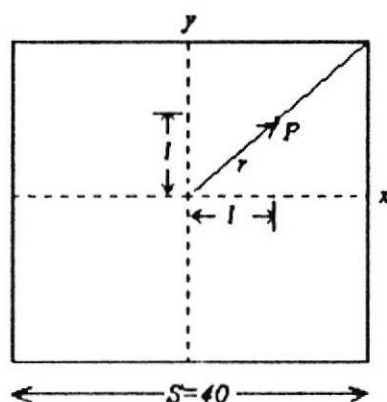
El valor del  $FCP(d, x, 40)$  se obtiene dividiendo el valor del  $OCR(d, x)$  del perfil transversal del campo simétrico de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  por los valores  $FEC(d, +x, 40)$  y  $FEC(d, -x, 40)$ , a fin de compensar el cambio de dosis cuando una mordaza se



acerca o se aleja de la otra mordaza una distancia  $x$  desde el centro del campo simétrico. Continuando de esta forma para todas las desviaciones  $x$ , se determina el  $FCP(d, x, 40)$  con lo cual se modela el  $POCR(d, x)$  (7), esto es:

$$POCR(d, x) \approx FCP(d, x, 40) \approx \frac{OCR(d, x)}{FEC(d, +x, 40)FEC(d, -x, 40)} \quad (2.16)$$

Este procedimiento se hace extensivo para la obtención de los  $POCR$  de campos asimétricos duales, pero en este caso el  $POCR$  se define por las esquinas del campo más grande, por lo que es necesario medir el  $OCR(d, r, 40)$  a lo largo de la diagonal para el campo más grande posible (8), tal como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8:** Configuración para la medición de perfiles diagonales  $OCR(d, r, 40)$

Entonces, el valor del  $POCR$  en el punto  $P$  a una distancia  $r$  a lo largo de la diagonal se obtiene dividiendo el valor  $OCR(d, r, 40)$  por el valor de corrección de borde de campo  $FEC(d, r, 40)$  para cada una de las cuatro mordazas, a fin de tomar en cuenta el cambio relativo en la dispersión por el movimiento desde el centro del campo hasta aquel punto (8):

$$POCR(d, r) \approx FCP(d, r, 40) \approx \frac{OCR(d, r, 40)}{FEC(d, +l, 40)^2 FEC(d, -l, 40)^2} \quad (2.17)$$

El radio  $r$  está dado por  $2\sqrt{l}$  de acuerdo a la figura 2.8. El denominador de esta ecuación, el cual es el producto de los valores  $FEC$  para cada una de las mordazas se puede expresar como el  $FEC_{TOTAL}$ , con lo que la ecuación (2.17) finalmente se puede escribir en forma simplificada como:

$$POCR(d, r) \approx \frac{OCR(d, r, 40)}{FEC_{TOTAL}(d, +l, 40)} \quad (2.18)$$

Para la aplicación de esta expresión se supone que el haz tiene simetría radial, lo cual se cumple en el Mevatron K, en razón de la forma del filtro aplanador que se describió en el literal 1.1.4. Sin embargo es posible que en la práctica éste no se encuentre correctamente centrado en el eje del haz, por lo que, previo a la

medición de los perfiles es necesario verificar la simetría y planicidad del haz, los cuales deben estar dentro de los límites de tolerancia establecidos por los protocolos de control de calidad, esto es del 2% y 3% respectivamente, con respecto a los valores de aceptación del linac. (18), (31)

### **2.3 Formalismo para el cálculo de la dosis en un punto cualquiera de un campo asimétrico regular.**

De los procedimientos que se adoptan en la práctica, el cálculo de la dosis absorbida por unidad monitora en un punto del maniquí, se basa en la calibración del haz en las condiciones de referencia. (2), (19), (20), (31)

El protocolo de dosimetría utilizado en el Instituto Oncológico Nacional, TRS-277, recomienda dos profundidades de referencia en condiciones isocéntricas: 5 cm o 10 cm de agua según la calidad del haz (19), (éstas condiciones también se han mantenido en el último protocolo emitido por el IAEA (20)), diferenciándose así de los utilizados anteriormente donde se recomienda condiciones SSD y profundidad de calibración en el punto de dosis máxima (24).

Esto ha llevado a que se reconsidere la metodología para el cálculo de la dosis en el eje central. Así, *Bridier y Dutreix* han propuesto una formulación general

donde todos los parámetros se obtienen por mediciones efectuadas en las condiciones de referencia (6). En este trabajo se adopta dicha metodología para el cálculo de la dosis en un punto sobre el eje central de un campo simétrico en haces de fotones de alta energía y, posteriormente, se lo hace extensivo para el cálculo de la dosis en cualquier punto de un campo asimétrico regular, mediante la incorporación de la razón fuera del eje central.

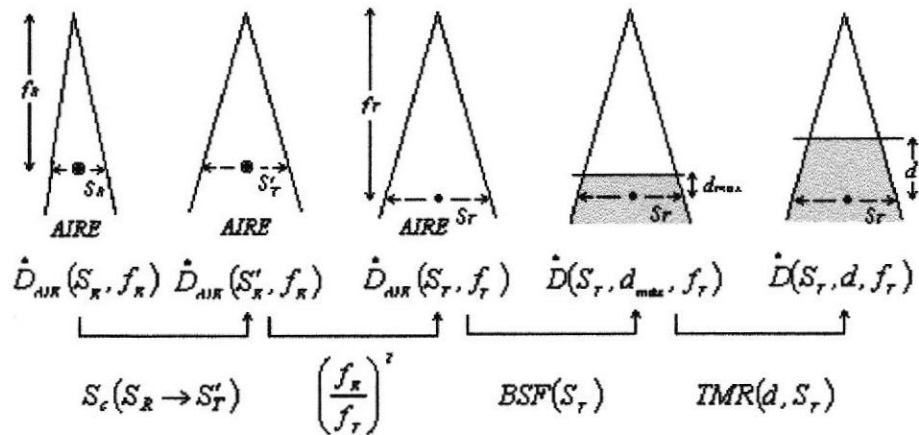
El método propuesto por estos autores consiste en separar la componente de dosis primaria de las componentes de dosis dispersa para lo cual se introduce la tasa de dosis en aire en las condiciones de cuasi equilibrio  $\dot{D}_{aire}$ . Este factor se supone proporcional a la fluencia de fotones primarios y se la utiliza únicamente para el establecimiento de la formulación, pero en sí no es necesario medirla.

Sobre esta base, se deduce la tasa de dosis en agua  $\dot{D}_P$  en un punto  $P$ .

Para el cálculo de la tasa de dosis en el maniquí a partir de la tasa de dosis en el aire, si se considera a la figura 2.9 y a las definiciones dadas en el apéndice A, entonces la tasa de dosis en el maniquí, para el campo de tratamiento  $S_T$  a la profundidad  $d$  y a una distancia de tratamiento  $f_T$  es:

$$\dot{D}(S_T, d, f_T) = \dot{D}_{AIR}(S_R, f_R) S_c(S_R \rightarrow S_T) \left(\frac{f_R}{f_T}\right)^2 BSF(S_T) TMR(d, S_T) \quad (2.19)$$





**Figura 2.9:** Esquema para el cálculo de la tasa de dosis en maniquí a partir de la tasa de dosis en aire en las condiciones de referencia.

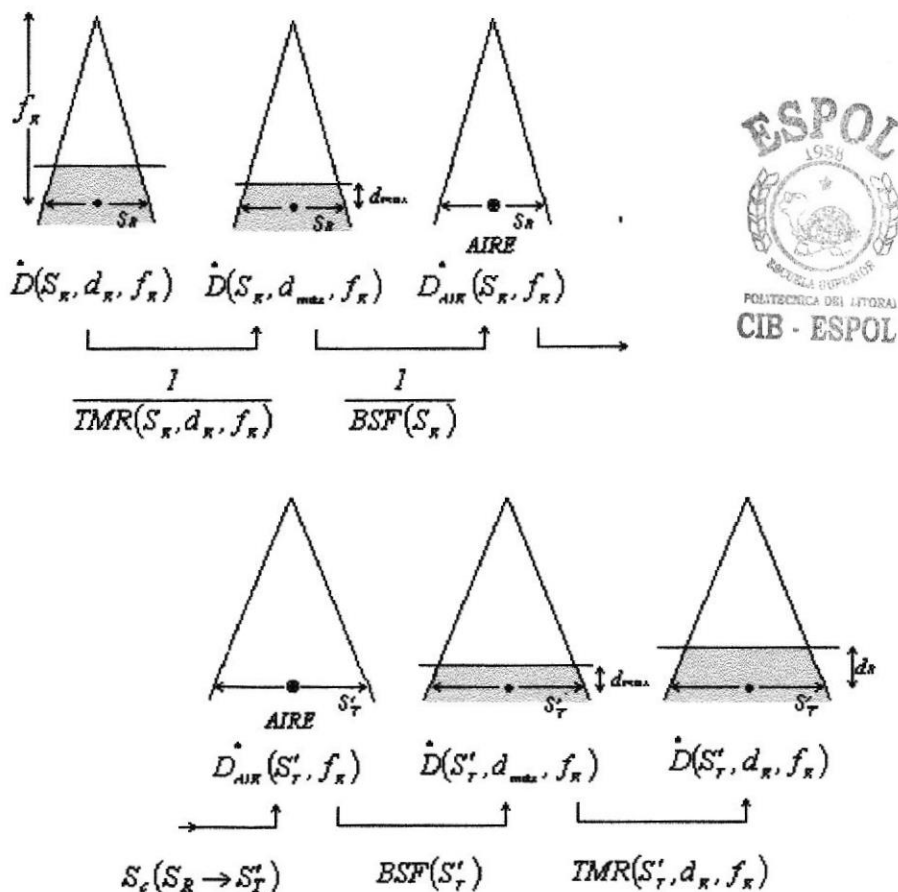
La tasa de dosis en aire para un campo de referencia  $S_R$  medido a la distancia de referencia  $f_R$ , se obtiene a partir de la tasa de dosis en agua en las condiciones referenciales mediante los tres primeros esquemas de la figura 2.10:

$$\dot{D}_{AIR}(S_R, f_R) = \dot{D}(S_R, d_R, f_R) \frac{1}{TMR(S_R, d_R, f_R)} \frac{1}{BSF(S_R)} \quad (2.20)$$

Resta por calcular el factor de dispersión del colimador a partir del factor de dispersión en el maniquí y colimador. De los esquemas de la figura 2.10 se determina que:



$$\dot{D}(S'_T, d_R, f_R) = \dot{D}(S_R, d_R, f_R) S_c(S_R \rightarrow S'_T) \frac{TMR(S'_T, d_R) BSF(S'_T)}{TMR(S_R, d_R) BSF(S_R)} \quad (2.21)$$



**Figura 2.10:** Esquema para el cálculo de la tasa de dosis en aire en función de la tasa de dosis en el maniquí, y para el cálculo del factor de dispersión del colimador  $S_c(S_R \rightarrow S'_T)$

De acuerdo a la definición de la ecuación (2.12) el factor de dispersión total está

dado por  $S_{c,p}(S_R \rightarrow S'_T) = \frac{\dot{D}(S'_T, d_R, f_R)}{\dot{D}(S_R, d_R, f_R)}$ , entonces de la ecuación (2.21) se puede

calcular el factor de dispersión del colimador  $S_c$  en función del factor de dispersión total  $S_{c,p}$ :

$$S_c(S_R \rightarrow S'_T) = S_{c,p}(S_R \rightarrow S'_T) \frac{TMR(S_R, d_R) BSF(S_R)}{TMR(S'_T, d_R) BSF(S'_T)} \quad (2.22)$$

La nomenclatura  $S_R \rightarrow S'_T$  denota al factor de dispersión por efecto del cambio del tamaño de campo de referencia al campo de tratamiento a la distancia de referencia  $f_R$ .

Por sustitución de las ecuaciones (2.20) y (2.22) en la ecuación (2.19) se obtiene la formulación de Bridier (6):

$$\dot{D}(S_T, d, f_T) = \dot{D}(S_R, d_R, f_R) S_{c,p}(S_R \rightarrow S'_T) \left( \frac{f_R}{f_T} \right)^2 \frac{TMR(S_T, d) BSF(S_T)}{TMR(S'_T, d_R) BSF(S'_T)} k_T(S'_T) \quad (2.23)$$

El factor  $k_T(S'_T)$  permite tomar en cuenta la reducción en la dosis  $\dot{D}(S_T, d, f_T)$  debido a la presencia de modificadores del haz tales como cuñas y parrillas. Este factor se determina mediante las razones de las dosis medidas con y sin modificador en las condiciones de referencia. (24),(6)



Finalmente, al formalismo para el cálculo de la dosis a lo largo del eje central de un campo simétrico, se lo hace extensivo para el cálculo de la dosis en el caso de campos asimétricos duales, para lo cual se incluye el factor fuera del eje central calculado mediante la expresión (2.8), es decir:

$$\dot{D}_{asim}(S_T, d, r, f_T) = \dot{D}_{sim}(S_T, d, f_T) (W) OCR(S_T, d, r) \quad (2.24)$$

Es decir la tasa de dosis en un punto  $r$  medido desde el eje central del colimador, para un campo asimétrico de tamaño  $S_T$  a la profundidad de tratamiento  $d$  es el producto de la tasa de dosis en el eje central del campo simétrico de tamaño  $S_T$  a la profundidad de tratamiento  $d$  por la relación fuera del eje central para el campo abierto (o con cuña) de tamaño  $S_T$  a la profundidad de tratamiento  $d$  en el punto  $r$ .

Es de señalar que todos los parámetros involucrados en la formulación de la ecuación (2.24) requieren tan sólo de mediciones para campos simétricos, los cuales en su mayoría se obtienen durante las pruebas de aceptación de un linac. Esto constituye una diferencia con respecto a otras formulaciones, donde se requieren mediciones en campos asimétricos para determinar factores de salida ya sea variando la posición de cada mordaza de manera independiente, o calculando factores empíricos de corrección de dispersión. (2), (25), (27), (28).



## **CAPITULO III**

### **3. INSTRUMENTOS DE MEDICION Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.**

De acuerdo al formalismo propuesto en el capítulo II, el problema básico consiste ahora en calcular los factores de perfil primario *POCR*, factores de frontera *BF* y factores de perfil de cuña *WPF*. Para tal efecto es necesario realizar el conjunto de mediciones que se describen a continuación.

#### **3.1 Condiciones de medición.**

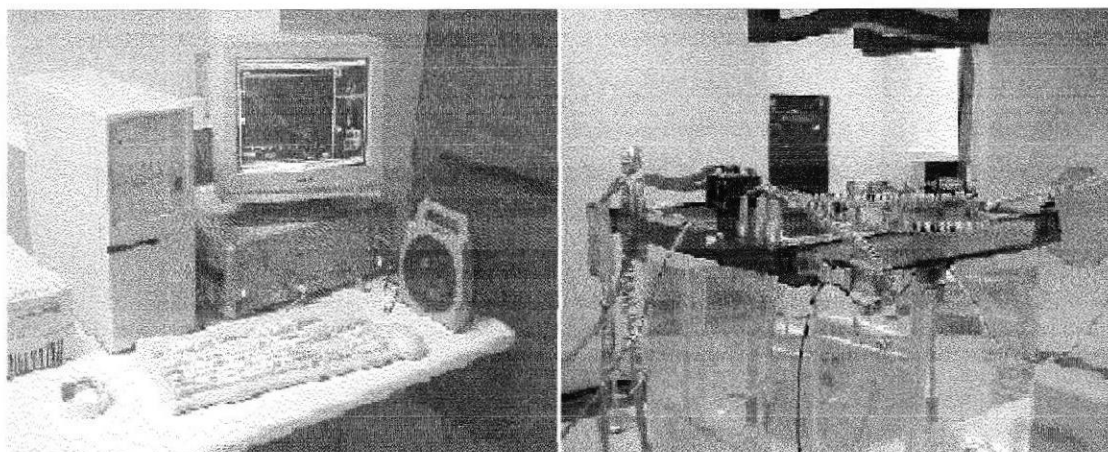
Todas las mediciones se realizaron en el acelerador lineal Siemens Mevatron K del Departamento de Radioterapia del Instituto Oncológico Nacional, el cual dispone de energías en fotones de 6 MV y 18 MV. Para la dosimetría relativa se utilizó el maniquí de agua del sistema de dosimetría Wellhöfer (Wellhöfer Dosimetrie, Schwarzebruch, Alemania), con dos cámaras de ionización Wellhöfer IC-15 de  $0.13 \text{ cm}^3$  a prueba de agua. (20), (43).

Para el caso de la medición de perfiles, una de las cámaras, llamada cámara de campo, se mueve dentro del maniquí de agua para efectuar las mediciones de ionización de acuerdo a la programación establecida por el usuario, a través de una interfase entre la computadora y el maniquí, llamada unidad de control CU500E (figura 3.1). Puesto que el sistema Wellhöfer utiliza para las mediciones estándar el modo de medición continua, el detector no se detiene para la adquisición de un dato, sino que se mueve continuamente a través del campo, por lo que necesita de la señal de una cámara de referencia para remover de la curva de porcentajes de dosis en profundidad o de perfiles, las pulsaciones inherentes al linac, para lo cual divide la señal en la cámara de campo por la señal en la cámara de referencia. (42)

La adquisición de datos en modo continuo tiene como ventajas la reducción del tiempo de medición y mayor adquisición de datos que en el modo paso a paso.



El CU500E tiene capacidad para entregar a la computadora 20 datos de puntos por segundo, y puesto que la velocidad más alta a la que se puede mover la cámara es de 15 mm/s la máxima resolución que se puede lograr es de 0.75 mm/dato (42).



**Figura 3.1:** Fotografías de los componentes básicos del sistema de dosimetría relativa. A la izquierda la computadora y la unidad de control CU500E, ambos ubicados en el área de mandos del linac A la derecha el maniquí con agua posicionado bajo el haz de radiación.

Cada una de las direcciones de movimiento de la cámara se controlan individualmente por medio de un motor y un potenciómetro conectados en el maniquí. Cada motor mueve la cámara en una dimensión al tiempo que los potenciómetros indican la posición de la misma, de tal forma que, el controlador chequea si verdaderamente ella ha alcanzado la posición deseada dentro de cierta tolerancia. La resolución de los potenciómetros es de 1/10 mm, el

intervalo de valores es de 0 hasta 4800 mm, lo cual corresponde a los 48 cm de longitud total de barrido que es posible con este maniquí (42).

En el caso de mediciones de dosis se utiliza el modo de dosis absoluta, para lo cual se retira la cámara de referencia y la cámara de campo se ubica en el punto de interés dentro del maniquí.

En lo que a las condiciones de medición se refiere. A fin de ser consistente con el protocolo de calibración de dosis absoluta IAEA TRS-277 (19), todas las mediciones se hacen en condiciones de distancia fuente superficie 95 y 90 cm para las energías de 6 y 18 MV respectivamente, y se corrigen de forma automática por el punto efectivo de medición en la cámara de ionización, que para el caso de 6 MV es 1.8 mm y para 18 MV es de 2 mm, cuyos valores han sido obtenidos experimentalmente por el fabricante de las cámaras.

Para eliminar las fluctuaciones inherentes a la electrónica del sistema, en las mediciones del perfil de haz, a todos los datos se los "suavizó" con un algoritmo de envolvente de 31 puntos (con los datos originales crea dos curvas cuasi envolventes de los cuales se obtiene su valor medio (43)). En el caso de los perfiles simétricos  $OCR(x,d,40\times40)$ ,  $OCR(r,d,40\times40)$  y  $OCR(x,d,w\times h)$ , para



considerar el hecho de que la planicidad del haz<sup>3</sup> no es idealmente de un 0% aunque tampoco rebasó el 3%, según se verificó previamente mediante la ejecución del protocolo de control de calidad (18), se promediaron los datos del perfil original con los datos del perfil espejo mediante la opción matemática que posee el administrador de datos del software. Previo a esto se les aplicó la corrección del eje central, debido a la imprecisión en la localización del centro del campo luminoso con respecto al de radiación, la misma que en todos los casos fue menor a 1 mm.

### 3.2 Factor de dispersión en el colimador y en el maniquí $S_{c,p}$

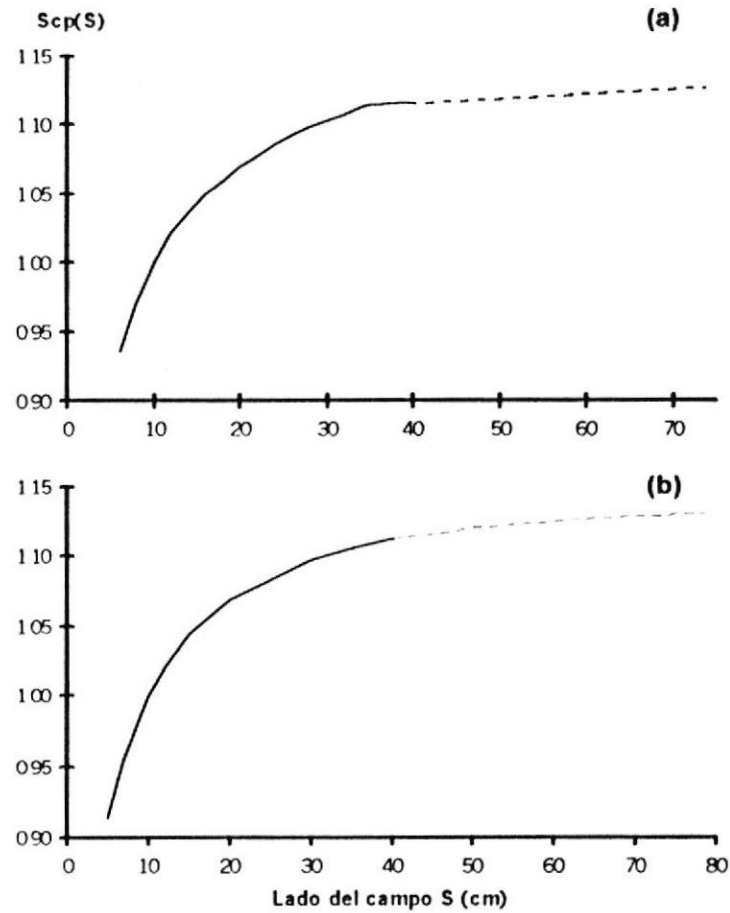
En la tabla B.I se muestran los valores de  $S_{c,p}$  en el eje central para 6 y 18 MV determinados por aplicación de la ecuación (2.12). Los datos en cursiva son para tamaños de campo cuadrados superiores a  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  que han sido extrapolados de los datos medidos. En las figuras 3.2 (a) y (b) se muestran tanto los valores medidos como los extrapolados.



<sup>3</sup> De acuerdo a las normas IEC 731 (1982), la planicidad se define como:  $\frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} 100$ ,

donde  $D_{max}$  es la dosis máxima y  $D_{min}$  es la dosis mínima en la región del 80% del tamaño de campo



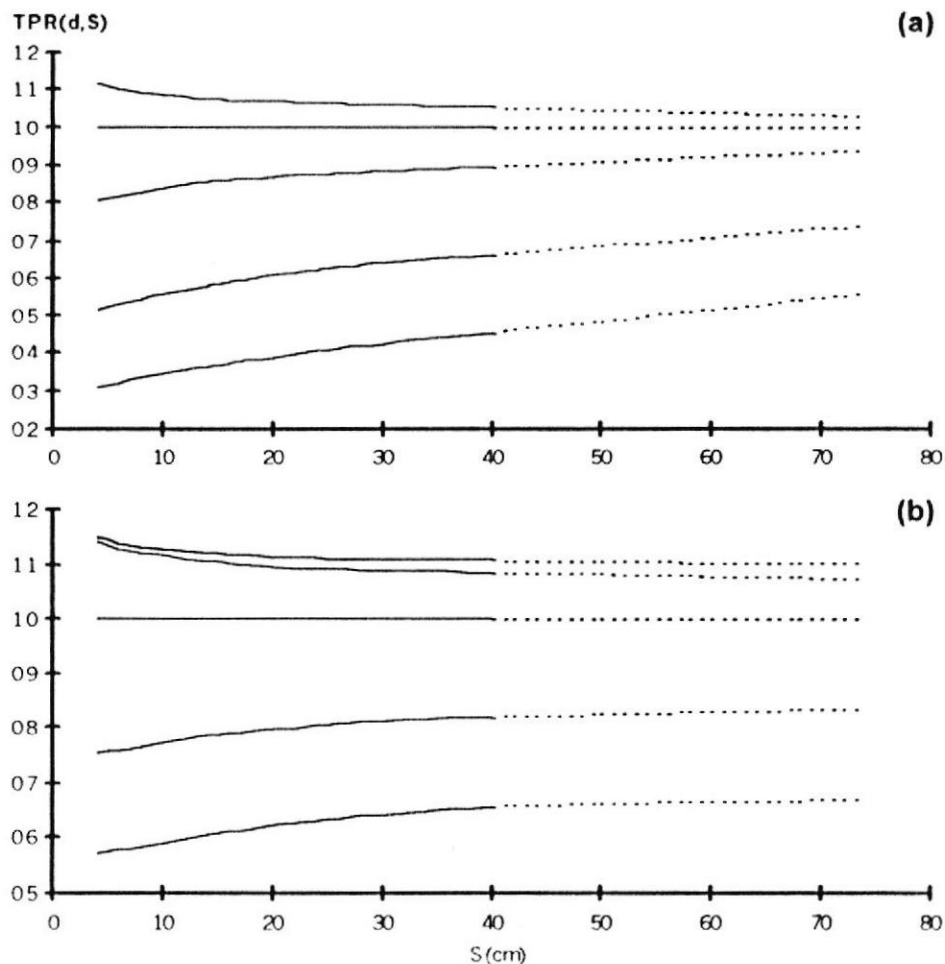


**Figura 3.2:** Factor de dispersión en el colimador y en el maniquí para las energías de 6 MV (a) y 18 MV (b). Las líneas continuas representan los valores obtenidos experimentalmente, y las discontinuas son los  $S_{c,p}$  obtenidos por extrapolación.

### 3.3. Razones tejido maniquí $TPR$

Los valores del  $TPR$  para ambas energías de fotones, se representan en las figuras 3.3(a) y 3.3(b). Estos se obtuvieron a partir de las tablas del  $TMR$  generadas por el sistema de planificación de tratamiento Theraplan/TP11, el

mismo que los calcula en base de los porcentajes de dosis en profundidad *PDP* obtenidos experimentalmente durante las pruebas de aceptación del linac, y a su vez suministrados a la base de datos de planificador mencionado (38).



**Figura 3.3:** Razones tejido maniquí en función del lado  $S$  del campo cuadrado (a) Empezando desde arriba las líneas continuas corresponden a fotones de 6 MV, para 1.5, 5, 10, 20 y 30 cm de profundidad, las líneas discontinuas representan los *TPR* obtenidos por extrapolación. (b) Similarmente para fotones de 18 MV, a las profundidades de 3, 5, 10, 20 y 30 cm

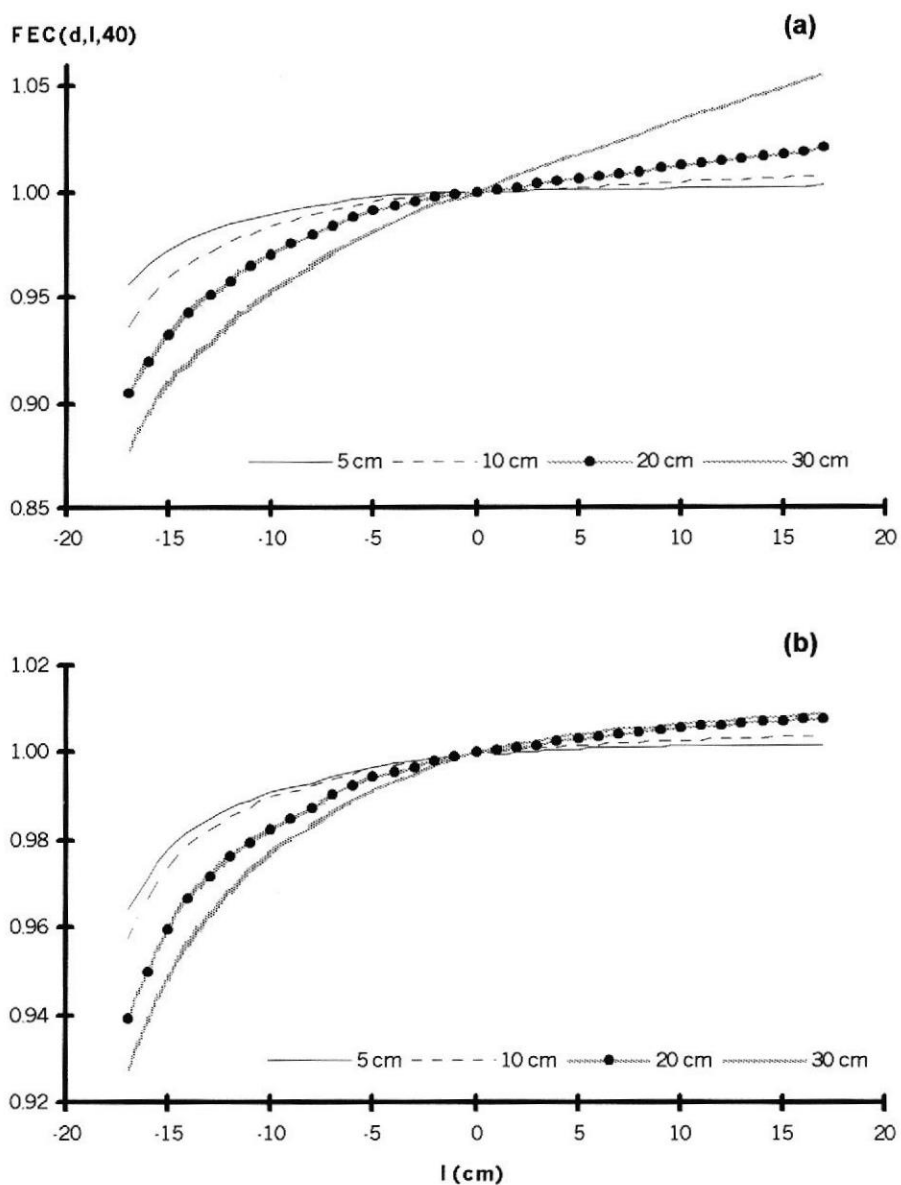
El sistema TP11 calcula los *TMR* mediante la ecuación (A.13) que se dedujo en el apéndice A. Finalmente, para encontrar los *TPR*, los *TMR* se normalizaron a las profundidades de referencia de 5 y 10 cm para 6 MV y 18 MV respectivamente.

### 3.4 Factores de borde de campo *FEC*

Los factores *FEC* se calcularon para desplazamientos de la mordaza positivos y negativos lo cual se especifica como  $l$  en la ecuación (2.17) y, cuyo valor va desde  $-17$  cm hasta  $+17$  cm en incrementos de 1 cm para las profundidades de  $d_{max}$ , 5, 10, 20 y 30 cm en ambas energías. De esta manera, el intervalo de tamaños de campo con los que se calcula el factor *FEC* van desde  $6 \times 6$  cm<sup>2</sup> hasta  $74 \times 74$  cm<sup>2</sup>.

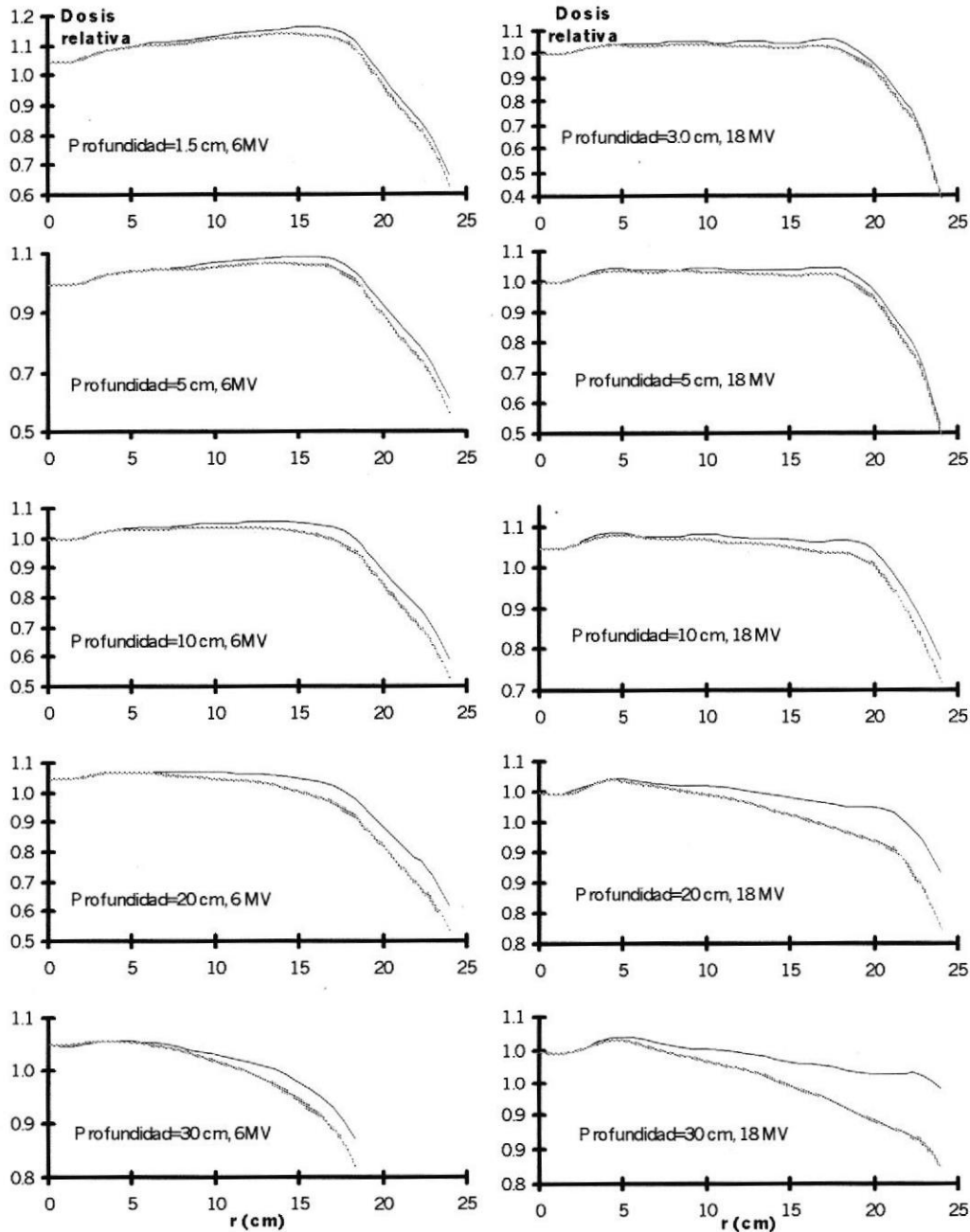
En las figuras 3.4(a) y (b) se muestran los *FEC* para cuatro profundidades, los valores numéricos se detallan en el apéndice C. En las figuras se puede observar que los *FEC* varían muy poco cuando los tamaños de campo son superiores a  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> (valores de  $l$  superiores a 0), lo cual es a consecuencia de que los *TPR* y  $S_{c,p}$  también varían ligeramente para estos tamaños de campo, tal como se observa en las figuras 3.2 y 3.3.





**Figura 3.4:** Factores de corrección de borde de campo  $FEC(d, x, 40)$  como una función de la desviación  $l$  desde el eje de rotación del colimador a las profundidades mostradas en las leyendas, (a) para fotones de 6 MV y (b) para fotones de 18 MV

### 3.5. Factores del perfil primario *POCR*



**Figura 3.5:** Comparación entre los perfiles diagonales para campos simétricos de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , (líneas discontinuas), y los perfiles primarios calculados por el método *FEC*, (líneas continuas), para fotones de 6 MV y 18 MV. Los ejes horizontales representan la distancia  $r$  al eje del colimador y los verticales las dosis relativas.

De acuerdo a la ecuación (2.17) se midieron perfiles diagonales  $OCR(d,r,40)$  a las profundidades  $d_{max}$ , 5, 10, 20 y 30 cm. Debido a que los  $TPR$  por definición se determinan utilizando mediciones en el isocentro, es necesario renormalizar los  $OCR(r,d,40 \times 40)$  para calcular los valores de los  $OCR$  que podrían obtenerse a una distancia fuente isocentro de 100 cm ( $OCR_{iso}$ ), por lo que de una simple correspondencia geométrica se obtiene :

$$OCR_{iso}(r,d,40 \times 40) = OCR\left(r \frac{SSD + d}{100}, d, 40 \times 40\right)$$



donde  $SSD$  es la distancia fuente superficie (95 cm y 90 cm para rayos x de 6 MV y 18 MV respectivamente).

En la figura 3.5 se representan simultáneamente tanto los  $OCR$  medidos como los factores de perfil primario  $POCR$  calculados con la expresión (2.17). Los valores numéricos de estos últimos se presentan en el apéndice D, en ellos se observa que los  $OCR$  obtenidos a partir de los perfiles diagonales para los campos simétricos de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  difieren sustancialmente de los  $POCR$  a medida que aumenta la distancia al eje central del colimador, y a medida que aumenta la profundidad, lo cual es una consecuencia de la disminución de dispersión lateral en el maniquí; esto explica los errores en la aproximación del

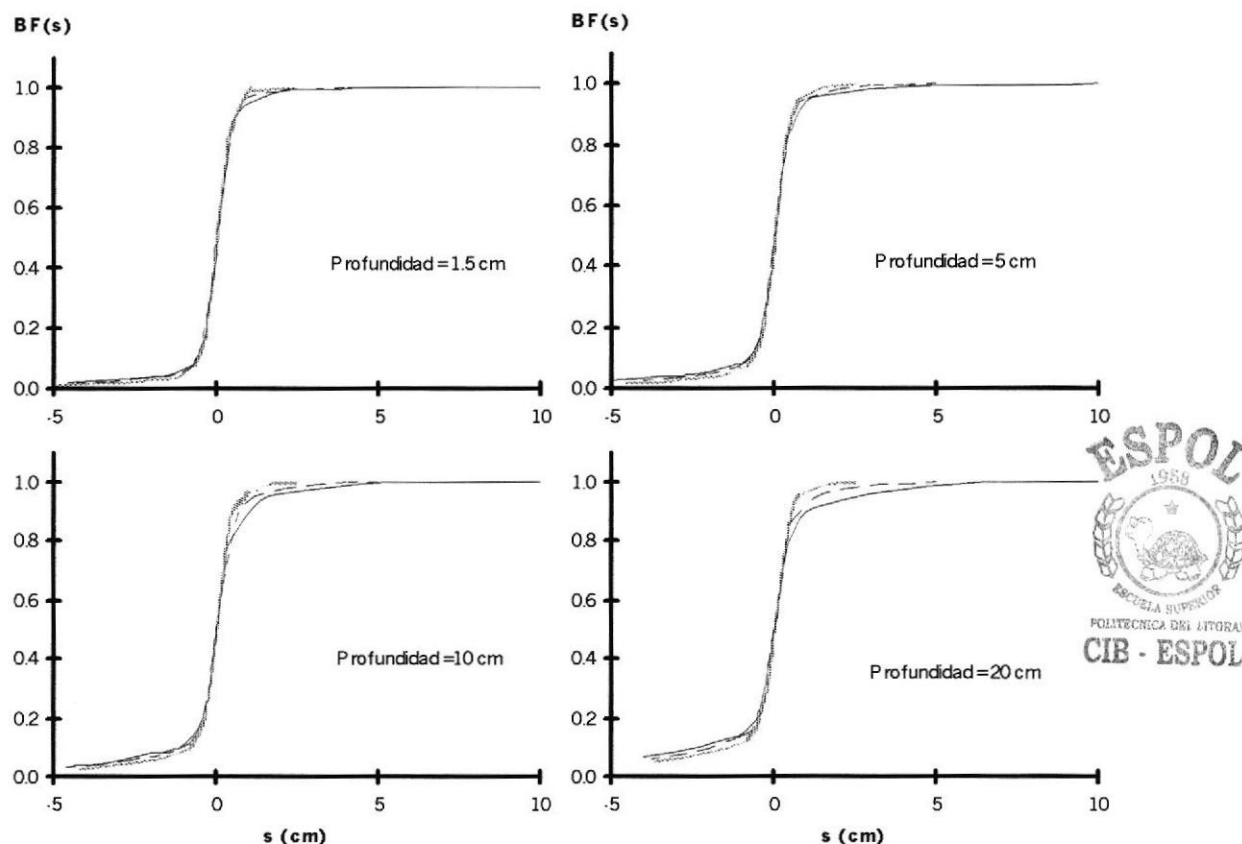
perfil primario con el producto de los perfiles transversal y longitudinal del campo de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  que se mencionó en el literal 2.1, y por tanto nuestros resultados están en concordancia con los resultados encontrados en la literatura. (9),(27).

### 3.6 Factores de frontera *BF*

En las condiciones indicadas en el literal 3.1 se configuraron para ambas energías, campos rectangulares simétricos de tamaños  $5 \times 10$ ,  $10 \times 10$  y  $20 \times 10 \text{ cm}^2$  a las profundidades de  $d_{max}$ , 5, 10 y 20 cm.

Para determinar los factores de frontera en condiciones isocéntricas es necesario efectuar un reescalamiento de la distancia  $s$ , tal como se definió en la ecuación (2.5), de tal forma que, cuando el punto de cálculo se encuentre en el isocentro para la profundidad correspondiente, el parámetro  $s$  tenga un valor igual a la mitad del lado del campo en el que se hace la medición.

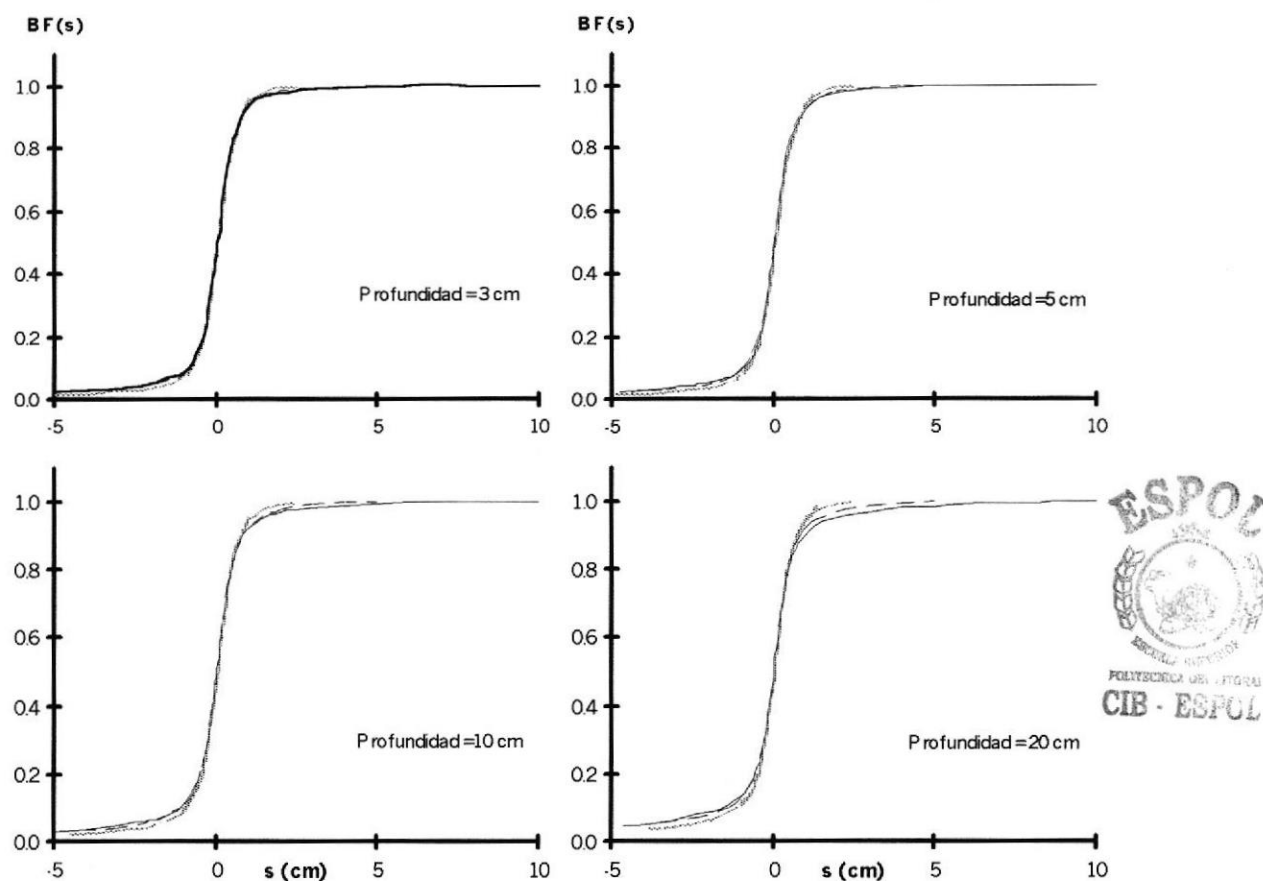
En las figuras 3.6 y 3.7 se representan los factores de frontera *BF* para los fotones de 6 MV y 18 MV respectivamente, por aplicación de la ecuación (2.3) con los factores de perfil primario que se calcularon en el literal 3.5. Los valores numéricos correspondientes se muestran en las tablas E.I a E.VIII del apéndice E.



**Figura 3.6:** Factores de frontera  $BF$  para rayos x de 6MV como una función de la distancia del borde de campo  $s$ , profundidad y tamaño de campo. Los valores positivos en el eje horizontal corresponden a puntos dentro del campo y los negativos a los puntos fuera del mismo. Los factores de frontera calculados corresponden a los campos de  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  (.....),  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (-----) y  $20 \times 10 \text{ cm}^2$  (—).

Las gráficas de las figuras 3.6 y 3.7 muestran que, para bajas profundidades ( $d_{max}$  y 5 cm) no hay diferencias apreciables de los factores  $BF$  entre los distintos tamaños de campo, sin embargo a mayores profundidades (10 y 20 cm) estos factores ya manifiestan diferencias notables, sobretodo a distancias cercanas a la frontera del campo.



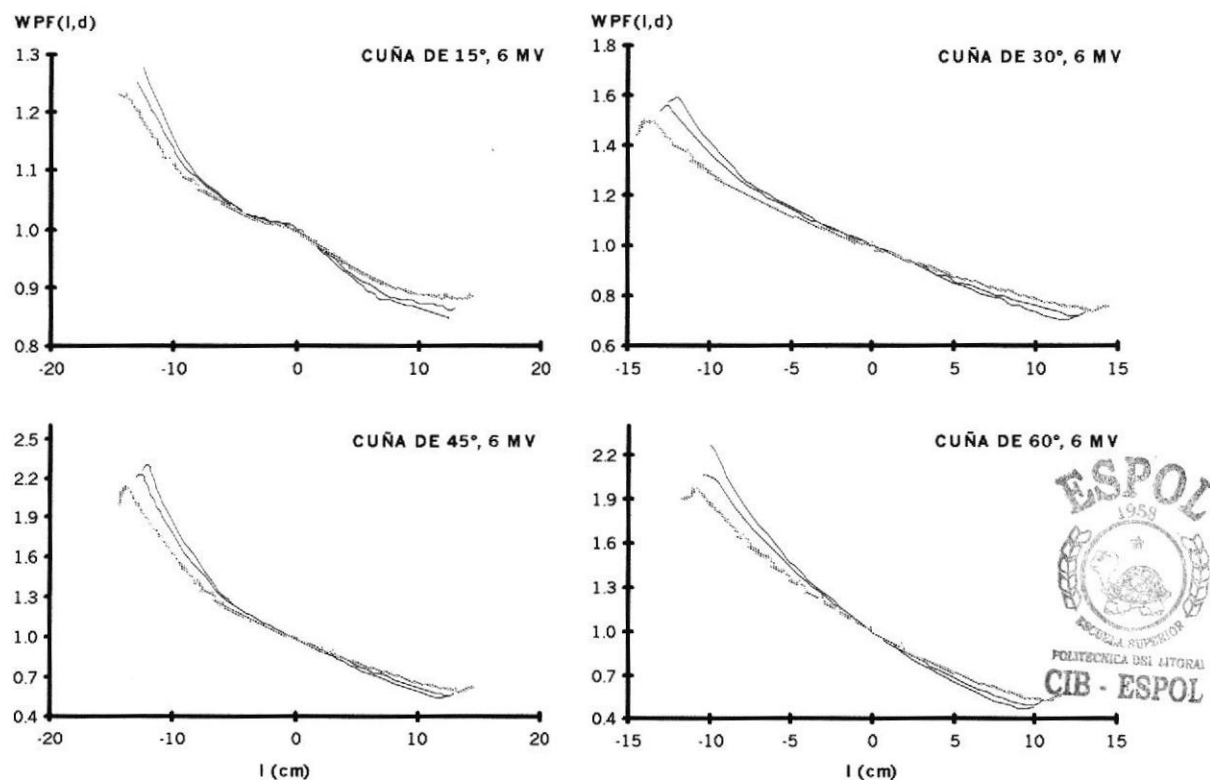


**Figura 3.7:** Factores de frontera  $BF$  para rayos x de 18 MV como una función de la distancia del borde de campo  $s$ , profundidad y tamaño de campo. Los valores positivos en el eje horizontal corresponden a puntos dentro del campo y los negativos a los puntos fuera del mismo. Los factores de frontera calculados corresponden a los campos de  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  (.....),  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (-----) y  $20 \times 10 \text{ cm}^2$  (—).

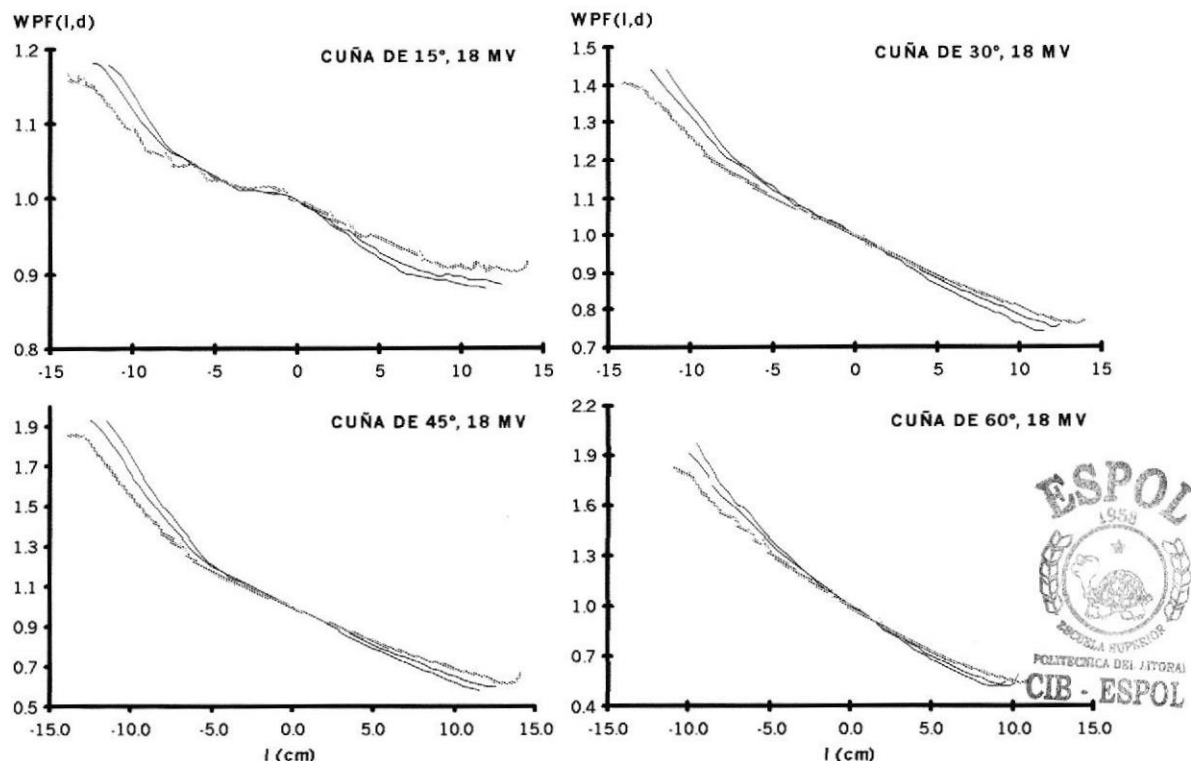
### 3.7 Factores de perfil de cuña $WPF$

De acuerdo a la definición expresada en la ecuación (2.7), se calcularon los  $WPF$  para los rayos x de ambas energías a las profundidades de  $d_{max}$ , 5, 10 y 20 cm. Los perfiles de cuña se midieron para los campos más grandes que es

posible configurar las mordazas con cada una de las cuñas, esto es, un campo de  $30 \times 25 \text{ cm}^2$  para las cuñas de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , y un campo de  $30 \times 20 \text{ cm}^2$  para la cuña de  $60^\circ$ . En las figuras 3.8 y 3.9 se han representado por facilidad sólo los resultados obtenidos para tres profundidades. Los datos numéricos de los perfiles de cuña para ambas energías se muestran en las tablas F.I a F.VIII del apéndice F.



**Figura 3.8:** Factores de perfil de cuña para fotones de 6 MV en función de la distancia lateral  $I$  medida desde el eje central del colimador. La simbología corresponde a las profundidades de 5 cm (—), 10 cm (-----) y 20 cm (.....) respectivamente. La dirección positiva de  $I$  corresponde a puntos en el haz afectados por el extremo más grueso de la cuña, y la negativa a aquellos puntos afectados por el extremo más delgado de la misma.



**Figura 3.9:** Factores de perfil de cuña para fotones de 18 MV en función de la distancia lateral  $I$  medida desde el eje central del colimador. La simbología corresponde a las profundidades de 3 cm (—), 10 cm (-----) y 20 cm (.....) respectivamente. La dirección positiva de  $I$  corresponde a puntos en el haz afectados por el extremo más grueso de la cuña, y la negativa a aquellos puntos afectados por el extremo más delgado de la misma.

Los  $WPF$  se han normalizado para que tomen el valor de 1.0 en el eje central, adicionalmente, sólo se han considerado distancias laterales  $I$  desde el eje del colimador de  $\pm 15.5$  cm para las cuñas de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , y, de  $\pm 12.5$  cm para la cuña de  $60^\circ$ , de esta forma se descartan aquellos puntos que están fuera del campo geométrico de la cuña, donde se presentan grandes fluctuaciones del  $WPF$  debido al cociente entre dos cantidades pequeñas.

## CAPITULO IV

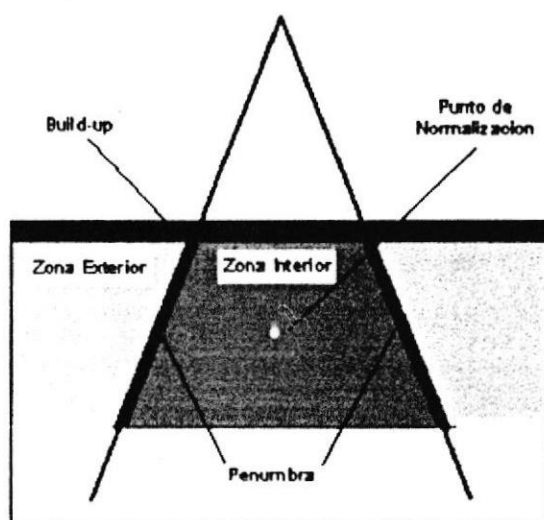
### 4. VERIFICACION Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 4.1 Generación de perfiles para campos asimétricos basados en las tablas calculadas.

A fin de verificar la habilidad del método implementado para generar cualquier tipo de perfil, es decir, la idoneidad de nuestros resultados en lo referente a los factores de perfil primario  $POCR(d, r)$ , factores de frontera  $BF(s)$  y factores de perfil de cuña, se procedió a calcular teóricamente una serie de perfiles para ser comparados con los obtenidos experimentalmente.



Para facilitar el análisis de los resultados, se tomó como base el método para caracterizar y analizar las diferencias entre los haces medidos y calculados, propuesto en el TG 53 (13), el que ha su vez se basa en el método utilizado por Van Dyk (40). Dicho método propone la separación del haz en diversas regiones (figura 4.1):



**Figura 4.1:** Regiones o zonas del haz de radiación según el TG 53 (AAPM)

- Región interior del haz o zona central de dosis elevada y bajo gradiente de dosis
- Región de penumbra o zona de alto gradiente de dosis (0.5 cm a cada lado del límite del campo).

- Región exterior o zona de baja dosis y bajo gradiente (zona exterior de la penumbra)
- Región de *build-up* (comprende desde la superficie hasta la profundidad de dosis máxima tanto en la región interior como en la región exterior).
- El eje central
- El punto de especificación de dosis (punto de normalización)

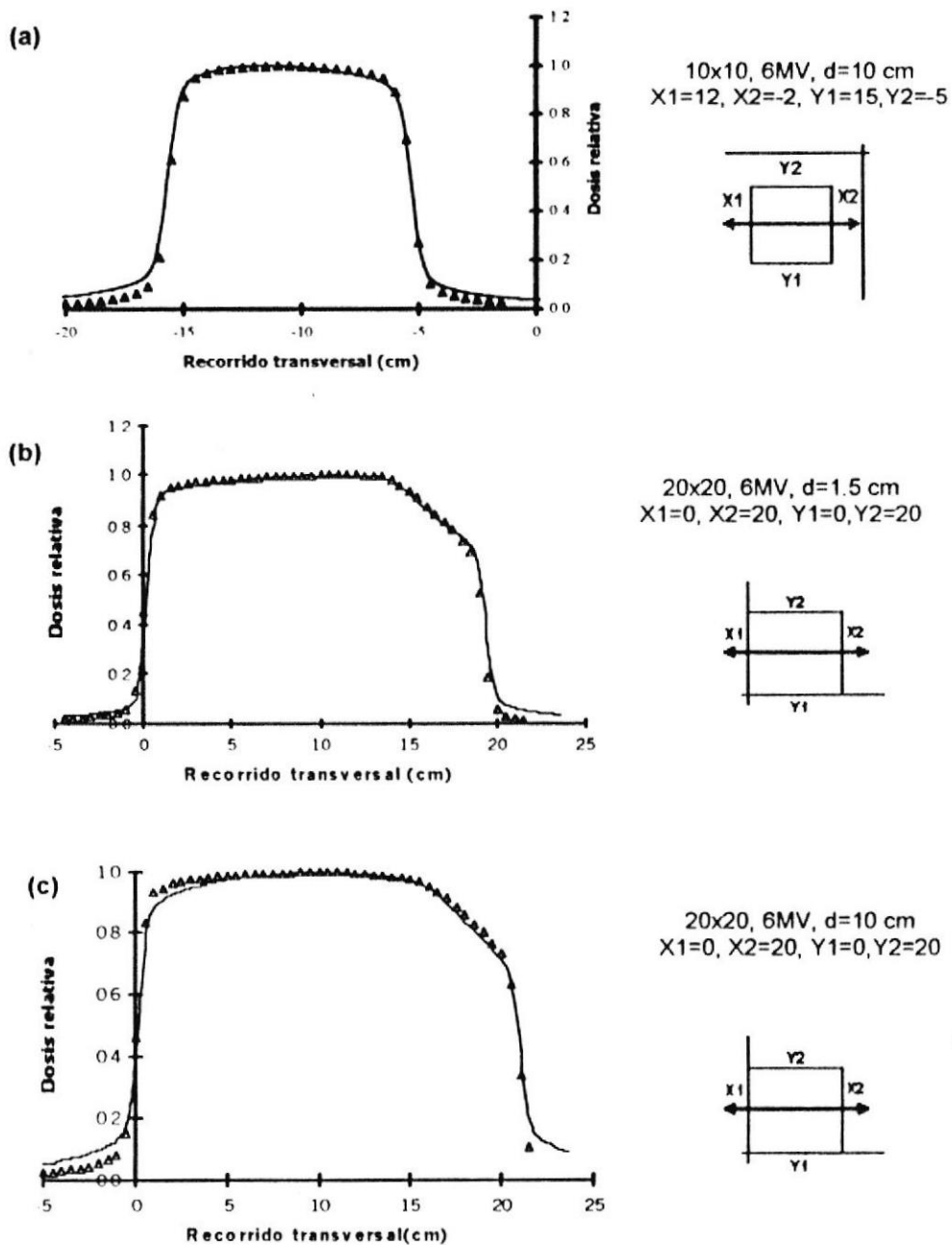
Las diferencias porcentuales entre las dosis medidas y calculadas se referirán al punto de normalización, tal como se indica en el TG 53 (40).

El análisis de los resultados de esta sección se limita a los valores obtenidos en la zona interior, la penumbra y zona exterior. Puesto que todos los perfiles se normalizaron en el eje central del campo irradiado a la profundidad de medición, no se consideran las discrepancias en este punto. Tampoco se consideran cálculos en la zona de *build-up* ya que no constituye una zona de mayor interés dosimétrico.

#### 4.1.1 Perfiles para campos asimétricos abiertos



Para 6 MV se configuraron los campos mostrados en los dibujos insertos en la figura 4.2. Todos ellos son campos asimétricos duales.



**Figura 4.2** Perfiles para campos asimétricos con energía de 6 MV medidos a distancia fuente superficie (SSD) de 95 cm. Las líneas continuas representan los valores medidos, los símbolos ( $\Delta$ ) representan los valores calculados. En los recuadros a la derecha de cada perfil se indica la configuración de cada una de las mordazas, mientras que la dirección de medición se indica por la flecha doble.

Para facilitar el análisis de estos resultados, en la tabla I se presentan las diferencias máximas encontradas en cada una de las zonas definidas anteriormente, entre los valores relativos de las dosis medidas y calculadas.

Campo (cm <sup>2</sup> )	X1,X2,Y1,Y2 (cm)	Profundidad del perfil (cm)	Interior del haz (%)	Penumbra (mm)	Exterior del haz (%)
10x10	12,-2,15,-5	10	1.6	1.0	-5.4
20x20	0, 20, 0, 20	1.5	1.4	2.0	-5.2
20x20	0, 20, 0, 20	10	5.4	1.5	-11.7

**Tabla I:** Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados para fotones de 6 MV

Tomando como referencia los criterios de aceptabilidad dados en el TG 53, en base a las expectativas de sus autores, cuyos valores para campos asimétricos son: en el interior del haz el 3%, en la región de penumbra 2 mm y en la zona exterior del haz el 3%; entonces:

- En la región interior del haz el criterio es rebasado únicamente por el campo de 20x20 cm<sup>2</sup> a 10 cm de profundidad (figura 4.2c), en particular esta discrepancia ocurre en una pequeña zona cercana al límite del campo, en el resto de esta zona la discrepancia no supera el 1%. En el caso de los dos



primeros perfiles (figuras 4.2a y 4.2b) las discrepancias no alcanzan en ningún caso el 2%.

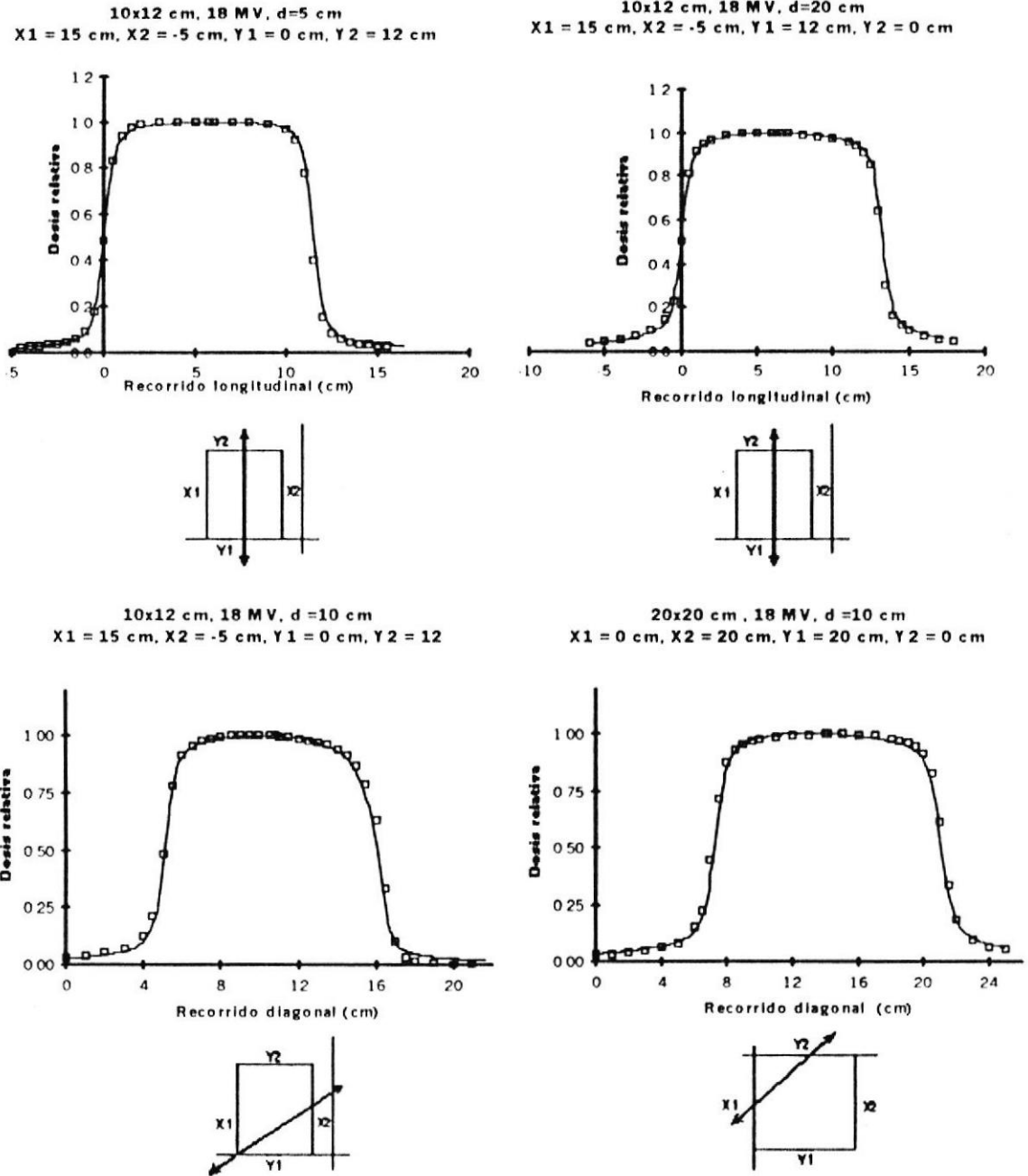
- En las zonas de penumbra la máxima variación es de 2 mm, es decir dentro del criterio de aceptabilidad.
- En la zona exterior al haz, las desviaciones tienen valores mayores al 5%. Estos valores son por defecto, es decir, para esta energía el modelo utilizado de cálculo del OCR subestima la dosis en esta zona.

En la tabla II se presentan las máximas diferencias encontradas en la energía de 18 MV para los perfiles de la figura 4.3.

Campo (cm <sup>2</sup> )	X1,X2,Y1,Y2	Profundidad del perfil (cm)	Interior del haz (%)	Penumbra (mm)	Exterior del haz (%)
10x12	15, -5, 0, 12	5	1.9	1.5	-3.3
10x12	15, -5, 12, 0	20	1.0	1.5	-3.0
10x12	15, -5, 0, 12	10	3.0	2.0	-3.2
20x20	0, 20, 20, 0	10	2.8	1.5	-3.0

**Tabla II:** Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados para fotones 18 MV





**Figura 4.3** Perfiles para campos asimétricos con la energía de 18 MV medidos a distancia fuente superficie (SSD) de 90 cm. Las líneas continuas representan los valores medidos, los símbolos (□) representan los valores calculados. En los recuadros inferiores a cada perfil se indica la configuración de cada una de las mordazas, mientras que la dirección de medición se indica por la flecha doble.

En la tabla II se observa que:

- Las discrepancias en el interior del haz se encuentran dentro del criterio.
- En la región de penumbra todas las discrepancias son inferiores o iguales a 2 mm.
- En la zona exterior del haz las discrepancias apenas rebasan el criterio correspondiente

Se observa que las diferencias entre los perfiles medidos y calculados son menores para la energía de 18 MV que para los de 6 MV.

#### **4.1.2 Perfiles para campos asimétricos con cuña**

Para ambas energías se configuraron campos hemibloqueados con cuña, pues constituyen uno de los casos más frecuentes en la práctica clínica (figuras 4.4 y 4.5). En lo referente al criterio de aceptación, el TG 53 establece: en el interior del haz el 5%, en la región de penumbra 3 mm y en la zona exterior del haz el 5%.

Como antes, la tabla III muestra las máximas diferencias entre las dosis medidas y calculadas en las tres zonas de los haces de 6 MV.



Cuña	Interior del haz (%)	Penumbra (mm)	Exterior del haz (%)
15°	2.6	0.5	-4.4
30°	3.3	2.5	-5.6
45°	3.8	4	-9.4
60°	1.6	2	-9.1

Tabla III: Máximas diferencias encontradas entre los perfiles medidos y calculados en campos con cuñas para fotones de 6 MV.

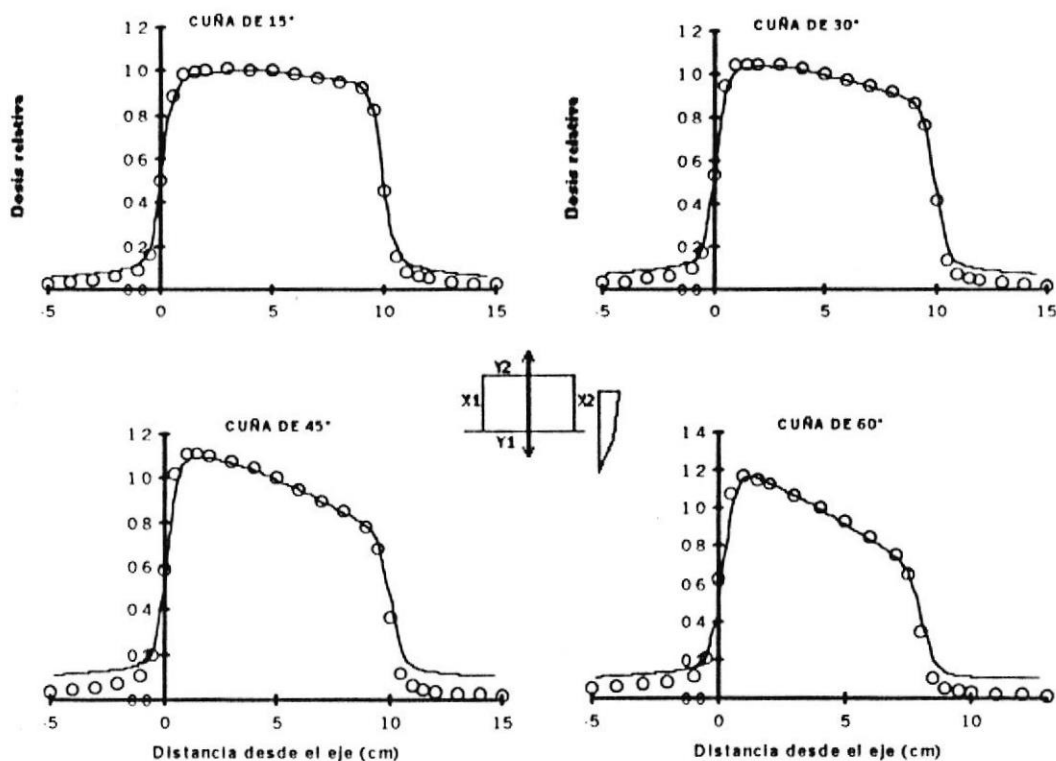


Figura 4.4: Perfiles para cuñas con la energía de 6 MV, con SSD = 95 cm y a una profundidad de 5 cm. Las cuñas de 15°, 30° y 45° corresponden a un campo hemibloqueado de 20 x 10 cm con X = 20 cm, Y1 = 0 cm, Y2 = 10 cm, mientras que para la cuña de 60° el campo es de 20 x 8 cm con X = 20 cm, Y1 = 0 cm, Y2 = 8 cm. Los valores medidos se representan por líneas sólidas, mientras que los símbolos (○) representan los valores calculados que se describen en el texto. La dirección de medición, así como la dirección de la cuña se indican en el gráfico inserto.

El análisis de la tabla III muestra que:

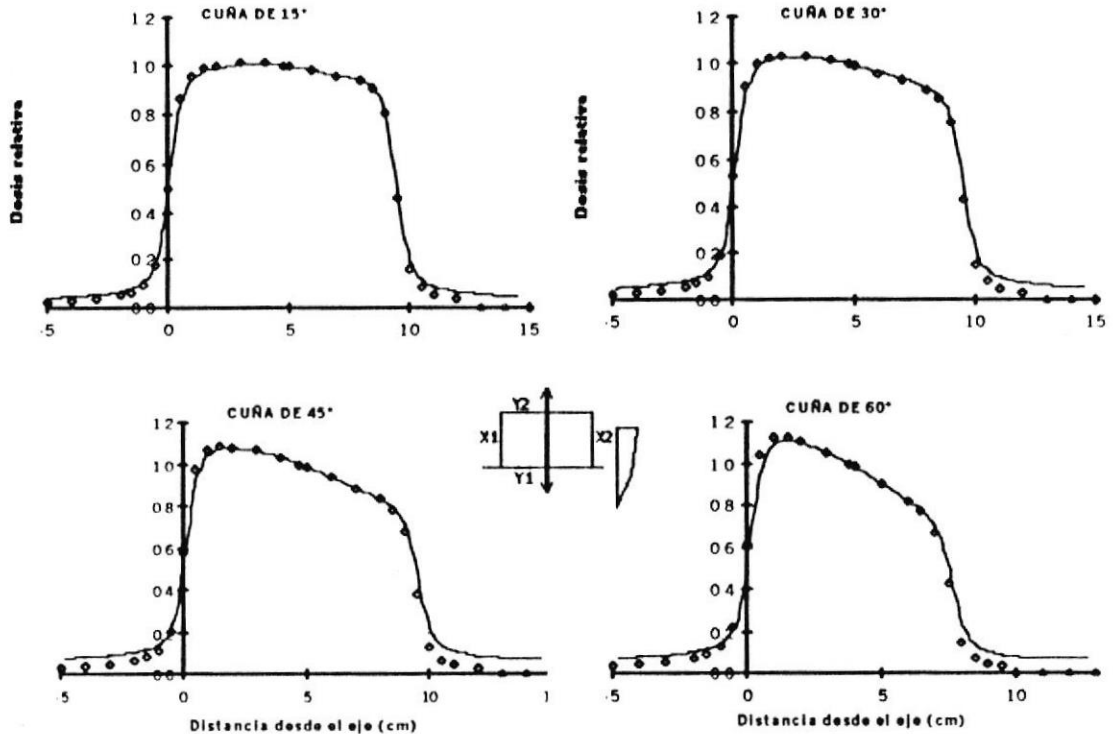
- En el interior del haz todos los valores están dentro del criterio del TG 53 (5%), las máximas discrepancias están en "la punta de la cuña" la cual no es zona extensa, ni de gran importancia en la dosimetría clínica.
- En la zona de penumbra las discrepancias son inferiores a los 3 mm, con excepción de la cuña de 45° en la que se encuentran puntos en la zona de penumbra externa que superan al criterio.
- En la zona exterior del haz las diferencias en general son mayores al 5%. Como se observa en la figura 4.3 en todos los casos, al igual que con campos abiertos, el modelo utilizado subestima la dosis en esta zona.

Para 18 MV, las máximas diferencias se muestran en la tabla IV:

Cuña	Interior del haz (%)	Penumbra (mm)	Exterior del haz (%)
15°	1.7	1.0	-3.4
30°	2.2	1.8	-5.0
45°	3.1	2.8	-7.3
60°	3.4	2.0	-7.0

**Tabla IV:** Máximas diferencias encontradas entre los perfiles de dosis medidos y calculados en campos con cuñas para fotones de 18 MV.





**Figura 4.5:** Perfiles para cuñas obtenidos con la energía de 18 MV, con SSD = 90 cm y a una profundidad de 5 cm. Las cuñas de 15°, 30° y 45° corresponden a un campo hemibloqueado de 20 x 10 cm con  $X = 20$  cm,  $Y1 = 0$  cm,  $Y2 = 10$  cm, mientras que para la cuña de 60° el campo es de 20 x 8 cm con  $X = 20$  cm,  $Y1 = 0$  cm,  $Y2 = 8$  cm. Los valores medidos se representan por líneas sólidas, mientras que los símbolos (○) representan los valores calculados que se describen en el texto. La dirección de medición, así como la dirección de la cuña se indica en el gráfico inserto.

De la tabla IV y de la figura 4.5 se observa que:

- En el interior del haz en ningún caso se rebasa al 5% de discrepancia.
- En la zona de penumbra todas las diferencias son inferiores a los 3 mm.

- En la zona exterior al haz los valores de discrepancia son superiores o iguales al 5% (salvo en el caso de la cuña de 15°), nuevamente el modelo subestima la dosis en los puntos fuera del campo de radiación.

## 4.2 Tasas de dosis

En esta sección se pretende poner a prueba el formalismo de la ecuación (2.24) para el cálculo de la tasa de dosis en un punto cualesquiera del campo asimétrico regular con cuña o sin cuña para las energías de 6 MV y 18 MV. Para el efecto, se lleva a cabo un estudio sistemático en un maniquí de agua, sobre el cual se hizo incidir haces asimétricos que se van incrementando progresivamente.

### 4.2.1 Campos abiertos

Para cada una de las técnicas de irradiación, esto es técnica fija (SSD) y técnica isocéntrica (DFI), se diseñaron dos tipos de experimentos, los cuales tuvieron por objetivo discriminar la idoneidad de los factores de frontera  $BF$  así como los del perfil primario  $POCR$ , en combinación con el formalismo para el cálculo de la tasa de dosis.



En cada caso, una de las mordazas independientes (la X1) se mantuvo estacionaria en +10 cm, mientras que la opuesta (la X2) se mueve hacia el eje central del colimador y aun más allá

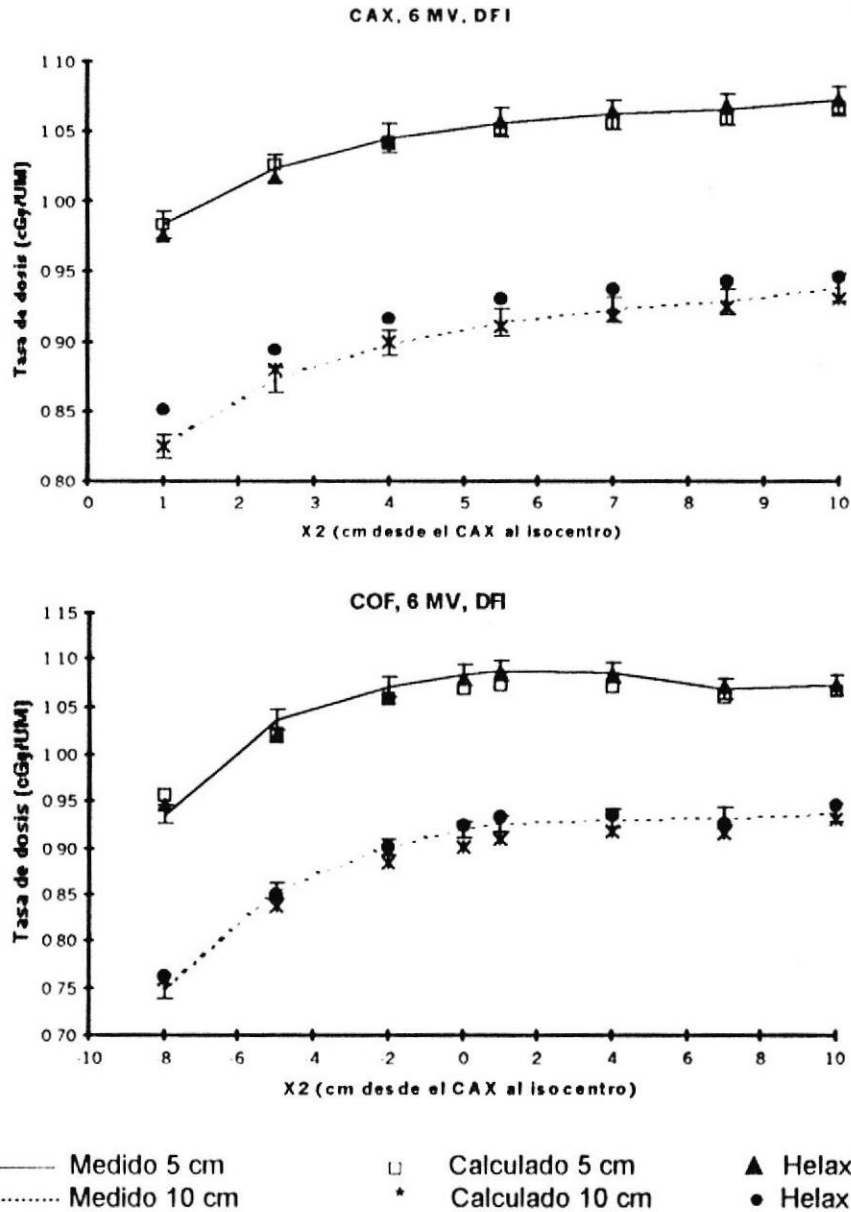
Para cada una de las configuraciones de las mordazas, se midieron las tasas de dosis a diferentes profundidades, en particular en el centro del campo proyectado (denotado como COF) y en el eje de rotación del colimador (denotado como CAX).

Las tasas de dosis se midieron con el sistema de dosimetría Wellhöfer en modo de dosimetría absoluta, utilizando una cámara de ionización IC-15. Sin embargo, debido a que esta cadena dosimétrica (cámara IC15 + controlador) no ha sido calibrada en un laboratorio de calibración secundario, la tasa de dosis absoluta se determinó por comparación de las lecturas (corregidas por presión y temperatura) obtenidas con esta cámara, en las mismas condiciones con las que se calibró el linac (protocolo de dosimetría TRS-277). Así pues, la lectura obtenida de esta forma equivale a la tasa de dosis a la que está calibrado el linac, es decir 1 cGy/UM; de esta manera las lecturas para cualquier otro campo se correlacionaron con la lectura de calibración.

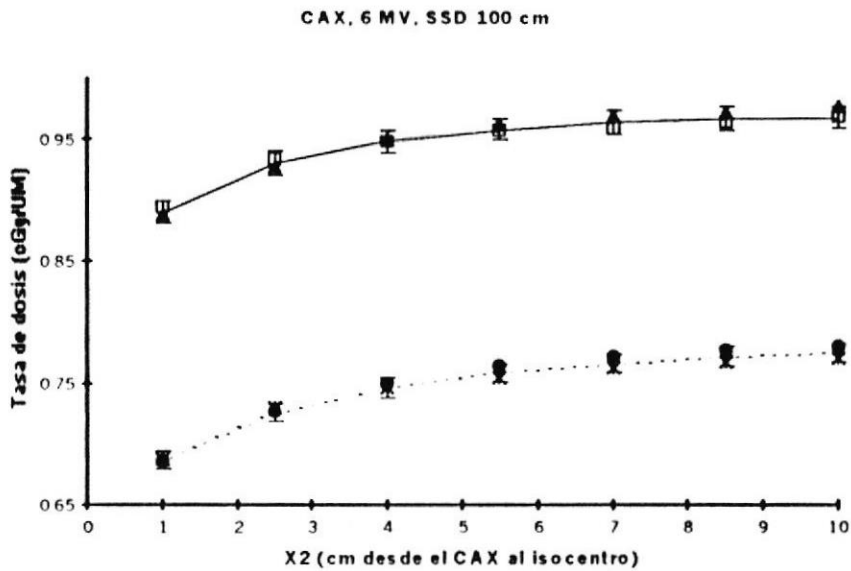
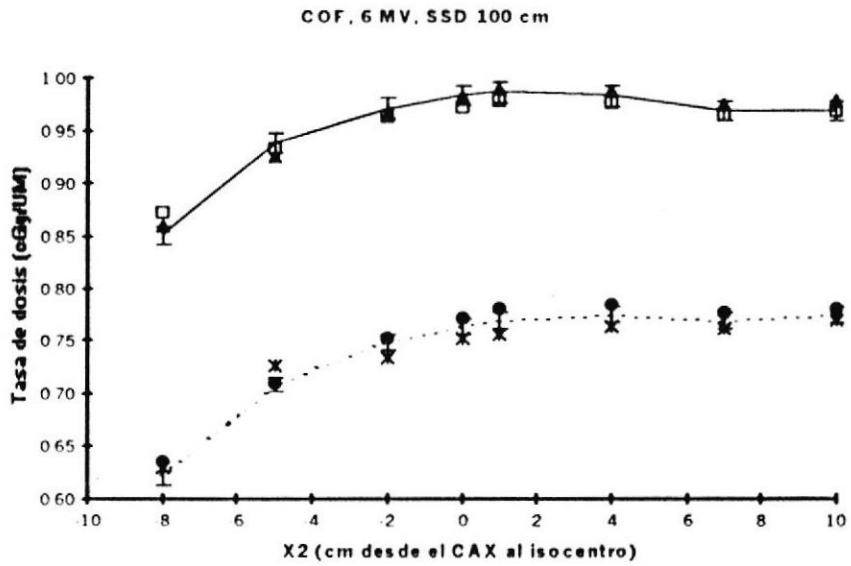




En la figura 4.6 y 4.7 se muestran los resultados encontrados para la energía de 6 MV. Cada medición corresponde al promedio de tres lecturas consecutivas.



**Figura 4.6:** Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica isocéntrica (DFI). Las barras de error representan el  $\pm 1\%$  del valor medido



— Medido 5 cm                      □ Calculado 5 cm                      ▲ Helax 5 cm  
 ..... Medido 10 cm                      \* Calculado 10 cm                      ● Helax 10 cm

**Figura 4.7:** Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica fija (SSD). Las barras de error representan el  $\pm 1\%$  del valor medido

De las figuras antes mencionadas se observa que en general las tasas de dosis están dentro del 1 % de los valores medidos, las peores situaciones se observan a las profundidades de 10 cm en el caso en que el cálculo se hace en el centro del campo asimétrico *COF*, donde las discrepancias alcanzan un valor máximo del 2%. En esta condición los factores de frontera *BF* toman el valor de 1.0 en concordancia con su definición, por lo que el único factor involucrado es el factor de perfil primario *POCR*, que se constituye en la fuente de discrepancia.

Para la evaluación de las tasas de dosis se utilizaron los mismos criterios del TG-53 mencionados anteriormente, por lo tanto las discrepancias del 2% en los cálculos en el *COF* están dentro de la tolerancia.

Los cálculos de las tasas de dosis en el eje central del colimador, *CAX*, corresponden a puntos en el interior del campo asimétrico, en cuyo caso el criterio del 3% no fue rebasado en ningún caso, inclusive en campos de alta asimetría ( $X_2 = 1$  cm y  $X_2 = -8$  cm).

Como se observa en las figuras 4.6 y 4.7, a las tasas de dosis calculadas y a las tasas de dosis medidas se han superpuesto los cálculos que efectúa el sistema de planificación Helax en un maniquí de densidad 1.0. Es interesante observar que para las mismas condiciones de medición, los valores obtenidos con el



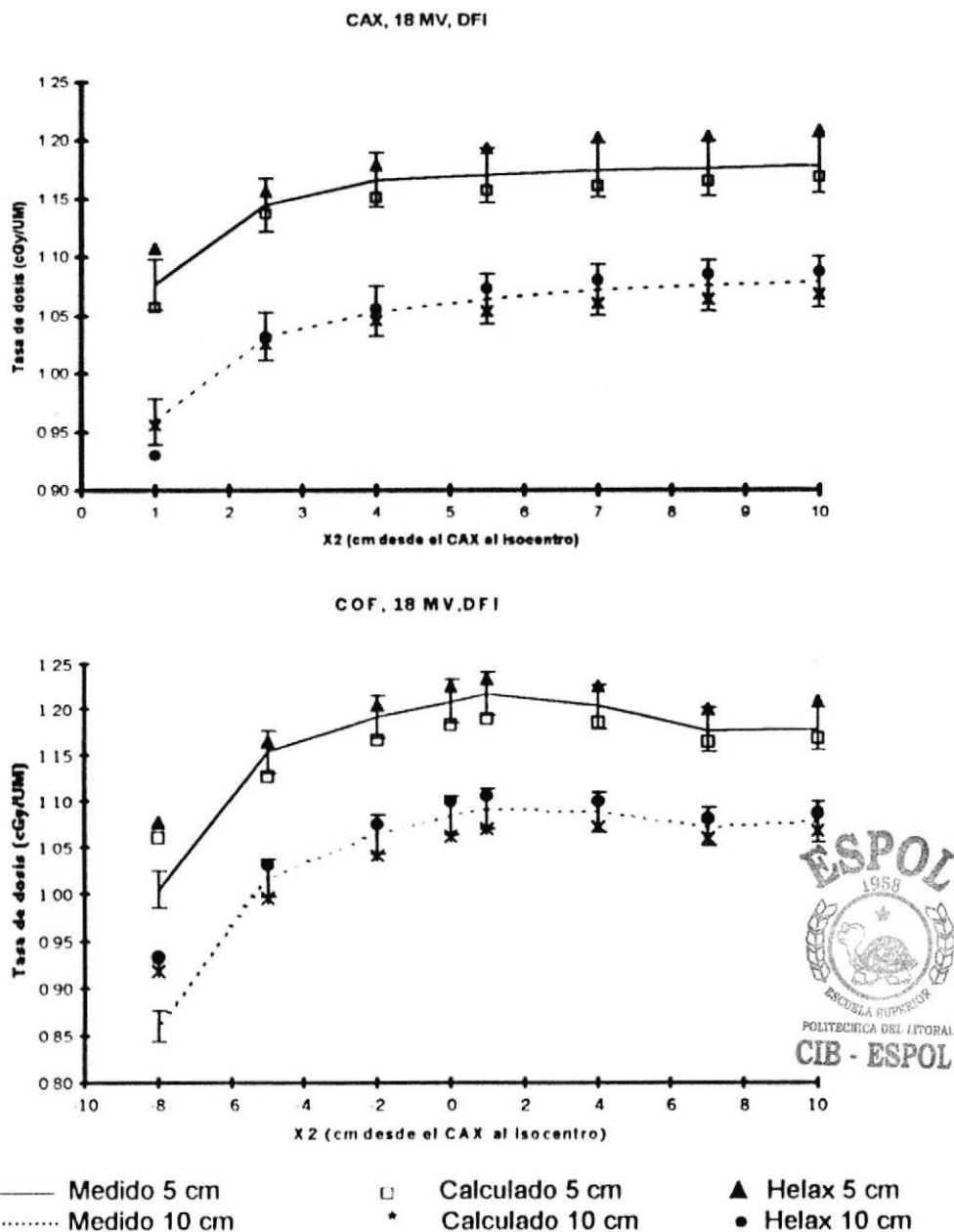
planificador son superiores a los valores medidos. Las diferencias que se alcanzan con la energía de 6 MV en general no sobrepasan del 1% salvo en una de ellas (CAX, 6 MV, DFI, profundidad de 10 cm) donde la discrepancia llegó al 3%.

Para la energía de 18 MV, el acuerdo entre lo medido y calculado fue más discrepante que con 6 MV como se verifica a continuación.

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran gráficamente los resultados. Las barras de error son del  $\pm 2\%$  con respecto del valor medido. Valores del 4% y 6% de discrepancia se obtuvieron en el caso de campos de alta asimetría ( $X_2 = 1$  cm y  $X_2 = -8$  cm), esto sin embargo se explica en razón de que los puntos de cálculo se encuentran dentro de la zona de penumbra en donde los gradientes de dosis son elevados y adicionalmente para ese tamaño de campo y energía no se garantiza la existencia de equilibrio electrónico lateral.

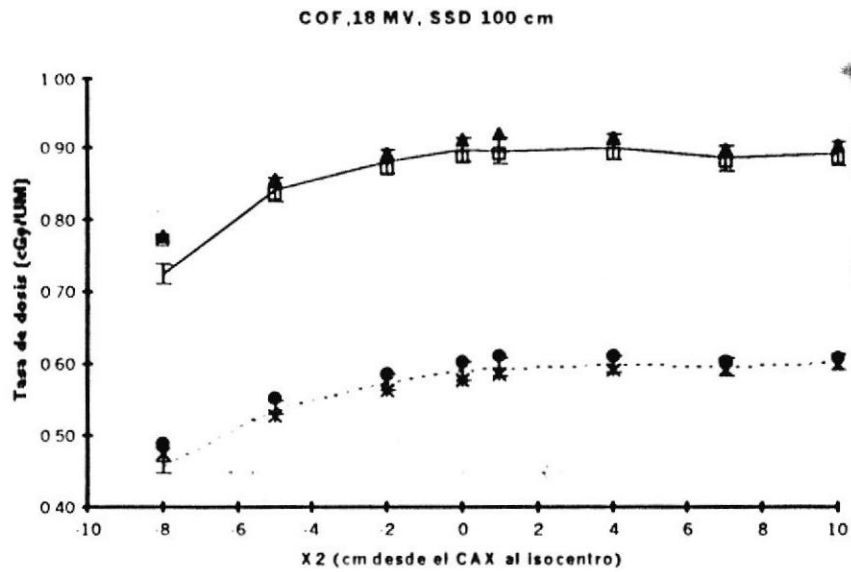
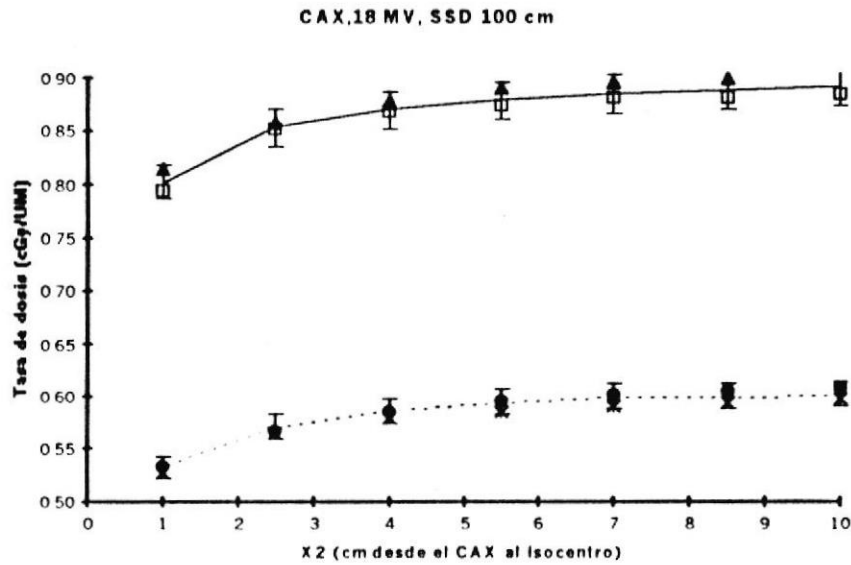
Por otro lado, los cálculos efectuados por el sistema de planificación Helax también tienen discrepancias del 2%, en el caso más crítico (CAX, 18 MV, DFI, profundidad = 5 cm) existen puntos donde las discrepancias superan al 2% inclusive en cálculos en el eje central y con campo simétrico.





**Figura 4.8:** Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica isocéntrica (DFI). Las barras de error representan el  $\pm 2\%$  del valor medido





— Medido 10 cm                      □ Calculado 10 cm                      ▲ Helax 10 cm  
 ..... Medido 20 cm                      \* Calculado 20 cm                      ● Helax 20 cm

**Figura 4.9:** Comparación entre las tasas de dosis medidas, las calculadas por el método aquí desarrollado, y las tasas de dosis calculadas por el planificador Helax con técnica fija (SSD). Las barras de error representan el  $\pm 2\%$  del valor medido

De los resultados encontrados en este apartado se desprende que, todos los cálculos llevados a cabo con el formalismo para campos asimétricos son menores a los que se han encontrado por medición directa y estos a su vez son inferiores a los que calcula el sistema Helax, lo cual indica que el formalismo propuesto subestima las tasas de dosis en campos abiertos, en tanto que el sistema de planificación las sobrestima. En otras palabras, se diría que al verificar de forma rutinaria los cálculos efectuados por el sistema Helax, existe una banda de discrepancia entre ambos cálculos que debe ser aceptada, por ser inherente al método de cálculo de cada uno de ellos.

Energía	Técnica de Irradiación	Discrepancia %
6	SSD	-0.7
	DFI	-1.1
18	SSD	-2.1
	DFI	-2.4



**Tabla V:** Discrepancias promedio entre las tasas de dosis calculadas por el formalismo propuesto y los cálculos del sistema de planificación Helax para campos abiertos.

En la tabla V se detallan las discrepancias promedio para cada energía y cada técnica de irradiación. En ella se observa que para 6 MV, las discrepancias entre el valor calculado por el sistema Helax y el valor calculado "manualmente" son

aproximadamente iguales al 1%, en tanto que para 18 MV este valor puede oscilar en alrededor del 2.5%. En la tabla V también se observa que para ambas energías las discrepancias son similares para cada una de las técnicas de irradiación, probando con ello que el formalismo utilizado tiene un carácter de aplicación general.

#### 4.2.2 Campos con cuñas

Para verificar los resultados obtenidos con cuñas, se configuró un campo hemibloqueado de  $20 \times 10 \text{ cm}^2$ . Campos conformados de esta manera son típicos en irradiaciones de mama, particularmente en SOLCA, alrededor de un 22% de las patologías que se tratan con radioterapia externa corresponden a tumores de mama<sup>5</sup> en las que se utilizan campos hemibloqueados con cuñas, por lo que constituye un caso de gran relevancia clínica. La configuración de las mordazas que conforman este campo son  $X = 20 \text{ cm}$ ,  $Y1 = 0 \text{ cm}$ ,  $Y2 = 10 \text{ cm}$ . Las tasas de dosis se midieron en un punto fijo fuera del eje central  $l = +1.5 \text{ cm}$  y  $l = +5 \text{ cm}$ , a una profundidad de  $10 \text{ cm}$  y técnica isocéntrica  $DFI = 100 \text{ cm}$ .



<sup>5</sup> Informe anual de los tratamientos que recibieron los pacientes según su diagnóstico en el Departamento de Radioterapia durante el año 2001.



En la tabla VI se muestra los resultados obtenidos con cada una de las energías. Al igual que en los campos abiertos los valores medidos corresponden al valor promedio de tres lecturas obtenidas consecutivamente. Con fines comparativos también se han incluido los cálculos arrojados por el sistema Helax en un maniquí homogéneo de densidad 1.0, en iguales condiciones que las de medición.

Fotones	$l$ (cm)	Cuña	Medido (cGy/UM)	Calculado (cGy/UM)	Diferencia (%)	Helax (cGy/UM)	Diferencia (%)
6 MV	1.5	No	0.829	0.844	1.9	0.831	0.3
		15	0.556	0.558	0.4	0.557	0.2
		30	0.420	0.417	-0.8	0.420	0.0
		45	0.245	0.243	-0.9	0.243	-0.9
		60	0.251	0.254	1.2	0.247	-1.6
	5.0	No	0.916	0.905	-1.2	0.918	0.2
		15	0.576	0.562	-2.5	0.572	-0.8
		30	0.414	0.400	-3.3	0.410	-0.9
		45	0.225	0.220	-2.1	0.222	-1.2
		60	0.203	0.209	3.0	0.200	-1.5
18 MV	1.5	No	0.963	0.991	2.9	1.000	3.8
		15	0.713	0.730	2.4	0.738	3.5
		30	0.571	0.584	2.3	0.590	3.3
		45	0.369	0.375	1.7	0.379	2.8
		60	0.376	0.387	2.9	0.386	2.6
	5.0	No	1.055	1.068	1.2	1.095	3.8
		15	0.741	0.747	0.8	0.762	2.8
		30	0.570	0.574	0.7	0.584	2.5
		45	0.347	0.348	0.3	0.354	2.1
		60	0.319	0.321	0.7	0.326	2.3

**Tabla VI:** Mediciones y cálculos de las tasas de dosis en campos hemibloqueados con cuñas en puntos fuera del eje central. En las dos últimas columnas se incluyen los cálculos efectuados con el planificador Helax.



Para 6 MV la máxima diferencia entre el valor calculado y el valor medido es del 3.3%, lo cual es aceptable de acuerdo al TG 53. Se observa sin embargo que para esta energía los cálculos del planificador Helax tienen una diferencia máxima del 1.6%.

En el caso de 18 MV los cálculos realizados con el formalismo desarrollado guardan un mejor acuerdo con respecto a los valores medidos pues la diferencia no supera al 3%, en contraposición a esto, las discrepancias del planificador Helax bordean al valor del 4% aunque aun están dentro del criterio (5%).

Como en el caso de los campos abiertos, se encontró que en los campos con cuñas la discrepancia promedio entre el cálculo manual y el cálculo del planificador es del 0.3% para la energía de 6 MV, y del 1.3% para la energía de 18 MV.

#### **4.2 3 Campos con bloqueo doble**

Finalmente, nuestros datos se verificaron con el caso especial de campos doblemente bloqueados de tamaño  $20 \times 10 \text{ cm}^2$ , con  $X_1 = 0 \text{ cm}$ ,  $X_2 = 20 \text{ cm}$ ,  $Y_1 = 0$  y  $Y_2 = 10 \text{ cm}$ . En la tabla VII se muestran los resultados para cada una de las puntos de medición denotados como  $P(x,y)$ .

Fotones	$P(x,y)$ (cm)	Medido (cGy/UM)	Calculado (cGy/UM)	Diferencia (%)	Helax (cGy/UM)	Diferencia (%)
6 MV	(10,1.5)	0.879	0.884	0.6	0.887	1.0
	(10,5.0)	0.935	0.921	-1.5	0.936	0.1
18 MV	(10,1.5)	0.998	1.019	2.1	1.044	4.6
	(10,5.0)	1.049	1.055	0.6	1.079	2.9

**Tabla VII:** Mediciones y cálculos de las tasas de dosis en campos con bloqueo doble. En las dos últimas columnas se incluyen los cálculos efectuados con el planificador Helax.

Los resultados de la tabla VII reflejan que, para ambas energías las tasas de dosis calculadas apenas superan al 2% de discrepancia con respecto a los valores medidos. En el caso de los valores calculados con el planificador el valor máximo de discrepancia del 4.6% está fuera de la tolerancia sugerida por el TG-53 (3%)

En cuanto a las diferencias promedio entre uno y otro método de cálculo, para la energía de 6 MV las discrepancias son del 1% en tanto que para 18 MV esta alcanzan el 2.3%.

#### 4.3 Discusión de los resultados



Se ha obtenido un buen acuerdo entre los perfiles medidos y calculados para campos definidos por colimadores duales asimétricos, mediante la utilización del

método de separación del efecto de la frontera del campo y del perfil primario *POCR*. En todos los perfiles obtenidos sean estos transversales o diagonales, los valores calculados del *OCR* en las zonas interiores del haz y para ambas energías, están dentro de las expectativas del TG-53. Sin embargo, en la zona exterior del haz, en la cual domina la dispersión del maniquí, se observa que para 6 y 18 MV nuestros cálculos infravaloran la reducción de la dosis. Este comportamiento es más pronunciado para fotones de 6 MV que para fotones de 18 MV como se puede observar en los perfiles de las figuras 4.2 y 4.3.

Un punto de controversia entre distintos autores, es la consideración acerca del factor  $S_{c,p}$ , esto es, que él es función sólo del valor área/perímetro, sin consideración de la forma del campo (cuadrado o rectangular) o de la posición del campo (sobre el eje central del colimador para campos simétricos o fuera del eje central para campos asimétricos). (7), (8), (9), (10), (22), (23), (24), (30), (34)

Así, *Rosenberg y col.* han considerado que tanto el  $S_c$ ,  $S_p$  y el *TMR* son factores dependientes de la forma y de la posición del campo, por lo cual han adaptado el método de *Day* para el cálculo de los valores efectivos de cada uno de ellos, haciendo de esta manera que dichos factores dependan no sólo de la posición individual de las mordazas, sino también de la localización del punto de cálculo relativo a los bordes del campo. De esta forma ellos obtuvieron discrepancias



entre los cálculos y las mediciones no mayores al 1% en 6 MV y 2% en 18 MV, aun en la frontera cerca del campo.

En nuestro caso particular se consideró que la implementación de este método conllevaría a un aumento sustancial de cálculos que no se justificarían en la aplicación que motivó este trabajo, pues los resultados obtenidos con el uso de formalismo propuesto son muy similares a los de *Rosenberg y cols.*

Finalmente, los datos comparativos entre los cálculos de tasas de dosis por el planificador Helax y aquellos obtenidos por medición muestran que el algoritmo de cálculo utilizado por dicho planificador sobrestiman las tasas de dosis en el caso de campos asimétricos regulares con valores que inclusive pueden superar el 2% en el caso de campos abiertos, y en el caso de cuñas valores que bordean el 4%, esto sin embargo no es crítico pues están en concordancia con los criterios de tolerancia del TG-53. Comparativamente, estas discrepancias son similares a las reportadas en la literatura para un planificador *CadPlan* (14).



## CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado un método para calcular las tasas de dosis en campos asimétricos regulares abiertos o con cuñas que ha demostrado tener un buen acuerdo con los valores medidos y, por lo tanto, se lo puede aplicar para la verificación de las unidades monitoras en chequeos de rutina.
2. Se ha comprobado la capacidad del método de corrección de borde de campo para modelar de manera precisa el perfil primario (POCR). Dicho método requiere únicamente de mediciones rutinarias de campos simétricos, incluyendo perfiles diagonales del haz, relaciones tejido-máximo (TMR), y factores de dispersión del maniquí y colimador ( $S_{c,p}$ ).



3. Se ha mostrado que una vez obtenido el *POCR* este puede ser usado para determinar la relación fuera del centro del campo (*OCR*) mediante la técnica del factor de frontera.
  
4. El cálculo de las relaciones fuera del centro del campo (*OCR*) o de perfiles mediante el método de separación del perfil primario *POCR* y del efecto de la frontera (*BF*), tienen valores compatibles con los criterios de aceptación para cálculos de dosis de haces externos sugeridos por el TG-53. Así pues, en la zona interior del haz los perfiles calculados se mantuvieron dentro del criterio del 3% con ambas energías; en las regiones de penumbra los mismos estuvieron dentro de los 2 mm; sin embargo, en la región externa del haz los resultados muestran que este modelo subestima la radiación dispersa, siendo más crítico con la energía de 6 MV, donde las discrepancias superan al 5%.
  
5. En el caso de campos regulares con cuñas, la inclusión del factor de perfil de cuña *WPF* ha dado como resultado perfiles cuya discrepancia es inferior al criterio del 5% en la zona interior del haz. Dentro de esta zona la mayor diferencia tiene lugar en la parte ubicada bajo "la punta de la cuña", que no es zona extensa, ni de gran importancia en la dosimetría clínica. En la zona de penumbra en general no se sobrepasa el criterio de los 3 mm. Sin

- embargo, en la zona exterior del haz el modelo utilizado siempre subestima la radiación dispersa en valores superiores al 5%. Esta última zona no suele ser de relevancia, excepto en el caso de uniones de campos.
6. Los cálculos de las tasas de dosis mediante el formalismo de la ecuación (2.24) para campos asimétricos abiertos, tienen una discrepancia que no supera el criterio del 3% para ambas energías. Sin embargo, estos valores siempre están por debajo del valor medido, es decir el método de cálculo que hemos propuesto subestima el verdadero valor de la tasa de dosis.
  7. En cuanto a los cálculos que efectúa el sistema de planificación Helax, las tasas de dosis son superiores a los valores medidos en aproximadamente un 2%, es decir sobrestima los valores de las tasas de dosis. Las discrepancias son algo más pronunciadas con la energía de 18 MV.
  8. En el análisis de los promedios de las discrepancias por energía se ha encontrado que el método de cálculo de las tasas de dosis que aquí se ha propuesto, y en última instancia de las unidades monitoras, guarda una diferencia inherente con el método de cálculo del sistema de planificación Helax de un 1% para la energía de 6 MV y de un 2.5% para la energía de 18





MV, las cuales deben ser aceptadas en las verificaciones de las unidades monitoras calculadas por el planificador.

9. En el caso de las tasas de dosis para los campos regulares asimétricos y con cuñas se ha determinado que los cálculos difieren en valores de alrededor del 3%, los cuales están dentro del criterio del 5%.





## **SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES**

1. Implementar en la práctica médica de la radioterapia los resultados encontrados en éste trabajo como parte de los procedimientos para la realización de los controles de calidad de la planificación del tratamiento en teleterapia.
2. El cálculo de las tasas de dosis que se efectúa mediante el método desarrollado no considera inhomogeneidades de contorno ni de tejido, por lo tanto, para la verificación de las tasas de dosis (y finalmente de las unidades monitoras) es necesario asegurar que en los cálculos efectuados por el planificador se encuentre inhabilitada la opción de corrección por inhomogeneidad, debido a que todas nuestras mediciones se hacen en agua. Esto es crítico en el caso de irradiación en zonas altamente densas (como huesos) o de baja densidad (por ejemplo pulmones).

3. La incorporación de las tablas generadas para la determinación del perfil primario, factores de frontera y factores de perfil de cuña en una hoja electrónica o en un programa de computadora, facilitaría la realización de cálculos de verificación de las unidades monitoras, pues se podrían efectuar de manera automática las interpolaciones necesarias.
  
4. Del análisis efectuado en el capítulo II es claro que los factores de perfil primario no varían con la introducción de bloques de protección dentro del haz; sin embargo los factores de frontera, los cuales modelan al haz en la región de frontera si varían. Un estudio más detallado de estos últimos es importante para la incorporación en un formalismo más general que permita el cálculo de las tasas de dosis para campos asimétricos irregulares sean estos abiertos con cuñas o con bloqueos.
  
5. Los datos necesarios para el cálculo del factor primario, factores de frontera y factores de cuña deberían adquirirse conjuntamente con los datos requeridos para alimentar la base de datos del sistema de planificación, a fin de minimizar las variaciones en la planicidad del haz debido a ligeros cambios en la calidad del haz que pueden afectar las mediciones.



**APENDICE A**

**RAZONES DE DOSIS EN EL EJE CENTRAL**



A continuación se hace una breve referencia a los principales parámetros que se definen en el eje central de un haz externo de radiaciones, las mismas que son esenciales en un sistema de cálculo de dosis para determinar las variaciones de la dosis en profundidad.

### A.1 Porcentaje de dosis en profundidad (*PDP*).

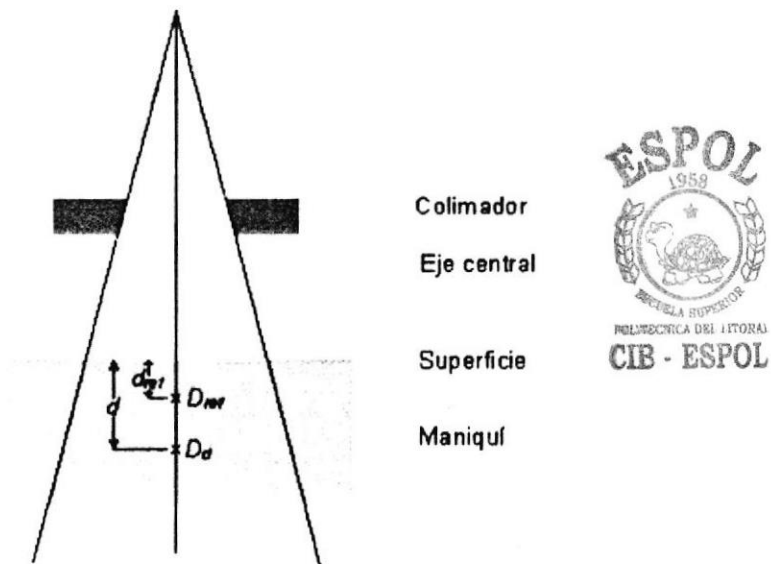


Figura A.1: Esquema para la definición del PDP

Se define como el cociente, expresado como un porcentaje, entre la dosis absorbida a cualquier profundidad  $d$  y la dosis absorbida a una profundidad de referencia  $d_{ref}$ , a lo largo del eje central del haz (figura A.1)

$$PDP = \frac{D_d}{D_{ref}} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

El *PDP* depende de la energía o calidad del haz, la profundidad forma y tamaño de campo, distancia fuente superficie y de la colimación del haz.

### A.2 Razón tejido aire (*TAR*).

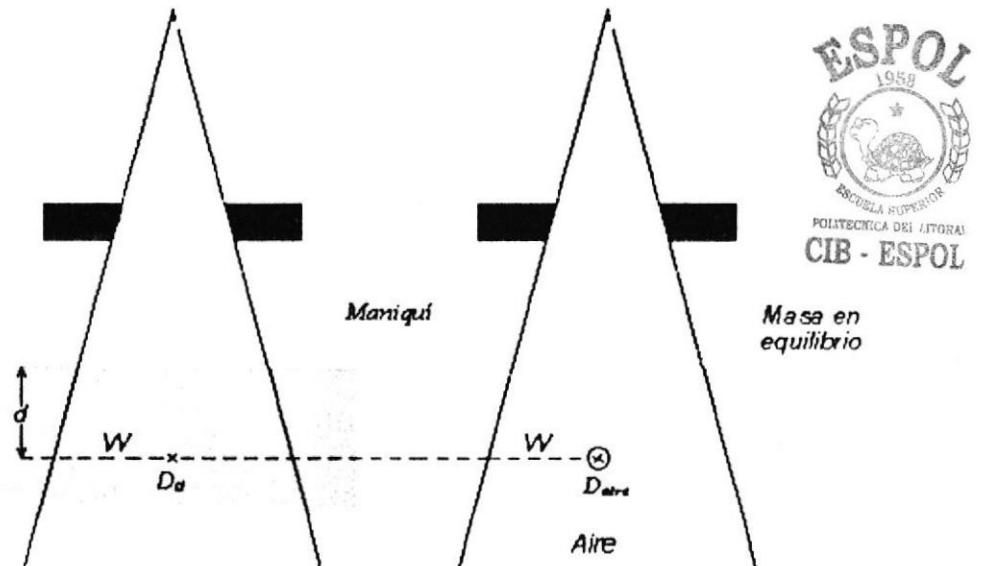


Figura A.2: Esquemas para definir el *TAR*

Se define como la razón entre la dosis  $D_d$  en un punto dado del maniquí y la dosis en aire  $D_{aire}$  en el mismo punto (figura A.2). Para una calidad del haz en

particular el *TAR* depende de la profundidad *d* y del tamaño del campo *w* a aquella profundidad:

$$TAR(d,w) = \frac{D_d}{D_{aire}} \quad (A.2)$$

Al igual que el *PDP*, el *TAR* varía con la energía, profundidad y tamaño de campo. Para haces de megavoltaje el *TAR* alcanza un máximo a la profundidad de dosis máxima  $d_{max}$  y luego decrece con la profundidad más o menos exponencialmente.

Un haz estrecho o un campo de tamaño  $0 \times 0 \text{ cm}^2$  es un campo hipotético en el cual la dosis en profundidad se debe enteramente a la contribución de los fotones primarios, o en otras palabras se dice también que la contribución de la dispersión a la dosis es despreciable, en este caso, más allá de  $d_{max}$  el *TAR* varía con la profundidad aproximadamente en forma exponencial como

$$TAR(d,0) = \exp(-\bar{\mu}(d - d_{max})) \quad (A.3)$$

donde  $\bar{\mu}$  es el coeficiente de atenuación promedio para el maniquí dado.

### A.2.1. Factor de retrodispersión (*BSF*).

Es un caso particular de la definición del *TAR*. Se define como el cociente entre la dosis en el eje central a la profundidad de dosis máxima  $d_{max}$  y la dosis en aire en el mismo punto.

$$BSF = TAR(d_{max}, w_{max}) = \frac{D_{max}}{D_{aire}} \quad (A.4)$$

$w_{max}$  es el tamaño de campo a la profundidad de dosis máxima  $d_{max}$ .

Físicamente el *BSF* representa el aumento en la dosis por efecto del incremento de la radiación dispersa que alcanza el punto de dosis máxima desde el tejido adyacente a este punto. Este factor disminuye con el incremento de la energía, así, para energías superiores a 8 MV este factor es cercano al mínimo valor, es decir cercano a 1.

### A.3. Razón dispersión – aire (*SAR*)



Se la utiliza con propósitos de cálculos de la dosis dispersa en el medio, y es particularmente útil en dosimetría de campos irregulares. El *SAR* se define como



la razón de la dosis dispersa en un punto dado en el maniquí y la dosis en aire en el mismo punto. Al igual que el *TAR*, el *SAR* es independiente de la distancia fuente superficie pero dependiente de la energía del haz, la profundidad y el tamaño de campo a esa profundidad.

La dosis dispersa en un punto del maniquí se considera como la dosis total menos la dosis primaria en dicho punto, por lo tanto matemáticamente el *SAR* está dado por:

$$SAR(d, w) = TAR(d, w) - TAR(d, 0) \quad (A.5)$$

en la cual el  $TAR(d, 0)$  representa la componente primaria del haz.

#### A.4. Razón tejido - maniquí (*TPR*) y razón tejido - máximo (*TMR*).



El *TPR* se define como la razón de la dosis en un punto dado en el maniquí y la dosis en el mismo punto a una profundidad fija de referencia (figura A.3). Para nuestros propósitos las profundidades de referencia que se eligieron son de 5 cm y 10 cm para 6 MV y 18 MV respectivamente, aunque no hay un acuerdo general concerniente a su elección. Si, de otro lado, se elige como punto de referencia la profundidad de máxima dosis  $d_{max}$  el *TPR* da lugar al *TMR* el cual

es un caso especial del primero. Matemáticamente estas dos razones se expresan como:

$$\begin{aligned} TPR(d,w) &= \frac{D_d}{D_{ref}} \\ TMR(d,w) &= \frac{D_d}{D_{max}} \end{aligned} \quad (A.6)$$

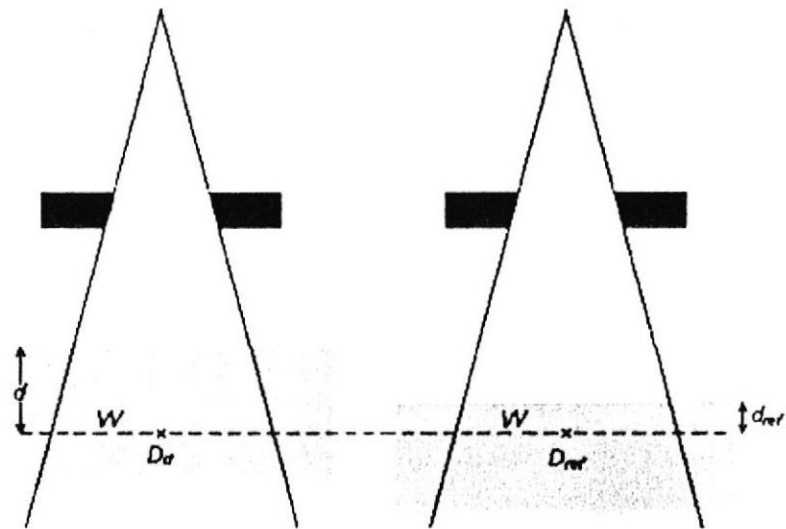


Figura A.3: Esquemas para las definiciones del *TPR* y *TMR*

El concepto del *TMR* se basa en la suposición de que la contribución de la dispersión a la dosis en profundidad en un punto es independiente de la divergencia del haz y depende sólo del tamaño de campo y del espesor de tejido (profundidad de cálculo), por lo que estas funciones (al igual que el *TPR*) son independientes de la distancia fuente superficie.

La profundidad de referencia de dosis máxima  $d_{max}$  debe ser utilizada para el  $PDP$ ,  $TMR$  y el factor de dispersión del maniquí  $S_p$ , indistintamente del tamaño de campo y de la distancia fuente superficie.

#### A.5 Relación entre el $PDP$ y el $TMR$ .

Se considera a la figura A.4

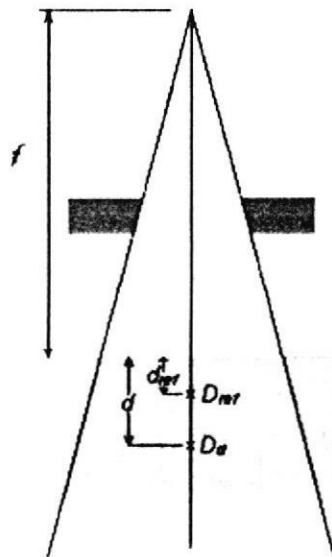


Figura A.4: Esquema para determinar la relación entre el  $PDP$  y el  $TMR$

Si se parte de la condición en que la dosis a la profundidad de  $d_{max}$  para el tamaño de campo  $w_0$  medido en la superficie del maniquí es  $D_{max}(d_{max}, w_0)$ , entonces, la dosis en aire a la distancia  $f+d_{max}$ , denotada como  $D_{AIRE}(w_{max})$  se calcula mediante:

$$D_{AIRF}(w_{max}) = \frac{D_{max}(d_{max}, w_{max})}{BSF(d_{ref}, w_{max})} \quad (A.7)$$

donde  $w_{max}$  es el tamaño de campo a la profundidad  $d_{max}$ . Para encontrar el valor de la dosis en aire a la distancia  $f+d$ , denotada como  $D_{AIRF}(w)$ , se utiliza la ley del inverso del cuadrado de la distancia; entonces:

$$D_{AIRF}(w) = D_{AIRF}(w_{max}) \left( \frac{f + d_{max}}{f + d} \right)^2 \quad (A.8)$$

donde  $w$  es el tamaño de campo a la profundidad  $d$ . La dosis en agua a la distancia  $f+d$  y profundidad  $d_{max}$ , y denotada como  $D_d(d_{max}, w)$  se calcula como:

$$D_d(d_{max}, w) = D_{AIRF}(w)BSF(d_{max}, w) \quad (A.9)$$

Por sustitución de las ecuaciones (A.7) y (A.8) en (A.9), se obtiene:

$$D_d(d_{max}, w) = D_{max}(d_{max}, w_{max}) \frac{BSF(d_{max}, w)}{BSF(d_{max}, w_{max})} \left( \frac{f + d_{max}}{f + d} \right)^2 \quad (A.10)$$



Por otro lado, de la figura A.4 y por definición del *TMR* se obtiene:

$$TMR(d, w) = \frac{D_d(d, w)}{D_d(d_{max}, w)} \quad (A.11)$$

Por sustitución de (A.10) en (A.11)

$$TMR(d, w) = \frac{D_d(d, w)}{D_{max}(d_{max}, w_{max})} \frac{BSF(d_{max}, w_{max})}{BSF(d_{max}, w)} \left( \frac{f + d}{f + d_{max}} \right)^2 \quad (A.12)$$

Pero el cociente entre las dosis en esta última expresión corresponde al porcentaje de dosis en profundidad para el tamaño de campo  $w_0$  y profundidad  $d$ . Por lo tanto el *TMR*( $d, w$ ) se expresa como:

$$TMR(d, w) = PDP(d, w_0, f) \frac{BSF(d_{max}, w_{max})}{BSF(d_{max}, w)} \left( \frac{f + d}{f + d_{max}} \right)^2 \quad (A.13)$$

Los tamaños de campo  $w$  y  $w_{max}$  se calculan como  $w = w_0 \frac{f + d}{f}$  y

$w_{max} = w_0 \frac{f + d_{max}}{f}$ . La ecuación (A.13) en particular es útil, porque es el método

en que el sistema Theraplan/TP11 calcula los *TMR* a partir de los datos del *PDP* (33).

**APENDICE B**

**FACTORES DE DISPERSION DEL COLIMADOR Y MANIQUI**



S (cm)	6 MV	18 MV
5	0.915	0.915
6	0.936	0.935
8	0.971	0.971
10	1.000	1.000
12	1.021	1.021
14	1.037	1.036
16	1.050	1.049
18	1.060	1.059
20	1.070	1.069
22	1.078	1.074
24	1.087	1.080
26	1.094	1.086
28	1.099	1.092
30	1.104	1.098
32	1.108	1.101
34	1.113	1.104
36	1.115	1.107
38	1.116	1.110
40	1.116	1.113
42	1.117	1.114
44	1.117	1.116
46	1.118	1.117
48	1.119	1.119
50	1.119	1.120
52	1.120	1.121
54	1.121	1.122
56	1.121	1.123
58	1.122	1.124
60	1.123	1.125
62	1.124	1.126
64	1.124	1.127
66	1.125	1.127
68	1.126	1.128
70	1.126	1.129
72	1.127	1.129
74	1.128	1.130



**Tabla B.I:** Factores de dispersión del colimador y del maniquí  $S_{c,p}$  para 6 y 18 MV como una función del lado del campo cuadrado  $S$ . Los  $S_{c,p}$  para campos de hasta  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  se han obtenido experimentalmente, los  $S_{c,p}$  para campos más grandes (en cursiva) se han obtenido por extrapolación.

**APENDICE C**

**TABLA DE FACTORES DE BORDE DE CAMPO *FEC(d,1,40)***





<b>FEC(d,l,40)</b>										
<b>6 MV</b>						<b>18 MV</b>				
Profundidad d (cm)										
<b>l (cm)</b>	<b>1.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
-17	0.967	0.957	0.937	0.905	0.878	0.964	0.967	0.958	0.939	0.928
-16	0.973	0.966	0.949	0.919	0.895	0.971	0.974	0.966	0.950	0.939
-15	0.979	0.973	0.959	0.932	0.909	0.978	0.980	0.974	0.959	0.949
-14	0.983	0.978	0.966	0.943	0.919	0.982	0.984	0.979	0.966	0.956
-13	0.986	0.982	0.972	0.951	0.928	0.985	0.987	0.982	0.972	0.963
-12	0.989	0.985	0.976	0.958	0.938	0.987	0.989	0.985	0.976	0.968
-11	0.990	0.987	0.980	0.965	0.945	0.989	0.991	0.988	0.979	0.973
-10	0.992	0.990	0.984	0.970	0.952	0.991	0.992	0.990	0.983	0.977
-9	0.993	0.991	0.986	0.975	0.959	0.992	0.993	0.991	0.985	0.980
-8	0.995	0.993	0.989	0.980	0.965	0.993	0.994	0.993	0.988	0.983
-7	0.996	0.995	0.992	0.985	0.971	0.994	0.995	0.994	0.990	0.986
-6	0.997	0.996	0.994	0.988	0.976	0.996	0.996	0.995	0.993	0.989
-5	0.998	0.997	0.995	0.991	0.981	0.997	0.997	0.997	0.994	0.992
-4	0.999	0.998	0.997	0.993	0.986	0.998	0.998	0.997	0.996	0.993
-3	1.000	0.999	0.998	0.996	0.990	0.998	0.998	0.998	0.997	0.995
-2	1.000	1.000	0.999	0.997	0.994	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997
-1	1.000	1.000	1.000	0.999	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	1.000	1.000	1.000	1.001	1.005	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001
2	1.000	1.000	1.000	1.002	1.008	1.000	1.001	1.001	1.001	1.002
3	1.000	1.000	1.001	1.004	1.011	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003
4	1.000	1.001	1.001	1.005	1.015	1.001	1.001	1.001	1.003	1.004
5	1.000	1.001	1.002	1.006	1.018	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004
6	1.000	1.001	1.002	1.007	1.021	1.001	1.001	1.002	1.004	1.005
7	1.000	1.001	1.003	1.009	1.025	1.001	1.001	1.002	1.004	1.006
8	1.000	1.001	1.003	1.010	1.028	1.001	1.001	1.002	1.005	1.006
9	1.000	1.001	1.004	1.011	1.031	1.001	1.001	1.003	1.005	1.008
10	1.000	1.002	1.004	1.012	1.034	1.002	1.001	1.003	1.006	1.007
11	1.000	1.002	1.005	1.013	1.037	1.002	1.001	1.003	1.006	1.007
12	1.000	1.002	1.005	1.015	1.040	1.002	1.001	1.003	1.006	1.007
13	1.000	1.002	1.006	1.016	1.044	1.002	1.001	1.003	1.007	1.008
14	1.000	1.002	1.006	1.017	1.047	1.002	1.001	1.003	1.007	1.008
15	1.000	1.002	1.007	1.018	1.050	1.002	1.001	1.004	1.007	1.009
16	1.000	1.002	1.007	1.019	1.053	1.002	1.001	1.004	1.008	1.009
17	1.000	1.003	1.007	1.021	1.056	1.002	1.001	1.004	1.008	1.009

Tabla C.I: Factores de borde de campo para 6 MV y 18 MV para el campo de 40x40 cm<sup>2</sup>, como una función de la profundidad  $d$  y de la desviación  $l$  de la mordaza, desde el eje del colimador.

**APENDICE D**

**TABLAS DE PERFILES PRIMARIOS *POCR(d,r)***



6 MV		Profundidad d (cm)				
r (cm)	1.5	5	10	20	30	
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
1.41	1.000	1.000	0.999	1.001	0.996	
2.83	1.022	1.019	1.016	1.010	1.003	
4.24	1.042	1.037	1.029	1.018	1.006	
5.66	1.056	1.044	1.034	1.020	1.004	
7.07	1.058	1.051	1.038	1.018	1.001	
8.49	1.068	1.058	1.042	1.016	0.991	
9.90	1.080	1.066	1.047	1.015	0.983	
11.31	1.089	1.074	1.051	1.015	0.973	
12.73	1.101	1.084	1.058	1.012	0.962	
14.14	1.108	1.089	1.057	1.005	0.942	
15.56	1.110	1.088	1.050	0.992	0.917	
16.97	1.106	1.081	1.039	0.974	0.881	
18.38	1.064	1.038	0.996	0.928	0.821	
19.80	0.961	0.941	0.904	0.846		
21.21	0.865	0.850	0.818	0.771		
22.63	0.768	0.754	0.728	0.690		
24.04	0.613	0.608	0.592	0.566		

18 MV		Profundidad d (cm)				
r (cm)	3	5	10	20	30	
0.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
1.41	1.002	1.000	1.000	0.997	0.998	
2.83	1.030	1.026	1.019	1.009	1.005	
4.24	1.046	1.041	1.034	1.023	1.020	
5.66	1.043	1.039	1.032	1.020	1.018	
7.07	1.043	1.035	1.027	1.013	1.010	
8.49	1.048	1.041	1.028	1.010	1.006	
9.90	1.050	1.041	1.029	1.009	1.001	
11.31	1.046	1.039	1.024	1.006	0.999	
12.73	1.049	1.039	1.023	0.999	0.995	
14.14	1.046	1.039	1.021	0.993	0.986	
15.56	1.047	1.036	1.015	0.987	0.980	
16.97	1.057	1.042	1.011	0.980	0.978	
18.38	1.042	1.039	1.017	0.976	0.969	
19.80	0.972	0.981	0.998	0.974	0.964	
21.21	0.861	0.882	0.935	0.966	0.963	
22.63	0.718	0.761	0.839	0.927	0.963	
24.04	0.417	0.526	0.724	0.864	0.941	

Tabla D.I Factores de perfil primario para 6 MV y 18 MV en función de la profundidad d y de la distancia al eje del colimador.

**APENDICE E**

**TABLAS DE FACTORES DE FRONTERA  $BF(s,d,w \times h)$**



6 MV					
Profundidad $d = 1.5$ cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.97	0.997	3.95	1.000	8.96	1.002
1.45	0.994	2.90	0.995	7.92	1.002
0.92	0.977	1.85	0.987	6.88	1.002
0.40	0.847	0.81	0.952	5.85	1.003
0.29	0.775	0.28	0.736	4.81	1.000
0.19	0.684	0.18	0.648	3.77	0.996
0.08	0.580	0.07	0.550	2.73	0.992
0.00	0.493	0.00	0.477	1.69	0.981
-0.02	0.472	-0.03	0.450	0.65	0.918
-0.13	0.366	-0.14	0.355	0.45	0.839
-0.23	0.272	-0.24	0.270	0.34	0.773
-0.34	0.195	-0.35	0.203	0.24	0.689
-0.44	0.139	-0.45	0.150	0.13	0.593
-0.55	0.102	-0.56	0.114	0.03	0.490
-0.65	0.080	-0.66	0.090	0.00	0.463
-1.18	0.042	-0.77	0.075	-0.07	0.388
-1.70	0.033	-1.29	0.046	-0.18	0.299
-2.75	0.022	-2.34	0.031	-0.28	0.224
-3.80	0.017	-3.39	0.022	-0.38	0.167
-4.85	0.013	-4.43	0.018	-0.59	0.100
				-0.70	0.083
				-0.90	0.064
				-1.42	0.049
				-2.46	0.036
				-3.50	0.027
				-4.54	0.021

Tabla E.I: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 6 MV a la profundidad de 1.5 cm



6 MV					
Profundidad $d = 5$ cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.49	0.986	3.99	0.997	9.00	0.997
0.98	0.965	2.98	0.992	7.99	0.997
0.68	0.933	1.97	0.981	6.99	0.998
0.48	0.874	0.96	0.951	5.98	0.998
0.37	0.822	0.75	0.926	4.98	0.995
0.27	0.751	0.55	0.875	3.98	0.989
0.17	0.665	0.45	0.830	2.97	0.983
0.07	0.567	0.35	0.771	1.97	0.970
0.00	0.492	0.25	0.698	0.96	0.939
-0.03	0.465	0.15	0.612	0.46	0.832
-0.13	0.365	0.05	0.521	0.36	0.775
-0.23	0.277	0.00	0.479	0.26	0.703
-0.33	0.207	-0.06	0.429	0.16	0.617
-0.44	0.158	-0.16	0.342	0.06	0.524
-0.54	0.124	-0.26	0.269	0.00	0.468
-0.74	0.087	-0.36	0.210	-0.04	0.431
-1.04	0.063	-0.46	0.165	-0.14	0.346
-1.55	0.048	-0.56	0.134	-0.24	0.273
-2.05	0.038	-0.66	0.112	-0.34	0.215
-2.56	0.032	-0.76	0.096	-0.44	0.170
-3.57	0.023	-0.86	0.086	-0.54	0.139
-4.59	0.017	-0.97	0.078	-0.74	0.102
		-1.07	0.072	-0.94	0.085
		-2.08	0.047	-1.04	0.079
		-3.09	0.034	-1.55	0.063
		-4.10	0.025	-2.05	0.054
				-2.55	0.046
				-3.05	0.039
				-4.06	0.030
				-5.06	0.025



Tabla E.II: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 6 MV a la profundidad de 5 cm

6 MV					
Profundidad = 10 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.54	0.994	4.04	0.998	9.04	1.000
0.58	0.913	3.07	0.992	8.08	0.999
0.39	0.833	2.11	0.979	7.13	0.999
0.20	0.689	1.14	0.951	6.17	0.998
0.00	0.495	0.66	0.900	5.21	0.995
-0.18	0.321	0.18	0.643	4.25	0.989
-0.37	0.199	0.00	0.484	3.30	0.980
-0.57	0.137	-0.11	0.388	2.34	0.964
-0.76	0.106	-0.30	0.256	1.38	0.938
-0.85	0.097	-0.50	0.174	0.42	0.798
-1.33	0.074	-0.78	0.118	0.23	0.673
-2.29	0.051	-1.27	0.088	0.13	0.593
-3.25	0.038	-1.75	0.074	0.00	0.477
-4.20	0.028	-2.71	0.054	-0.06	0.428
		-3.68	0.040	-0.25	0.287
		-4.64	0.032	-0.34	0.234
				-0.54	0.165
				-1.02	0.108
				-1.49	0.089
				-2.45	0.066
				-3.41	0.051
				-4.37	0.039

Tabla E.III: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 6 MV a la profundidad de 10 cm



6 MV					
Profundidad = 20 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.63	0.990	4.12	0.994	9.12	0.996
0.75	0.948	3.24	0.990	8.25	0.998
0.58	0.913	2.36	0.976	7.37	0.998
0.40	0.846	1.49	0.957	6.49	0.995
0.23	0.720	0.61	0.874	5.62	0.991
0.00	0.497	0.43	0.810	4.74	0.984
-0.12	0.383	0.34	0.762	3.87	0.974
-0.30	0.257	0.17	0.634	2.99	0.958
-0.47	0.185	0.00	0.488	2.11	0.938
-0.65	0.148	-0.10	0.410	1.24	0.907
-0.82	0.129	-0.18	0.343	0.80	0.876
-1.00	0.117	-0.27	0.288	0.36	0.750
-1.87	0.085	-0.45	0.211	0.18	0.633
-2.74	0.067	-0.62	0.171	0.10	0.565
-3.62	0.052	-0.80	0.149	0.00	0.488
		-1.15	0.127	-0.08	0.428
		-2.03	0.098	-0.17	0.364
		-2.91	0.076	-0.25	0.309
		-3.79	0.061	-0.34	0.264
				-0.52	0.205
				-0.60	0.185
				-0.96	0.146
				-1.39	0.126
				-2.27	0.101
				-3.15	0.080
				-4.02	0.066



Tabla E.IV: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 6 MV a la profundidad de 20 cm



18 MV					
Profundidad = 3 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.96	0.996	3.92	1.001	8.93	1.001
1.43	0.980	2.85	0.993	7.85	0.999
0.89	0.932	1.77	0.979	6.78	1.001
0.35	0.745	1.24	0.959	5.70	1.001
0.25	0.672	0.70	0.884	4.63	0.999
0.14	0.587	0.48	0.807	3.56	0.995
0.03	0.498	0.27	0.676	2.48	0.988
0.00	0.491	0.16	0.592	1.41	0.966
-0.08	0.411	0.00	0.478	0.87	0.924
-0.18	0.330	-0.05	0.416	0.55	0.847
-0.29	0.261	-0.27	0.267	0.44	0.800
-0.40	0.207	-0.38	0.213	0.33	0.738
-0.50	0.164	-0.59	0.145	0.23	0.661
-0.72	0.112	-0.81	0.109	0.12	0.574
-0.93	0.084	-1.02	0.088	0.01	0.484
-1.26	0.060	-1.45	0.065	0.00	0.476
-1.79	0.042	-2.53	0.043	-0.10	0.395
-2.33	0.033	-3.60	0.033	-0.20	0.316
-2.86	0.029	-4.68	0.027	-0.31	0.250
-3.94	0.022			-0.42	0.200
-5.01	0.019			-0.53	0.163
				-0.63	0.137
				-0.74	0.118
				-1.06	0.086
				-1.28	0.073
				-1.82	0.055
				-2.89	0.040
				-3.96	0.030
				-5.04	0.026



Tabla E.V: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 18 MV a la profundidad de 3 cm

18 MV					
Profundidad = 5 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.97	0.996	3.94	0.999	8.95	0.998
1.45	0.978	2.88	0.995	7.89	0.997
0.92	0.930	1.82	0.978	6.84	0.998
0.40	0.765	1.29	0.957	5.79	0.997
0.19	0.621	0.76	0.896	4.74	0.995
0.08	0.536	0.55	0.838	3.68	0.991
0.00	0.492	0.34	0.735	2.63	0.985
-0.02	0.450	0.23	0.664	1.58	0.966
-0.13	0.368	0.13	0.584	1.05	0.935
-0.23	0.296	0.02	0.498	0.53	0.834
-0.34	0.235	0.00	0.480	0.42	0.787
-0.44	0.189	-0.08	0.413	0.32	0.726
-0.55	0.158	-0.19	0.336	0.21	0.651
-0.65	0.129	-0.30	0.271	0.11	0.567
-0.86	0.095	-0.40	0.219	0.00	0.479
-1.07	0.074	-0.51	0.180	-0.11	0.393
-1.18	0.067	-0.72	0.131	-0.21	0.314
-1.70	0.044	-0.83	0.114	-0.32	0.251
-2.75	0.029	-1.14	0.084	-0.42	0.202
-3.80	0.021	-1.36	0.071	-0.53	0.168
-4.85	0.018	-1.89	0.053	-0.74	0.124
		-2.42	0.043	-0.95	0.099
		-3.47	0.033	-1.16	0.083
		-4.53	0.026	-1.37	0.071
				-1.58	0.062
				-2.11	0.050
				-2.63	0.041
				-3.68	0.032
				-4.74	0.025



Tabla E.VI: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 18 MV a la profundidad de 5 cm

18 MV					
Profundidad = 10 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
2.00	0.996	3.99	0.999	9.00	1.001
1.50	0.984	2.98	0.992	7.99	1.000
1.00	0.945	1.97	0.977	6.99	1.001
0.80	0.915	1.47	0.962	5.99	1.000
0.60	0.864	0.96	0.921	4.98	0.997
0.50	0.828	0.76	0.891	3.98	0.991
0.40	0.777	0.56	0.840	2.98	0.983
0.30	0.715	0.36	0.751	1.97	0.969
0.20	0.642	0.26	0.687	1.47	0.953
0.10	0.561	0.16	0.612	0.97	0.919
0.00	0.479	0.06	0.530	0.77	0.892
-0.10	0.399	0.00	0.484	0.57	0.846
-0.20	0.328	-0.04	0.448	0.37	0.762
-0.30	0.266	-0.15	0.373	0.17	0.625
-0.40	0.218	-0.25	0.307	0.07	0.544
-0.50	0.180	-0.35	0.253	0.00	0.487
-0.70	0.132	-0.45	0.211	-0.03	0.460
-0.90	0.103	-0.55	0.180	-0.13	0.382
-1.10	0.085	-0.65	0.157	-0.23	0.314
-1.50	0.063	-0.75	0.139	-0.33	0.258
-2.00	0.048	-0.85	0.124	-0.43	0.215
-2.50	0.040	-0.95	0.113	-0.53	0.183
-3.50	0.030	-1.05	0.103	-1.03	0.106
-4.50	0.024	-1.56	0.075	-1.54	0.078
		-2.06	0.059	-2.04	0.064
		-3.07	0.044	-3.04	0.047
		-4.08	0.035	-4.04	0.037
				-5.05	0.031



Tabla E.VII: Factores de frontera  $BF(s,d,wxh)$  para 18 MV a la profundidad de 10 cm

18 MV					
Profundidad = 20 cm					
5x10 cm <sup>2</sup>		10x10 cm <sup>2</sup>		20x10 cm <sup>2</sup>	
s (cm)	BF	s (cm)	BF	s (cm)	BF
2.50	1.000	5.00	1.000	10.00	1.000
1.59	0.986	4.08	0.996	9.09	0.998
1.13	0.959	3.16	0.988	8.17	0.996
0.68	0.894	2.24	0.978	7.26	0.996
0.59	0.868	1.33	0.947	6.34	0.994
0.50	0.834	1.14	0.935	5.43	0.990
0.41	0.790	0.96	0.919	4.52	0.985
0.31	0.735	0.77	0.890	4.06	0.982
0.22	0.669	0.59	0.846	3.60	0.978
0.13	0.597	0.41	0.773	3.15	0.972
0.04	0.520	0.32	0.721	2.69	0.966
0.00	0.495	0.22	0.661	2.23	0.957
-0.05	0.445	0.13	0.593	1.77	0.946
-0.14	0.375	0.04	0.520	1.32	0.928
-0.23	0.314	0.00	0.489	0.86	0.889
-0.32	0.263	-0.05	0.448	0.68	0.860
-0.41	0.223	-0.14	0.379	0.49	0.811
-0.51	0.191	-0.24	0.321	0.31	0.726
-0.60	0.167	-0.33	0.273	0.22	0.669
-0.69	0.148	-0.42	0.235	0.13	0.601
-0.87	0.122	-0.51	0.205	0.04	0.526
-1.05	0.106	-0.70	0.164	0.00	0.496
-1.14	0.099	-0.88	0.138	-0.05	0.452
-1.60	0.076	-1.06	0.122	-0.15	0.381
-2.05	0.063	-1.43	0.100	-0.24	0.322
-2.96	0.049	-2.35	0.072	-0.33	0.274
-3.88	0.040	-3.27	0.057	-0.42	0.236
		-4.19	0.048	-0.51	0.208
				-0.60	0.186
				-0.69	0.168
				-0.88	0.143
				-0.97	0.135
				-1.42	0.105
				-1.88	0.090
				-2.80	0.068



Tabla E.VIII: Factores de frontera  $BF(s,d,w,h)$  para 18 MV a la profundidad de 20 cm

APENDICE F

TABLAS DE FACTORES DE PERFIL DE CUÑA *WPF(l,d)*



l (cm)	6 MV				
	Profundidad d (cm)				
	1.5	5	10	20	30
-15.0					1.211
-14.0				1.227	1.182
-13.0			1.252	1.200	1.155
-12.0	1.263	1.247	1.214	1.165	1.132
-11.0	1.216	1.205	1.176	1.132	1.107
-10.0	1.167	1.156	1.137	1.107	1.091
-9.0	1.126	1.119	1.104	1.091	1.076
-8.0	1.090	1.089	1.083	1.072	1.065
-7.0	1.068	1.071	1.068	1.061	1.052
-6.0	1.054	1.052	1.051	1.046	1.040
-5.0	1.038	1.039	1.039	1.034	1.034
-4.0	1.023	1.023	1.025	1.026	1.026
-3.5	1.017	1.022	1.023	1.021	1.023
-3.0	1.017	1.019	1.019	1.017	1.018
-2.5	1.015	1.018	1.017	1.013	1.016
-2.0	1.013	1.014	1.011	1.011	1.011
-1.5	1.010	1.011	1.011	1.009	1.012
-1.0	1.008	1.009	1.008	1.005	1.010
-0.5	1.007	1.008	1.005	1.004	1.006
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.991	0.994	0.991	0.993	0.993
1.0	0.980	0.982	0.984	0.984	0.985
1.5	0.971	0.975	0.975	0.977	0.979
2.0	0.959	0.962	0.964	0.970	0.973
2.5	0.947	0.954	0.957	0.964	0.969
3.0	0.937	0.944	0.949	0.957	0.963
3.5	0.929	0.934	0.939	0.951	0.956
4.0	0.920	0.925	0.931	0.945	0.954
5.0	0.903	0.910	0.916	0.931	0.941
6.0	0.886	0.894	0.905	0.922	0.933
7.0	0.879	0.879	0.891	0.910	0.922
8.0	0.867	0.874	0.882	0.900	0.915
9.0	0.865	0.870	0.878	0.898	0.906
10.0	0.858	0.865	0.872	0.889	0.902
11.0	0.851	0.859	0.870	0.888	0.903
12.0	0.843	0.852	0.867	0.883	0.899
13.0			0.864	0.883	0.897
14.0				0.883	0.899
15.0					0.893



Tabla F.I: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 6 MV y cuña de  $15^\circ$

30°	6 MV				
	Profundidad d (cm)				
	1.5	5	10	20	30
l (cm)					
-15.0					1.453
-14.0				1.500	1.414
-13.0			1.538	1.462	1.364
-12.0	1.569	1.588	1.513	1.397	1.321
-11.0	1.533	1.492	1.438	1.348	1.277
-10.0	1.440	1.412	1.369	1.295	1.237
-9.0	1.368	1.345	1.310	1.252	1.208
-8.0	1.293	1.276	1.256	1.213	1.179
-7.0	1.233	1.228	1.213	1.182	1.151
-6.0	1.196	1.188	1.175	1.152	1.124
-5.0	1.153	1.154	1.144	1.123	1.099
-4.5	1.137	1.132	1.124	1.111	1.087
-4.0	1.121	1.118	1.107	1.096	1.080
-3.5	1.101	1.099	1.093	1.076	1.069
-3.0	1.087	1.082	1.078	1.069	1.056
-2.5	1.069	1.072	1.066	1.053	1.045
-2.0	1.060	1.056	1.053	1.039	1.035
-1.5	1.040	1.042	1.037	1.029	1.026
-1.0	1.024	1.030	1.027	1.019	1.014
-0.5	1.015	1.015	1.013	1.010	1.004
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.983	0.983	0.984	0.979	0.981
1.0	0.966	0.970	0.972	0.973	0.974
1.5	0.950	0.953	0.960	0.963	0.963
2.0	0.932	0.936	0.946	0.948	0.950
2.5	0.923	0.924	0.926	0.939	0.944
3.0	0.902	0.910	0.918	0.931	0.937
3.5	0.884	0.893	0.898	0.917	0.926
4.0	0.873	0.879	0.884	0.907	0.919
4.5	0.857	0.864	0.877	0.894	0.906
5.0	0.841	0.846	0.860	0.879	0.892
6.0	0.816	0.824	0.840	0.862	0.877
7.0	0.791	0.800	0.815	0.842	0.858
8.0	0.765	0.781	0.797	0.822	0.845
9.0	0.748	0.757	0.776	0.808	0.835
10.0	0.718	0.735	0.758	0.790	0.822
11.0	0.699	0.716	0.742	0.775	0.806
12.0	0.706	0.707	0.722	0.763	0.797
13.0			0.737	0.754	0.783
14.0				0.758	0.772
15.0					0.766

Tabla F.II: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 6 MV y cuña de 30°



45°	6 MV				
	Profundidad d (cm)				
	1.5	5	10	20	30
l (cm)					
-15.0					2.001
-14.0				2.118	1.896
-13.0			2.204	1.996	1.781
-12.0	2.295	2.296	2.127	1.863	1.684
-11.5	2.313	2.184	2.031	1.799	1.638
-11.0	2.155	2.063	1.945	1.734	1.583
-10.0	1.945	1.872	1.788	1.626	1.503
-9.0	1.765	1.718	1.641	1.508	1.415
-8.0	1.603	1.574	1.515	1.417	1.338
-7.0	1.464	1.441	1.402	1.329	1.268
-6.0	1.336	1.323	1.305	1.256	1.226
-5.0	1.252	1.239	1.236	1.205	1.183
-4.5	1.218	1.215	1.212	1.186	1.158
-4.0	1.194	1.189	1.186	1.163	1.144
-3.5	1.171	1.162	1.164	1.139	1.121
-3.0	1.141	1.137	1.137	1.122	1.108
-2.5	1.120	1.115	1.114	1.096	1.094
-2.0	1.101	1.093	1.093	1.076	1.068
-1.5	1.076	1.064	1.068	1.065	1.056
-1.0	1.052	1.047	1.046	1.038	1.033
-0.5	1.024	1.023	1.024	1.018	1.010
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.970	0.976	0.978	0.980	0.987
1.0	0.950	0.950	0.962	0.957	0.969
1.5	0.928	0.930	0.937	0.940	0.954
2.0	0.901	0.902	0.916	0.927	0.931
2.5	0.878	0.885	0.892	0.902	0.923
3.0	0.853	0.861	0.876	0.893	0.905
3.5	0.832	0.838	0.855	0.869	0.890
4.0	0.811	0.817	0.832	0.855	0.877
4.5	0.786	0.795	0.817	0.841	0.861
5.0	0.768	0.775	0.793	0.819	0.841
6.0	0.726	0.737	0.761	0.789	0.818
7.0	0.684	0.696	0.724	0.763	0.791
8.0	0.646	0.663	0.688	0.732	0.766
9.0	0.613	0.628	0.659	0.705	0.746
10.0	0.576	0.594	0.626	0.674	0.721
11.0	0.542	0.563	0.600	0.651	0.704
12.0	0.547	0.546	0.577	0.631	0.679
13.0			0.581	0.609	0.661
14.0				0.607	0.648
15.0					0.635



Tabla F.III: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 6 MV y cuña de 45°



60°	6 MV				
	Profundidad d (cm)				
	l (cm)	1.5	5	10	20
-12.0					1.886
-11.0				1.945	1.800
-10.0		2.267	2.043	1.860	1.687
-9.0	2.155	2.052	1.930	1.740	1.605
-8.5	2.035	1.945	1.847	1.684	1.562
-8.0	1.930	1.866	1.776	1.635	1.519
-7.5	1.838	1.786	1.712	1.585	1.484
-7.0	1.767	1.721	1.658	1.540	1.437
-6.5	1.703	1.661	1.592	1.495	1.403
-6.0	1.626	1.592	1.540	1.443	1.372
-5.5	1.563	1.534	1.483	1.407	1.341
-5.0	1.494	1.466	1.431	1.353	1.304
-4.5	1.431	1.416	1.384	1.321	1.262
-4.0	1.382	1.359	1.332	1.274	1.230
-3.5	1.326	1.303	1.286	1.238	1.204
-3.0	1.276	1.262	1.244	1.197	1.173
-2.5	1.222	1.215	1.195	1.176	1.137
-2.0	1.176	1.168	1.167	1.129	1.117
-1.5	1.130	1.123	1.115	1.105	1.082
-1.0	1.084	1.078	1.082	1.070	1.046
-0.5	1.043	1.038	1.039	1.038	1.022
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.958	0.960	0.963	0.971	0.976
1.0	0.913	0.922	0.931	0.939	0.948
1.5	0.877	0.884	0.894	0.912	0.929
2.0	0.839	0.847	0.861	0.882	0.894
2.5	0.801	0.811	0.830	0.855	0.870
3.0	0.766	0.778	0.802	0.828	0.852
3.5	0.733	0.749	0.770	0.806	0.828
4.0	0.702	0.713	0.740	0.779	0.808
4.5	0.667	0.685	0.710	0.756	0.787
5.0	0.639	0.654	0.685	0.730	0.764
5.5	0.611	0.628	0.659	0.707	0.747
6.0	0.584	0.600	0.635	0.681	0.726
6.5	0.555	0.577	0.610	0.662	0.707
7.0	0.531	0.550	0.584	0.643	0.686
7.5	0.509	0.529	0.565	0.625	0.672
8.0	0.487	0.507	0.545	0.606	0.657
8.5	0.471	0.490	0.524	0.589	0.638
9.0	0.454	0.474	0.513	0.577	0.624
10.0		0.482	0.496	0.547	0.599
11.0				0.537	0.577
12.0					0.563



Tabla F.IV: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 6 MV y cuña de 60°

15°	18 MV				
	Profundidad d (cm)				
	l (cm)	3	5	10	20
-15.0					1.179
-14.0				1.164	1.161
-13.0				1.160	1.140
-12.0		1.189	1.178	1.137	1.117
-11.0	1.171	1.161	1.152	1.109	1.097
-10.0	1.141	1.133	1.118	1.092	1.076
-9.0	1.107	1.099	1.092	1.065	1.062
-8.0	1.075	1.072	1.069	1.058	1.055
-7.0	1.055	1.054	1.055	1.043	1.043
-6.0	1.042	1.041	1.042	1.037	1.034
-5.0	1.031	1.029	1.029	1.026	1.025
-4.5	1.023	1.023	1.025	1.026	1.021
-4.0	1.018	1.018	1.020	1.020	1.017
-3.5	1.013	1.013	1.015	1.017	1.014
-3.0	1.011	1.012	1.014	1.014	1.013
-2.5	1.011	1.010	1.011	1.016	1.010
-2.0	1.009	1.009	1.011	1.019	1.010
-1.5	1.008	1.006	1.008	1.017	1.005
-1.0	1.007	1.005	1.006	1.013	1.003
-0.5	1.003	1.005	1.005	1.003	1.003
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.991	0.992	0.992	0.996	0.993
1.0	0.984	0.983	0.987	0.991	0.989
1.5	0.976	0.977	0.977	0.986	0.982
2.0	0.967	0.967	0.971	0.979	0.974
2.5	0.958	0.959	0.962	0.968	0.969
3.0	0.952	0.953	0.958	0.967	0.962
3.5	0.943	0.945	0.949	0.957	0.958
4.0	0.935	0.938	0.942	0.950	0.953
4.5	0.928	0.930	0.936	0.952	0.949
5.0	0.920	0.922	0.928	0.949	0.941
6.0	0.909	0.910	0.918	0.940	0.931
7.0	0.899	0.900	0.909	0.931	0.923
8.0	0.893	0.896	0.902	0.919	0.917
9.0	0.890	0.891	0.898	0.911	0.908
10.0	0.886	0.886	0.896	0.913	0.905
11.0	0.882	0.884	0.891	0.911	0.902
12.0		0.877	0.888	0.911	0.900
13.0				0.904	0.898
14.0				0.912	0.897
15.0					0.896



Tabla F.V: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 18 MV y cuña de 15°

l (cm)	18 MV				
	Profundidad d (cm)				
	3	5	10	20	30
-15.0					1.360
-14.0				1.410	1.355
-13.0				1.394	1.320
-12.0		1.455	1.416	1.348	1.285
-11.0	1.408	1.393	1.364	1.302	1.248
-10.0	1.350	1.340	1.315	1.259	1.217
-9.0	1.294	1.283	1.264	1.216	1.183
-8.0	1.238	1.230	1.216	1.184	1.159
-7.0	1.189	1.188	1.182	1.159	1.135
-6.0	1.158	1.155	1.150	1.131	1.116
-5.0	1.127	1.123	1.121	1.104	1.090
-4.5	1.110	1.108	1.106	1.092	1.080
-4.0	1.096	1.095	1.093	1.083	1.074
-3.5	1.082	1.080	1.078	1.073	1.065
-3.0	1.070	1.068	1.068	1.063	1.053
-2.5	1.059	1.057	1.056	1.051	1.043
-2.0	1.046	1.047	1.045	1.042	1.035
-1.5	1.037	1.033	1.034	1.032	1.028
-1.0	1.025	1.022	1.022	1.021	1.018
-0.5	1.013	1.012	1.013	1.009	1.008
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.985	0.985	0.989	0.990	0.990
1.0	0.974	0.973	0.977	0.976	0.981
1.5	0.962	0.962	0.965	0.966	0.973
2.0	0.949	0.948	0.955	0.957	0.966
2.5	0.935	0.936	0.943	0.946	0.954
3.0	0.922	0.924	0.931	0.934	0.946
3.5	0.907	0.909	0.919	0.924	0.937
4.0	0.892	0.896	0.904	0.914	0.924
4.5	0.879	0.883	0.893	0.906	0.917
5.0	0.866	0.870	0.880	0.894	0.907
6.0	0.845	0.848	0.860	0.875	0.888
7.0	0.825	0.828	0.843	0.859	0.873
8.0	0.804	0.808	0.824	0.841	0.861
9.0	0.784	0.788	0.806	0.826	0.848
10.0	0.763	0.767	0.787	0.810	0.834
11.0	0.745	0.751	0.769	0.792	0.822
12.0		0.751	0.754	0.779	0.812
13.0				0.768	0.796
14.0				0.776	0.787
15.0					0.784



Tabla F.VI: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 18 MV y cuña de  $30^\circ$

45°	18 MV				
	Profundidad d (cm)				
	l (cm)	3	5	10	20
-15.0					1.869
-14.0				1.863	1.823
-13.0				1.846	1.729
-12.0		1.972	1.904	1.753	1.636
-11.0	1.883	1.858	1.790	1.650	1.552
-10.0	1.751	1.729	1.664	1.551	1.470
-9.0	1.620	1.601	1.550	1.455	1.391
-8.0	1.497	1.484	1.447	1.370	1.315
-7.0	1.386	1.377	1.350	1.298	1.249
-6.0	1.289	1.282	1.261	1.227	1.202
-5.0	1.210	1.207	1.201	1.182	1.167
-4.5	1.183	1.183	1.178	1.162	1.146
-4.0	1.161	1.161	1.155	1.144	1.128
-3.5	1.138	1.136	1.133	1.125	1.113
-3.0	1.119	1.115	1.115	1.106	1.094
-2.5	1.100	1.098	1.095	1.088	1.081
-2.0	1.080	1.080	1.077	1.071	1.065
-1.5	1.062	1.060	1.059	1.054	1.048
-1.0	1.044	1.041	1.037	1.038	1.032
-0.5	1.021	1.020	1.020	1.018	1.018
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.979	0.979	0.978	0.983	0.983
1.0	0.959	0.957	0.960	0.966	0.969
1.5	0.938	0.938	0.939	0.949	0.953
2.0	0.917	0.917	0.925	0.931	0.939
2.5	0.895	0.897	0.905	0.915	0.925
3.0	0.875	0.876	0.885	0.898	0.908
3.5	0.854	0.856	0.866	0.881	0.892
4.0	0.833	0.836	0.847	0.867	0.878
4.5	0.814	0.816	0.828	0.851	0.864
5.0	0.793	0.796	0.809	0.837	0.850
6.0	0.756	0.762	0.776	0.804	0.821
7.0	0.719	0.725	0.745	0.776	0.796
8.0	0.685	0.692	0.711	0.746	0.772
9.0	0.649	0.656	0.680	0.722	0.747
10.0	0.616	0.624	0.648	0.693	0.724
11.0	0.589	0.595	0.622	0.668	0.699
12.0		0.598	0.598	0.647	0.676
13.0				0.621	0.660
14.0				0.647	0.642
15.0					0.638



Tabla F.VII: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 18 MV y cuña de 45°

60°	18 MV				
	Profundidad d (cm)				
	3	5	10	20	30
l (cm)					
-12.0					1.761
-11.0				1.828	1.739
-10.0			1.916	1.777	1.650
-9.5	1.977	1.860	1.860	1.714	1.611
-9.0	1.870	1.813	1.800	1.664	1.565
-8.5	1.801	1.758	1.722	1.615	1.539
-8.0	1.726	1.694	1.661	1.566	1.496
-7.5	1.665	1.637	1.613	1.526	1.456
-7.0	1.603	1.585	1.561	1.485	1.420
-6.5	1.560	1.528	1.513	1.445	1.389
-6.0	1.499	1.478	1.463	1.401	1.355
-5.5	1.449	1.433	1.419	1.372	1.323
-5.0	1.400	1.386	1.377	1.330	1.282
-4.5	1.350	1.345	1.330	1.294	1.261
-4.0	1.309	1.302	1.292	1.254	1.228
-3.5	1.267	1.259	1.251	1.222	1.193
-3.0	1.220	1.217	1.211	1.188	1.167
-2.5	1.182	1.176	1.176	1.154	1.140
-2.0	1.149	1.149	1.136	1.125	1.113
-1.5	1.112	1.114	1.101	1.098	1.086
-1.0	1.072	1.073	1.066	1.065	1.061
-0.5	1.036	1.037	1.035	1.031	1.034
0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	0.962	0.966	0.971	0.969	0.972
1.0	0.929	0.933	0.934	0.938	0.955
1.5	0.899	0.903	0.904	0.915	0.929
2.0	0.859	0.869	0.876	0.885	0.901
2.5	0.829	0.836	0.843	0.858	0.881
3.0	0.804	0.806	0.814	0.836	0.853
3.5	0.769	0.774	0.786	0.812	0.833
4.0	0.737	0.747	0.760	0.786	0.811
4.5	0.707	0.716	0.727	0.759	0.784
5.0	0.677	0.684	0.696	0.735	0.762
5.5	0.656	0.658	0.672	0.714	0.739
6.0	0.630	0.634	0.650	0.692	0.723
6.5	0.602	0.612	0.628	0.670	0.701
7.0	0.579	0.589	0.607	0.650	0.686
7.5	0.557	0.567	0.584	0.629	0.661
8.0	0.538	0.547	0.564	0.612	0.649
8.5	0.524	0.531	0.547	0.590	0.632
9.0	0.516	0.522	0.533	0.579	0.617
9.5	0.549	0.542	0.522	0.564	0.597
10.0			0.532	0.552	0.583
11.0				0.558	0.565
12.0					0.571



CIB - ESPOL

Tabla F.VIII: Factores de perfil de cuña  $W(l,d)$  para 18 MV y cuña de 60°

## BIBLIOGRAFIA

1. American Association of Physicists in Medicine, Task Group No. 21, "A protocol for the determination of absorbed dose from high energies photons and electron beams", AAPM, Med. Phys. 10, 1983, 741-771.
2. Araki F. y col. "Dose calculation for asymmetric photon fields with independent jaws and multileaf collimators", AAPM, Med. Phys. 27 (2), 2000, 340-345.
3. Attix Frank, "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry", John Wiley & Sons, U.S.A. New York, 1986.



4. Bentel G.C., "Radiation Therapy Planning" 2da.edición,383-397
5. Boyer A.L. "Basic Applications of a Multileaf Collimator". Based on the Report Task Group of the American Association of Physicists in Medicine, s.f.,7.
6. Bridier A., Dutreix A., "A method for dose calculation for high energy photon beams based on measurements performed at reference depth", Acta Oncologica Vol. 32, No.4, 1993, 43-53.
7. Cadman P., "A dosimetric investigation of scatter conditions for dual asymmetric collimators in open fields". AAPM, Med. Phys. 22 (4), 1995, 457-463.
8. Cadman P., "Using the field edge correction (FEC) method to generate accurate POCRs and OCRs for asymmetric fields". AAPM, Med. Phys. 23 (3), 1996, 353-356.
9. Chui Chen-Shou y Mohan Radhe, "Off-center ratios for three-dimensional dose calculations", AAPM, Med. Phys. 13 (3), 1986, 409-412.



10. Chui Chen-Shou, Mohan Radhe y Fontela Doracy "Dose computations for asymmetric fields defined by independent jaws", AAPM, Med. Phys. 15 (1), 1988, 92-95.
11. Cunningham Johns H.E., "The Physics of Radiology", 4ta. Ed. Springfield, IL, 1983.
12. Cunningham J. R., Shrivastava P.N., Wilkinson J.M., "Program Irreg – Calculation of dose from Irregularly Shaped Radiation Beams", Computers Programs in Biomedicine, 2, North Holland Publishing Company, 1972, 192-199.
13. Fraas B, Doppke K., Hunt M., Kutcher G., Starkschall G., Van Dyke., "Quality Assurance for clinical radiotherapy treatment planning", Med. Phys. 25 (10), 1998, 1773-1829.
14. Gracia A., Linero D., Picón C., de Blas R., Lizuain M.C. "Establecimiento del estado de referencia inicial de un sistema de planificación de tratamientos de radioterapia", Revista de Física Médica, Vol.2 (2), Madrid, 2001, 57-73.





15. Hanson W.F., Berkley L.W., Peterson M., "Off-axis beam quality change in linear accelerator x-ray beams" Med. Phys. 7, AAPM, 1980, 145-146.
16. Hanson W.F., Berkley L.W., Peterson M., "Calculative technique to correct for the change in linear accelerator beam energy at off-axis points" AAPM.Med. Phys. 7, 1980, 147-150.
17. Helax –TMS, "Helax –TMS 4.0 User´s Manual", Versión 2, Uppsala, 1997, 125, 131-135.
18. IAEA-TECDOC-1151. "Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia: Protocolo de control de calidad", Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, 2000, 19 - 23
19. IAEA (International Atomic Energy Agency). "Absorbed dose determination in photon and electron beams. An International code of practice". Technical report n° 277. AIEA, Viena 1987, 9-53.
20. IAEA (International Atomic Energy Agency). "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for



Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water". Technical report n° 398. AIEA, Viena 2000, 27-67.

21. Karzmark C.J., Morton R.J., "A Primer on Theory and Operation of Linear Accelerators in Radiation Therapy." BRH Radiological health, Maryland, 1981, 1-47.
22. Khan Faiz M., Gerbi Bruce J., y Deibel Firmin C., "Dosimetry of asymmetric x-ray collimators", AAPM, Med.Phys.13 (6), 1986, 936-941.
23. Khan Faiz M., "Dosimetry of wedged fields with asymmetric collimation", AAPM, Med.Phys.20 (5), 1993, 1447-1451.
24. Khan F. M., "The Physics of Radiation Therapy", 2da. Ed. Ed. Williams & Wilkins. Baltimore, 1994.
25. Kwa W., Kornelsen R. O., Harrison R., El-Khatib E. "Dosimetry for asymmetric x-ray fields". AAPM, Med. Phys. 21(10), 1994, 1599-1604.

26. Lichter A.S. y col. "A Technique for field Matching in Primary Breast Irradiation", Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 9, USA, 1982, 263-270.
27. Loshek D. y Keller K., "Beam profile generator for asymmetric fields", AAPM, Med. Phys. 15, 1988, 604-610.
28. Marinello G., y Dutreix A., "A general method to perform dose calculations along the axis of symmetrical and asymmetrical photon beams", AAPM, Med. Phys. 19 (2), 1992, 275-281.
29. Molto C., Masok V., Barrie A.M., Marinello G., "Application d'une méthode de calcul de débit de dose sur l'axe des faisceaux de photons symétriques et asymétriques á différents accélérateurs". Bull Cancer/Radiother. 80, 1993, 59-76.
30. Murray B., McClean B. y Field C., "Output factors for fields defined by four independent collimators", AAPM, Med. Phys. 22 (3), 1995, 285-290.
31. Nath R., Biggs P., Bova F., Ling C., Purdy J., Van de Geijn J, Weinhaus M., "AAPM code of practice for radiotherapy accelerators: Report of AAPM



Radiation Therapy Task Group No. 45", AAPM, Med. Phys. 21 (7), 1994, 1093-1120.

32. Nordic Association of Clinical Physics: "Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximal energy between 1 and 50 MeV." Acta Radiol 19, 1980, 55-79
33. Purdy J.A., "Relationship between tissue-phantom ratio and percentage depth dose", AAPM, Med. Phys. 4 (1), 1977, 66-67.
34. Rosenberg I., Chu J.C.H, y Saxena V., "Calculation of monitor units for a linear accelerator with asymmetric jaws", AAPM, Med. Phys. 22 (1), 1995, 55-61
35. Rosenow U.L. y col. "A Technique for treating local BreastCancer Using a Single Set-up Point and Asymmetric Collimation". Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 19, USA, 1990, 183-188.
36. SIEMENS "Digital Service". Workbook 1, Siemens Medical Systems, Inc. Oncology Care Systems, California, 1994, 1-9.



37. SIEMENS "Digital Mevatron User Manual", Siemens Medical System, Inc. Oncology Care Systems Group, California, 1997,17.
38. THERATRONICS "Acquisition of Radiation DATA (Scatter-Air Ratios)", 1993, 36-37, 1993.
39. Umeh R.N. y Hanson W.F., AAPM. Med.Phys.12,(Abstracto), 1985, 543.
40. Van Dyk J., Barnett R.B., Gyglar J.E., Shragge P.C., "Commisioning and Quality Assurance of Treatment Planning Computers", Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 26, 1993, 261-273
41. Van Dyk J. "Practical dosimetric considerations of a 10-MV photon beam", AAPM. Med. Phys., Vol. 4 No. 2, 1977, 145-153.
42. Wellhofer Dosimetrie. "WP700 Getting Started". Wellhofer Dosimetrie, 1997, 9-11
43. Wellhofer Dosimetrie. "Software Description". Wellhofer Dosimetrie, 1996, 161-162

