

Desarrollo del currículo para la profundización en mecanobiología computacional

Curriculum development for the deepening in computation mechanobiology

Dr. Octavio Silva Caicedo,^I Ing. Diego A. Garzón-Alvarado Ph.D,^{II} Dr. Carlos García Sarmiento^{III}

^I Departamento de Medicina Física (Rehabilitación). Universidad Nacional de Colombia.

^{II} Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

^{III} Departamento de Ortopedia. Universidad Central de Colombia.

RESUMEN

En este trabajo se hace una propuesta sobre el desarrollo curricular para la formación profesional e investigativa en mecanobiología. Se identifican los requerimientos conceptuales, investigativos y metodológicos para la preparación de personas idóneas en el campo de investigación. Por último, se hace una propuesta sobre la metodología a utilizar en la solución e investigación sobre el campo de trabajo.

Palabras clave: Currículo, biomecánica, mecanobiología, ciencias biomédicas, ingeniería.

ABSTRACT

The objective of present paper is to make a proposal on the curricular development for professional and researching training in mechanobiology. The conceptual, researching and methodological requirements are identified for the training of suitable persons in the research field. Finally, a proposal on the methodology to be used in solution and research on the working field is made.

Key words: Curriculum, biomechanics, mechanobiology, biomedical sciences, engineering.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería biomédica utiliza las diferentes metodologías habituales en el ámbito ingenieril: ensayos de laboratorio y en campo y simulación computacional. Esta última precisamente está teniendo un avance vertiginoso gracias al desarrollo y mejora continua de los computadores, es hoy en día una potente herramienta utilizada habitualmente en el diseño de prótesis, seguimiento de patologías y en la conceptualización del comportamiento de tejidos y procesos biológicos. En esta área de investigación en particular se construyen algoritmos complejos capaces de predecir el comportamiento del cuerpo humano ante distintas condiciones mecánicas,¹ eléctricas² y magnéticas.³ Además, la simulación computacional permite estudiar nuevas teorías sobre procesos biológicos con el objeto de establecer nuevas líneas de experimentación y modelos más adecuados para fenómenos tan complejos como la marcha humana, la angiogénesis, la formación de tumores, la morfogénesis y el crecimiento biológico, entre otros muchos casos.⁴

El uso continuo de la simulación en medicina ha permitido obtener datos importantes acerca del comportamiento biológico, mecánico y químico de órganos y tejidos utilizando la formalización matemática y la consiguiente simulación numérica de procesos biológicos muy complejos. Distintos problemas de medicina relacionados con la cirugía, el trauma y la rehabilitación han sido identificados, conceptualizados y sistemáticamente resueltos numéricamente. Sin embargo, aunque la simulación numérica en bioingeniería es de reciente desarrollo, la abstracción física y la consiguiente formulación matemática del cuerpo humano se remontan a varios siglos atrás.

Desde la abstracción física y la biología, se ha desarrollado una nueva área del conocimiento que involucra la ingeniería y la medicina, denominada mecanobiología. La mecanobiología involucra el desarrollo de hipótesis y teorías a la luz de la biología, que en conjunto con los estímulos externos, especialmente mecánicos, permiten elucidar las preguntas médicas. Esta nueva área involucra el desarrollo de modelos experimentales y computacionales para probar por ensayo y error las hipótesis formuladas con rumbo hacia la construcción de nuevo conocimiento. Este desafío intelectual debe ser abordado por grupos interdisciplinarios de profesionales, a saber: médicos, ingenieros, químicos, biólogos, entre otros. Por tanto, los profesionales que desarrollan estudios de mecanobiología deben tener competencias especiales para abordar problemas de investigación, desarrollar nuevo conocimiento y aprender a comunicar sus ideas.

Jacques Delors,⁵ desde un punto de vista general, establece que los objetivos y propósitos de la educación del siglo XXI deben estar enmarcados en las siguientes acciones:

1. Aprender a conocer.
2. Aprender a hacer.
3. Aprender a convivir.
4. Aprender a ser.

En el mismo trabajo, *Delors* señala que: "Cada vez con más frecuencia, los empleadores ya no exigen una calificación determinada, que consideran demasiado

unida todavía a la idea de la pericia material y piden, en cambio, un conjunto de competencias específicas de cada persona, que combina la calificación propiamente dicha, adquirida mediante la formación técnica y profesional, el comportamiento social, la aptitud para trabajar en equipo, la capacidad de iniciativa y la de asumir riesgos". Este texto permite ubicarnos en el desarrollo de las capacidades y competencias de los profesionales que trabajan en mecanobiología, especialmente, en la mecanobiología computacional.

Por tanto, la formación de los profesionales en esta área, está privilegiada por capacidades y competencias, más que en los conocimientos tradicionales que alberga la ingeniería, en este sentido, se debe pensar en un sujeto que puede tener las siguientes cualidades:⁶

1. Iniciativa y creatividad.
2. Capacidad de autosuperación.
3. Habilidades sociales y de relaciones humanas (trabajo en grupo).
4. Valores humanos.
5. Capacidad de comunicación oral y escrita.
6. Conocimientos técnicos.

Como se puede observar, en la escala de cualidades, el peso de los conocimientos técnicos es menor debido a que, en el mundo actual, se requieren de conocimientos más especializados que de una gran cantidad de ellos. Sin embargo, estos conocimientos técnicos deben tener una base metodológica y científica que merece ser discutida. En este sentido *Tunnermann*⁷ y *Escotet*⁸ le entregan un papel preponderante a la universidad en el desarrollo de capacidades y bases científicas de los estudiantes. *Tunnerman* afirma que las universidades del siglo XXI se medirán por las capacidades de sus alumnos (más que por sus profesores) en la construcción de conocimiento. Por tanto, los alumnos deben tener la "capacidad de aprender", y se convierte en un sujeto activo del conocimiento, a diferencia de lo que ocurría en la educación tradicional, donde el estudiante estaba evaluado por sus conocimientos enciclopédicos.

Desde este punto de vista, en este artículo se hace una propuesta sobre las competencias, currículo y desarrollo de los profesionales que se dedican a la investigación en mecanobiología, especialmente en el ámbito computacional. El objetivo es promover la discusión sobre el desarrollo de las capacidades investigativas de un profesional en investigación, en el área médica. En especial, se hace una propuesta concreta para una línea de profundización en la Universidad Nacional de Colombia.

DESARROLLO

Acerca de los modelos de educación

Un modelo de educación tiene un conjunto de acciones que, de manera organizada, deben lograr el aprendizaje de un tema, una actividad o una cualidad en tiempos finitos de enseñanza. Por tanto, se deben ejecutar estas acciones de manera sistemática, para que los sujetos que están involucrados en el proceso logren objetivos claros. Estos sujetos son, obviamente, los alumnos y los profesores. De

forma simplista, estos sujetos desarrollan las destrezas y contenidos necesarios para hacer eficiente el proceso educativo. Este proceso puede estar enfocado en:

- a. El conocimiento del profesor quien expone, examina, juzga y propone.
- b. El estudiante que aprende según sus intereses particulares.
- c. Una mezcla de los componentes antes enunciados.

En la enseñanza de la mecanobiología no se puede contemplar de forma aislada cada uno de estos enfoques. Por esta razón, se discutirá cada uno de ellos en los siguientes epígrafes.

Conocimientos que se requieren en la práctica de la mecanobiología y la biomecánica

El sistema educativo debe propender por el desarrollo de contenidos básicos que deben tener el carácter de "mínimos" en el quehacer investigativo. En el caso de la mecanobiología (y también la biomecánica), la cual se puede enmarcar como una especialidad de la ingeniería biomédica y mecánica, y por tanto, sus cursos mínimos están enmarcados en dichas ingenierías. En la figura 1 se observa que la mecanobiología se fundamenta, principalmente por las ciencias básicas, ingeniería y medicina. El currículo del área de profundización que se muestra en esta figura, es común para las ingenierías, y puede ser utilizado en el diseño de maestrías en ingeniería biomédica, mecánica y profundización en biomecánica. Se puede observar currículos de ingeniería biomédica en el Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Michigan, Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de John Hopkins y Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Virginia.⁹⁻¹³

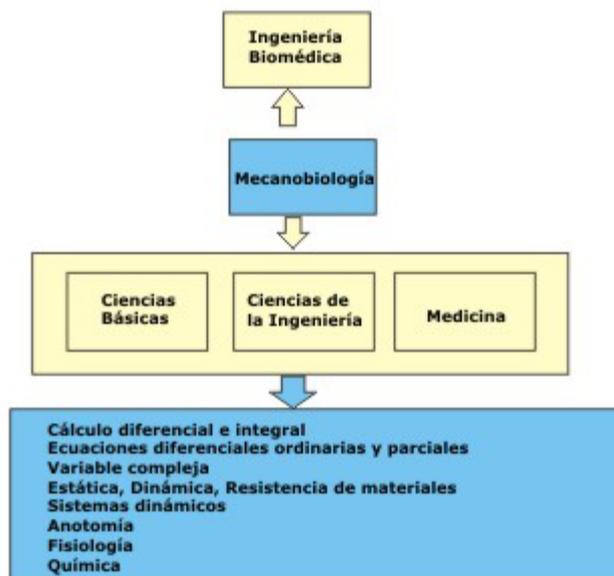


Fig. 1. Currículo mínimo de pregrado necesario para el abordaje de la mecanobiología y la biomecánica.

En la figura 1 se puede apreciar que existen competencias en el desarrollo de habilidades analíticas, dadas por las asignaturas de matemáticas y física. El objetivo que tienen estas disciplinas es, desarrollar en el estudiante, la capacidad

de abordar problemas médicos y biológicos desde la perspectiva física. A partir de las leyes naturales el estudiante debe poder predecir el comportamiento en el tiempo y espacio de una variable de un fenómeno médico o biológico. Las asignaturas de anatomía, biología y fisiología tienen el objeto de conformar un lenguaje y conocimientos mínimos que le permitan discernir sobre la veracidad de sus hipótesis y predicciones. Adicionalmente, estas asignaturas permitirán al estudiante desarrollar una comunicación efectiva en torno a grupos interdisciplinarios con personal médico. Es importante notar que los currículos de ingeniería biomédica⁹⁻¹³ consideran de vital importancia el desarrollo de las habilidades básicas por encima de la incorporación en el estudiante de una gran cantidad de conocimientos. Es así como las universidades tienen por objetivo impartir asignaturas fundamentales sobre las de profundización, tema que es aplazado para estudios de posgrado: especialización, maestría y doctorado.

Con los conocimientos mínimos de las asignaturas de pregrado el estudiante puede acceder a estudios de especialización, maestría y doctorado en el área de biomecánica e ingeniería biomédica. El objetivo de la especialización en estas áreas debe ser la actualización y profesionalización del quehacer industrial, por encima del trabajo investigativo. Un profesional especialista puede llevar a cabo el diseño de prótesis, tanto odontológicas como médicas (ortopédicas, cosméticas, etc.), diseño de dispositivos (*stents*, válvulas cardíacas, instrumental médico), análisis de rehabilitación, estudios de traumas y accidentes, entre otras tantas posibilidades de desempeño. Nótese que el especialista no plantea hipótesis o teorías sobre un fenómeno médico, crea soluciones para su entorno social. Por el contrario, el magíster, es un paso intermedio entre la investigación pura y la aplicada. La maestría tiene por objeto desarrollar habilidades de investigación sobre la base de sólidos conocimientos en un área específica de la biomecánica o la mecanobiología. En esta etapa, el estudiante tiene una participación activa en el desarrollo de su currículo y en la elección de su línea de profundización. En la figura 2 se muestran las posibles asignaturas que pueden ser comunes en biomecánica y mecanobiología:

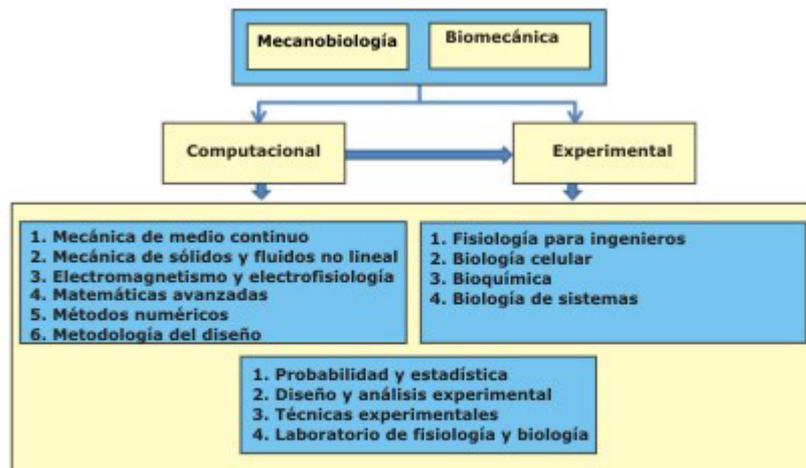


Fig. 2. Propuesta del diseño curricular de una maestría en biomecánica o mecanobiología.

Como se observa en la figura 2, tanto las áreas de biomecánica y mecanobiología guardan una estrecha relación en las asignaturas que pueden ser impartidas para abordar la investigación. Se pueden observar tres recuadros en la parte inferior, el

superior izquierdo serán las asignaturas impartidas por el área de ingeniería, nótese que se da especial importancia al análisis y fundamentos de sólidos y fluidos para llevar a cabo la parte computacional. En la parte derecha se observan las asignaturas que son impartidas para el fundamento médico. En la parte inferior se observan las técnicas experimentales que son fundamentales para abordar problemas de laboratorio. Un estudiante de maestría debe tomar, mínimo, las siguientes disciplinas:

- a. Componente de ingeniería: Matemáticas avanzadas y Mecánica de medio continuo.
- b. Componente de medicina: Fisiología para ingenieros y biología celular.
- c. Probabilidad y estadística: Diseño y análisis de experimentos.

Debe existir un componente investigativo, orientado por un profesor con experiencia en la parte experimental o computacional. El componente de investigación se plasma en la tesis de maestría, donde el estudiante se enfrenta a un tema de desarrollo e investigación donde demuestre sus habilidades y consolide una metodología de investigación. Se pueden ver estudios de maestría en biomecánica y mecanobiología en las siguientes referencias.¹⁴⁻¹⁶

Luego, en el doctorado, el estudiante se enfoca en desarrollar o continuar una línea de investigación en la cual se desarrolla nuevo conocimiento. En este punto el estudiante debe proponer nueva metodología, nuevos conceptos y nuevos desarrollos en torno a un tema específico. Los resultados de la investigación deben ser publicados y arbitrados por académicos de alto prestigio que den constancia de la originalidad del trabajo.⁶

Acerca de los contenidos y desarrollos en mecanobiología

Como se observó en párrafos anteriores, la mecanobiología se puede subdividir en dos grandes partes, la mecanobiología experimental y la computacional. En la parte experimental, los investigadores deben realizar trabajo en laboratorio para encontrar y cuantificar las reglas de un proceso biológico y bioquímico, donde está, de por medio, la física mecánica. Por tanto, el trabajo experimental encuentra las reglas de acción de un determinado proceso biológico o médico. Este debería ser el método por excelencia en la investigación médica. Sin embargo, debido a la complejidad de los procesos biológicos, costo de recursos, y en ocasiones la dificultad de aislar fenómenos se recurre a estudiar los mismos fenómenos según las leyes generales de la física y la biología, por eso surge la mecanobiología computacional.

La mecanobiología computacional, determina las reglas cuantitativas que gobiernan las acciones celulares para su expresión, diferenciación y mantenimiento ante estímulos biológicos y mecánicos, las cuales pueden simularse mediante métodos numéricos. El procedimiento para hallar dichas reglas es habitualmente mediante el proceso de "prueba-error".¹⁷ Los ensayos computacionales se simulan a partir de problemas de valor en el contorno mediante los cuales, las cargas mecánicas sobre el contorno son trasladadas a variables mecánicas locales (deformaciones y tensiones). Del lado biológico, estas variables mecánicas locales o biofísicas estimulan la expresión celular para regular, por ejemplo, la composición de la matriz y la expresión de sustancias moleculares. Tanto la parte biológica como la mecánica se combinan en un modelo computacional, que considera la aplicación de fuerzas, mecanotransducción, expresión celular, genética y la transformación de las

características de la matriz extracelular. El método usual de implementación numérica de estos problemas mecanobiológicos es el método de los elementos finitos,^{17,18} aunque se han utilizado otros métodos, como el de elementos de contorno y sin malla.

Por tanto, un investigador que desarrolla investigación en mecanobiología experimental debe tener fortalezas en: leyes generales de la física y la biología, métodos numéricos y modelado matemático. En la figura 3, se pueden observar las habilidades y las asignaturas que requiere un estudiante en formación.

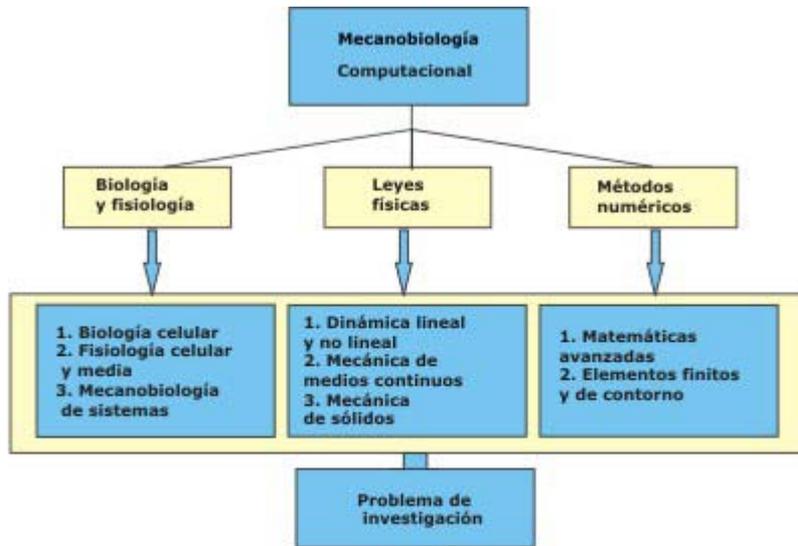


Fig. 3. Propuesta del diseño curricular del área de mecanobiología computacional.

Cada una de estas áreas y asignaturas (de la figura 3) son imprescindibles para la completa formación de un investigador en mecanobiología. El proceso de formación se debe completar con una investigación original donde se efectúe una disertación computacional de una de las tantas posibilidades en el estudio de procesos médicos.

Entre las muchas posibilidades de investigación se pueden enumerar:

1. Mecanobiología de órganos.
2. Mecanobiología de tejidos:
 - a. Comportamiento de tejidos duro.
 - b. Comportamiento de tejido blando.
3. Mecanobiología celular.
4. Mecanobiología de patologías.

En la primera parte de este trabajo se hizo una revisión del estado del arte, donde se muestran los artículos más relevantes en cada una de estas áreas. En la

siguiente parte de este trabajo se muestra cada una de las áreas de formación en mecánica computacional.

Formación en Biología y Fisiología

En el desarrollo de la formación de un investigador de estas calidades, las asignaturas de la formación biológica le permitirán interactuar con profesionales del área médica, discernir sobre la teoría y comunicar eficientemente sus resultados. El desarrollo curricular debe estar enfocado al proceso de interacción de las células, tejidos, y órganos y sistemas. En especial se debe hacer énfasis en el siguiente temario:

1. En biología celular (Alberts B, et al. Molecular Biology of the Cell. 5ª ed. 2008 Ed. Garland). (Lodish H, et al. Molecular Cell Biology. 5ª ed. 2004. Ed. Freeman):

- a. Funciones de mantenimiento celular: Organización molecular, rol de la membrana, superficie y membrana celular, organización y tránsito intracelular; núcleo celular, conversión de energía.
- b. Multicelularidad: Multiplicación celular y regulación del crecimiento, sistemas de integración en complejos multicelulares, actividades celulares en morfogénesis.
- c. Origen y mantenimiento de estados diferenciados: Diferenciación progresiva, organización y funciones diferenciadas de células epiteliales, conjuntivas, musculares, nerviosas y óseas.

2. En fisiología médica (Guyton Arthur C. 1919-2003. Hall John E. Madrid, etc. Elsevier cop. 2006):

- a. Organización y función sistémica general.
- b. Fisiología muscular.
- c. Fisiología pulmonar.
- d. Fisiología cardíaca.
- e. Fisiología renal.
- f. Neurofisiología.
- g. Sistema gastrointestinal.
- h. Sistema reproductivo.
- i. Sistema endocrino.
- j. Sistema inmunológico.

3. Mecanobiología de sistemas: En esta asignatura, se puede llevar a cabo el estudio integrado del sistema musculoesquelético y el efecto que tienen las cargas sobre ellos. La asignatura depende de la orientación de las necesidades del estudiante y el grado de especialización del profesor.

Estas asignaturas deben tener un contenido altamente investigativo, y un carácter informativo-formativo. El estudiante es el principal actor en el desarrollo de las asignaturas, y por tanto, se debe trabajar en torno a problemas de investigación y experimentación.

Formación en Ingeniería

En el desarrollo de la actividad en mecanobiología computacional, se requiere el manejo de las leyes básicas de conservación que fundamentan el trabajo en ingeniería y que serán aplicadas a problemas médicos. En este sentido, las asignaturas permiten la integración de un lenguaje común en ingeniería en adición al lenguaje tensorial, que es el precursor para la programación numérica. Las asignaturas pueden ser:

1. Mecánica de medios continuos: Fung YC (1977). A First Course in Continuum Mechanics (2nd ed.). Prentice-Hall.

- a. Análisis tensorial.
- b. Descripción euleriana y lagrangiana.
- c. Descripción de sólidos y fluidos.
- d. Descripción del movimiento (Cinemática).
- e. Descripción del estado de esfuerzos o tensiones.
- f. Leyes generales de la mecánica e ingeniería.

2. Dinámica lineal y no lineal: Diederich Hinrichsen, Anthony J. Pritchard (2005). Mathematical Systems Theory I-Modelling, State Space Analysis, Stability and Robustness. Springer Verlag.

- a. Dinámica lineal: Ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales en evolución en el tiempo.
- b. Dinámica no lineal: Formación de patrones, estabilidad, patrones de Turing.

3. Mecánica de sólidos y fluidos:

- a. Mecánica lineal, pequeñas deformaciones.
- b. Elasticidad lineal.
- c. Grandes deformaciones.
- d. Hiperelasticidad.
- e. Hipoelasticidad.
- f. Poroelasticidad.
- g. Ecuación de Navier Stokes.

Formación en computación numérica

Por último para analizar las hipótesis propuestas se debe llevar a cabo la solución del sistema de ecuaciones que se obtiene de la formulación. En general, el resultado de la formulación es un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales que dependen del tiempo y el espacio. Para su solución se requiere conocer de las siguientes asignaturas:

1. Matemáticas avanzadas: donde se estudian tópicos que dependen de la formación del alumno. El objetivo de esta asignatura es consolidar los conocimientos matemáticos adquiridos en cursos de pregrado, en especial se debe

hacer énfasis en: álgebra lineal, ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales, cálculo vectorial.

2. Elementos finitos y de contorno:

- a. Métodos numéricos.
- b. Métodos de aproximación.
- c. Método de los residuos ponderados.
- d. Formulación débil.
- e. Método de los elementos finitos.
- f. Método de los elementos de contorno.

Integración del conocimiento

El trabajo metodológico de la mecanobiología computacional se puede observar en la figura 4, donde se propone el desarrollo e integración del conocimiento adquirido en las asignaturas formativas.

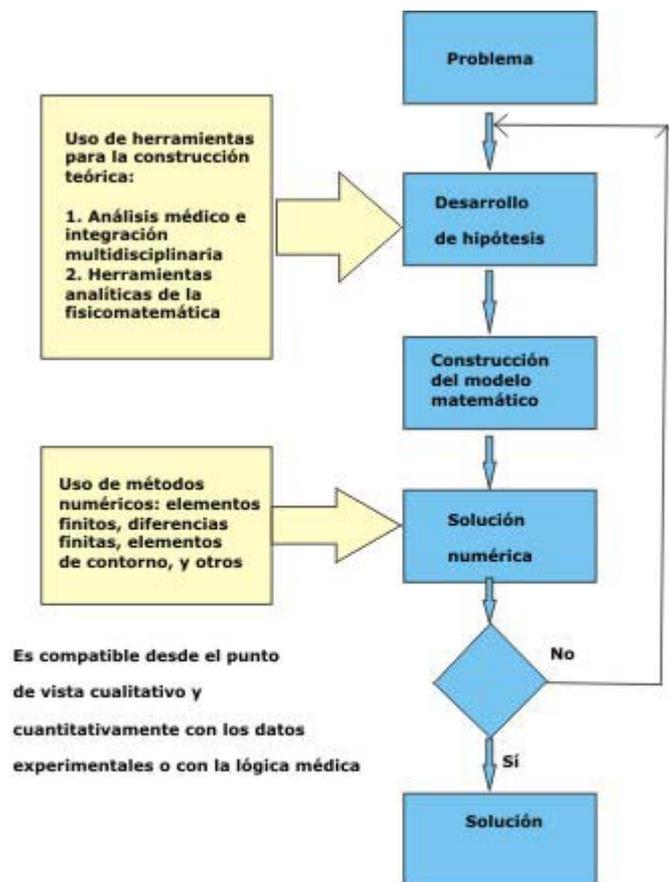


Fig. 4. Algoritmo para la solución de problemas en mecanobiología.

El desarrollo del conocimiento inicia con la identificación de un problema concreto de la fisiología celular o humana. Las asignaturas formativas en ingeniería le permitirán al estudiante desarrollar un conjunto de hipótesis sobre el problema en concreto. Con la ayuda del conocimiento en las leyes generales de conservación y las ecuaciones constitutivas puede argumentar el comportamiento de una entidad biológica desde la perspectiva mecánica. Esta hipótesis, ahora en términos de ecuaciones diferenciales, puede solucionarse mediante un método numérico apropiado, como, por ejemplo, el método de los elementos finitos o elementos de contorno. Luego, los resultados son estudiados a la luz de la precisión del método de solución y de la cercanía con los resultados experimentales previamente reportados. Cuando los resultados no son satisfactorios se desarrolla nuevamente el algoritmo de solución para ajustar la hipótesis y por tanto, las ecuaciones que la representan. Si la evidencia es adecuada y los resultados son satisfactorios el proceso termina.

Un punto importante en la formación de un investigador es la comunicación de sus resultados. Este proceso debe estar acompañado de un orientador quien le de indicaciones sobre el estilo, objetivo y formato de presentación de los resultados de su trabajo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se hace una propuesta para el desarrollo del currículo en la formación de ingenieros, físicos, matemáticos y médicos en el área de mecanobiología. La propuesta se enmarca en la identificación y desarrollo de conocimientos y habilidades para el trabajo de investigación en el área mencionada. Por tanto, se propone un conjunto de asignaturas fundamentales y un proceso formativo y de investigación que puede conducir a fomentar el trabajo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carter DR, Mikic B, Padian K. Epigenetic mechanical factors in the evolution of long bone epiphyses. *Zoological Journal of the Linnean Society*. 1998;123(2):163-78.
2. Greason WD. Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge1. *Journal of Electrostatics*.1998;44:205-19.
3. Rotariu O, Strachan NJC. Modelling magnetic carrier particle targeting in the tumor microvasculature for cancer treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005;293:639-46.
4. Enderle J, Blanchard SM, Bronzino J. *Introduction to Biomedical Engineering*. San Diego, California: Elsevier Academic Press; 2000.
5. Delors J. *Los cuatro pilares de la educación*. Caracas: Ediciones UNESCO; 1996. p. 18.
6. Molina Alvarez A. Problemática actual en la enseñanza de la ingeniería: Una alternativa para su solución. *Revista Ingenierías*. 2000;3(7):10-5.

7. Tunnermann B. La educación superior en los umbrales del siglo XXI. Caracas: Ediciones CRESALC, UNESCO; 1996. p. 284.
8. Escotet M. Tendencias, misiones y políticas de la universidad. Nicaragua: Universidad Centroamericana (UCA); 1994. p. 210.
9. Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Michigan. Disponible en: http://www.bme.umich.edu/programs/graduate/documents/Biomechanics_ConcentrationF10.pdf
10. Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de John Hopkins. Disponible en: <http://www.bme.jhu.edu/academics/ugrad/docs/BME-Curriculum-Checklist.pdf>
11. Programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Virginia. Disponible en: http://bme.virginia.edu/undergraduate/design_core.html
12. Programa de Ingeniería Biomédica en la Universidad de la Ciudad de Londres. Disponible en: <http://www.city.ac.uk/courses/undergraduate/beng-biomedical-engineering>
13. Programa de Ingeniería Biomédica en la Universidad de Navarra. Disponible en: <http://www.tecnun.es/oferta-academica/grado-plan-2009/ingenieria-biomedica.html>
14. Programa de maestría en biomecánica en la Universidad de Indiana. Disponible en: <http://www.indiana.edu/~sportbm/graduate-programs.html>
15. Programa de maestría en biomecánica en la Universidad Estatal de Michigan. Disponible en: <http://education.msu.edu/kin/grad/masters/msbm.asp>
16. Programa de maestría en biomecánica en la Universidad de Stanford. Disponible en: <http://me.stanford.edu/>
17. Van der Meulen MCH, Huiskes R. Why mecanobiology? Journal of Biomechanics. 2002;35(4).
18. Prendergast PJ. Finite element models in tissue mechanics and orthopaedic implant design. Clinical Biomechanics. 1997;12(6):343-66.

Recibido: 6 de enero de 2010.
Aprobado: 22 de enero de 2010.

Autor para la correspondencia:
Ing. *Diego A. Garzón-Alvarado*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico:
dagarzona@bt.unal.edu.co
