

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

**TABU SEARCH PARA EL PROBLEMA DE
SELECCION DE ANGULOS EN
RADIOTERAPIA**

JUAN BASTIAN VIDAL SANCHEZ

INFORME FINAL DEL PROYECTO
PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN INFORMÁTICA

NOVIEMBRE, 2017

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

**TABU SEARCH PARA EL PROBLEMA DE
SELECCION DE ANGULOS EN
RADIOTERAPIA**

JUAN BASTIAN VIDAL SANCHEZ

**PROFESOR GUÍA: GUILLERMO CABRERA GUERRERO
PROFESOR CO-REFERENTE: RICARDO SOTO DE GIORGIS**

CARRERA: INGENIERÍA DE EJECUCIÓN INFORMÁTICA

NOVIEMBRE, 2017

Agradecimientos a mi familia, amigos, compañeros y profesores que me han apoyado durante estos 4 años de aprendizaje.

Resumen

Uno de los tratamientos utilizados para combatir el cáncer es la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), el cual consiste en emitir dosis controladas de radiación hacia el tumor. El acelerador lineal puede tomar distintas posiciones alrededor del paciente, y sólo un subconjunto de las posiciones posibles debe ser seleccionado. Esto con el fin de entregar tratamientos de alta calidad en periodos cortos de tiempo. El problema de la selección de estas posiciones es conocido como Beam Angle Optimization (BAO), el cual es un problema NP-Hard que no es posible de resolver por medio de técnicas de búsqueda completa. Durante años, diferentes estrategias han sido propuestas para resolver este problema. Algoritmos heurísticos tales como algoritmos genéticos, optimización de enjambre de partículas o recorrido simulado han sido ampliamente utilizados para abordar este problema. Aunque no es tan común como las estrategias mencionadas anteriormente, los algoritmos de búsqueda local también se han considerado para resolver este problema. En este trabajo de título se comparan 2 de estos algoritmos; Local Search y Tabu Search. Estos algoritmos buscan una configuración de ángulos (BAC) que entregue como resultado un buen tratamiento y se espera que Tabu Search supere a la Local Search implementada, ya que, aunque ambos son algoritmos de búsquedas locales, Tabu Search utiliza estructuras de memoria para optimizar la búsqueda, que le permite no volver a repetir ángulos dentro de la configuración, ángulos que pueden disminuir la calidad del tratamiento. Además se proponen estrategias de mejora para Tabu Search basadas en la aplicación de reglas geométricas ad-hoc al problema que se está resolviendo. Para comparar estos algoritmos se utilizará un caso real de cáncer a la próstata disponible en una plataforma pública llamada CERR.

Palabras clave: Radioterapia de intensidad modulada, Beam Angle Optimization, CERR, Algoritmos de Búsqueda local, Beam Angle Configuration, Cono.

Abstract

One of the therapies used to treat cancer is the Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT), which consists of controlled doses of radiation emissions from a lineal accelerator to the cancerous tumor. The lineal accelerator can take different positions around the patient and only a subset of the possible positions can be selected. This in order to give a high quality treatment in short periods. The problem of selecting these positions is known as the Beam Angle Optimization (BAO), which is an NP-Hard problem that it's not possible to solve using total search techniques. For years, different strategies to solve this problem have been proposed. Heuristic algorithms like genetic algorithms, bee swarm optimization, or simulated annealing have been amply used to address this issue, although not as common as the strategies mentioned recently, the local search algorithms have been considered to solve this problem. In this grade level work, two of these algorithms are compared; Local Search and Tabu Search. These algorithms search for a beam angle configuration (BAC) which gives a good treatment as a result. It is expected that Tabu Search surpasses the already implemented Local search, because while both being local search algorithms, Tabu Search uses memory structures for search optimization, which it allows it to avoid angle repetition in the configuration, avoiding angles that can lower the treatment's quality. It is also proposed strategies for improving Tabu Search, based in the application of geometric rules ad-hoc to the solving problem. To compare the algorithms will be used CERR, a real prostate cancer case available in a public platform.

Keywords: Intensity-Modulated Radiation Therapy, Beam Angle Optimization, CERR, Local Search Algorithms, Beam Angle Configuration, Cone.

Índice

1. Introducción	1
2. Descripción del problema	3
2.1. Formulación matemática del problema	4
3. Descripción de la técnica	7
3.1. Pseudocódigo tabu search	8
3.2. Técnica del cono	8
4. Experimentos	12
4.1. Resultados	13
5. Conclusión	17

Lista de Figuras

1.	Acelerador lineal y sus beams tomando la forma de órganos.	2
2.	Discretización de los órganos y "beams" en "voxels" y "beams-lets".	4
3.	Superficie 3D de la función objetivo de la ecuación (6) para las parejas de ángulos.	9
4.	Superficie plana de la función objetivo de la ecuación (6) para las parejas de ángulos.	10
5.	Ángulos restringidos por técnica del cono para el ángulo 0.	11
6.	Caso de prostata CERR utilizado en este estudio.	12

Lista de Tablas

1.	<i>"Initial BACs"</i> utilizados para los experimentos	13
2.	Resultados <i>"TabuSearch"</i> vs <i>"LocalSearch"</i>	14
3.	Resultados <i>"TabuSearch"</i> vs <i>"LocalSearch"</i> <i>"BACs"</i> <i>"randoms"</i>	15
4.	Resultados <i>"TabuSearch"</i> vs <i>"TabuSearch"</i> con cono	16

1. Introducción

El cáncer, según la *"American Cancer Society"*, es una enfermedad que corresponde a un crecimiento descontrolado de las células de nuestro cuerpo, sobrepasando a las células normales y dificultando que este funcione de la manera que debería. El cáncer se puede originar en cualquier parte del cuerpo por lo que existen muchos tipos de este, como el cáncer en los pulmones, cáncer de mamas, cáncer en el colon o hasta en la sangre. Para el presente proyecto nos enfocaremos en el cáncer de próstata, el cual en Chile constituye la tercera causa de muerte por enfermedad neoplásica de la población masculina [1]. Se estima que anualmente mueren unos 1500 hombres debido a esta enfermedad, ubicándose por detrás del cáncer de estómago y del pulmonar [1]. Este tipo de cáncer se origina cuando las células de la próstata, una glándula que solo tienen los hombres y que produce parte del líquido que conforma el semen, comienzan a crecer sin control y provocan síntomas como problemas al orinar, sangre en la orina o el semen, dificultad para lograr una erección, entre otros.

Existen distintos tipos de tratamientos para tratar el cáncer y cual de estos utilizar dependerá del tipo y de lo avanzado que este se encuentre (cabe destacar que en la mayoría de los casos se utilizan combinaciones de tratamientos). El tratamiento más utilizado para combatir el cáncer a la próstata es la radioterapia, más específico aún la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), la cual consiste en utilizar aceleradores lineales de rayos X controlados por computadora para administrar dosis de radiación precisas a un tumor maligno o áreas específicas dentro del tumor [2] (ver Figura 1). La IMRT permite que la dosis de radiación se conforme con mayor precisión a la forma tridimensional del tumor mediante la modulación (o el control) de la intensidad del haz de radiación en varios volúmenes pequeños [2]. La IMRT también hace posible enfocar dosis más altas en regiones dentro del tumor, al tiempo que se minimiza la exposición a la radiación en las estructuras fundamentales circundantes normales [2]. El tratamiento se planifica cuidadosamente con la ayuda de imágenes tridimensionales de tomografía computada o imágenes de resonancia magnética del paciente, junto con cálculos computarizados de dosis para determinar el patrón de intensidad de dosis que mejor se adapte a la forma del tumor [2]. En general, las combinaciones de múltiples campos de intensidad modulada provenientes de distintas direcciones de haz producen una dosis de irradiación individualizada que aumenta al máximo la dosis al tumor, a la vez que minimiza la dosis para los tejidos normales adyacentes [2]. Para este proyecto nos enfocaremos

específicamente en el uso del IMRT para el tratamiento del cáncer a la próstata, y en cómo optimizar mediante la metaheurística del *"Tabu Search"* el problema del *"Beam Angle Optimization"* (BAO) que junto con el *"Fluence Map Optimization"* (FMO) conforman 2 de las 3 fases del tratamiento de IMRT y con los cuales se busca encontrar una relación óptima entre la posición del acelerador lineal (utilizando la menor cantidad de beams) y la intensidad de la radiación aplicada sobre el tumor de la próstata, sin dañar la vejiga y el recto, que se encuentran alrededor de éste.

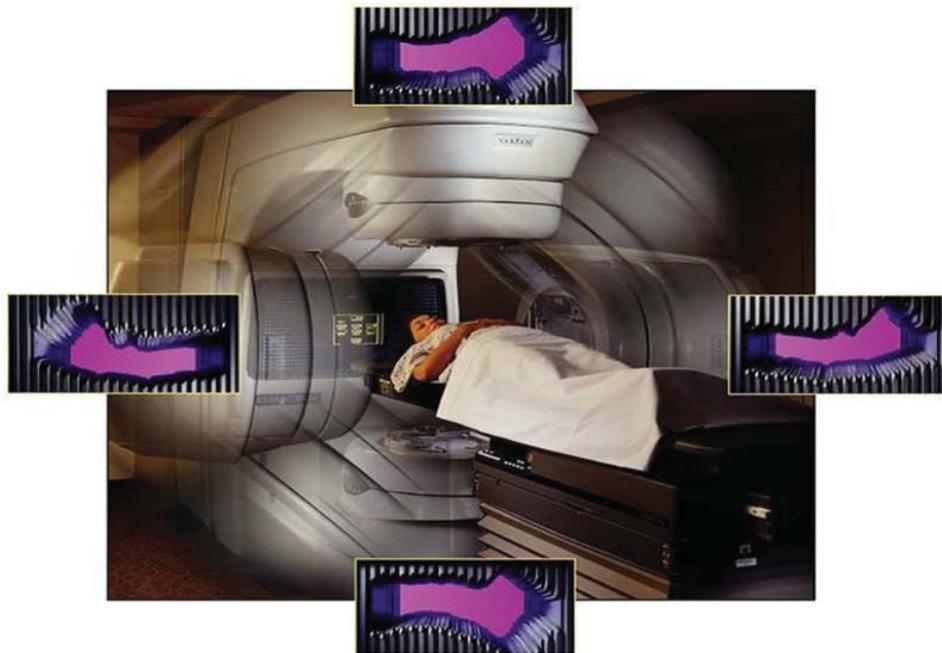


Figura 1: Acelerador lineal y sus beams tomando la forma de órganos.

2. Descripción del problema

El problema BAO es la primera etapa del IMRT y es considerado una optimización de combinatoria, que consiste en encontrar la mejor combinación de N ángulos (ángulos que puede tomar el acelerador lineal, de 0 a 359) en un conjunto discreto de K candidatos, es decir, la combinatoria de K sobre N ángulos. En [3] Sultan comprobó que BAO es un problema NP-Hard, lo que quiere decir que no es posible evaluar todas sus posibles soluciones ya que al aumentar el valor de N (en este proyecto utilizaremos un $N=5$ con el fin de acortar el tiempo del tratamiento) el valor de la combinación crece de manera exponencial. Dado que el BAO es un problema NP-Hard es posible resolverlo con la ayuda de metaheurísticas, en este caso la del tabu search, que buscan sistemáticamente dentro del espacio de posibles soluciones B , obteniendo un buen valor en un tiempo reducido en comparación con el tiempo que llevaría evaluar todas las posibles combinaciones de ángulos del espacio de búsqueda.

El problema FMO es la segunda etapa del IMRT y consiste en encontrar el mejor tratamiento posible para una configuración de ángulos que satisface las restricciones de BAO, utilizando una función objetivo en específico. En este trabajo utilizaremos una función objetivo que está basada en la dosis uniforme equivalente (EUD por sus siglas en inglés) de radiación emitida al tumor y a los órganos cercanos. Originalmente propuesto en Niemierko (1997), el gEUD puede definirse como la dosis biológicamente equivalente que, si se entrega uniformemente, conduciría a la misma respuesta que la distribución de dosis real no uniforme [4]. Una ventaja de los modelos basados en *gEUD* sobre otros modelos de dosis-respuesta es que no requieren muchos parámetros, haciendo que el proceso de optimización dependa menos de parámetros que podrían ser difíciles de determinar [4].

Para poder modelar matemáticamente el problema del FMO discretizamos cada órgano en pequeños subvolúmenes llamados "*voxels*" y cada "*beam*" del acelerador lineal en sub-beams llamados "*beamlets*" (ver Figura 2) con lo que, en este caso, podremos calcular la función del *gEUD* (2). Además para poder medir el efecto de un tratamiento sobre un órgano se ocupa un parámetro llamado "*Dose deposition matrix*" que es la tasa a la cual la radiación emitida por un "*beamlet*" afecta a un "*voxel*" por cada unidad de tiempo.

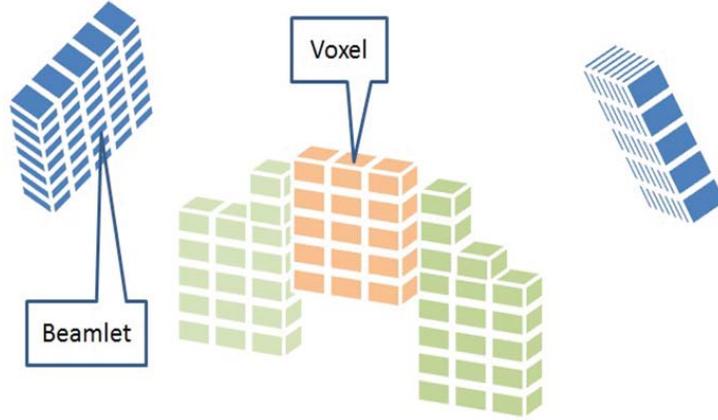


Figura 2: Discretización de los órganos y "beams" en "voxels" y "beamlets".

2.1. Formulación matemática del problema

Como se mencionó anteriormente para poder calcular el EUD de cada órgano utilizaremos el modelo matemático empleado por el profesor Guillermo Cabrera en [5], con este método podremos calcular la dosis de radiación depositada por cada "beamlet" en cada "voxel" utilizando la siguiente expresión matemática:

$$d_j^r = \sum_{i=1}^n A_{ji}^r x_i \text{ for all } j = 1, 2, \dots, m^r, \quad (1)$$

Donde $r \in R = O_1, \dots, O_Q, T$ es un elemento del conjunto de índices de regiones (utilizamos el término región para referirnos al tumor, cualquier órgano en riesgo o tejido normal), con el tumor Indexado por $r = T$ y los órganos en riesgo y tejido normal indexado por $r = O_q$ con $q = 1, \dots, Q$. M^r es el número total de voxels en la región r , j corresponde a un voxel específico en la región r , $d^r \in R_m^r$ es un vector de dosis y sus elementos d_j^r dan la dosis total entregada al "voxel" j en la región r por el "fluence map" $x \in X(A)$. Obteniendo d_j^r podremos calcular el EUD del tumor y de los órganos utilizando la función $gEUD$, igual a la expresión matemática:

$$gEUD^r(x) = \left(\frac{1}{m^r} \sum_{j=1}^{m^r} (d_j^r)^{a^r} \right)^{1/a^r}, \quad (2)$$

Donde a^r es un parámetro dependiente de la región y d_j^r (que depende de x) es el valor obtenido por la función anterior. Para el tumor (como se menciona en [5]), utilizamos $a^r < 0$, mientras que para los órganos elegimos $a^r > 1$. Como $|a^r|$ aumenta, el $gEUD$ se vuelve más sensible a los *vóxeles* menos (más) irradiados en el tumor (órganos). Por lo tanto, para los órganos que permiten ciertos niveles de radiación sin un compromiso funcional (también llamados órganos paralelos), el parámetro a^r se establece cerca de 1, mientras que para los órganos en riesgo (los que deben irradiarse lo menos posible) elegimos un r grande. Con esta expresión obtendremos una función $gEUD_p$ para la próstata, un $gEUD_v$ para la vejiga y un $gEUD_r$ para el recto, con $gEUD_p = 70$ aceptado por los médicos para acabar con el tumor.

Como el profesor Guillermo Cabrera explica en [5], la función objetivo a resolver para este problema es la siguiente:

$$h(A) : \min_{x \in X(A)} z(x) = -\ln L(x; T, \nu_T, eud_0^T) - \sum_{q=1}^Q \ln U(x; O_q, \nu_{O_q}, eud_0^{O_q}) \quad (3)$$

Donde:

$$L(x; T, \nu_T, eud_0^T) = \left(1 + \left(\frac{eud_0^T}{gEUD^T(x)} \right)^{\nu_T} \right)^{-1}, \quad y \quad (4)$$

$$U(x; O_q, \nu_{O_q}, eud_0^{O_q}) = \left(1 + \left(\frac{gEUD^{O_q}(x)}{eud_0^{O_q}} \right)^{\nu_{O_q}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Los parámetros eud_0^t y $eud_0^{O_q}$ corresponden a los valores de $gEUD$ prescritos para el tumor y los órganos, respectivamente, y $\nu_t, \nu_{O_q} > 0$ son parámetros definidos por el usuario que indican la importancia del tumor y el q -ésimo órgano, respectivamente.

Como se explica en [5] la función (3) es una función que busca maximizar la radiación sobre el tumor y minimizar la radiación hacia los órganos contiguos a este. Pero como se mencionó anteriormente tenemos una restricción para el valor del el valor $gEUD$ del tumor la cual es que $gEUD_p = 70$, por

lo que podemos hacer unos cambios en el modelo logístico presentado en la función. Debemos fijar el $gEUD$ del tumor a ser mayor o igual que su dosis prescrita eud_0^t , por lo que no necesitamos considerar L en la función, sino que debemos incluir la restricción ya mencionada para el $gEUD_T$. Por lo tanto la función (3) puede ser reformulada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 h(A) : \quad & \min_{x \in X(A)} \quad z(x) = - \sum_{q=1}^Q \ln U \left(x; O_q, v_{O_q}, eud_0^{O_q} \right) & (6) \\
 \text{s.t.} \quad & gEUD^T(x) \geq eud_0^T
 \end{aligned}$$

Donde h_1 es la función de juicio asociada al problema FMO con función objetivo z_1 .

3. Descripción de la técnica

Como ya se mencionó anteriormente para resolver el problema de BAO se utilizará la metaheurística de búsqueda con memoria "*tabu search*" (búsqueda tabú en español) que trata de utilizar la memoria del proceso de búsqueda para mejorar su rendimiento. Según [6] la forma más directa de introducir la memoria en el procedimiento de búsqueda no monótono es considerar una función de aceptación que tenga en cuenta la historia de la búsqueda. El procedimiento elemental de búsqueda tabú evita la repetición prematura de las mismas soluciones en el recorrido, para lo que prohíbe que las últimas soluciones vuelvan a utilizarse en el recorrido de búsqueda. Para la memoria de la búsqueda se propone utilizar un vector de largo igual a K , mismo K dado por la combinatoria ya mencionada de K sobre N , con $N = 5$ y $K = 0, 1, 2, \dots, 359$.

Para comenzar se inicializará una configuración de ángulos de largo N (se piensa también que los médicos al realizar el tratamiento una gran cantidad de veces ya tienen conocimiento de ángulos que pueden entregar buenas soluciones por lo que se les puede permitir ingresar la primera población manualmente) y la lista tabú en 0. Se enviará la configuración al FMO para evaluar la función objetivo con esos ángulos utilizando el solver IPOPT, de ser una mejor solución que la del óptimo global este se actualizará y se ingresará a la lista tabú cada ángulo de esta configuración. Luego se generarán dos vecinos de forma randómica para cada uno de los ángulos de la configuración verificando que estos no se encuentren en la lista tabú y que sean $\leq \text{ángulo} - \text{"step"}$ y $\geq \text{ángulo} + \text{"step"}$, con $\text{"step"} = 5$. Luego se evaluará la función objetivo para cada uno de estos vecinos y nos moveremos hacia el que tenga el mejor fitness, ingresándolo en la lista tabú y volviendo a generar vecinos para esta configuración hasta que se cumpla con la cantidad de iteraciones. Cabe destacar que un ángulo tabú puede ser considerado como mejor vecino solo si es mejor que el óptimo global.

3.1. Pseudocódigo tabu search

```
1: Generar configuración de ángulos inicial
2: Inicializar Tabu list
3: for cantidad de iteraciones do
4:   Generar vecinos para la configuración de ángulos
5:   for cada vecino do
6:     Evaluar Función Objetivo
7:     Seleccionar mejor vecino;
8:     if Mejor vecino se encuentra tabu then
9:       if Fitness vecino es mejor que el optimo global then
10:        Actualizar óptimo global
11:        Actualizar óptimo local
12:       else
13:        Seleccionar segundo mejor vecino
14:       end if
15:     else
16:       if Mejor vecino es mejor que el best then
17:        Actualizar óptimo global
18:        Actualizar óptimo local
19:       else
20:        Actualizar óptimo local
21:       end if
22:     end if
23:   if Se encuentra el criterio de finalización then
24:     Fin
25:
26:
```

3.2. Técnica del cono

La idea de usar una configuración de varios ángulos nace del hecho de que los ángulos se complementan entre sí, esto quiere decir que al calcular la función objetivo para cada ángulo por separado, si hacemos un “*ranking*” con los ángulos de mejor valor y creamos una configuración con los primeros 5, es posible que obtengamos un valor peor que el que obtendríamos de una configuración variada entre ángulos muy buenos y ángulos muy malos. Además se sabe que al combinar ángulos muy cercanos entre sí (o incluso iguales) en una misma configuración no entrega buenos resultados. Esto queda demostrado en la figura 3 en donde se muestra la superficie de la función

objetivo de la ecuación (6) para todas las posibles parejas de ángulos entre 0 y 359.

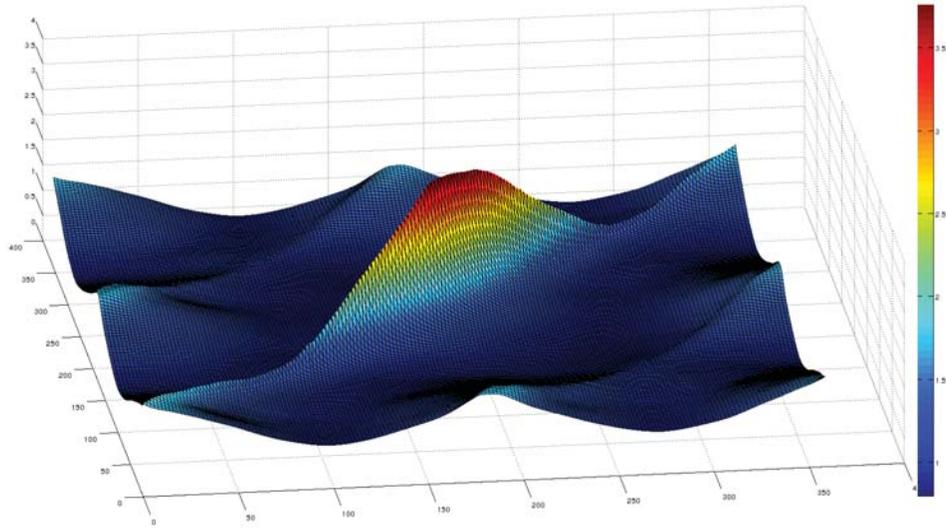


Figura 3: Superficie 3D de la función objetivo de la ecuación (6) para las parejas de ángulos.

Como se puede observar a simple vista los peores resultados se encuentran en la diagonal principal, es decir los ángulos iguales o cercanos, más específico aun en el centro de la diagonal principal marcado de color rojo. En esta figura es fácil notar cuales son los ángulos con peor valor de función objetivo, pero resulta difícil distinguir cuáles son los que presentan los mejores valores de función objetivo. Para poder distinguir estos últimos es necesario observar el gráfico desde arriba de la siguiente manera:

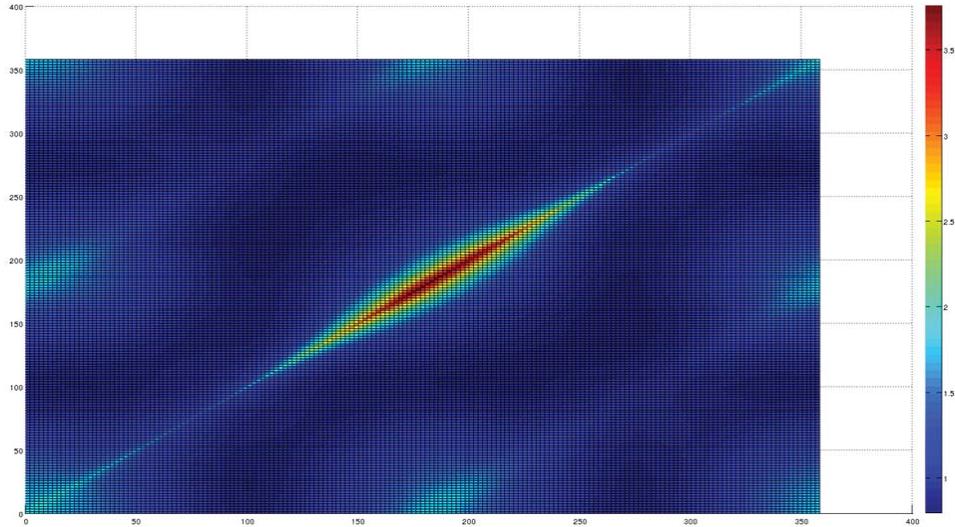


Figura 4: Superficie plana de la función objetivo de la ecuación (6) para las parejas de ángulos.

Como se aprecia en la superficie plana, los peores valores de función objetivo se encuentran marcados con colores claros, mientras que los mejores valores de función objetivo son representados por un color azul oscuro. Tomando en cuenta esto podemos notar que los ángulos con peor valor de función objetivo, aparte de los que son iguales, son los que se encuentran de frente entre sí, ejemplo el ángulos 0 con el 180. Con esta información se decidió reducir el espacio de búsqueda utilizando la técnica denominada técnica del cono, la que consiste en restringir los ángulos que se encuentren de frente al ángulo al que se le está generando vecinos en un cono de \pm "step" como se puede observar en la siguiente figura:

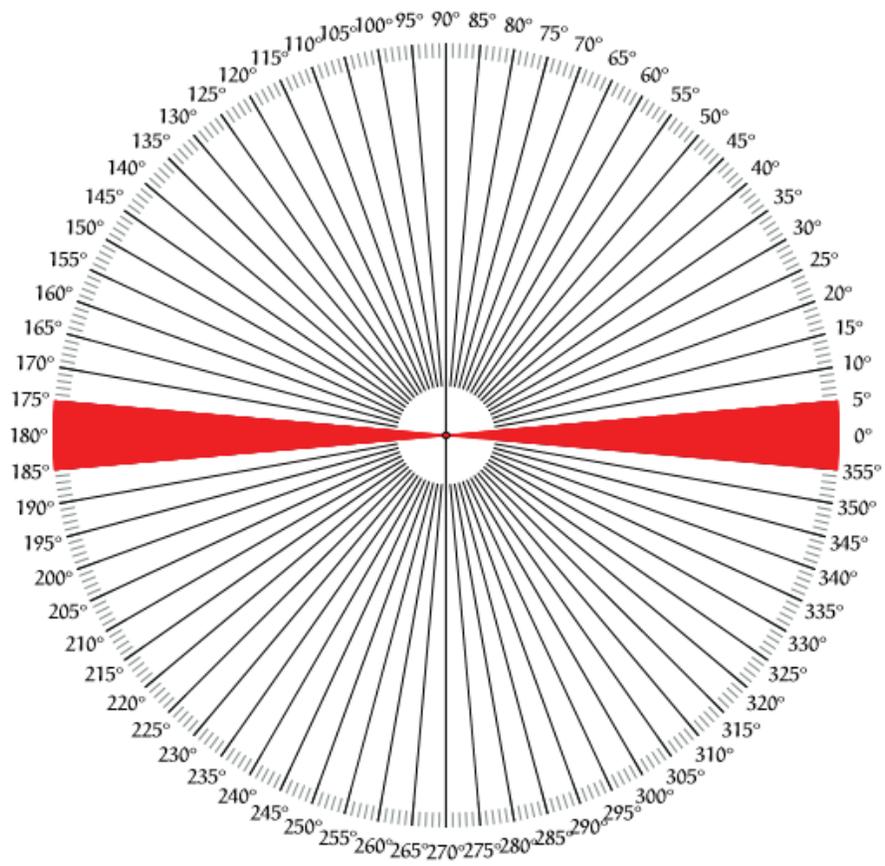


Figura 5: Ángulos restringidos por técnica del cono para el ángulo 0.

4. Experimentos

Una vez implementada la metaheurística del tabu search, esta se probó con un caso real de próstata propuesto por el profesor Guillermo Cabrera el cual también utilizó en [5]. El caso clínico llamado CERR se puede observar en la figura 6.

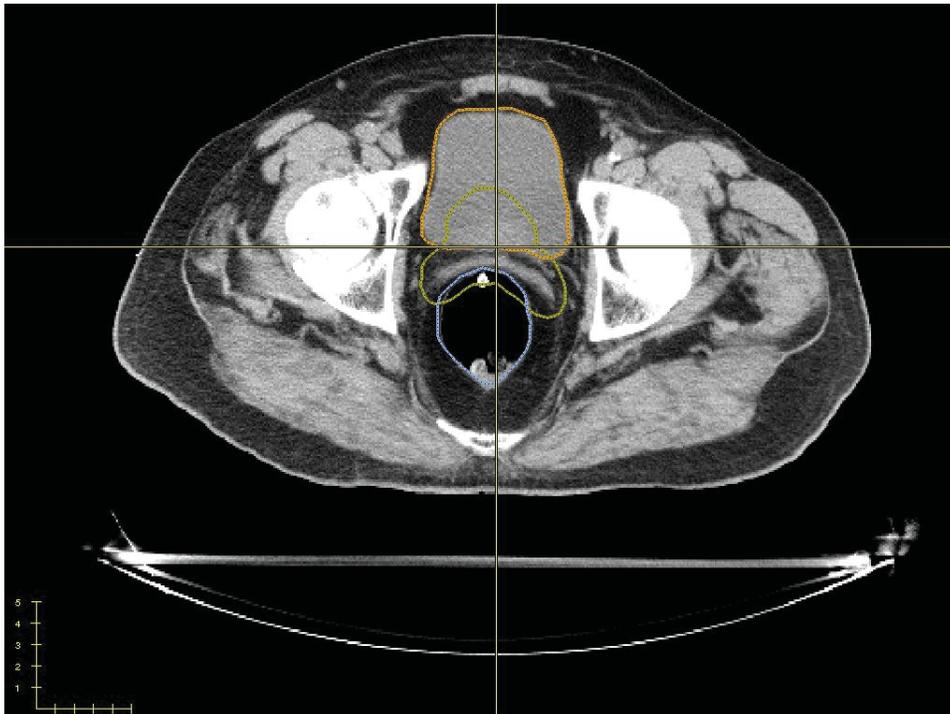


Figura 6: Caso de prostata CERR utilizado en este estudio.

"*Tabu Search*" se ejecutará para resolver el problema BAO con los datos de CERR. El "*tabu search*" se correrá un total de 14 veces partiendo de 14 diferentes configuraciones de ángulos a las que llamaremos "*Initial BACs*", estos "*BACs*" corresponden a ángulos equidistantes que son comúnmente utilizados en radioterapia.

BACs	Angulo 1	Angulo 2	Angulo 3	Angulo 4	Angulo 5
1	0	70	140	210	280
2	5	75	145	215	285
3	10	80	150	220	290
4	15	85	155	225	295
5	20	90	160	230	300
6	25	95	165	235	305
7	30	100	170	240	310
8	35	105	175	245	315
9	40	110	180	250	320
10	45	115	185	255	325
11	50	120	190	260	330
12	55	125	195	265	335
13	60	130	200	270	340
14	65	135	205	275	345

Tabla 1: “*Initial BACs*” utilizados para los experimentos

Para comparar nuestra metaheurística utilizaremos los resultados obtenidos por la Búsqueda Local (“*Local Search*”) propuesta por el profesor Guillermo Cabrera en [4], partiendo desde los mismos “*Initial BACs*”.

4.1. Resultados

Después de ejecutar el algoritmo para cada “*Initial BAC*” se obtuvieron los siguientes resultados, que fueron comparados con los resultados obtenidos por la “*Local Search*”.

BAC	Best. Sol. TS	Best. Sol. LS
1	0.7099	0.7233
2	0.7091	0.7233
3	0.7083	0.7234
4	0.7093	0.7248
5	0.7109	0.7255
6	0.7086	0.7189
7	0.7097	0.7180
8	0.7093	0.7180
9	0.7106	0.7181
10	0.7090	0.7335
11	0.7093	0.7131
12	0.7086	0.7135
13	0.7106	0.7145
14	0.7086	0.7152

Tabla 2: Resultados "*TabuSearch*" vs "*LocalSearch*"

Como se puede observar el tabu search logra superar en todos los "*BACs*" al local search (lo que ya se esperaba), cabe destacar que estos resultados son de un promedio de 10 veces que se corrió el algoritmo y presentan una desviación estándar pequeña de 0,00082, por lo que se puede afirmar que el algoritmo de "*tabu search*" es robusto.

Los ángulos utilizados para la comparación anterior, como ya se mencionó, son equidistantes y comúnmente utilizados en radioterapia ya que entregan buenos resultados. Es por esto que se decidió realizar una nueva comparación utilizando esta vez 15 "*initial BACs*" seleccionados de forma randómica y comparando los resultados de cada algoritmo. Esta comparación se puede apreciar en la tabla 3.

BAC	Best. Sol. TS	Best. Sol. LS
1	0.70763	0.74561
2	0.71040	0.70892
3	0.70927	0.74100
4	0.71186	0.72331
5	0.71043	0.72480
6	0.70848	0.72882
7	0.70830	0.70998
8	0.70872	0.71796
9	0.70842	0.72435
10	0.70899	0.71998
11	0.71030	0.73127
12	0.71029	0.74561
13	0.70897	0.70804
14	0.70876	0.72678
15	0.71147	0.74222

Tabla 3: Resultados "*TabuSearch*" vs "*LocalSearch*" "BACs" "randoms"

En caso de los ángulos random "*TabuSearch*" es derrotada por la "*LocalSearch*" en 2 de los 15 casos, pero estas pérdidas fueron muy pequeñas en comparación de la ganancia que se obtuvo en los 13 casos de victoria.

Como se mencionó anteriormente la técnica del cono restringe el espacio de búsqueda descartando los ángulos que podrían entregar malos resultados. Al incluir esta mejora al algoritmo se obtuvieron los resultados de la tabla 4 los cuales se comparan con los del tabu search simple.

N	Best.Sol. TS	Best.Sol. TS Cono
1	0,709997682	0,71040132
2	0,709141728	0,70879123
3	0,708344401	0,708011617
4	0,709338856	0,709339569
5	0,710916834	0,710948665
6	0,708651844	0,709463969
7	0,70975896	0,709019982
8	0,709339699	0,708517334
9	0,710600211	0,706753859
10	0,709058565	0,708600014
11	0,709326497	0,708680151
12	0,708654176	0,709598623
13	0,710617161	0,709303772
14	0,708608365	0,70836198

Tabla 4: Resultados "*TabuSearch*" vs "*TabuSearch*" con cono

Se puede observar que salvo por los BACs 1,4,5,6 y 12 el "*tabu search*" con cono logra superar al "*tabu search*" simple (resultados obtenidos de un promedio de 10 veces que se corrió el algoritmo), por lo que se puede confirmar que la técnica del cono logra mejorar el algoritmo del "*tabu search*".

5. Conclusión

El cáncer de próstata es una terrible enfermedad que afecta a los hombres y la cual acaba con miles de vidas anualmente en nuestro país. La evolución de las tecnologías ha logrado que sea posible tratar este y otros tipos de cáncer, con la ayuda de la IMRT y otros tratamientos. El problema BAO es uno de muchos problemas que no es posible solucionar por "*Fuerza Bruta*" analizando todas sus posibles soluciones ya que al contener muchas variables resultaría muy largo o incluso imposible de resolver de esta manera. Es por esto que la existencia de las metaheurísticas resulta de mucha utilidad en estos días ya que nos pueden entregar buenas soluciones en un corto periodo de tiempo con lo que es posible llegar a salvar vidas. Si bien muchos pueden decir que utilizar metaheurísticas es como buscar con los ojos cerrados, quedó demostrado que con el uso de las técnicas apropiadas es posible guiar a estas en su búsqueda de forma que podemos hacerlas más inteligentes y eficientes.

Si bien las metaheurísticas logran entregar buenos resultados en poco tiempo, estos siguen siendo demasiado largos, ya que en el caso de tabu search el tiempo de ejecución es de días. Para el problema BAO lo ideal sería poder tener resultados un día después de realizar los análisis al paciente, de esta manera se impide que el tumor siga creciendo y dañando aún más el organismo. Es por esto que además de obtener buenos resultados, se debe trabajar en maneras de reducir el tiempo que tardan las metaheurísticas en entregar sus resultados, para lograr salvar la mayor cantidad de vidas posibles.

Referencias

- [1] CÁNCER DE PRÓSTATA, <http://publicacionesmedicina.uc.cl/TemasMedicinaInterna/pdf/CancerProstata.pdf>.
- [2] RADIOLOGYINFO.ORG EN RADIOTERAPIA DE INTENSIDAD MODULADA (IMRT), <http://www.radiologyinfo.org/sp/pdf/imrt.pdf>.
- [3] SULTAN A S A 2006 OPTIMIZATION OF BEAM ORIENTATIONS IN INTENSITY MODULATED RADIATION THERAPY PLANNING PHD THESIS DEUTSCHE NATIONALBIBLIOTHEK.
- [4] WU Q, MOHAN R, NIEMIERKO A, OPTIMIZATION OF INTENSITY-MODULATED RADIOTHERAPY PLANS BASED ON THE EQUIVALENT UNIFORM DOSE.
- [5] CABRERA ET AL ITOR, A MATHEURISTIC APPROACH TO SOLVE THE MULTI-OBJECTIVE BEAM ANGLE OPTIMISATION PROBLEM IN INTENSITY MODULATED RADIATION THERAPY.
- [6] BELÉN MELIÁN, JOSÉ A. MORENO PÉREZ, J. MARCOS MORENO VEGA, METAHEURISTICS: A GLOBAL VIEW.