



Mioperceb: multimedia y simulador para el aprendizaje de la morfoelectrofisiología muscular del percebe

Reyes Monreal, Marleni¹ ; Pérez Bonilla, María Eugenia²
Pérez Escalera, Miguel¹; Reyes Lazalde, Arturo²

¹Escuela de Artes Plásticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)

²Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
(México)

Fecha de recepción: 07/Mar/2017

Fecha de aceptación: 05/Sept/2017

Resumen:

Se presenta el desarrollo de un paquete didáctico que incluye un multimedia sobre la morfología muscular del percebe y un simulador de su comportamiento electrofisiológico, en el marco de una propuesta docente que pretende unificar el aspecto científico con las habilidades y competencias disciplinarias que contribuyan a motivar al alumno para lograr un mejor aprovechamiento académico. El multimedia fue desarrollado con el programa Flash®, es interactivo e introduce al alumno en la fisiología de la contracción muscular especializada. El simulador de la electrofisiología del músculo del percebe fue desarrollado en Visual Basic® versión 6.0, basado en el modelo matemático de Morris-Lecar. Fue compilado para ser ejecutable en ambiente Windows®, desde XP a Windows® 10. El programa permite al alumno interactuar con cada una de las variables biológicas para realizar un sin número de simulaciones que le permitirán comprender el efecto de cada variable y la relación entre ellas.

Palabras clave: Métodos didácticos, Electrofisiología muscular, Simuladores,



Abstract: **Mioperceb: multimedia and simulator for the study of the muscular morpho-electrophysiology of the barnacle**

In this paper we present the development a didactical package, its includes a multimedia module on the muscular morphology of the barnacle and a simulator of its electrophysiological behavior, within the framework of a teaching proposal that seeks to unify the scientific aspect with the disciplinary skills and competences that contribute to motivate the student to achieve a better academic progress. The multimedia module was developed with the Flash® program, is interactive and introduces the student in the physiology of specialized muscle contraction. The muscle electrophysiology simulator was developed in Visual Basic® version 6.0, based on the mathematical model of Morris-Lecar. It was compiled to be executable in Windows® environment, from XP to Windows® 10. The program allows the student to interact with each of the biological variables to perform a wide number of simulations that will allow him to understand the effect of each variable and the relationship between them.

Keywords: Didactical methods, Muscular electrophysiology, Simulators, Morris-Lecar's model

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Gaitán y Pásaro (2001); en general, los diseños de estrategias didácticas deben reunir todos los enfoques y modos de actuar que hagan que el profesorado dirija adecuadamente el aprendizaje de sus alumnos. El método didáctico debe permitir organizar de forma racional y práctica los medios, técnicas y procedimientos de enseñanza para propiciar un aprendizaje integral por parte de los alumnos. En el caso de la licenciatura en Biología, las competencias desarrolladas por el alumno deben abarcar tanto el conocimiento de las bases teóricas como la



posibilidad de ejecución de la práctica (Gaitán y Pásaro 2001). En el contexto de los métodos didácticos, en años recientes se ha incrementado el interés por los programas de cómputo para modelar la realidad; principalmente debido a los avances en la tecnología y en algunas herramientas para el desarrollo de modelos matemáticos relacionados con sistemas biológicos. En un inicio estos modelos fueron desarrollados para la investigación; sin embargo, ahora se han incorporado a la educación en los procesos de enseñanza-aprendizaje de conceptos de la ciencia en general y particularmente de conceptos biológicos (Bergdoll y Koch 1995; da Silva et al. 2015). El desarrollo de métodos didácticos debe considerar los estilos de aprendizaje. De acuerdo con el estudio de López et al. (2013) los estilos de aprendizaje en alumnos de biología en México, muestran que los métodos individuales y auditivos son poco favorecidos; en cambio, los estilos visual, táctil y kinestésico tienen más éxito: Los alumnos manifiestan que aprenden mejor haciendo experimentos y cuando participan en actividades en grupo. Sin embargo, la diferencia es pequeña indicando una “homogeneidad, como si un mismo estudiante estuviera en la posibilidad de manifestar diferentes maneras de aprender”(López et al. 2013). En biología están involucrados también objetos de estudio abstractos y que representan el saber biológico. Para la enseñanza-aprendizaje de conceptos abstractos en biología se han implementado algunas estrategias. Por ejemplo, Diez (2009) utilizó para el aprendizaje significativo del concepto de gen: (1) la identificación de conocimientos previos, (2) el análisis e interpretación del concepto de gen que construyen mediante la elaboración de mapas conceptuales, representaciones gráficas, cuestionarios y entrevistas grabadas en audio (IAP, investigación acción participativa), (3) Análisis de respuestas a cuestionarios y en actividades didácticas planteadas durante el desarrollo de la IAP y (4) Análisis y correspondencia de significados identificados en cada momento del estudio con los significados actualmente aceptados por la comunidad.

En el caso de que el proceso biológico implique conceptos matemáticos, las estrategias didácticas deben destacar las dificultades de aprendizaje o de crear oportunidades de enseñanza, desplegando las ideas en una de las formas de representación y posteriormente preguntando cómo se pueden describir, representar o ilustrar en otra forma (Lesh et al. 1987). Para Goldin y Javier (1998), el término representación tiene diferentes interpretaciones: (1) un conjunto de situaciones del



entorno físico que pueden ser objeto de descripción matemática, (2) un sistema lingüístico, mediante el cual se plantea y discute el contenido matemático, (3) un constructo matemático formal que puede representar situaciones mediante símbolos cumpliendo ciertos axiomas.

Por otro lado, se ha destacado la importancia de atender no sólo a los componentes cognitivos implicados en el aprendizaje, sino también a los componentes afectivos o motivacionales. Se trata de “instrumentar prácticas pedagógicas que no sólo contemplen la enseñanza de los saberes disciplinares, sino que atiendan también a aquellos aspectos que pueden favorecer el aprendizaje de tales saberes. Lógicamente, entre estos aspectos a considerarse encuentra la motivación y el uso de estrategias de aprendizaje” (Rinaudo et al. 2003). Según Pintrich y García (1993), “los modelos cognitivos tienden a partir de un estudiante motivacionalmente inerte, en tanto que los modelos motivacionales tienden a partir de un alumno cognitivamente vacío”. El desafío es integrar los modelos cognitivos con los modelos motivacionales.

En las ciencias biológicas, se sabe que en gran cantidad de temas se encuentran muchos problemas de aprendizaje, sobre todo cuando se utilizan métodos tradicionales de enseñanza. Las simulaciones por computadora son herramientas que incrementan la oportunidad de que los estudiantes aprendan a pensar científicamente; y dan a los estudiantes una mayor oportunidad de comprensión de las cuestiones epistemológicas relacionadas con el desarrollo del conocimiento científico (Cartier y Stewart 2000). Se ha reportado que los laboratorios computarizados, equipados con simuladores pueden mejorar el aprendizaje de los estudiantes en ciencias (Nakhlek y Krajcik 1993; Reyes Lazalde et al. 2016) y dan lugar a actitudes más positivas hacia el aprendizaje (Ybarrondo 1984). La mayoría de los estudiantes señalan que el aprendizaje basado en problemas asistidos por computadora permite adquirir habilidades computacionales, entender conceptos, establecer relaciones entre variables y obtener soluciones particulares (Chang 2001; Bulu y Pedersen 2010).

En este sentido, se seleccionó un tema de interés biológico, comprendido en la currícula, cuyo modelo matemático puede ser implementado en un simulador



computacional interactivo, que permita al estudiante la asistencia computacional para aprender sobre situaciones biológicas.

Uno de los procesos biológicos modelados matemáticamente corresponde a la actividad eléctrica de fibras musculares en percebe, debida a la presencia de canales de potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) (Morris y Lecar 1981). Investigaciones de este modelo mostraron que presenta un comportamiento dinámico complejo (Wang et al. 2005; He y Wu 2005). En este caso, los alumnos se enfrentan a un tema complejo, donde deben aprender conceptos como: potenciales de acción de Ca^{2+} , canales de Ca^{2+} que no inactivan y la fracción de activación de un canal. Además, deben derivar un modelo matemático con una ecuación diferencial que reproduzca el comportamiento eléctrico del músculo de percebe y la interpretación biológica de cada variable en el modelo. Por otro lado, interpretar su representación gráfica: voltaje contra tiempo y en plano de fases.

Aquí se presenta el desarrollo de un multimedia interactivo sobre la morfología muscular del percebe y de un simulador de la actividad eléctrica del músculo, enmarcados en una propuesta de estrategia didáctica para la enseñanza-aprendizaje del tema. Para este propósito se hace énfasis en la enseñanza de conceptos que se van estructurando de manera constructivista.

PROPUESTA DIDÁCTICA

Se propone una estrategia didáctica para el aprendizaje significativo de conceptos importantes en la biología y en la electrofisiología muscular. La temática abordada es continuación de una serie de lecciones previas. Los conocimientos previos necesarios sobre los que se articulan los conceptos nuevos son: (1) los modelos matemáticos y su solución, (2) principios de electrónica, (3) la estructura del músculo estriado y (4) el registro electrofisiológico. En la tabla 1 se resume la estrategia didáctica propuesta:



TABLA I. ESTRATEGIA DIDÁCTICA				
ASPECTOS:	MULTIMEDIA:	SOFTWARE:	CONCEPTOS:	ACTIVIDADES:
Biológico Morfología celular y tisular	Módulo I: Estructura del músculo del percebe	Flash®	Supercontracción: Línea Z no alineada (en zigzag)	Uso de programa interactivo
Electrofisiológico	Módulo II: Registro eléctrico del músculo.	Simulador propio	Potenciales de Ca^{2+} Oscilaciones, Oscilaciones amortiguadas	Uso del simulador. Interpretación de trazos electrofisiológicos
Matemático	Módulo III Modelo matemático de Morris-Lecar	PowerPoint	Ecuación diferencial de compuerta Fracción de apertura de canales de K^+ y Ca^{2+}	Derivación del modelo a partir del circuito eléctrico Reducción del modelo de Hodgkin y Huxley al modelo de Morris-Lecar
Gráfico	Módulo IV Graficado en plano de fases	Simulador propio	Ciclo límite Punto estable	Interpretación del plano de fase

Módulo I: Estructura muscular del percebe (aspectos biológicos y motivacionales)

El movimiento corporal de los seres vivos es la función operativa más versátil, con múltiples aplicaciones biomecánicas. De todos los mecanismos motrices, el sistema más evolucionado, potente y eficiente es el modelo de deslizamiento (contracción-relajación), basado en el arreglo de microfilamentos protéicos. Muy particularmente, la morfofisiología muscular del crustáceo conocido como percebe: *Balanus nubilus*, es extraordinariamente diferente a la de los vertebrados, debido a las peculiaridades



estructurales de sus fibras. El conocimiento de las características de este modelo muscular, facilitan el entendimiento de la dinámica de la contracción muscular, referida como “supercontracción”, debido a la capacidad inusual de acortamiento de las fibras, hasta la sexta parte de su longitud de reposo. El músculo de percebe es diferente del músculo esquelético habitualmente descrito. Una característica que lo distingue consiste en que las bandas Z, I y A no están alineadas. Esta arquitectura permite que las miofibrillas se puedan sobrelapar y en consecuencia se ejerce una mayor fuerza. Las fibras musculares de *Balanus nubilus* desarrollan tensiones de hasta 600 kN/cm². El aumento de la tensión se realiza en un tiempo de 177 ms a 12 °C, alrededor de cinco veces mayor que los músculos de la rana a la misma temperatura. Las etapas de la contracción muscular entre los músculos de la rana y los del percebe son diferentes. En la fase de contracción se observa una fase rápida, semejante entre en el músculo del percebe y de la rana. Sin embargo, la fase de relajación en el músculo de percebe se produce cinco veces más lentamente.

Módulo II: Registro electrofisiológico (aspectos biológicos y motivacionales)

Los experimentos de Morris y Lecar en 1981, mostraron que la actividad eléctrica que se registra en el músculo del percebe presenta una gama muy grande de respuestas oscilatorias. Los estímulos eléctricos necesarios para producirlas son mucho mayores que los habitualmente aplicados en el músculo estriado de la rana. En el músculo estriado de la rana el potencial de acción muscular, se debe a una entrada de sodio, seguida de una salida de potasio y después se presenta una meseta producto de una corriente de calcio, para que finalmente, el potencial se repolarice gracias a la salida de potasio. En el músculo estriado de percebe, en cambio, la despolarización se debe a una entrada de calcio y la repolarización a una salida de potasio. Para investigar el efecto que tiene tanto el calcio como el potasio en el músculo de percebe, Morris y Lecar realizaron una serie de experimentos estratégicos: (1) Perfundir al músculo con soluciones sin calcio y (2) bloqueo de los canales de potasio. Las oscilaciones de las fibras musculares de percebes decididamente no son estereotipadas (Hagiwara et al. 1969; Murayana y Lakshminarah 1977); son variables y a veces complejas. Dependiendo de los parámetros experimentales.



Módulo III: Modelo matemático (aspectos biológicos y motivacionales)

Para el desarrollo del simulador se usó el modelo matemático de Morris-Lecar (1981). Se trata de un modelo que reproduce los potenciales de acción ante un estímulo de corriente, de la misma manera que lo hace el modelo de Hodgkin y Huxley (1952). Sin embargo, el modelo de Morris-Lecar está formado por un sistema de dos ecuaciones diferenciales asociadas a tres funciones matemáticas que dependen del voltaje. Esto es posible gracias a que el proceso electrofisiológico en la fibra muscular del percebe está determinado por un canal de Ca^{2+} y uno de K^+ que son voltaje dependientes y ninguno de los dos inactiva apreciablemente. Los estudios electrofisiológicos de fijación de corriente muestran un comportamiento oscilatorio complicado (Hagiwara et al. 1969; Murayama y Lakshminarayanaiah, 1977).

La reducción del modelo de Hodgkin y Huxley (1952) al modelo de Morris-Lecar es posible gracias a que las conductancias en el músculo de percebe tienen una inactivación muy rápida (Keynes et al., 1973). En estas condiciones, prácticamente se pueden tener un par de conductancias simples que no inactivan, en comparación con otros crustáceos (Mounier y Vassort, 1975).

Modelo de Morris Lecar

Se trata de una sola ecuación diferencial tipo compuerta.

$$C \frac{dV}{dt} = -I_{ion} + I_{ap} \quad (1)$$

Donde:

$$I_{ion} = m_{\infty}(V)G_{Ca}(V - V_{Ca}) + WG_K(V - V_K) + G_L(V - V_L) \quad (2)$$

$$\frac{dW}{dt} = \phi \frac{[W_{\infty}(V) - W]}{\tau_W(V)} \quad (3)$$

Se conciben tres canales: uno de calcio, uno de potasio y uno de naturaleza inespecífica (corriente de fuga). La variable W determina la fracción de canales de potasio que están abiertos. Los canales de calcio responden a los cambios de voltaje tan rápidamente que m se transforma instantáneamente en m_{∞} . La constante de



tiempo es tan pequeña que los cambios en la compuerta son prácticamente inmediatos. Además la corriente de Ca^{2+} no presenta inactivación. La corriente de calcio entrante y la saliente de potasio compiten y determinan la evolución del voltaje.

Módulo IV: Graficado en plano de fases (aspectos biológicos y motivacionales)

Existen ecuaciones que no pueden ser resueltas analíticamente, o bien es muy difícil hacerlo. En ese caso resulta importante considerar la información cualitativa que puede ser obtenida acerca de sus soluciones, sin realmente resolver la ecuación. En el plano de fases (dos dimensiones) existe una trayectoria representativa de la dinámica del sistema. Lo que se proyecta en el plano de fases son órbitas que pueden tener diferentes propiedades que no se aprecian en otras formas de graficar. En la dinámica de la actividad eléctrica del músculo de perche se encuentran ciclos límite, trazo espiral y bucles.

MATERIAL Y MÉTODO

Se diseñó y desarrolló un paquete didáctico que está formado por un multimedia y un simulador. El multimedia fue implementado con el programa Macromedia Flash MX®. El simulador fue desarrollado con el programa Visual Basic versión 6.0 para que se ejecute en ambiente Windows® desde XP a Windows® 10. El simulador está basado en el modelo matemático de Morris-Lecar (1981). Las ecuaciones diferenciales fueron resueltas por el método numérico de Euler.

RESULTADOS

I. Multimedia del músculo de perche

Se elaboró la primera versión multimedia de un módulo didáctico sobre el modelo estructural del músculo estriado del perche *Balanus nubilus*. En la pantalla de inicio para el usuario, se muestra un botón <<comenzar>> para iniciar la navegación. Al presionar sobre el botón <<comenzar>>, se despliega otra pantalla que muestra el



menú principal del programa (Figura 1), que consta de seis secciones, correspondientes a los niveles de organización biológica del sistema muscular, desde el modelo animal hasta el molecular: (1) Modelo animal: percebe gigante *B. nubilus*, (2) Modelo muscular: un músculo adductor y uno retractor, (3) Modelo tisular: estructura de la fibra muscular, (4) Modelo celular: componentes subcelulares, (5) Modelo subcelular: arreglo estructural de la sarcómera y (6) Modelo molecular: interacción de las proteínas motoras.

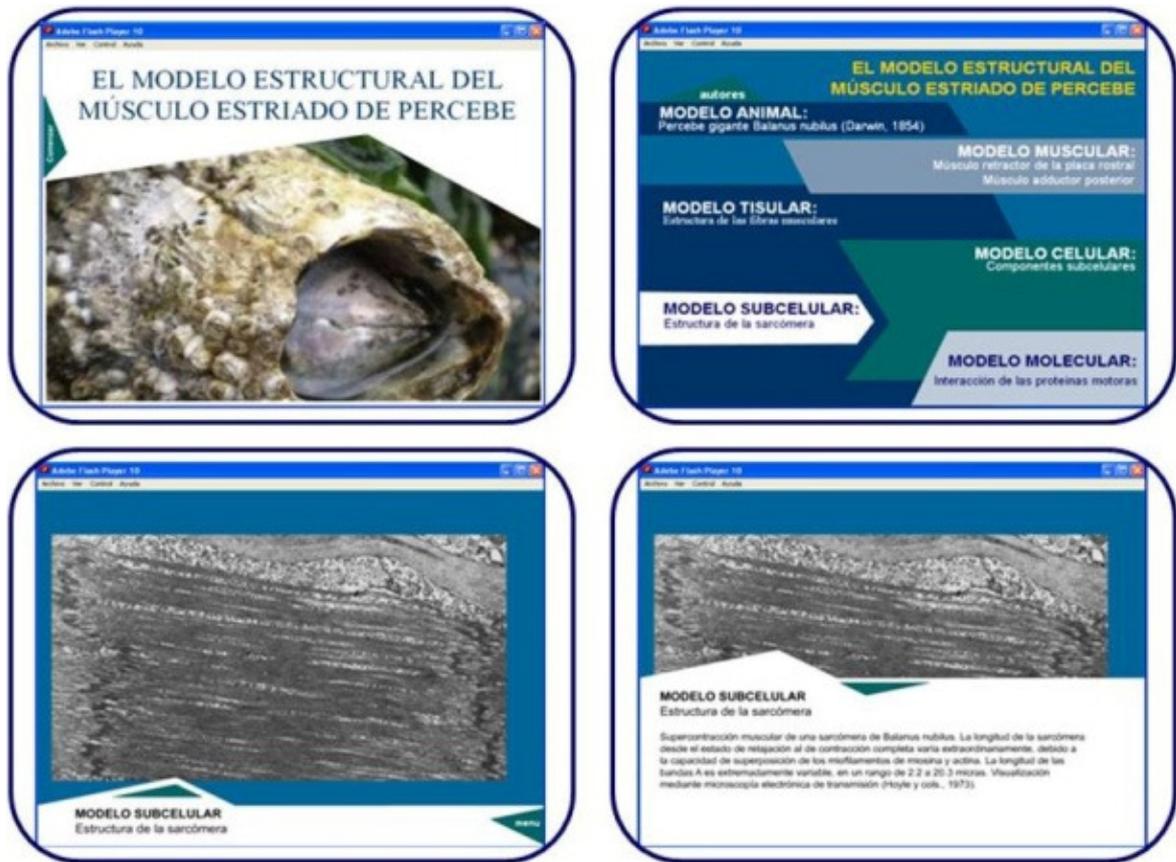


Fig. 1. Pantallas del programa multimedia “El modelo estructural del músculo estriado del percebe”. En esta figura se muestran cuatro de las pantallas del programa: la pantalla de inicio del programa, la del menú principal y dos ejemplos del material visual. En general, el multimedia consiste de una serie de materiales didácticos que explican la organización biológica muscular del percebe, desde el modelo animal hasta el molecular.



Este producto multimedia carece de una secuencia de navegación fija o pre-establecida, de modo que cada usuario puede acceder o salir a la sección de su elección en el orden que decida. Todas las pantallas de las secciones muestran el título de la sección y el submenú de acceso al material visual, micrográfico e informativo. Aquí se presentaron como ejemplo el módulo de imágenes ilustrativas y de material fotográfico.

Imágenes ilustrativas

El módulo incluye una galería de imágenes ilustrativas de la estructura morfológica muscular, desde esquemas hasta dibujos computacionales tridimensionales, con la intención de que los usuarios se familiaricen con las representaciones gráficas sencillas que les faciliten la comprensión conceptual de la información teórica. Todas las imágenes se clasificaron y distribuyeron de acuerdo al nivel de organización del sistema biológico (Figura 2).

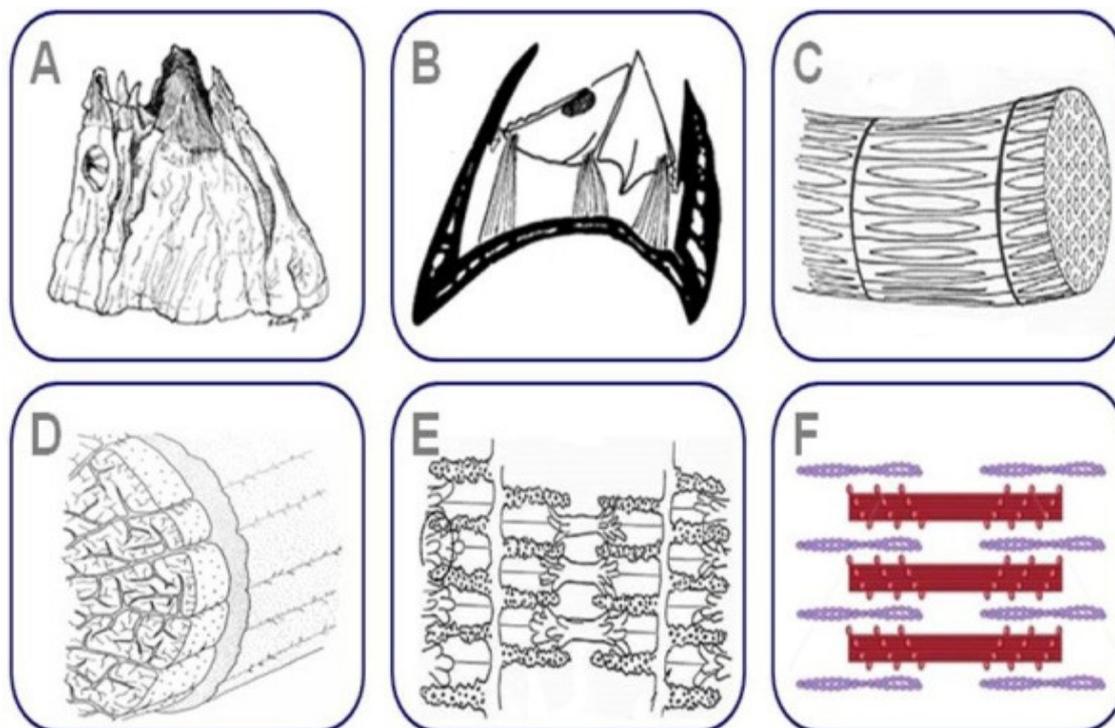


Fig. 2. Organización biológica estructural del músculo estriado del percebe gigante *Balanus nubilus*. Se muestran algunos ejemplos de los esquemas básicos utilizados para explicar los

diferentes niveles de organización. A: El modelo animal (percebe gigante); B: El modelo muscular (músculos adductor y retractor de las placas); C: El modelo tisular (fibra muscular aislada); D: El modelo celular (componentes subcelulares de la fibra muscular estriada); E: El modelo subcelular (arreglo estructural de la sarcómera); y F: El modelo molecular (interacción de los miofilamentos proteicos de actina y miosina). En las pantallas del programa multimedia, cada esquema utilizado cuenta con una descripción breve y los créditos del esquema utilizado.

Material fotográfico

El módulo también incluye una galería de imágenes fotográficas de la estructura morfológica muscular, obtenidas de artículos científicos, con la finalidad de que los usuarios conozcan el sistema biológico real, que les permita contrastar las diferencias. Nuevamente, las imágenes se clasificaron y distribuyeron de acuerdo al nivel de organización biológica del sistema muscular (figura 3).

II. Simulador de la actividad eléctrica del músculo de percebe

Se diseñó y desarrolló un simulador del modelo de Morris-Lecar que permite el estudio de la dinámica del tren de potenciales de acción que se producen por la inyección de corriente constante de estímulo en el músculo rostral depresor en el percebe *Balanus nubilus*. Es ejecutable en ambiente Windows®. El simulador está basado en el modelo matemático propuesto por Morris y Lecar en 1981. La estimulación constante produce una variedad de tipos de comportamiento oscilatorio cuando el medio interno contiene el quelante de Ca^{2+} , EGTA. Las oscilaciones se suprimen cuando la concentración de Ca^{2+} externa es removida del medio externo, o si se bloquea la conductancia de K^+ .



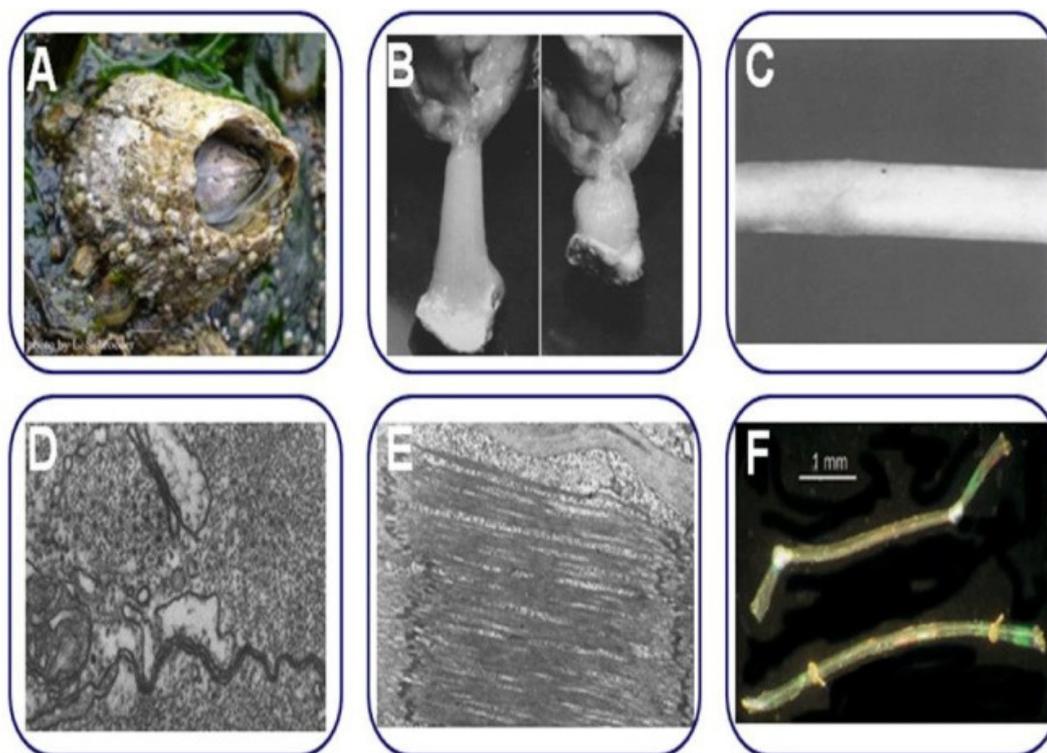


Fig. 3. Organización biológica estructural del músculo estriado del percebe gigante *Balanus nubilus*. Se muestran algunos ejemplos del material fotográfico utilizado para explicar los diferentes niveles de organización. A: El modelo animal (percebe gigante); B: El modelo muscular (músculos adductor y retractor de las placas); C: El modelo tisular (fibra muscular aislada); D: El modelo celular (componentes subcelulares de la fibra muscular estriada); E: El modelo subcelular (arreglo estructural de la sarcómera); y F: El modelo molecular (interacción de los miofilamentos proteicos de actina y miosina). En las pantallas del programa multimedia, cada fotografía utilizada cuenta con una descripción breve y los créditos de las imágenes utilizadas.

Descripción del simulador y ejemplos de simulaciones

El programa computacional funciona de manera interactiva y está formado de cuatro submódulos: (1) <<POTENCIALES DE ACCIÓN>>, (2) <<POTENCIALES DE ACCIÓN CAMBIO DE VARIABLES>>, (3) <<PLANO DE FASE>> y (4) <<PLANO DE FASE CAMBIO DE VARIABLES>>. Para acceder a estos submódulos se oprime el botón correspondiente del menú que aparece en la pantalla inicial (figura 4).

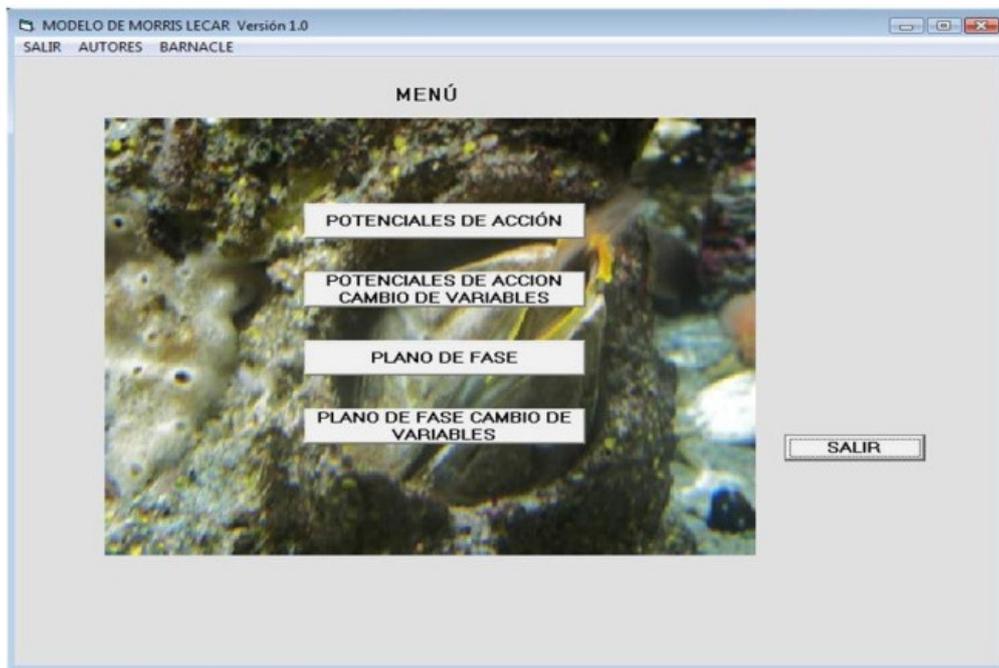


Fig. 4. Ventana de interfaz que aparece al ejecutarse el programa. El usuario puede acceder a cualquiera de las cuatro simulaciones indistintamente o salir del programa.

Cuando se selecciona el botón <<POTENCIALES DE ACCIÓN>> se accede a la ventana de interfaz del usuario (Figura 5). Aquí se muestra en la parte central un recuadro que corresponde al osciloscopio, donde se presenta el tren de potenciales de acción. El eje horizontal corresponde al tiempo (ms) y el eje vertical corresponde al voltaje (mV). La escala es de 0 a 500 ms y de -80 a 90 mV, respectivamente. Del lado derecho de la ventana y arriba se encuentra un recuadro amarillo donde se ingresa el valor de la corriente de estímulo en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Se recomiendan valores de 1 a 150. Abajo, se encuentran dos botones <<REGRESAR AL MENÚ>> y <<SALIR>>. La acción de estos botones son: regreso al menú principal y salir del programa, respectivamente. Todas las ventanas de interfaz cuentan con estos botones, de manera que siempre se puede regresar y seleccionar otra simulación, o si se desea, salir del programa.

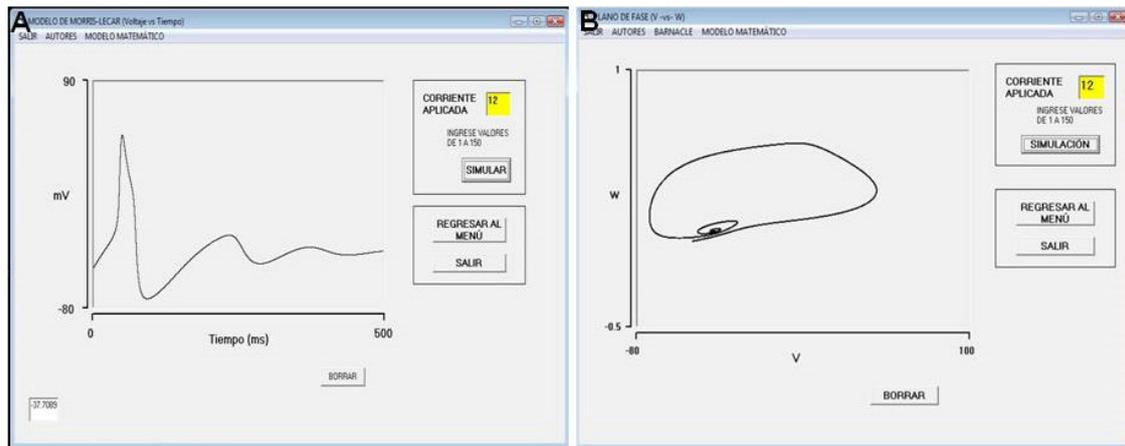


Fig. 5. Ventana de Interfaz y ejemplo de simulación. (A) se muestra la respuesta al estímulo de corriente de $12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. La corriente es lo suficientemente grande para generar un potencial de acción y producir una oscilación del potencial de membrana. (B) se muestra la dinámica correspondiente en el plano de fase, se observa un trazo espiral y se muestra un punto de equilibrio al cual se llega con un bucle.

Cuando se incrementa la estimulación a $16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, se observa como respuesta la generación de cuatro potenciales de acción en 500 ms. La despolarización se debe a una corriente entrante de calcio y la repolarización a una corriente saliente de potasio. Al observar con detenimiento la repolarización, se notan dos partes una lenta que va del pico del potencial de acción a un tercio de la repolarización y se sigue con una segunda parte que es más rápida; el efecto es una pequeña prominencia en la repolarización (figura 6). En B, el trazo correspondiente en el plano de fase. Cada potencial de acción corresponde a un ciclo en el plano de fase. Se observa que en este caso no se presenta un punto estable.

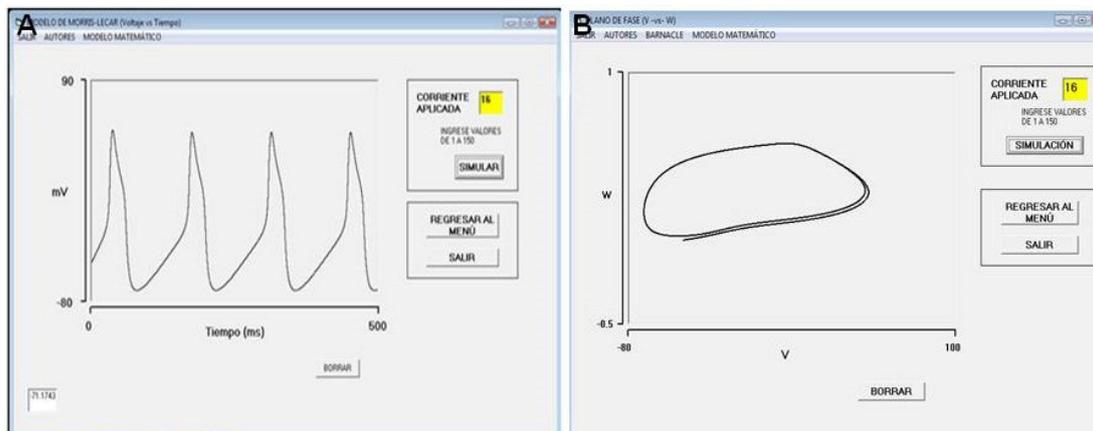


Fig. 6. (A) se muestra la respuesta a $16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Se generan varios potenciales de acción. (B) se observa un ciclo completo que corresponde a un proceso que oscila sin cambios, hasta formar lo que se llama un ciclo límite. Se observa que para producir una secuencia de potenciales (tren) es necesario dar un estímulo grande, esta es una característica del modelo de Morris-Lecar.

Las oportunidades de análisis dinámico que ofrece este modelo matemático se pueden incrementar cuando se tiene acceso a todos sus parámetros. Los simuladores: Potencial de acción cambio de variables y Plano de fase cambio de variables, permiten al usuario modificar cada uno de los parámetros y observar los cambios que se producen en el tren de potenciales de acción y en la dinámica en el plano de fase. Para ingresar a estos submódulos simplemente se seleccionan los botones correspondientes en la pantalla de inicio, donde se encuentra el menú principal. Se recomienda a los usuarios, primero cambiar de forma independiente cada uno de los parámetros; por ejemplo, mover el valor hacia arriba y después hacia debajo de cada una de las variables. Se tiene que explorar, en el trazo de voltaje, cambios en la frecuencia de disparo y en la forma del potencial de acción. Realizar los mismos cambios de este parámetro en el plano de fase para poder asociar qué pasa en la dinámica correspondiente: observar la presencia de un ciclo límite, un punto estable como un nodo o un trazo espiral como un bucle.

En la figura 7, el trazo en el tren de disparo y en el plano de fase cuando los valores de cada uno de los parámetros permanecen con valores de default, es decir, los valores iniciales propuestos por Morris y Lecar (1981).



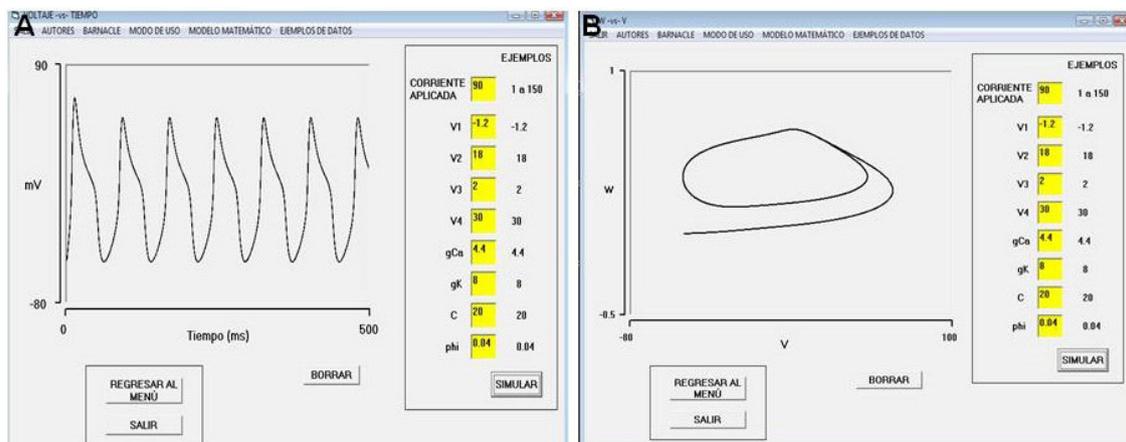


Fig. 7. (A) Pantallas de interfaz donde se muestran los trazos de voltaje $-v$ - tiempo y (B) la dinámica correspondiente en el plano de fase. Los parámetros fueron: $I_{app}= 90$, $V_1=-1.2$, $V_2=18$, $V_3=2$, $V_4=30$, $g_{Ca}=4.4$, $g_K=8$, $C=8$, $\phi=0.04$.

DISCUSIÓN

Los métodos para la enseñanza de las ciencias cambian constantemente. Van desde técnicas de repetición, técnicas de lectura de comprensión, solución de problemas, trabajo en equipo, construcción de mapas conceptuales, programas de cómputo basados en estímulos, obras de teatro, videograbación, canciones, podcast, programas de radio y televisión, películas, reportajes, por proyectos, por investigación y con las facilidades de los equipos de cómputo actuales, páginas Web, presentaciones en PowerPoint, Flash, blogs, creación de materiales multimedia, uso de redes sociales y simuladores computacionales (Gómez 2014). En todos los casos, siempre buscando un aprendizaje que ha cambiado también, y va desde un aprendizaje por habituación o sensibilización, cooperativo, colaborativo, observacional, emocional, experiencial, memorístico, repetitivo, por descubrimiento, por investigación, hasta el significativo (Alban 2010; Ruiz 2007; Porlán 1993). En las ciencias biológicas, la enseñanza-aprendizaje de conceptos es difícil porque los alumnos requieren, en todos los casos, de conocimientos previos (Morales 2009). El uso de cualquier tecnología o método es insuficiente cuando no se cuenta con una sólida base de conocimientos previos. En la propuesta pedagógica que se presenta, se hace énfasis en los conocimientos previos

de ecuaciones diferenciales y su solución por lo menos de manera básica, de circuitos eléctricos resistivos y capacitivos y el modelo matemático de Hodgkin y Huxley. Con estos conocimientos y los nuevos adquiridos se podría alcanzar un conocimiento significativo. En este trabajo se optó por el desarrollo de un multimedia y de simuladores. Con la finalidad de lograr un aprendizaje colaborativo, donde el profesor guía dirige el orden y la temática de estudio; y un aprendizaje por descubrimiento, donde el alumno modifica valores de variables y estudia el efecto que tienen en el sistema biológico y su relación con otras variables. Con el simulador se reproducen los resultados experimentales. El aprendizaje por investigación es otra de las formas que se pretende propiciar con estas herramientas didácticas. Por otro lado, se presume que los alumnos estudian biología por vocación, incluso en algunos casos, en desacuerdo con sus padres. En consecuencia, tienen una motivación intrínseca. Con la finalidad de mantener esta motivación, la temática seleccionada tiene que ver con un proceso biológico que es extraordinario en el sentido de que la contracción muscular de este músculo, tan pequeño, que tiene que alcanzar una fuerza sorprendente para abrir las placas y se pueda alimentar. La actividad eléctrica también es diferente; los potenciales de acción son de Ca^{2+} y con estímulos grandes el patrón de disparo se hace complejo. Para observar este comportamiento, nada mejor que un simulador computacional. El uso del programa para probar su usabilidad y resultados correctos mostró ser de fácil manejo. Queda pendiente su uso en un próximo curso de biofísica para estudiar su impacto en el aprendizaje.

CONCLUSIONES

En el campo morfoelectrofisiológico, la resolución de problemas biológicos es indispensable para lograr un aprendizaje significativo que integre conocimientos de diferentes disciplinas. Con los simuladores, el alumno podrá descubrir cómo con estímulos de alta intensidad la actividad eléctrica del músculo de percebe cambia sus patrones de disparo. Además, al modificar variables podrá determinar cómo algunas de ellas incrementan la frecuencia de disparo, otras aumentan la amplitud del potencial de acción y otras más disminuyen la frecuencia e incluso presentan disparo en la despolarización de manera sostenida sin que se repolarice a potenciales de reposo. Conocerá nuevas formas de graficado como el plano de fases y se introducirá a la



interpretación de un sistema dinámico. Todo esto tiene sentido en un contexto de aprendizaje integral que guíe al alumno: en lo anatómico, desde lo macroscópico a lo molecular; en lo fisiológico desde la contracción muscular hasta la electrofisiología y en lo teórico, desde lo matemático hasta la representación gráfica. Las herramientas didácticas presentadas aquí son útiles en el aprendizaje de conceptos en el marco de un aprendizaje constructivista guiado. El multimedia y los simuladores son de inestimable ayuda en materias de tipo práctico, como la biología, permitiendo una visión dinámica y presuntiva de los procesos biológicos en general y en particular de la anatomía y fisiología del músculo de percebe.

REFERENCIAS

Albán S. O. (2010). Metodologías didácticas aplicadas por los docentes en las ciencias naturales para el desarrollo de destrezas básicas. Ibarra, Ecuador. [Visto 30/03/2014] http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/10454/1/41598_1.pdf

Bergdoll S., Koch U. T. (1995). "BIOSIM –A biological neural network simulator for research and teaching, featuring interactive graphical user interface and learning capabilities". *Neurocomputing*, 8:93-112.

Bulu S. T., Pedersen S. (2010). "Scaffolding middle school students' content knowledge and ill-structured problem solving in a problem-based hypermedia learning environment". *Educational Technology Research and Development*, 58(5):507-530.

Cartier J. L., Stewart J. (2000). "Teaching the nature of inquiry: further developments in high school genetics curriculum". *Science and Education*, 9:247-267.

Chang C. Y. (2001). "Comparing the impacts of a problem-based computer-assisted instruction and the direct-interactive teaching method on student science achievement". *Journal of Science Education and Technology*, 10(2):147-153.



Da Silva R. R., Bissaco B. M. A., Goroso D. G. (2015). "MioLab, a rat cardiac contractile force simulator: Applications to teaching cardiac cell physiology and biophysics". *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 122(3):480-490.

Diez, D. (2009). Aprendizaje significativo del concepto de gen entre estudiantes de biología. *upel-ipc Venezuela. Enseñanza de las Ciencias, Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona*, pp. 313-316
<http://ensciencias.uab.es/congreso09/numeroextra/art-313-316.pdf>

Gaytan G. S. P., Pásaro D. Ma. R., Pontiga R. F. (2001). "Programa piloto de aprendizaje interactivo de la neurobiología: nuevas estrategias de enseñanza de la electrofisiología". *Revista de Enseñanza Universitaria*, 18:73-80.

Goldin G., Javier C. (1998). "Representations and the psychology of mathematics education: Part I". *Journal of Mathematical Behaviour*, 17(1):1-4.

Gómez C. M. E. (2014). "El material didáctico expuesto en clase como instrumento de educación para la paz". *Revista de Paz y Conflicto*, 7:155-174.

Hagiwara S., Hayashi H., Takahashi K. (1969). "Calcium and potassium currents of the membrane of a barnacle muscle fibre in relation to the calcium spike". *The Journal of Physiology*, 205(1):115-29.

He J. H., Wu X. H. (2005). "A modified Morris-Lecar model for interacting ion channels". *Neurocomputing*, 64:543-545.

Hodgkin A. L., Huxley A. F. (1952). "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve", *The Journal of Physiology*, 117:500-544.

Keynes R. D., Rojas E., Taylor R. E., Vergara J. (1973). "Calcium and potassium systems of a giant barnacle muscle fibre under membrane potential control". *The Journal of Physiology*, 229:409-455.



Lesh R., Post T., Behr M. (1987). Representations and translations among representations in mathematics learning and problem solving. In C, Javier (ed). *Problems of representation in the teaching and learning of mathematics*. NJ:Lawrence Er, pp. 33-40.

López T. A., Nava M. M. E., Moreno C. R. (2013). "Exploración de los estilos de aprendizaje en los estudiantes de la carrera de biología". *Revista Estilos de Aprendizaje*, 6:118-138.

Morales U. E. M. (2009). "Los conocimientos previos y su importancia para la comprensión del lenguaje matemático en la educación". *Universidad Ciencia y Tecnología*, 13(52):211-222.

[visto 01/03/2007] http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000300004

Morris C., Lecar H. (1981). "Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber". *Biophysical Journal*, 35(1):193-213.

Mounier Y., Vassort G. (1975). "Initial and delayed membrane currents in crab muscle fibre under voltage-clamp conditions". *The Journal of Physiology*, 252:589-608.

Murayama K., Laksminarayanaiah N. (1977). "Some electrical properties the membrane of the barnacle fibers under internal perfusion". *The Journal of Membrane Biology*, 35:257-283.

Nakhlek M. B., Krajcik J. S. (1993). "A protocol analysis of the influence of technology on students' actions, verbal commentary, and thought processes during the performance of acid-base titrations". *Journal of Research in Science Teaching*, 30:1149-1168.

Pintrich P., García T. (1993). "Intraindividual differences in students' motivation and selfregulated learning". *German Journal of Educational Psychology*, 7(3):99-107.



Porlán R. (1993). *Constructivismo y escuela. Hacia un modelo de enseñanza aprendizaje basado en la investigación*. Díada Editora, Sevilla.

Reyes-Lazalde A., Reyes-Monreal M., Pérez-Bonilla M. E. (2016). "Experimentación virtual con el simulador Dosis-Respuesta como herramienta docente en biología". *Apertura: Revista de Innovación Educativa*, 8(2):22-37.

Rinaudo M. C., Chiecher A., Donolo D. (2003). "Motivación y uso de estrategias en estudiantes universitarios. Su evaluación a partir del Motivate Estrategias Liaoning Questionare". *Anales de Psicología*, 19(1):107-119.

Ruiz O. F. J. (2007). "Modelos didácticos para la enseñanza de las ciencias naturales". *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 3(2):41-60.

Wang H., Lu Q., Wang Q. (2005). "Generation of firing rhythm patterns and synchronization in the Morris-Lecar neuron model". *The International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 6(1):7-12.

Ybarrondo B. A. (1984). *A study of the effectiveness of computer-assisted instruction in the high school biology classroom*. Report No. SE046309. (Esat Lansing, MI: National Center for Research on teacher Learning). [visto: 28/02/2017] <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED265015>.

