



**SOMIB**  
Sociedad Mexicana  
de Ingeniería Biomédica

## DetECCIÓN Y ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS 2D DE LA BRAZADA DE CROL PARA EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA TÉCNICA DE NADO

E. Rodríguez-Esparza<sup>1</sup>, A. R. Mejía-Rodríguez<sup>1</sup>, M. O. Mendoza-Gutiérrez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 México

**Resumen** - La aplicación de una mala técnica durante la práctica de la natación puede incrementar la incidencia de una de las lesiones con mayor concurrencia entre los nadadores, el síndrome del hombro de nadador. En este trabajo se presenta una herramienta de análisis comparativo del movimiento realizado por sujetos de prueba contra una trayectoria patrón, de la brazada del estilo de crol, con el propósito de evaluar cuantitativamente la aplicación correcta de la técnica, para mejorarla o perfeccionarla y disminuir la incidencia de lesiones. Las trayectorias de marcadores, colocados en las articulaciones del brazo, fueron adquiridas mediante un sistema de visión y procesadas utilizando el algoritmo CamShift de la librería OpenCV. Además, se calcularon los valores de distancia simétrica media y distancia máxima para cuantificar la similitud entre las trayectorias a comparar. La herramienta de análisis comparativo fue validada experimentalmente con sujetos nadadores y no nadadores.

**Palabras clave** - Análisis de trayectoria, CamShift, Seguimiento de trayectoria, Síndrome del hombro de nadador.

### I. INTRODUCCIÓN

La natación es uno de los deportes más recomendados, debido a que tiene como beneficios: activar y fortalecer la mayor parte de los músculos, mejorar la coordinación y flexibilidad de los movimientos, y aumentar la resistencia muscular y cardiorrespiratoria debido a la resistencia que ejerce el agua en cada movimiento [1, 2]. Sin embargo, si el ejercicio físico no se realiza de la manera adecuada, puede llegar a provocar lesiones. Las principales lesiones en la natación ocurren en el hombro, y provienen de una mala técnica en la brazada, principalmente en el estilo de crol por ser el más practicado a nivel competitivo y recreativo [3].

El movimiento de los miembros superiores en el estilo de crol es alterno, pudiéndose distinguir tres fases principales: la fase de recobro aéreo, que es cuando el brazo se encuentra fuera del agua y que supone alrededor del 24% del tiempo del ciclo de la brazada; la fase de deslizamiento y la fase propulsiva transcurren con el brazo dentro del agua y suponen alrededor del 76% del ciclo. La fase propulsiva está compuesta por tres partes que son agarre (A), tirón (T) y empuje (E); y es en ésta donde se presentan las principales deficiencias técnicas de la brazada de crol [4].

La mayor parte de la fuerza propulsiva proviene del miembro superior mediante movimientos concéntricos de aducción y rotación interna de la articulación glenohumeral, por lo que una mala técnica puede provocar dolor causado por un pinzamiento subacromial que se conoce como Síndrome del Hombro de Nadador (SHN) [5]. La mayor incidencia del SHN se encuentra en el 80% de atletas jóvenes (edad promedio de 18 años) que practican el estilo de crol, seguidos por nadadores de estilos mariposa y dorso.

Pérez et al. afirman que el SHN se desarrolla por una técnica incorrecta debido al mal movimiento en la ejecución de la brazada, mala flexibilidad y al aumento de intensidad del entrenamiento [6]. Para tratar de corregir una mala técnica de nado y disminuir la incidencia del SHN, además de mejorar los tiempos en las competencias, se recurre a la biomecánica deportiva [7], la cual estudia la anatomía funcional para prevenir lesiones causadas por movimientos realizados de manera incorrecta [8]. Una de las herramientas más utilizadas en este ámbito es el seguimiento de trayectorias; para detectar, reconocer y rastrear objetivos específicos sobre una secuencia de imágenes; así como obtener información relativa a la posición, velocidad y aceleración, con el fin de realizar un modelado cinemático y dinámico de este tipo de actividades [9].

El análisis de secuencias de imágenes en la natación ha sido objeto de estudio en diversos trabajos. Por ejemplo, Dadashi et al. grabaron a nadadores de estilo crol y colocaron tres unidades de medición inercial en el sacro y los antebrazos para detectar y clasificar las fases de la brazada de crol, empleando técnicas de estimación de la orientación y un algoritmo de filtrado adaptable. Como resultado obtuvieron una clasificación y caracterización adecuadas brindando una herramienta de retroalimentación para el análisis de la brazada de los nadadores [10]. Por otro lado, Figueiredo et al. analizan videos de atletas nadando 200 m de crol para realizar un estudio biomecánico en 2D y 3D a través de dos software comerciales: Ariel Performance Analysis System (APAS) y Dartfish; obteniendo la posición del centro de masa en función del tiempo y la velocidad media, para generar un modelo 3D del sujeto analizado. Además, se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple para identificar el porcentaje de los factores (biomecánicos, energéticos, coordinadores y musculares) que afectan el rendimiento durante la prueba de 200 m crol. Los resultados obtenidos mostraron que la fatiga muscular presentó el mayor porcentaje de afectación al rendimiento [11].

Una limitante de los trabajos anteriores es que no se estima de forma precisa la trayectoria de los movimientos dentro del agua, debido a que los softwares comerciales utilizados no pueden realizar un registro continuo de los datos, siendo necesario pausar el video y seleccionar de forma manual el objetivo específico para obtener la posición de los centros de masa de las articulaciones. Por lo anterior, en este trabajo se presenta una herramienta alternativa para el análisis de las trayectorias de la brazada de crol, en sujetos nadadores y no nadadores, que permita tener una evaluación cuantitativa de la técnica de nado con el fin de mejorarla para tratar de reducir el riesgo de desarrollar SHN.

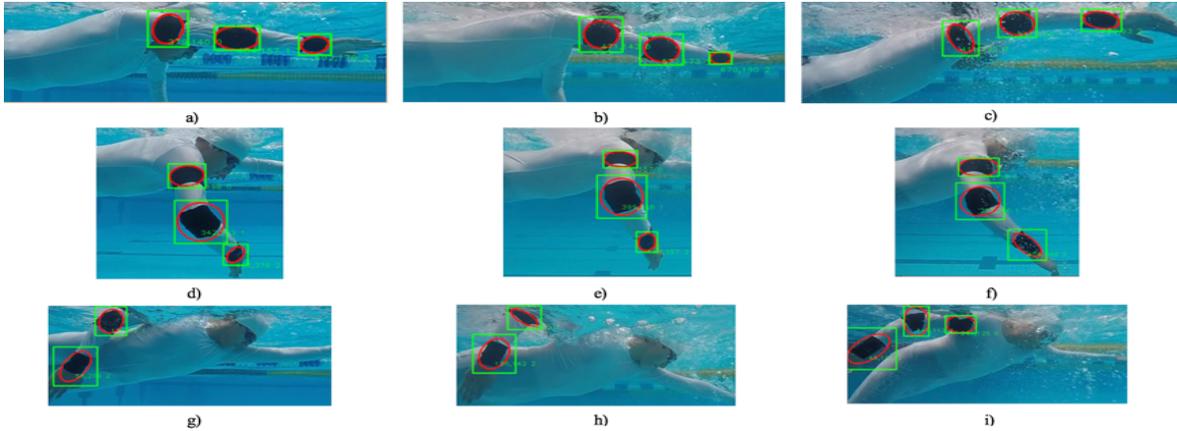


Fig. 1. Fases de la brazada derecha de crol: Agarre - (a) patrón, (b) nadador y (c) no nadador; Tirón - (d) patrón, (e) nadador y (f) no nadador; Empuje - (g) patrón, (h) nadador e (i) no nadador.

## II. METODOLOGÍA

Para el análisis de la técnica en la brazada de crol, se realizaron adquisiciones de video con vistas laterales derecha e izquierda de siete sujetos, con el fin de poder evaluar su técnica y procesar los fotogramas. Como trayectoria patrón se utilizó el video de un sujeto que, de acuerdo a entrenadores expertos, presentó la mejor técnica en un equipo de natación de alto rendimiento de la ciudad de San Luis Potosí. Este patrón fue utilizado para comparar las técnicas de seis sujetos de prueba, tres pertenecientes al mismo equipo de natación y tres sujetos inexpertos. Es importante mencionar que todos los sujetos fueron voluntarios del sexo masculino con una edad promedio de  $19.7 \pm 3.7$  años. Para grabar los videos se utilizó una cámara GoPro HERO4 Silver con una resolución WVGA a 240 fps, la cual se encontraba fija en la pared lateral de la alberca a 27 cm por debajo del nivel del agua.

### A. Adquisición de las trayectorias

El protocolo de adquisición consistió en que los sujetos realizaran de forma continua cuatro ciclos de siete brazadas de crol; se solicitó a los voluntarios que evitaran realizar una respiración hasta que acabaran un ciclo. Adicionalmente, para facilitar el reconocimiento del movimiento de las articulaciones, los sujetos utilizaron un traje de baño completo de lycra color blanco, con marcadores negros en hombro, codo y muñeca, y los sujetos no debían avanzar a través del agua durante el protocolo, por lo que se utilizó un cinturón colocado por debajo del traje de baño que estaba amarrado al banco de salida por medio de una liga. En la Fig. 1 se muestran ejemplos de fotogramas adquiridos para obtener la trayectoria del brazo derecho; en estas imágenes se observan los sujetos: patrón, nadador y no nadador; en las fases de agarre, tirón y empuje, respectivamente.

### B. Seguimiento de la trayectoria de los marcadores

Para poder estudiar y comparar el movimiento de la brazada de crol, fue necesario elaborar un programa para detectar los marcadores y trazar las trayectorias de las coordenadas del centro de masa de cada marcador. El programa fue desarrollado en C++, con la librería OpenCV

utilizando el algoritmo CamShift (Continuously Adaptive Mean Shift), que realiza el rastreo de imágenes a color y utiliza el cambio de media para ajustar el tamaño de la ventana de búsqueda [12]. CamShift es una técnica iterativa en donde se tiene una nube de puntos en el espacio (distribución de píxeles obtenida de la retroproyección del histograma) para cada iteración; en esa nube se evalúa la densidad de las intensidades de los puntos dentro de una región de interés (ROI, por sus siglas en Inglés), y por medio de una ventana de búsqueda obtiene un máximo local, que representa el centroide de la región donde la densidad de las intensidades es máxima.

El algoritmo CamShift utilizado en este trabajo funciona de la siguiente manera [13]:

1. Definición del primer fotograma.
2. Se realiza la selección manual de la ROI.
3. Se calcula la máscara de la ROI.
4. Se calcula el histograma de la ROI y se normaliza.
5. Se calcula la retroproyección a partir del histograma y la distribución de probabilidad de color de la región centrada en la ventana de búsqueda.
6. Se itera para encontrar el centroide de la región. La ubicación del centroide  $(x_c, y_c)$  está dada por

$$x_c = \frac{M_{1,0}}{M_{0,0}} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{M_{0,1}}{M_{0,0}} \quad (2)$$

con  $M_{0,0}$  siendo el momento cero y  $M_{1,0}$ ,  $M_{0,1}$  los primeros momentos de  $x$  y  $y$  de la ventana, tales que:

$$M_{0,0} = \sum_X \sum_Y I(x, y) \quad (3)$$

$$M_{1,0} = \sum_X \sum_Y xI(x, y) \quad (4)$$

$$M_{0,1} = \sum_X \sum_Y yI(x, y) \quad (5)$$

donde  $I(x, y)$  es la probabilidad de la intensidad en la posición  $(x, y)$ .

7. Para el siguiente fotograma, la ventana de búsqueda se centra en la ubicación media encontrada en el paso 6 y se establece el tamaño de la ventana en función del momento cero. Se regresa al paso 5, y el algoritmo continua iterando hasta que se llegue al último fotograma.

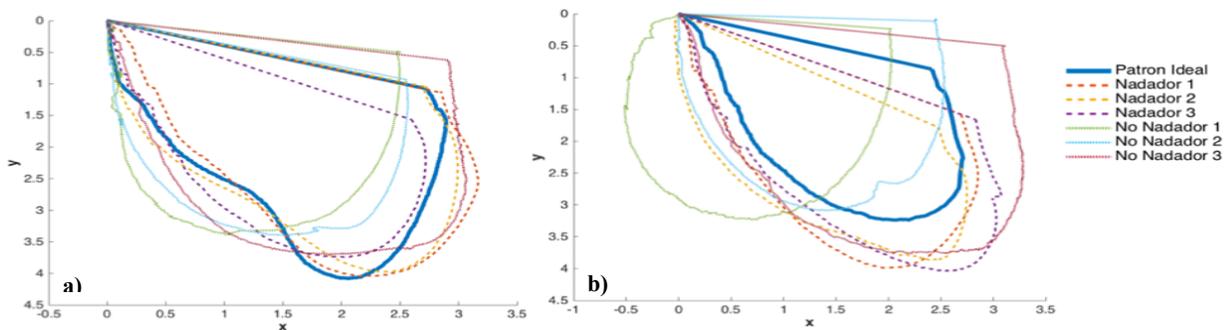


Fig. 2. Trayectorias obtenidas del brazo derecho de los sujetos de prueba, para las articulaciones de (a) muñeca y (b) codo.

Las trayectorias de los sujetos corresponden a la localización de los centroides de la muñeca y codo, las cuales se van almacenando para su análisis posterior. Se utilizó la normalización  $Z$  con el fin de evitar que los resultados se afectaran por datos atípicos. Por otro lado, el punto en el que comenzó la trayectoria de las brazadas de cada sujeto fue trasladado al origen  $(0,0)$ ; este proceso se realizó con el fin de que las dimensiones de los brazos de los sujetos no afectaran los resultados. Además, se calculó la distancia simétrica media (ASD, por sus siglas en Inglés), entre la trayectoria patrón  $A$  y cada una de las trayectorias  $B$  de los otros nadadores, utilizando la siguiente ecuación:

$$ASD = \frac{1}{T_A + T_B} [\sum_{P_A \in T_A} d(P_A, T_B) + \sum_{P_B \in T_B} d(P_B, T_A)] \quad (6)$$

donde  $d(P_A, T_B)$  y  $d(P_B, T_A)$  indican la distancia euclidiana entre cada punto de la trayectoria  $A$  a la trayectoria  $B$ , y viceversa. La ASD brinda información del error promedio que existe entre las trayectorias, si el error medio es 0, esto expresa una coincidencia perfecta entre trayectorias. Además, se calculó la distancia máxima (DMax) entre las dos trayectorias, dada por

$$DMax = \max\{\max d(P_A, T_B), \max d(P_B, T_A)\} \quad (7)$$

y que indica el error máximo presente entre las trayectorias, o el punto de peor técnica a lo largo de la trayectoria [14].

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se presentan las tres fases propulsivas (agarre - A, tirón - T, y empuje - E) de la brazada derecha de los sujetos patrón (Fig. 1a, 1d, 1g), nadador (Fig. 1b, 1e, 1h) y no nadador (Fig. 1c, 1f, 1i). En color negro se observan marcadores colocados en las articulaciones del hombro, codo y muñeca, los cuales se encuentran encerrados en una elipse roja que representa la ROI.

En las tres fases del sujeto patrón (Fig. 1a, 1d, 1g) y del sujeto nadador (Fig. 1b, 1e, 1h), se presentan similitudes en la posición del brazo, sugiriendo que el movimiento de la brazada lo realizan de forma semejante; mientras que las tres fases del sujeto no nadador, no presentan dicha similitud. Sin embargo, a pesar de que el patrón y el nadador presentan similitud en la posición del brazo, se observa en la Fig. 1b que el brazo del nadador en la fase de agarre, se hunde más que el del sujeto patrón (Fig. 1a) y en la Fig. 1e, el codo del

nadador está más elevado que el del patrón (Fig. 1d). Por otro lado, las diferencias entre el sujeto patrón y el sujeto no nadador, se observan en la Fig. 1c debido a que el no nadador no hunde el brazo en comparación al brazo del patrón (Fig. 1a) y en la Fig. 1i se percibe que el hombro del no nadador en la fase de empuje sigue dentro del agua, en comparación al hombro del sujeto patrón (Fig. 1g).

En la Fig. 2 se presentan las trayectorias promedio que siguieron las articulaciones en la brazada derecha de cada uno de los sujetos. En la Fig. 2a se observan las trayectorias de la muñeca y en la Fig. 2b, las del codo. En ambas figuras, la trayectoria patrón se encuentra trazada con una línea gruesa de color azul, las trayectorias punteadas pertenecen a los nadadores y las trayectorias continuas a los no nadadores. Se definió el origen  $(0,0)$  de todas las trayectorias en la fase terminal del empuje de la brazada de crol, considerando que el brazo saldrá del agua para empezar la fase del recobro aéreo y en este punto no se tiene un seguimiento de los marcadores hasta que vuelve a entrar el brazo al agua.

En la Fig. 2a se observa que las trayectorias de los nadadores 1 y 2, comienzan a la misma altura que la trayectoria de la muñeca del patrón. En la técnica correcta, en esta fase, la muñeca y el codo deben de estar aproximadamente a 10 cm por debajo de la superficie del agua, y se aprecia que el nadador 3 presenta una altura inferior a la correcta. En los sujetos no nadadores se puede ver que únicamente el no nadador 2 presenta una altura correcta, mientras que los sujetos 1 y 3, presentan una altura mayor a la correcta. En la fase del tirón, los no nadadores 1 y 2 presentan trayectorias más cortas que el patrón. Este efecto ocurre debido a que no rotan los hombros, provocando que la longitud en esta fase no sea la óptima. En el caso del no nadador 3, la fase de tirón es semejante al patrón. En la fase de empuje, las trayectorias de la brazada medidas en la muñeca son similares al patrón, tanto en nadadores como no nadadores.

Por otro lado, en la Fig. 2b se puede observar que las trayectorias de los tres nadadores resultan similares en comparación con la trayectoria de la brazada medida en el codo del patrón; con la diferencia de que la fase de agarre de los nadadores se realiza a una altura inferior a la correcta. Mientras que las trayectorias de los no nadadores presentan características muy diferentes a la correcta, siendo notorio

que las trayectorias de los no nadadores 1 y 2 no presentan ninguna similitud con el patrón. Estas diferencias hacen evidente la aplicación de una mala técnica.

El análisis cuantitativo se presenta en las Tablas I y II, en donde se reportan los valores de ASD y Dmax de ambos brazos. El error promedio obtenido por los nadadores es menor en comparación con el de los sujetos no nadadores.

Además, la ASD está relacionada con la Dmax, por lo que, al presentarse mayores valores de ASD con respecto a la trayectoria del sujeto patrón, se deduce que existen valores mayores de DMax. En ambas tablas, se tiene una columna de observaciones para especificar la fase de la brazada en que se presenta el error máximo (A, T o E). El propósito de identificar la fase de la brazada donde se tiene el mayor error, es el de corregir con mayor énfasis esa fase específica y así, disminuir el riesgo de padecer el SHN.

TABLA I

RESULTADOS DEL BRAZO DERECHO

	ASD		DMax			
	Muñeca	Codo	Muñeca	Obs.	Codo	Obs.
Nadador 1	0.17	0.27	0.40	A	0.76	T
Nadador 2	0.11	0.31	0.28	T	0.91	T
Nadador 3	0.15	0.37	0.50	E	0.91	T
No Nadador 1	0.44	0.69	0.98	T	1.13	T
No Nadador 2	0.32	0.27	0.79	T	0.79	A
No Nadador 3	0.20	0.47	0.53	E	0.79	A

TABLA II

RESULTADOS DEL BRAZO IZQUIERDO

	ASD		DMax			
	Muñeca	Codo	Muñeca	Obs.	Codo	Obs.
Nadador 1	0.20	0.21	0.62	T	0.58	A
Nadador 2	0.07	0.17	0.26	E	0.61	A
Nadador 3	0.32	0.21	0.80	E	0.56	A
No Nadador 1	1.01	0.70	1.75	T	1.13	T
No Nadador 2	0.58	0.61	1.18	T	0.93	T
No Nadador 3	0.17	0.18	0.60	E	0.60	T

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se realizó la adquisición imágenes y el seguimiento de trayectorias como herramienta para mejorar la técnica de la brazada de crol, y así disminuir la incidencia del SHN, a través de un programa que almacena información para después compararla contra una trayectoria patrón. Se logró cuantificar el error de la técnica en el codo y la muñeca, identificando en qué fase de la brazada se presenta el mayor error. Los sujetos no nadadores, que presentaron las mayores diferencias en las gráficas de trayectoria en comparación con el patrón, también obtuvieron los valores de ASD y DMax más altos, haciendo evidente la mala técnica en su brazada de crol. Estos resultados sugieren que los sujetos no nadadores son más propensos a desarrollar el SHN. Esta información es muy útil para los expertos en el ámbito de la natación, como entrenadores, fisioterapeutas y nadadores, para poder identificar la fase de la brazada donde se tiene que prestar mayor atención para mejorar la técnica y reducir el riesgo de

lesión. Es importante mencionar que en este trabajo solo se consideraron trayectorias en 2D, debido a que solo se utilizó una cámara. Sin embargo, con la retroalimentación de un entrenador deportivo, se considera que estos resultados son prometedores como un análisis cuantitativo preliminar de la técnica de la brazada de crol, y se espera en un futuro poder agregar más cámaras de video que permitan realizar un análisis tridimensional.

Adicionalmente, como trabajo a futuro se pretende aumentar la población de sujetos de prueba y realizar la comparación con un sujeto patrón con la mejor técnica a nivel estatal o regional, así como agregar al análisis información complementaria como un modelado cinemático y dinámico en 3D para estudiar el movimiento completo del nadador y mejorar su técnica y rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gallego Antonio, J., Aguilar Parra, et al. (2012). Programa de natación adaptada para personas mayores dependientes: beneficios psicológicos, físicos y fisiológicos. *Revista de Psicología del Deporte*, 21(1).
- [2] Naranjo, L. H. A. (2015). Beneficios del ejercicio. *Hacia la promoción de la salud*, 8(1), 86-100.
- [3] Bailón Cerezo, J. (2013). Dolor de hombro en nadadores de competición.
- [4] Casas, M. G. Natación estilos clásicos.
- [5] Bailón-Cerezo, J., Torres-Lacomba, M., & Gutiérrez-Ortega, C. (2016). Prevalencia del dolor de hombro en nadadores de competición: estudio piloto. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, 16(62).
- [6] Pérez, C. Z., Sanfilippo, L. A., & Jivelekian, A. C. (2015). Lesiones y accidentes deportivos en nadadores federados. *ISDe Sports Magazine*, 7(24).
- [7] Sigcho Pesantez, L. J. (2017). La correcta aplicación de técnicas en la natación mejorara los tiempos en las competencias estudiantiles del colegio la Inmaculada.
- [8] Mosquera Ochoa, D., & Sierra Landines, L. M. (2013). El cuerpo como fundamento para el diseño de vestuario: estudio morfológico y anatómico del cuerpo humano a través de la biomecánica y la ergonomía (Doctoral dissertation).
- [9] García-Manzo, Y. (2017). Análisis biocinemático de la ejecución del arranque en levantadoras de pesas escolares de Granma (original). *Revista científica OLIMPIA*, 14(42), 62-74.
- [10] Dadashi, F., Crettenand, F., et al. (2013). Automatic front-crawl temporal phase detection using adaptive filtering of inertial signals. *Journal of sports sciences*, 31(11), 1251-1260.
- [11] Figueiredo, P., Pendergast, D. R., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2013). Interplay of biomechanical, energetic, coordinative, and muscular factors in a 200 m front crawl swim. *BioMed research international*, 2013.
- [12] Emami, E., & Fathy, M. (2011, November). Object tracking using improved camshift algorithm combined with motion segmentation. In *Machine Vision and Image Processing (MVIP), 2011 7th Iranian* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Allen, J. G., Xu, R. Y., & Jin, J. S. (2004, June). Object tracking using camshift algorithm and multiple quantized feature spaces. in *Proceedings of the Pan-Sydney area workshop on Visual information processing* (pp. 3-7). Australian Computer Society, Inc..
- [14] Mejia-Rodriguez, A. R., Scalco, E., et al. (2012, August). Mesh-based approach for the 3D analysis of anatomical structures of interest in Radiotherapy. In *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, (pp. 6555-6558).