

# **SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA ARTICULACIÓN HUMANA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**PLAN DE INVESTIGACIÓN**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN FORMACIÓN EN LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO**

**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

Emilio Lechosa Urquijo

**DIRECTORES:**

Juan A. Juanes  
Fernando Blaya Haro  
Roberto D'Amato

5 de abril de 2019

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA OBJETO DE ESTUDIO (MÁXIMO 50 LÍNEAS):

INTRODUCTION AND JUSTIFICATION OF THE TOPIC OF STUDY (50 LINE MAXIMUM):

La simulación de elementos anatómicos; huesos, músculos.... mediante el método de elementos finitos se ha llevado a cabo en diversas ocasiones [1], [2], [3], [4], [5] y [6], [16]. La finalidad de estas simulaciones es diversa, una de las posibilidades que nos brinda un modelo FEM es la de poder prever el comportamiento de dicho elemento en diversos estados de carga [5], [11], [13], para así estimar las tensiones, deformaciones y esfuerzos a los que se puede ver sometido, [1], [2], [3], [4], [5] y [6], [16] estudiar la fatiga que se puede producir en el mismo, [1] comprobar las deformaciones admisibles en un elemento antes de que se produzca la lesión en el mismo, [1], [12]...

De los elementos que intervienen en una articulación podemos diferenciar tres tipos fundamentales, con la simplificación que se aplica en los modelos de elementos finitos a cada uno de ellos.

Huesos y tendones. Pueden aproximarse de un modo válido a elementos de rigidez elevada, en comparación al resto de elementos que intervienen en la articulación, por lo que el empleo de elementos 3D para su mallado es aceptado [1], [2], [3], [4], [5], [6], [16] La caracterización del tejido esta aceptada como un material con un módulo de elasticidad constante.

Ligamentos. Su comportamiento puede asimilarse al de un muelle, con una constante elástica definida, asumiendo que únicamente trabajarían a tracción, [2], [10], [18].

Músculos, el elemento más complejo de simular dentro de la articulación, su comportamiento depende de numerosos factores y su módulo de elasticidad no es constante ya que son los elementos activos de la articulación. Su deformación no responde únicamente a la carga aplicada al elemento.

Los estudios realizados hasta ahora han empleado elementos 3D para el mallado de los músculos [1], [2], [3], [4], [5], [6], [16] de una articulación, siendo esta una buena aproximación, presenta un inconveniente importante para aprovechar los resultados. Al analizar una articulación en una posición diferente de la estudiada es necesario volver a mallar los músculos de nuevo, puesto que su geometría habrá cambiado. Esto impide elaborar una metodología para el análisis de una articulación en diferentes posiciones ya que habría que repetir todo el trabajo realizado, en el estudio de una posición, en el resto de posiciones.

El comportamiento biomecánico de la musculatura se ha estudiado en numerosas ocasiones, dependiendo de la morfología del músculo, la excitación recibida, la velocidad del movimiento, .... Numerosos estudios sobre la simulación matemática del comportamiento muscular han sido llevados a cabo [5], [7], [8], [9], [11], [12], [17], Sin embargo ninguno de ellos ha abordado la tarea de integrar los resultados obtenidos en los mismos en una herramienta que permita el estudio completo de una articulación mediante el empleo de una herramienta de uso común como se trata de los análisis FEM.

El problema que presenta un estudio FEM de estas características es la obtención de una metodología que pueda reutilizarse de un modo sencillo. Al ser los músculos elementos con geometría variable, durante el movimiento de la articulación, se hace necesario rehacer el trabajo completo de análisis para cada posición que desee estudiarse, la malla ha de generarse de nuevo para cada posición a estudiar [1], [2], [6], [16].

La tesis se centrará en la obtención de un modelo matemático, basado en el modelo de Hill [5], [14], [15], de simulación de la fuerza producida en un músculo mediante elementos 1D (de dos nodos) que nos permita simular la articulación en diferentes posiciones.

Al simplificar el músculo a un elemento de 2 nodos el problema de reutilizar el modelo FEM en diferentes estudios desaparece, ya que el músculo quedaría siempre definido por esos dos nodos y, a pesar de que estos se desplazasen, el músculo seguiría unido en los mismos puntos y se alinearía con su nueva posición de modo automático.

## HIPÓTESIS DE TRABAJO Y PRINCIPALES OBJETIVOS A ALCANZAR (MÁXIMO 50 LÍNEAS):

*WORKING HYPOTHESIS AND PRINCIPAL OBJECTIVES SOUGHT (50 LINE MAXIMUM):*

Se considera que existe un modelo matemático exportable a un modelo de análisis mediante elementos finitos que nos permitirá simular el comportamiento de un músculo, dentro de una articulación, en diferentes estados de carga y posiciones sin necesidad de realizar el modelo FEM desde el inicio.

El objetivo principal de la tesis es obtener la siguiente relación, que pueda emplearse en un análisis mediante elementos finitos, del comportamiento de un músculo.

$$F_{\text{musc}} = F_{\text{musc}}(L, A, V, f, T)$$

Dónde:

$F_{\text{musc}}$  = fuerza desarrollada por el músculo

$L$  = Longitud del músculo respecto a su longitud en reposo

$A$  = Sección transversal del músculo respecto a su sección en reposo

$V$  = Tensión eléctrica de la excitación

$f$  = frecuencia de la excitación eléctrica

$T$  = tipo de músculo

El alcance del estudio se restringe a las siguientes condiciones.

- Estará basado en el modelo de Hill.
- Se centrará en el estudio de los músculos involucrados en la articulación glenohumeral.
- El tipo de contracción muscular analizado será isométrica, sin desplazamiento en la articulación. Se analizarán únicamente casos estáticos.
- La validación del modelo matemático obtenido se realizará comparando los resultados obtenidos al analizar un músculo, aislado de la articulación, mediante un modelo FEM basado en elementos 3D y un modelo FEM del mismo músculo, en las mismas condiciones de carga.

Una vez obtenido el modelo matemático teórico que explique el comportamiento de un músculo en determinadas situaciones de carga, este podrá ser extrapolado a diferentes tipos de músculos mediante la modificación del modelo matemático de acuerdo a las variaciones fisiológicas entre diferentes tipos de músculos o estados de carga.

El objetivo secundario de la tesis es la obtención de un modelo de elementos finitos de la articulación glenohumeral completa en el que el modelado de los diferentes elementos y tejidos que intervienen en el mismo nos permita estudiar la articulación en diferentes posiciones.

En dicho modelo FEM de la articulación se empleará el modelo matemático obtenido anteriormente.

Dicho modelo nos permitirá analizar el funcionamiento de la articulación, caracterizar los músculos responsables del movimiento en la misma y podrá ser empleado en diferentes posiciones sin necesidad de repetir el modelo completo.

Con dicho modelo analizaremos:

- Evolución del esfuerzo realizado por el músculo en las diferentes posiciones que adopte una articulación
- Análisis de daño acumulado, la fatiga acumulada, en el músculo por acumulación de esfuerzo durante la repetición de movimientos.

**METODOLOGÍA A UTILIZAR (APORTAR CONFORMIDAD/INFORMES/PROTOCOLOS GARANTIZANDO BIOÉTICA/BIOSEGURIDAD SI EL TIPO DE EXPERIMENTACIÓN LO REQUIERE) (MÁXIMO 50 LÍNEAS):**

**METHODOLOGY TO BE USED (PROVIDE CONSENT FORMS/REPORTS/PROTOCOLS GUARANTEEING BIOETHICS/BIOSECURITY IF REQUIRED BY THE TYPE OF EXPERIMENTATION) (50 LINE MAXIMUM):**

Las etapas del trabajo se detallan a continuación.

1. Búsqueda de antecedentes. Detallar el estado del arte en estudios relativos a la aplicación del método de elementos finitos en tejidos biológicos. La búsqueda de dichos antecedentes se realizara a través de publicaciones realizadas con anterioridad sobre el comportamiento de los músculos involucrados en el movimiento de las articulaciones.  
La información de interés se centrara en el comportamiento de los músculos, aspecto fundamental del modelo matemático a desarrollar.
2. Partiendo de imágenes obtenidas mediante resonancia magnética nuclear (RMN) se obtendrá un modelo 3D de un músculo.
  - a. Dicho modelo se obtendrá en una primera etapa en la posición del músculo obtenida mediante las imágenes
  - b. En una segunda etapa se extrapolará el músculo a diferentes situaciones de alargamiento.
  - c. La reconstrucción del músculo se llevara a cabo tratando la nube de puntos obtenida mediante RMN y reconstruyendo las superficies que definen el músculo. Dicha tarea se llevara a cabo mediante el SW Geomagic Desing X y el resultado del trabajo será un modelo 3D completo del músculo.
3. Partiendo del modelo 3D obtenido del músculo se realizara un modelo FEM mediante elementos 3D. El modelo de elementos finitos se realizará con el SW Femap, el tipo de elemento empleado será hexaédrico de 8 nodos. Con este modelo obtendremos los resultados considerados válidos, según publicaciones previas, para el análisis de un músculo en diferentes estados de carga. De entre los resultados obtenidos destacaremos:
  - a. Esfuerzos desarrollados por el músculo en una situación de contracción isométrica
  - b. Distribución de tensión en el músculo en diferentes zonas del mismo.
4. Planteamiento y desarrollo de la ecuaciones de comportamiento de un músculo de acuerdo a la expresión

$$F_{\text{musc}} = F_{\text{musc}}(L, A, V, f, T)$$

Dónde:

$F_{\text{musc}}$  = fuerza desarrollada por el músculo

$L$  = Longitud del músculo respecto a su longitud en reposo

$A$  = Sección transversal del músculo respecto a su sección en reposo

$V$  = Tensión eléctrica de la excitación

$f$  = frecuencia de la excitación eléctrica

$T$  = tipo de músculo

5. Con el modelo matemático elaborado se realizara un modelo de elementos finitos, con un elemento único de dos nodos (1D) que sea homólogo en dimensiones al realizado en el punto 2, cuyo comportamiento se definirá de acuerdo a lo indicado en el punto 4.
6. Con el análisis de ambos modelos se llevara a cabo la comparación y ajuste del modelo obtenido en el punto 5 respecto a los resultados obtenidos en el punto 3. Se realizaran los ajustes necesarios en la formulación incluida en el modelo FEM para que ambos modelos sean congruentes.
7. Una vez se ha conseguido la convergencia entre el modelo basado en elementos 3D y el modelo basado en elementos 1D para el mismo músculo se realizará un modelo completo de elementos finitos de una articulación (glenohumeral) que incluya los elementos involucrados en la misma, huesos tendones, ligamentos y músculos. Los músculos se modelaran de acuerdo a la simulación obtenida en en los puntos 5 y 6. Para la obtención del modelo se partirá, de nuevo, de imágenes obtenidas mediante RMN a partir de las cuales se reconstruirá el modelo CAD de la articulación.
8. Análisis de la articulación modelada en diferentes estados de carga comprobando la coherencia de los resultados obtenidos mediante el modelo con músculos simulados con elementos 1D frente al mismo modelo simulando los músculos con elementos 3D

## **MEDIOS Y RECURSOS MATERIALES DISPONIBLES (MÁXIMO 50 LÍNEAS):**

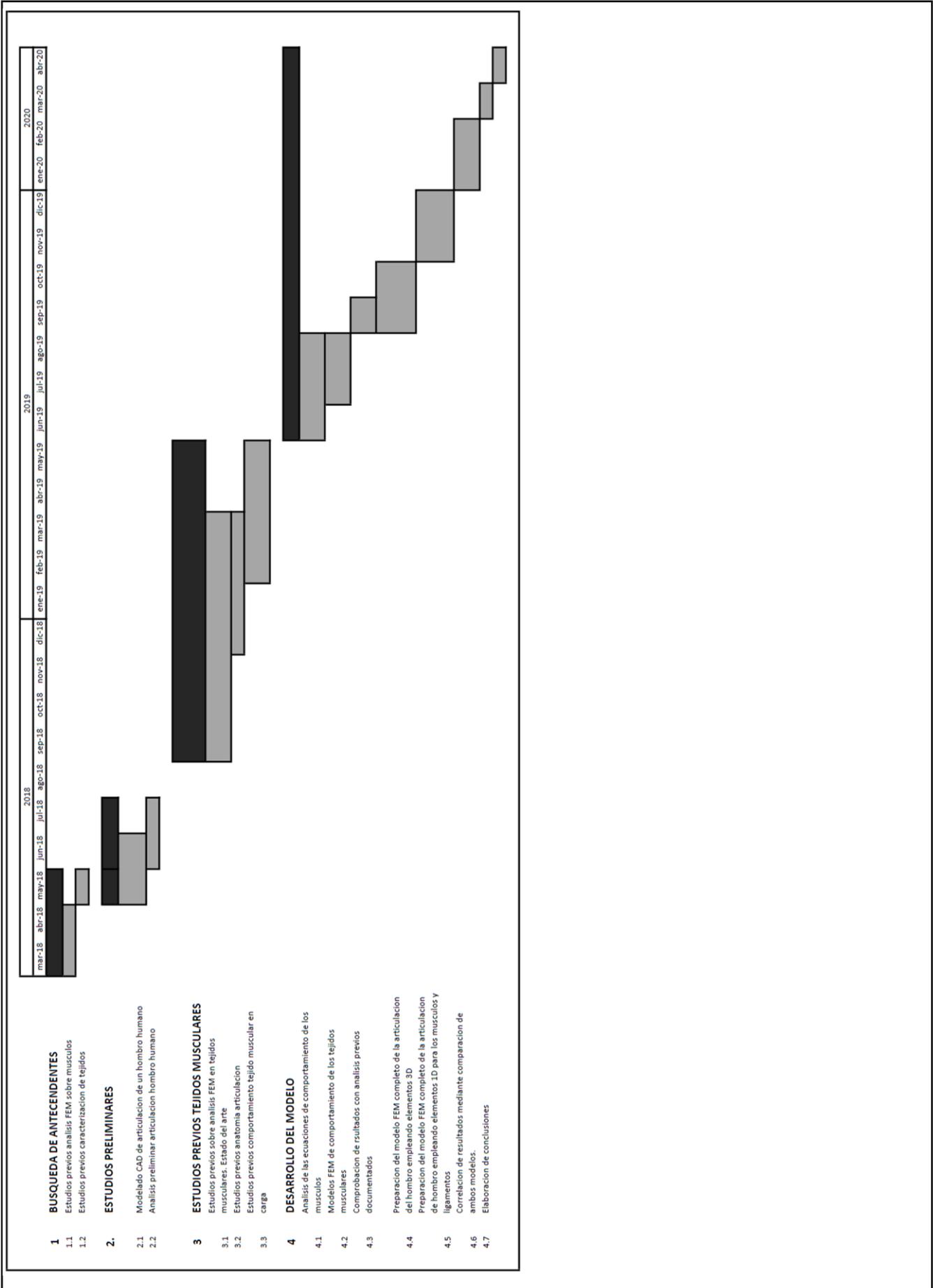
**MATERIAL MEANS AND RESOURCES AVAILABLE (50 LINE MAXIMUM):**

El trabajo se desarrolla en el programa de Doctorado: Formación en la Sociedad del Conocimiento, [20], [21], [22], siendo su portal, accesible desde <http://knowledgesociety.usal.es>, la principal herramienta de comunicación y visibilidad de los avances [19]. En él se irán incorporando todas las publicaciones, estancias y asistencias a congresos durante el transcurso del trabajo."

Para la realización del estudio se cuenta con los siguientes recursos.

- Imágenes 3D obtenidas mediante resonancia magnética nuclear de los elementos que intervienen en la articulación.
  
- Estación de trabajo  
procesador INTEL- I5 7400 a 3.00 GHz  
memoria RAM: 64 Gb  
disco duro SSD de 500 Gb
  
- SW de modelado CAD.  
Siemens NX. v7.0
  
- SW de modelado y análisis FEM  
Femap + NASTRAN 10.2
  
- SW de tratamiento de nubes de puntos, GEOMAGIC Desing, X con el que se obtendrán los modelos 3D partiendo de las imágenes de la resonancia magnética.
  
- Impresión 3D de modelos anatómicos empleando resinas SLA e impresora Form2 de 3Dsystem.

**PLANIFICACIÓN TEMPORAL AJUSTADA A TRES AÑOS (MÁXIMO 50 LÍNEAS):**  
**TIMING SCHEDULE OVER THREE YEARS / FIVE YEARS (Part time)(50 LINE MAXIMUM):**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (MÁXIMO 50 LÍNEAS):

### BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES (50 LINE MAXIMUM):

- [1] M. Islan, J. Carvajal, P. S. Pedro, R. D'Amato, J. A. Juanes, and E. Soriano, "Linear approximation of the behavior of the rotator cuff under fatigue conditions. Violinist case study," in Proceedings of the 5th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality - TEEM 2017, 2017, pp. 1–8.
- [2] A. Ruggiero, S. Affatato, M. Merola, and M. C. De, "FEM analysis of metal on UHMWPE total hip prosthesis during normal walking cycle," in Proceedings of the XXIII Conference of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics (AIMETA 2017), 2017, pp. 4–7.
- [3] N. Seki et al., "Mechanical environment of the supraspinatus tendon: Three-dimensional finite element model analysis," *J. Orthop. Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 348–353, Jul. 2008.
- [4] M. Zheng, Z. Zou, P. J. D. S. Bartolo, C. Peach, and L. Ren, "Finite element models of the human shoulder complex: a review of their clinical implications and modelling techniques," *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 33, no. 2. Wiley-Blackwell, 2017.
- [5] A. María Ramírez, Begoña Calvo, Jorge Grasa. "Modelado y simulación del tejido músculo-esquelético. Validación experimental con el músculo tibial anterior de rata". 2011
- [6] Yacine Berranen, Mitsushiro Hayashibe, Benjamin Guilles and David Giraud. "3D volumetric Muscle modeling for real time deformation analysis with FEM" 2012
- [7] J. M. Winters and S. L. Y. Woo, "Multiple muscle systems : biomechanics and movement organization," vol. 16, no. 3, 1990.7
- [8] G. K., A. J. van den Bogert, et al. Cole, "Modelling of force production in skeletal muscle undergoing stretch," *Journal of Biomechanics*, vol. 29, no. 8, pp. 1091- 1104, 1996
- [9] Hill, A.V. (octubre de 1938). "El calor de constantes dinámica y acortamiento de los músculos". *Proc. r Soc Lond. B (Londres: Royal Society)* 126 (843): 136 – 195. Doi:10.1098/rspb.1938.0050.
- [10] Fung, Y. C. (1993). *Biomecánica: Propiedades mecánicas de los tejidos vivos*. Nueva York: Springer-Verlag. p. 568. ISBN0-387-97947-6.
- [11] Martins, J.A.C.; Pires, E.B; Salvado, R.; Dinis, P.B. (1998). "Modelo numérico del comportamiento pasivo y activo de los músculos esqueléticos". *Métodos computacionales en ingeniería y mecánica aplicada (Elsevier)* 151: 419 – 433. Doi:10.1016/S0045-7825 (97) 00162-X.
- [12] F. J. Alonso, G. Galan- Marín, D.R. Salgado, R. Pamies-Vila, J.M. Font-Llagunes "Cálculo de esfuerzo musculares en la marcha humana mediante la optimización estática-fisiológica". 2014
- [13] Hanieh Mohamad, Hong Yao, Gholamreza Khademi, Thang T Nguyen, Dan Simon Hanz Richter. "Extended Kalman filtering for state estimation of a Hill muscle model". ISSN 1751-8644. 2018
- [14] Eric J. Perreault, Thomas G Sandercock and Charles J. Heckman. "Hill muscle model performance during natural activation and electrical stimulation" . 2001
- [15] G.A. Lichtwark and A.M.Wilson. "A modified Hill muscle model that predicts muscle power output and efficiency during sinusoidal length changes". 2005
- [16] B. Seral García, J. Cegoñino Banzo, J.M. García Aznar, M. Doblaré Castellano, F. Seral Iñigo. "Simulación en 3D con elementos finitos de un modelo de prótesis de rodilla". 2015
- [17] Carlos Alerto Díaz Hernández, Fernando Cerdán Cartagena, Juan Suardíaz Muro. "Plataforma de simulación dinámica y control de movimiento humano basado en Opensim y Matlab". Sept. 2013
- [18] G. Li, J. Gil, A. Kanamori and S. L.-Y. Woo. "A Validated Three-Dimensional Computational Model of a Human Knee Joint" *J Biomech Eng* 121(6), 657-662 (Dec 01, 1999)
- [19] García-Holgado, A., García-Peñalvo, F. J., & Rodríguez-Conde, M. J. (2015). Definition of a technological ecosystem for scientific knowledge management in a PhD Programme. In G. R. Alves & M. C. Felgueiras (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM'15)* (Porto, Portugal, October 7-9, 2015) (pp. 695-700). New York, NY, USA: ACM.
- [20] García-Peñalvo, F. J. (2014). *Formación en la sociedad del conocimiento, un programa de doctorado con una perspectiva interdisciplinar*. *Education in the Knowledge Society*, 15(1), 4-9.
- [21] García-Peñalvo, F. J. (2018). Edición 2018-2019 del Kick-off del Programa de Doctorado "Formación en la Sociedad del Conocimiento". *Seminarios del Programa de Doctorado en Formación en la Sociedad del Conocimiento* (23 de octubre de 2018), Salamanca, España. <https://goo.gl/TBaxYD>
- [22] García-Peñalvo, F. J., García-Holgado, A., & Ramírez-Montoya, M. S. (2018). The PhD Corner: TEEM 2018 Doctoral Consortium. In F. J. García-Peñalvo (Ed.), *TEEM'18 Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality* (Salamanca, Spain, October 24th-26th, 2018) (pp. 979-983). New York, NY, USA: ACM.