

Estudio de las relaciones entre los parámetros del tratamiento y los resultados de la verificación en VMAT

Analysis of relations between treatment parameters and the verification results in VMAT

Marina Navarro Segarra¹, Ignasi Modolell Farre²

¹ Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona. E-08193 Bellaterra (Barcelona).

² Servei de Física Mèdica i Protecció Radiològica. Institut Català d'Oncologia. Hospitalet del Llobregat (Barcelona).

Fecha de Recepción: 10/07/2017 - Fecha de Aceptación: 05/02/2018

Objetivo: identificar las relaciones latentes entre los parámetros de los tratamientos de arcoterapia volumétrica modulada (VMAT): acelerador, zona de tratamiento, número de volúmenes, dosis, unidades de monitor, longitud de arcos, resultados del porcentaje gamma y puntos totales utilizados para la verificación.

Material y Métodos: se analizan un total de 308 pacientes de próstata y cabeza y cuello. La planificación de los tratamientos se realiza con el sistema Eclipse versión 13.0 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA) y se verifica con el maniquí Sun Nuclear Arccheck mediante el software SNC Patient versión 6.6.2 (Sun Nuclear Corporation, Melbourne, FL).

Se recogen 11 variables relacionadas con la geometría, la complejidad de los planes de tratamiento, la localización del tratamiento y los resultados de la verificación. Se lleva a cabo un análisis estadístico mediante el software de analítica predictiva PSPP versión 0.10.4-g50f7b7 (Free Software Foundation, Boston, MA).

Resultados: se obtienen correlaciones entre las variables de estudio. Siendo las más destacables las correlaciones de la modulación del campo con el índice $\gamma_{1\%-1\text{ mm}}$ y con la variable patología, que ponen en evidencia la relación existente entre una disminución del valor obtenido de los índices gamma para campos más modulados y el aumento en la modulación del tratamiento según la patología.

Conclusiones: a partir de este análisis se observa una correspondencia entre la modulación del tratamiento y la falta de acuerdo entre la dosis medida y calculada. Esto da la posibilidad de anticipar tendencias de las verificaciones futuras y corregir o adaptar tanto dichas verificaciones como las planificaciones, en función de la complejidad del tratamiento.

Palabras clave: VMAT, índice de modulación, verificación dosimétrica.

Objective: to identify the relations between treatment and verification Volumetric Arc Therapy (VMAT) variables: accelerator, treatment area, number of volumes, delivered dose, monitor units (UM), arc geometry, gamma index and the number of measurement points used for the verification.

Materials and methods: 308 prostate and head and neck patients have been analyzed. The treatment plan is calculated using the Eclipse system, version 13.0 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA). Plans are verified with the Sun Nuclear Arccheck phantom and the SNC Patient software, version 6.6.2 (Sun Nuclear Corporation, Melbourne, FL).

Eleven variables related to the geometry and complexity and the treatment areas were analyzed. This statistical analysis was done using the predictive analytics software PSPP, version 0.10.4-g50f7b7 (Free Software Foundation, Boston, MA).

Results: correlations between the studied variables are obtained. The more remarkable ones are the relations between the field modulation, the gamma index $\gamma_{1\%-1\text{ mm}}$ and the treatment pathology, which show up the actual relation between a decrease in the gamma index value for the highly modulated plans and increase in the treatment modulation according to the treatment pathology.

Conclusions: a correlation has been found between the treatment complexity and the dose agreement (or the planned dose and verified dose agreement). This might allow to anticipate tendencies in future verifications, being able to change the treatment plan or verification schemes depending on treatment complexity.

Key words: Application, VMAT, modulation index, dosimetric verification.

* Correspondencia
marinasegarra@hotmail.com

Introducción

La arcoterapia volumétrica modulada (VMAT)^{1,2} es una técnica de tratamiento relativamente novedosa, que combina la rotación del gantry a velocidad variable, con un movimiento dinámico del multilámina (MLC) que modula la intensidad del campo consiguiendo de esta manera administrar una cantidad de dosis más altas en las zonas de tratamiento preservando las zonas sanas. Esta técnica permite obtener distribuciones de dosis más complejas reduciendo el tiempo y aumentando la seguridad de tratamiento en comparación con las técnicas de IMRT convencionales. A pesar de todas estas ventajas su implementación clínica conlleva un incremento en la complejidad del tratamiento. Por ello, es necesario realizar rigurosos controles dosimétricos para cada paciente, cada plan debe ser verificado para así evitar que se produzcan posibles errores asociados a los límites del cálculo del plan de tratamiento o a la precisión con la que se lleva a cabo su administración.³

Un análisis retrospectivo de los datos obtenidos para cada tratamiento durante un cierto periodo de tiempo puede poner de manifiesto los factores que influyen en la coincidencia entre la distribución de dosis planificada y medida. La detección y comprensión de la influencia de estos factores puede ser muy útil y ayudar a optimizar y mejorar la planificación y la verificación de futuros planes. Se pueden encontrar estudios⁴⁻⁷ en los cuales obtienen las relaciones entre las variables de tratamiento, por ejemplo, las correlaciones entre los índices gamma y el desplazamiento medio realizado por las láminas del colimador multilámina (LT), las unidades de monitor (MU), el índice de la complejidad de modulación (MCS)⁸ o la combinación de estos parámetros en un índice de modulación (LTMCS, MI)⁹⁻¹⁰ para distintas zonas tanto para tratamientos de VMAT como de IMRT.

Este trabajo realiza un estudio sobre algunas de las variables implicadas en los tratamientos VMAT con el objetivo de caracterizar las relaciones entre ellas y encontrar el impacto que tienen en la verificación del tratamiento. Para ello se analizan las correlaciones de Pearson de los índices gamma con un conjunto de variables de tratamiento. Paralelamente, se ha buscado definir una serie de índices que caractericen la modulación del campo y que puedan obtenerse mediante cálculos sencillos sobre variables que estén disponibles en el informe dosimétrico del tratamiento. El objetivo es comprobar si estos índices pueden cuantificar la complejidad del tratamiento y sus dependencias.

Material y métodos

Para realizar el análisis se recogen los valores de las variables que, en su conjunto, caracterizan los tratamientos de VMAT realizados en nuestro centro a un total de 308 pacientes, entre el 1 de agosto de 2015 y el 1 de agosto de 2016. Los tratamientos de 6MV son

impartidos en los aceleradores Varian Clinac Trilogy y Clinac TrueBeam ambos provistos de un colimador multilámina modelo "Millennium" de 120 láminas.

Los planes de tratamiento constan todos de dos arcos con el colimador multilámina girado 45° y 315° en cada arco y energía de 6 MV. Dichos arcos tratan entre 1 y 3 volúmenes blanco simultáneamente. En función de la localización de los volúmenes blanco, los arcos pueden realizar rotaciones completas u omitir algún segmento.

La planificación se realiza con el sistema Eclipse versión 13.0 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA) usando el algoritmo Analytical Anisotropic Algorithm (AAA) y se verifica con los resultados obtenidos en el maniquí Sun Nuclear Arccheck. Mediante el software *SNC Patient*TM versión 6.6.2 (Nuclear Sun Corporation, Merlbourne, FL). Imponiendo unas condiciones correspondientes a un 10% de umbral de dosis, una distancia de acuerdo (DTA) en 3D y el criterio de cálculo Van Dyk (diferencia global de dosis normalizada al máximo de la distribución calculada que coincida con la ubicación de un detector), se calculan cuatro índices gamma, el índice de dosis absorbida para una diferencia de dosis absoluta de 3% y una DTA de 3 mm y los índices de porcentaje de dosis para unas diferencias relativas del 3%, 2% y 1% y una DTA de 3 mm, 2 mm y 1 mm respectivamente.

El total de puntos verificados dependerá de las condiciones impuestas en la verificación y del tamaño del campo, tenemos por tanto, que para campos de tratamiento más grandes se abarcará más superficie del maniquí y se compararán más detectores durante la verificación.

Las variables analizadas en el estudio son las siguientes:

- *Acelerador*: tiene en cuenta en qué máquina se realiza el tratamiento, su valor será 0 si se trata en el acelerador TrueBeam y 1 si se trata en el Trilogy, es por tanto una variable binaria.
- *Patología*: son consideradas dos zonas de tratamiento, la zona de próstata y la de cabeza y cuello, las demás son descartadas para el análisis debido a que no se cuenta con suficientes casos clínicos como para poder realizar un análisis estadístico adecuado. Durante el análisis esta variable es tratada como una variable binaria siendo Patología = 1 para la zona de próstata y Patología = 0 para las zonas de cabeza y cuello.
- *Volúmenes*: número de volúmenes tratados simultáneamente a distinta dosis, esta variable es una variable discreta pudiendo ser 1, 2 o 3. Se descartaron los casos con más de tres volúmenes por ser escasos.

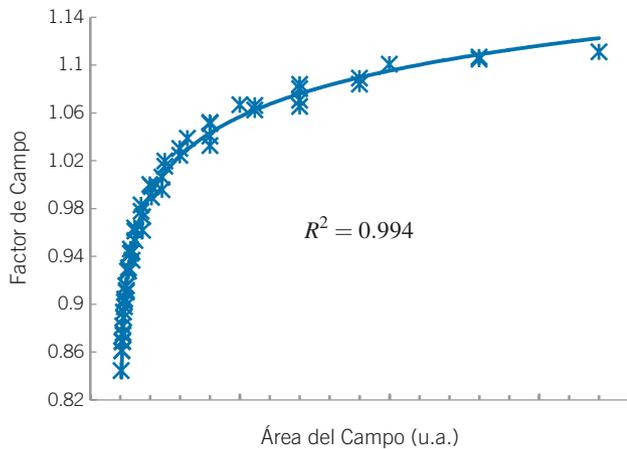


Fig. 1. Factores de campo en función del área del campo ajustados a una curva logarítmica.

- **Dosis:** mayor valor de dosis por sesión con el que es tratado nuestro conjunto de volúmenes; expresado en Gy.
- **Unidades de Monitor (MU):** unidades de monitor totales del tratamiento, sumando las de cada arco.
- **Arcos:** varía según si el brazo realiza un giro completo o parcial, el número de arcos realizados es 2 en todos los tratamientos. En el análisis esta variable es, por tanto, binaria y toma los siguientes valores: Arcos = 1 si los dos arcos realizados son completos (= 360°), Arcos = 0 si los dos arcos realizados son parciales (< 360°).
- **Porcentaje gamma:** se define a partir del porcentaje de puntos que cumplen el criterio gamma exigido en cada caso durante la verificación.
- **Puntos:** indica la cantidad de detectores totales que se comparan durante la verificación, es por tanto una variable continua relacionada con el tamaño de campo.

Además de estas, definimos tres variables más para poder cuantificar la modulación de nuestro campo de tratamiento:

- **Modulación 1 [Ec. 1(a)]:** cuantifica las unidades de monitor por unidad de dosis prescrita por fracción del tratamiento. Tomamos como valor de dosis prescrita el recogido en la variable "Dosis", que, en caso de tratar varios volúmenes de forma simultánea es la que corresponde al volumen con mayor dosis. El valor de esta variable aumentará cuantas más MU necesitemos para tratar con la misma cantidad de Gy, indicando así que estamos tratando con arcos más modulados.

A partir de esta definición de modulación básica, construimos dos índices de modulación más tratando de atenuar el efecto del tamaño de campo y la profundidad de tratamiento en la relación entre dosis y unidades de monitor.

- **Modulación 2 [Ec. 1(b)]:** se define para eliminar la influencia del tamaño de campo en las unidades de monitor por unidad de dosis del tratamiento. Estudiando la relación entre los factores de campo y el área del campo observamos que, para campos cuya relación de tamaño entre la dirección craneocaudal y transversal es inferior a 3, se ajustan con buena correlación ($R^2 = 0.994$) a una curva logarítmica (Fig. 1).

Dada la geometría cilíndrica del detector empleado y el uso de arcos, el número de detectores empleados en la verificación es proporcional al tamaño de campo en la dirección cañón-blanco.

La técnica de tratamiento empleada sitúa el isocentro en el centro del volumen blanco, si este es único, o en el centro del mayor de los volúmenes de tratamiento, si estos son múltiples. En consecuencia, los campos de tratamiento son aproximadamente simétricos.

Los colimadores de los campos de tratamiento están girados 45°, por lo que el tamaño de campo en la dirección cañón-blanco es igual a la diagonal de dichos campos. De acuerdo con la geometría del detector y de los arcos de verificación, el número de detectores verificados será proporcional a la diagonal del campo de tratamiento.

El área del campo de tratamiento varía con la diagonal del campo de tratamiento cuadráticamente. Aplicando logaritmo obtendremos que el logaritmo del área del campo de tratamiento es proporcional al logaritmo de la diagonal del campo, o, lo que es lo mismo, al logaritmo del número de detectores verificados.

De acuerdo con el ajuste de la Fig. 1, el logaritmo del número de detectores verificados será aproximadamente proporcional al factor de campo.

Para definir la Modulación 2, añadimos un factor correspondiente al logaritmo del número de detectores verificados. El valor de la Modulación 1 queda así reescalado, suprimiendo la influencia del tamaño de campo.

- **Modulación 3 [Ec. 1(c)]:** se define para eliminar la influencia de la profundidad de tratamiento en las unidades de monitor por unidad de dosis.

Para simplificar la definición de esta variable se definió un valor dependiente únicamente de la patología.

Al incluir el estudio únicamente pacientes de próstata y cabeza y cuello, zonas que presentan espesores

muy distintos, asignar un único valor para todos los tratamientos de próstata y otro para todos los de cabeza y cuello permite discriminar adecuadamente la influencia del espesor de tratamiento en el índice de modulación.

Las áreas pélvicas tienen un espesor mucho mayor que las de cabeza y cuello, por ello, la profundidad a la que se encuentran los volúmenes blanco será mayor, y necesitarán más unidades de monitor para recibir la misma dosis, sin ser necesariamente tratamientos más modulados.

Para definir el factor de patología se promedia la profundidad de tratamiento para todos los pacientes de próstata y para todos los pacientes de cabeza y cuello, y se busca el valor del porcentaje de dosis en profundidad que corresponde a esos promedios. Los valores hallados fueron de 0.49 para la próstata y 0.77 para cabeza y cuello, que corresponden a unas profundidades medias de 15.4 y 7.3 cm respectivamente.

La Modulación 3 queda definida como la Modulación 2 multiplicada por el Factor de patología, eliminando así la influencia de las diferencias de espesor asociadas a la región anatómica tratada.

$$M1 = \frac{MU}{Dosis} \quad (a)$$

$$M2 = M1 \cdot \ln(\text{número de puntos}) \quad (b) \quad (1)$$

$$M3 = M2 \cdot F_p \quad (c)$$

Se analizan un total de 189 casos de próstata y 119 de cabeza y cuello. En conjunto son analizados 193 casos tratados en el acelerador TrueBeam, de los cuales 132 son de próstata y 61 son de cabeza y cuello; y 115 en el acelerador Trilogy de los cuales 57 son de próstata y 58 son de cabeza y cuello. Los rangos de variación y promedios de las variables escogidas se muestran en la Tabla 1.

Se realizan cuatro análisis estadísticos con estas variables mediante el software de analítica predictiva PSPP,¹² versión 0.10.4-g50f7b7 (Free Software Foundation, Boston, MA). El primero es una comparación previa de todas las variables a partir de la cual seleccionamos las variables de estudio según la significancia e información que aporten sus correlaciones. Tras esta selección, se realiza un primer análisis, estudio 1, en el cual las variables Dosis y MU quedan englobadas en las variables modulación. En los siguientes analizamos cada patología por separado, se realiza el estudio 2 para los casos de próstata y el estudio 3 para los de cabeza y cuello.

En cada uno de estos estudios se obtiene la matriz de correlaciones de los coeficientes de correlación de Pearson¹³⁻¹⁴ y dos test de adecuación muestral el test de esfericidad de Bartlett¹⁵ y el de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO).¹⁵ Estos tres datos indican cuantitativa y cualitati-

vamente si existen relaciones lineales entre las variables y su fortaleza y significación. Estos dos test son realizados para comprobar si las variables están lo suficientemente correlacionadas como para justificar que se lleve a cabo el análisis de la matriz de correlaciones.

La prueba de esfericidad de Bartlett parte de la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones no es diferente de la matriz identidad es decir, las variables están completamente descorrelacionadas; y calcula el estadístico χ^2 , basado en el determinante de la matriz de correlaciones. De esta manera este test da como resultados el valor de χ^2 , que debe ser alto; el valor del determinante de la matriz de correlaciones, que debe ser próximo a 0, y el nivel de significancia, que debe ser menor que 0.05 para poder rechazar la hipótesis nula. El test de KMO compara los valores de las correlaciones entre las variables con sus correlaciones parciales, la escala en este estudio para interpretar el índice de KMO se muestra en la Tabla 2.

Por otra parte, la interpretación escogida para aquellos índices de correlación (r) que encontramos significativos la encontramos en la Tabla 3.

Siendo la hipótesis nula, H_0 , de nuestro análisis que las variables no se encuentran relacionadas, el nivel de significación asumido es del 5% ($p = 0.05$), esto significa que si el resultado del análisis de las muestras presenta un nivel de significación mayor al límite asumido no se puede rechazar la hipótesis nula. En cambio, si el nivel que se obtiene es menor, consideraremos que las variables están significativamente correlacionadas linealmente, en mayor o menor medida dependiendo del valor de r .

Resultados y discusión

El análisis preliminar demostró que los índices gamma correspondientes a 3%-3mm, tanto absoluto como relativo y al 2%-2mm relativo, no presentan ninguna correlación con el resto de variables, esto hizo descartarlas como variables de futuros análisis y escoger la gamma 1%-1mm como único índice válido. Dado que su rango de variación es mayor, cualquier relación entre ella y el resto de variables del análisis será más apreciable y así se mostrará en el análisis estadístico. Estos resultados concuerdan con los presentados por Dhanabalan Rajasekaran et al.⁶ donde las correlaciones con el MCS más importantes también las presentaba la gamma 1%-1mm.

Los resultados obtenidos para el resto de análisis superan los dos test permitiendo descartar la hipótesis nula y demostrando que las variables son adecuadas para el análisis estadístico y que en un principio es posible obtener alguna correlación significativa entre ellas.

Para el estudio 1 el test de esfericidad tiene como soluciones una $\text{Sig} = 0.000$, un $\chi^2 = 2519.62$ y un $\text{Det.} = 0.00$. Por su parte el índice de KMO es igual

Tabla 1. Rango de variación, promedios y desviación estándar de las variables dosis, modulación y gamma.

	Promedio	Desviación estándar	Rango de variación
Dosis (Gy)	2.30	1.02	2.00-9.00
Unidades de Monitor	609.55	322.33	314-2773
Modulación 1 (MU/cGy)	2.64	0.77	1.54-4.37
Modulación 1 próstata (MU/cGy)	2.90	0.88	1.89-4.37
Modulación 1 cabeza y cuello (MU/cGy)	2.23	0.42	1.57-3.38
Modulación 2 (MU/cGy)	17.60	4.94	10.02-30.73
Modulación 2 próstata (MU/cGy)	19.02	5.25	10.05-30.73
Modulación 2 cabeza y cuello (MU/cGy)	15.32	3.16	10.01-24.48
Modulación 3 (MU/cGy)	10.29	3.81	4.93-18.85
Modulación 3 próstata (MU/cGy)	9.32	4.04	4.93-15.06
Modulación 3 cabeza y cuello (MU/cGy)	11.79	2.42	7.71-18.85
Gamma 3% - 3 mm absoluta	98.46	2.20	74.9-100
Gamma 3% - 3 mm relativa	99.78	0.51	95.50-100
Gamma 2% - 2 mm relativa	97.81	2.17	80.30-100
Gamma 1% - 1 mm relativa	78.05	8.42	51.20-99.80

a 1.00, de esta manera se obtiene que a priori tiene sentido continuar con el análisis de la matriz de correlaciones que encontramos en la Tabla 4.

Observando la matriz del estudio 1 se puede extraer, primero, que la Gamma 1 no presenta ninguna correlación con la variable Arcos y tiene una ínfima correlación inversa con la Modulación 1. En cambio, se encuentra que correlaciona con el Acelerador de forma inversamente proporcional, esto indica que las verificaciones tienen en general un mejor nivel de acuerdo entre el mapa de dosis de la planificación y el medido para el acelerador TrueBeam que para el Trilogy. También aparece una correlación directa con la patología que indica que los valores de gamma son mayores para los casos de próstata que los de cabeza y cuello. Esto podría ser consecuencia del hecho de que obtenemos un mayor acuerdo en la verificación para el acelerador TrueBeam donde son tratados más casos de próstata.

Con el número de volúmenes correlaciona de forma inversa, al igual que con los puntos, es decir, la gamma decrece cuando aumentan el número de volúmenes y/o cuando más puntos son verificados, por tanto, cuando la complejidad de tratamiento es mayor y cuando el campo es más grande.

El porcentaje gamma también aparece correlacionado de forma inversa con la Modulación 2. Se observa cómo la correlación pasa de ser ínfima a ser escasa, es decir, aumenta, y además se hace más significativa, al tener en cuenta el tamaño de campo a través del número de puntos. La correlación con la modulación del campo vuelve a ganar fuerza cuando también se

tiene en cuenta el espesor de la zona de tratamiento dando como resultado un índice $r = -0.52$. Este hecho pone de manifiesto que cuantas más variables contempla el índice definido para la modulación del tratamiento mejor correlación se obtiene con el porcentaje gamma, ya que, al tener en cuenta efectos como el tamaño de campo y el espesor del paciente, que influyen en la relación entre las unidades de monitor, la dosis y la

Tabla 2. Escala de interpretación del índice de Kaiser-Meyer-Olkin.

Valor de índice KMO	Adecuación muestral
≥ 0.75	Buena
≥ 0.50	Aceptable
< 0.50	Inaceptable

Tabla 3. Escala de interpretación del índice de correlación de Pearson (r).

Valor de r	Interpretación
0.00-0.20	Ínfima correlación
0.20-0.40	Escasa correlación
0.40-0.60	Moderada correlación
0.60-0.80	Buena correlación
0.80-1.00	Muy buena correlación

Tabla 4. Índices de correlación de Pearson (r) con sus significaciones (p) para la Gamma1, la modulación y con el resto de variable para el estudio 1.

	Modulación 1		Modulación 2		Modulación 3	
	r	p	r	p	r	p
Acelerador	-0.08	0.077	-0.05	0.214	0.12	0.016
Patología	0.63	0.000	0.49	0.000	-0.53	0.000
Volúmenes	0.11	0.028	0.27	0.000	0.18	0.001
Arcos	0.37	0.000	0.38	0.000	0.12	0.018
Puntos	-0.09	0.054	0.13	0.012	0.40	0.000
Porcentaje gamma 1	-0.10	0.023	-0.23	0.000	-0.52	0.000
Modulación 1	1.00	—				
Modulación 2	0.95	0.000	1.00	—		
Modulación 3	0.27	0.000	0.46	0.000	1.00	—

Tabla 5. Índices de correlación de Pearson (r) con sus significaciones (p) para las modulaciones con el resto de variables de estudio para los 189 casos de próstata.

	Gamma 1		Modulación 1		Modulación 2 y 3	
	r	p	r	p	r	p
Acelerador	-0.34	0.000	0.13	0.022	0.15	0.255
Volúmenes	-0.30	0.000	0.19	0.000	0.39	0.001
Puntos	-0.43	0.000	0.36	0.000	0.64	0.000
Porcentaje gamma 1	1.00	—	-0.40	0.000	-0.47	0.000
Modulación 1	-0.40	0.000	1.00	—		
Modulación 2 y 3	-0.47	0.000	0.94	0.000	1.00	—

Tabla 6. Índices de correlación de Pearson (r) con sus significaciones (p) para las modulaciones con el resto de variables de estudio para los 118 casos de cabeza y cuello.

	Modulación 1		Modulación 2 y 3	
	r	p	r	p
Acelerador	-0.07	0.241	-0.10	0.145
Volúmenes	-0.02	0.394	0.09	0.171
Arcos	0.39	0.000	0.46	0.000
Puntos	0.14	0.068	0.39	0.000
Porcentaje gamma 1	-0.38	0.000	-0.43	0.000
Modulación 1	1.00	—		
Modulación 2 y 3	0.96	0.000	1.00	—

gamma; se consigue aislar y acentuar la relación entre la complejidad del campo y el resultado de la verificación.

Por otra parte, aparecen también correlaciones destacables entre las modulaciones y el resto de varia-

bles. Modulación 1 y Modulación 2 presentan una relación moderada con la patología, indicando que las unidades de monitor para una misma dosis son más altas en tratamientos de próstata que en los de cabeza

y cuello. Este resultado es un efecto secundario de la diferencia de espesor que encontramos entre una zona y otra de tratamiento, en general las zonas de próstata son mucho más voluminosas que las zonas de cabeza-cuello, es decir, necesitan más unidades de monitor para ser tratadas con una misma cantidad de dosis. Por tanto, debido a que la definición de Modulación 2 del campo sí que tiene en cuenta la influencia del tamaño del campo, pero no la influencia del espesor de la zona de tratamiento, obtenemos una correlación directa con la zona de patología.

Analizando las correlaciones que presenta la variable Modulación 3 se puede observar cómo al incluir los efectos del espesor de la zona de tratamiento aparece una fuerte correlación inversa con la variable patología, que indica que las patologías de cabeza y cuello están generalmente más moduladas que las próstatas.

Por último, se encuentra que las modulaciones presentan una correlación con los Arcos esto indica que los tratamientos con arcos parciales (tratamientos de cabeza y cuello) la modulación es menor. Esto es debido a que durante la planificación los arcos parciales suelen ser aplicados a zonas con geometrías más simples mientras que zonas con geometrías más complejas son tratadas con arcos completos, de esta forma los órganos de riesgo toman un carácter más influyente en la modulación del campo, dando como resultados tratamientos mucho más complejos.

Pese a haber encontrado correlaciones significativas, la mayoría de los índices no triviales que se han obtenido para la gamma son índices de escasa correlación ($0.20 \leq r \leq 0.40$), excepto para el caso de las modulaciones con la patología donde r pasa a tener un carácter moderado.

Los resultados obtenidos para los estudios de las patologías por separado, se muestran en la Tabla 5 y 6. En estos estudios hay que tener en cuenta que, la variable Modulación 3 contiene la misma información que la variable Modulación 2 dado que se consideran la zona de patología por separado y por tanto, ambas modulaciones presentan las mismas correlaciones. Por otra parte, para el estudio 2, casos de próstata, eliminamos los resultados de las correlaciones con la variable Arcos dado que no hay casos con arcos parciales para esta zona.

Con estos dos nuevos análisis se confirman los resultados obtenidos para el estudio 1 además de obtener resultados nuevos.

Ambos estudios presentan resultados satisfactorios en los test de adecuación muestral, el índice de KMO es 1.00 en los dos casos, los mismos resultados obtenemos también para la $\text{Sig} = 0.000$ y para el determinante $= 0.00$, el χ^2 obtenido es 7652.98 para la próstata y 4340.80 para la cabeza y cuello. Respalándonos en estos resultados realizamos el análisis de la matriz de correlaciones.

Como confirmación y ampliación del estudio 1 se observa que la correlación del porcentaje gamma 1 con Acelerador viene en su totalidad causada por la relación presente en los casos de próstata, los cuales también presentan una correlación más fuerte de la gamma con el número de volúmenes y de puntos totales que los casos de cabeza y cuello.

La correlación entre el porcentaje gamma y las modulaciones se hace mucho más importante en estos dos nuevos estudios. Esta dependencia incluso llega a ser de carácter moderado ($r > 0.40$) cuando analizamos el porcentaje gamma de los casos de cabeza y cuello y la Modulación 2. Demostrando de esta manera que aquellos tratamientos más modulados, es decir, aquellos con más MU por unidad de dosis y en los que el área de campo es más grande, están asociados a unos valores de gamma más bajos. Estos resultados concuerdan con los presentados por Laura Masi et al. en su estudio^[10] donde encuentra la misma relación entre el MCS y las MU con los índices gamma (3%, 3mm -2%, 2mm), que la que presentamos aquí entre las modulaciones y la $\gamma_{1\%-1\text{mm}}$. En su caso la correlación encontrada es más fuerte, suponemos que esto puede ser debido a que la sencillez índice de modulación utilizado en este estudio repercute en correlaciones más moderadas. También creemos que en el estudio 1 solo encontramos esta relación para la Modulación 3 puesto que para la 1 y la 2 se enmascara por la correlación que tienen con la patología.

La mayor robustez de las correlaciones al estudiar las patologías por separado era un resultado esperado, dadas las aproximaciones que suponen definir un factor de patología global promediando espesores y obteniéndolo a partir de la curva de porcentaje de dosis en profundidad. Podrían reducirse las aproximaciones tomadas para ese factor definiéndolo para el espesor particular de cada paciente y empleando curvas de relación tejido-máximo (TMR), pero eso complicaría el cálculo del factor de modulación más allá de los objetivos del presente trabajo.

Conclusiones

Tras el análisis retrospectivo de 308 casos clínicos se han encontrado correlaciones significativas, de carácter escaso o moderado, entre algunas de las variables que caracterizan los tratamientos de VMAT. Los valores del porcentaje gamma y la modulación del tratamiento parecen mostrar una relación moderada, demostrando que se puede esperar encontrar peores correspondencias en las verificaciones para los planes de tratamiento con campos más modulados.

Las correlaciones encontradas entre la complejidad del campo y el porcentaje gamma_{1%-1mm} son mayores cuando tenemos en cuenta el impacto del espesor de la región anatómica de tratamiento y el tamaño del

campo en el número de UM a través de las definiciones de la Modulación 2 y 3. La correlación aumenta a -0.23 y -0.52 , para las variables Modulación 2 y 3 respectivamente, respecto de $r = -0.10$ que se encontraba para la variable Modulación 1.

En general, los resultados de este estudio pueden ser útiles para anticipar tendencias de las verificaciones futuras y corregir o adaptar tanto dichas verificaciones, como las planificaciones de los tratamientos en sí.

A partir de los resultados obtenidos cuando se realizó el análisis separando los pacientes por patologías, podemos concluir que, en caso de querer discriminar por rangos de valores el nivel de modulación y su acuerdo con los resultados de las verificaciones, sería recomendable establecer rangos distintos para cada patología, o bien emplear un índice de modulación más complejo.

Bibliografía

1. K.Otto. "Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single arc." *Med Phys* 2008;35:310-7.
2. Teoh M, Clark CH, Wood K, Whitaker S, Nisbet A. "Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice." *Br J Radiol* 2011;84:967-96.
3. "The importance of accurate treatment planning, delivery, and dose verification" *Rep Pract Oncol Radiother* 2012;17:63-5.
4. Dhanabalan Rajasekaran, Prakash Jeevanandam, Prabakar Sukumar, Arulpandiyam Ranganathan, Samdevakumar Johnjothi and Vivekanandan Nagarajan, "A study on the correlation between plan complexity and gamma index analysis in patient specific quality assurance of volumetric modulated arc therapy". *Rep Pract Oncol Radiother* 2015;20:57-65.
5. Jin X, Yan H, Han C, Zhou Y, Yi J, Xie C., "Correlation between gamma index passing rate and clinical dosimetric difference for pre-treatment 2D and 3D volumetric modulated arc therapy dosimetric verification." *Br J Radiol* 2015; 88:20140577.
6. Nathan L. Childress, R. Allen White, Charles Bloch, Mohammad Salehpour, Lei Dong, and Isaac I. Rosen, "Retrospective analysis of 2D patient-specific IMRT verifications". *Med Phys* 2005;32:838-50.
7. Weiliang Du, Sang Hyun Cho, Xiaodong Zhang, Karen E. Hoffman, and Rajat J. Kudchadker, "Quantification of beam complexity in intensity-modulated radiation therapy treatment plans" *Med Phys* 2014;41:021716.
8. McNiven AL, Sharpe MB, and Purdie TG. "A new metric for assessing IMRT modulation complexity and plan deliverability." *Med Phys* 2010;37:505-515.
9. Jong Min Park, So-Yeon Park, Hyoungnyoun Kim⁶, Jin Ho Kim, Joel Carlson and Sung-Joon Ye, "Modulation indices for volumetric modulated arc therapy", *Phys Med Biol* 2014;59: 7315-40.
10. Laura Masi, Raffaella Doro, Virginia Favuzza, Samantha Cipressi, and Lorenzo Livi, "Impact of plan parameters on the dosimetric accuracy of volumetric modulated arc therapy", *Med Phys* 2013;40:071718.
11. Free Software Foundation, Inc. "PSPP Users's Guide", 134-140.
12. Santiago de la fuente Fernández, "Análisis Factorial", UAM, Análisis de la matriz de correlación, 2011;7-8.
13. Departamento de sociología de la UCM, "Material didáctico: Guía para el análisis de datos", Capítulo 20.
14. Francesc Carmona, Departament d'estadística de la UB, "Un ejemplo de ACP paso a paso", 2014;1-2.

Colección FUNDAMENTOS DE FÍSICA MÉDICA

¡YA ESTÁ COMPLETA!

Objetivos de la colección:

01

Cubrir gran parte del programa teórico de formación de la especialidad, lide RFH.

02

Uniformizar los conocimientos teóricos de base para todos los especialistas en formación.

03

Armonizar el léxico y la terminología en el ámbito de la Física Médica.



En su conjunto, los diez libros van dirigidos a especialistas en formación en la especialidad de RFH, (fundamentalmente los residentes de primero y segundo año de la especialidad), así como a titulados superiores que quieran adquirir o mejorar sus conocimientos en el área de la Física Médica.

Por medio de esta colección, se pretende además, difundir el contenido de nuestros cursos entre todos los profesionales de la Física Médica de habla hispana que deseen acercarse a nuestros textos y tener a su disposición un libro de consulta en español.

www.auladoc.com

Información y pedidos en:



+34 5428282



info@auladoc.com



Madrid



SIEMENS



Small cells don't have to lead to big problems.

Siemens answers help doctors detect diseases earlier, saving costs and extending lives.

When diseases are caught early, they make less of an impact on everyone. That's because a large majority of today's healthcare costs go toward treating the late stages of diseases like cancer and heart disease. With Siemens advanced diagnostic technology, doctors

can accurately identify these killers earlier. So patients get the treatment they need sooner. Which helps save lives and cuts costs. Wherever there are tough health-care questions, we're answering them.

[siemens.com/answers](https://www.siemens.com/answers)