



Construcción de modelos sobre respuestas biológicas de seres vivos frente a estímulos externos

Construction of Models on Living Beings' Biological Responses to External Stimuli

Nazira Píriz Giménez*

Profesora del Instituto de Profesores Artigas, Consejo de Formación en Educación, Administración Nacional de Educación Pública, Montevideo, Uruguay

Lydia Galagovsky

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto Centro de Formación e Investigación en Enseñanza de las Ciencias (CEFIEC), Universidad de Buenos Aires, Argentina.
lydia.galagovsky@gmail.com

RESUMEN • Se presenta una experiencia didáctica sobre el fenómeno biológico de la irritabilidad de los seres vivos. La propuesta consistió en que 81 estudiantes, futuros docentes de Biología, crearan modelos *ad hoc* para interpretar las reacciones de seres vivos ficticios insertados en contextos biológicos fantásticos, tomados de dos escenas de la película Avatar*.

Los dos objetivos fueron a) analizar las dificultades de los estudiantes durante el proceso de modelización; b) detectar las estrategias de la intervención docente que favorecieron la superación de obstáculos de aprendizaje.

Se presentan las características generales de la propuesta didáctica, ejemplos de los tres tipos principales de obstáculos epistemológicos encontrados y las estrategias docentes que contribuyeron a la superación de tales dificultades.

PALABRAS CLAVE: Modelizar; Irritabilidad en seres vivos; Formación docente; Modelos ficticios; Modelos científicos.

ABSTRACT • A didactic experience is presented concerning the biological phenomenon of irritability in living beings. The proposal consisted of 81 Biology teachers in training that create *ad hoc* models to interpret fictional living beings' reactions inserted in fantastic biological contexts, taken from two scenes from the movie Avatar*.

The two objectives were a) to analyze the students' difficulties during the modeling process; b) to detect the teaching strategies that favored the overcoming of learning obstacles.

The general characteristics of the didactic proposal, the examples of the three main types of epistemological obstacles encountered, and the teaching strategies that contributed to overcome such difficulties are presented.

KEYWORDS: Modeling; Living beings' irritability; Teacher training; Fictional models; Scientific models.

* Dulce e incansable Nazira (17/06/1968-08/03/2023), nos has dejado tu inmenso legado

Recepción: enero 2023 • Aceptación: febrero 2024 • Publicación: junio 2024

INTRODUCCIÓN

Numerosas publicaciones refieren la importancia de que los estudiantes logren aprender modelos científicos (Izquierdo, 2005; Develaki, 2007; Sensevy et al., 2008; Galagovsky, 2011; Tamayo Alzate, 2013; Adúriz-Bravo, 2015; Gomez Galindo, 2013, 2014; Lombardi et al., 2016; Acevedo-Díaz et al., 2017; Upmeier zu Belzen et al., 2019; Oliva, 2019; Díaz Guevara et al., 2019; Machado y Levy, 2021; Garrido Espeja et al., 2022). Sin embargo, aprender ciencia no es solo repetir contenidos de modelos científicos –en tanto productos teóricos obtenidos por la ciencia–, sino también adquirir la propia actividad de generarlos (Couso et al., 2020).

Aprender a modelizar es aprender a idear marcos interpretativos que permitan desarrollar competencias tales como describir, predecir, explicar e intervenir en fenómenos apelando a sus mecanismos causales, de acuerdo con lo que ya se sabe y con la capacidad de transferir esos saberes a otros contextos (Thagard, 2010; Schwarz et al., 2009; Acher, 2014; Couso et al., 2020). Modelizar en situación de aula, por lo tanto, impone el gran desafío de generar ambientes didácticos en los cuales los estudiantes desarrollen representaciones mentales originales que articulen las competencias mencionadas, y adquieran capacidades de argumentar y comunicar dichas representaciones mentales.

Específicamente, comprender un modelo biológico requiere vincular procesos que atraviesan niveles de organización, con coherencia vertical de mecanismos no lineales, donde confluyen explicaciones físicoquímicas, acciones de moléculas a nivel bioquímico, mecanismos de señalización celular, mecanismos fisiológicos, etc. (Fröhlich, 1986; Adúriz Bravo y Revel Chion, 2019; Gómez Galindo y García Franco, 2021; Ocelli, Pomar y Gómez Galindo, 2022; Couso, 2020; Píriz et al., 2023). Sin embargo, a pesar de una enseñanza correcta, frecuentemente se ha confirmado que estudiantes de biología suelen aprender fragmentos de contenidos, desconectados entre sí (Mora Zamora, 2002; Marzábal et al., 2014; Píriz et al., 2018; Jördens et al., 2016; Umpiérrez et al., 2023; Schneeweiß y Gropengiesser, 2019; Pérez et al., 2021).

El presente trabajo es parte de una experiencia didáctica que se desarrolló en la asignatura de Biofísica para estudiantes del primer año de una carrera pública de formación docente en Biología –Profesorado de Ciencias Biológicas, en el Instituto Artigas, de Montevideo, Uruguay–, en el nivel terciario no universitario.

La propuesta didáctica amplió el tema del sistema nervioso animal –recurrentemente enseñado desde la escuela primaria (Gómez Galindo, 2014)–, incluyendo la irritabilidad como respuesta biológica de los seres vivos (Cingolani y Houssay, 2000; Cooper y Hausman, 2006; Cortés, 2013; Varela, 2010; Píriz, 2016; González Novoa, 2016). Debido a la complejidad y variedad de los mecanismos biofísicos, bioquímicos, subcelulares, celulares y fisiológicos involucrados, el tema se aborda, generalmente, en el nivel de los estudiantes de profesorado, donde se han detectado dificultades en su aprendizaje (Píriz et al., 2018; Píriz y Galagovsky, 2021; Píriz, 2022).

La propuesta didáctica se extendió por un período de diez semanas dentro de la modalidad de enseñanza virtual, durante 2020 y 2021. La experiencia fue monitoreada desde dos aspectos: por un lado, se deseaba investigar qué competencias cognitivas lograban desarrollar los estudiantes en relación con el proceso de modelización (Umpiérrez et al., 2023) y, por otro, interesaba detectar sus dificultades frente a la tarea de modelizar. El presente trabajo remite a este último aspecto.

Los objetivos del presente trabajo son a) analizar las dificultades sistemáticas de los estudiantes durante el proceso de modelización y b) detectar las estrategias de la intervención docente que favorecieron la superación de dichos obstáculos de aprendizaje.

La consigna didáctica para los estudiantes fue la de generar modelos biológicos *ad hoc* sobre dos escenas de la película Avatar[®], donde se mostraban respectivos fenómenos de irritabilidad táctil en seres vivos ficticios (figuras 1 y 2). Para resolver la consigna los estudiantes debían imaginar estructuras

biológicas, sus mecanismos de funcionamiento y su intercomunicación, insertando modelos científicos validados por la ciencia en una argumentación coherente y consistente, que atravesara diferentes niveles biológicos (físicoquímico, bioquímico, fisiológico, etc.).

MARCO TEÓRICO SOBRE IRRITABILIDAD DE LOS SERES VIVOS FRENTE A ESTÍMULOS

El sistema nervioso de mamíferos suele ser el tema central con el que escolarmente se enseña la irritabilidad de los seres vivos; además, la capacidad de su excitabilidad fue originariamente asociada exclusivamente a los tejidos muscular y nervioso, mediante el disparo de potenciales de acción. Actualmente, las respuestas a estímulos han sido conceptualmente ampliadas y corroboradas en diversidad de células y organismos, incluyendo plantas y seres unicelulares (Piríz, 2016).

Dentro del modelo de irritabilidad de seres vivos se destacan las respuestas eléctricas de las membranas celulares, entendidas como cambios relativamente breves en el potencial de membrana, determinados por el pasaje de iones a través de ellas. Estas respuestas pueden ser graduadas (electrotonos) o «todo o nada» (potenciales de acción) (Piríz, 2016). Las respuestas graduadas toman nombres específicos como «potencial receptor» o «potencial postsináptico» –según la célula en la que ocurran–, y tienen particular interés tanto en la transducción sensorial como en las sinapsis químicas (Kandel et al., 2001). La capacidad de generar electrotonos está presente en todas las células vivas, y sus características principales son: la conducción con decremento y la sumación en el tiempo y en el espacio, que puede alcanzar el umbral y disparar un potencial de acción.

Las respuestas «todo o nada» cobran importancia en procesos de rápida propagación hacia sitios distantes manteniendo su amplitud.

La presente propuesta plantea desafíos: porque, por un lado, Cortés Cortés (2013) y González Novoa (2016) han señalado específicamente dificultades para un aprendizaje contextualizado sobre el potencial de acción y, por otra parte, Garrido Espeja et al. (2022) han planteado que incluso docentes titulados han encontrado dificultades generales para contextualizar procesos que ocurren a nivel molecular.

LA ELECCIÓN DE DOS EVENTOS FICTICIOS COMO DISPARADORES PARA LA MODELIZACIÓN

Las escenas para las cuales los estudiantes debían crear modelos interpretativos tenían 10-12 segundos de duración cada una y estaban a disposición de los estudiantes. En la escena 1, los avatares recorren un bosque de manera que al tocar o pisar en cada lugar se produce una emisión de luz (figura 1). En la escena 2 se visualizan estructuras similares a plantas que se pliegan y cierran ante el contacto físico con el avatar (figura 2).



Fig. 1. Se muestran cuatro imágenes representativas de la escena 1. Las imágenes a) y b) muestran a un avatar justo antes y después de tocar con la mano una estructura que responde generando luz. La imagen c) muestra que se enciende luz cuando el avatar pisa y la d) señala que se enciende luz cuando pisan los avatares y que tales rastros luminosos van quedando con disminución temporal de la intensidad de luz. Fuente: Avatar*.

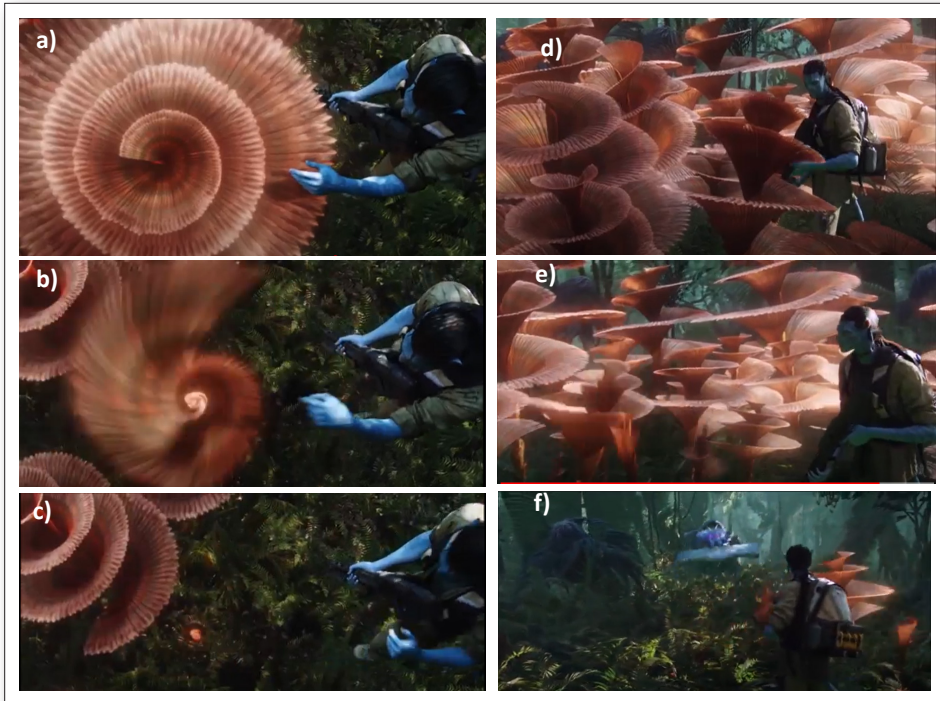


Fig. 2. Se muestran imágenes representativas de la escena 2. Las imágenes a)-c) muestran a un avatar justo antes y después de tocar una estructura que responde replégándose sobre sí misma. Las imágenes d)-e) muestran la desaparición secuencial de estructuras reactivas más lejanas ante la repetición del estímulo a una de ellas. Fuente: Avatar*.

En sus intentos de modelización, se esperaba que los estudiantes encontraran en referencias bibliográficas numerosos elementos teóricos, tales como estructuras y mecanismos, con explicaciones sobre modos de respuesta frente a estímulos externos para variados organismos, presentados para diferentes niveles de organización (físicoquímico, bioquímico, fisiológico, etc.) (Cooper y Hausman, 2006; Píriz, 2016). Sin embargo, dichos elementos solo podrían serles de utilidad en la medida en que ellos supieran insertarlos en un relato explicativo original, imaginado *ad hoc* para interpretar las escenas. Es decir, modelizar les demandaba a los estudiantes comprender los contenidos encontrados en la literatura y, llegado el momento, constituirlos en «evidencias» (Guillaumin, 2005) explicativas parciales dentro de un modelo explicativo completo en el que logran articular –con imaginación y creatividad– relaciones de estructura–función.

En la tabla 1 se resumen aspectos descriptivos de las escenas de Avatar* y los correspondientes dispositivos teóricos –que se encuentran en libros e internet– que podrían integrarse como elementos explicativos de un modelo final imaginario sobre cómo responderían los respectivos seres vivos ficticiales de las escenas, ante los estímulos externos.

Tabla 1.
Relaciones entre aspectos macroscópicos de respuestas a estímulos en las escenas ficticias elegidas y propiedades de respuestas eléctricas de membranas celulares como elementos teóricos para construir posibles modelos explicativos.

<i>Descripción de hechos ficticios macroscópicos que disparan el proceso de modelización</i>	<i>Dispositivos teóricos posibles de ser integrados como elementos explicativos en el modelo final</i>
Escena 1: La emisión de luz se inicia en el sitio de estimulación con una intensidad máxima y continúa en zonas progresivamente más alejadas con una intensidad que decae.	La amplitud en el registro de una respuesta electrofisiológica (graduada) se reduce a medida que esta se conduce (conducción con decremento), es decir, que decae con la distancia (Píriz, 2016; Kandel et al., 2001).
Escena 1: La repetición de un estímulo en una zona recientemente estimulada no modifica la intensidad de la luz emitida, que se mantiene intensa.	La aplicación de un segundo estímulo en una zona donde se disparó un potencial de acción no produce una nueva respuesta; propiedad denominada refractariedad, que es una de las propiedades típicas del potencial de acción (Latorre et al., 1996; Píriz, 2016; Cingolani y Houssay, 2000).
Escena 2: La aplicación de estímulos aislados genera respuestas de plegamiento aisladas, en tanto que la repetición de estímulos determina el cierre de estructuras que no fueron estimuladas (respuesta múltiple).	La aplicación de estímulos subumbrales determina la generación de respuestas electrofisiológicas (graduadas). La repetición de estímulos puede determinar la <i>sumación temporal</i> de dichas respuestas, alcanzando el umbral necesario para disparar un potencial de acción, el cual se propagará sin decremento a lo largo de toda la célula que recibió el estímulo, o bien en células diferentes que se comunicarían por uniones del tipo «gap» (Cingolani y Houssay, 2000; Kandel et al., 2001).

LA PROPUESTA DIDÁCTICA

Población involucrada

La experiencia didáctica virtual se realizó en nueve cursos anuales de la asignatura de Biofísica, durante 2020 y 2021. Esta asignatura consta de 3 horas semanales de 45 minutos cada una. Las tareas desarrolladas fueron idénticas en ambos años y los datos que aquí se exponen provienen de una selección sobre ambos períodos.

Las actividades tomaron las últimas diez semanas de cada año lectivo; las clases virtuales se desplegaron sobre la plataforma Schoology* donde quedaron registrados todos los escritos y discusiones. La

conductora de la propuesta didáctica fue la docente titular de la asignatura. El análisis de todos los datos recogidos y documentados fue realizado en colaboración. Los aportes explícitos de los estudiantes registrados en los foros, en los documentos escritos y en las defensas orales constituyeron las unidades de análisis para dos objetivos de indagación sobre la propuesta didáctica.

Por su alta demanda en compromiso de tiempo y esfuerzo, la propuesta se planteó como optativa, dentro del segundo parcial del curso, donde se evaluaría la comprensión sobre mecanismos teóricos de respuesta de seres vivos frente a estímulos, acorde con la información presentada en los materiales bibliográficos. Iniciaron la tarea 81 estudiantes con edades comprendidas entre 18 y 40 años; la gran mayoría trabajaba y tenía responsabilidades familiares y personales diversas. Se organizaron 19 grupos con 2-3 integrantes cada uno. Si bien los grupos se mantuvieron hasta el final, fueron desgranándose algunos de sus integrantes, de tal forma que fueron 44 estudiantes quienes completaron las tareas.

Desarrollo de la experiencia didáctica

Para el desarrollo de la consigna se plantearon tareas y momentos de discusión, pautados para trabajos sincrónicos o asincrónicos (Ruiz y Dávila, 2016; Kutugata Estrada, 2016; Fernández Oliveras et al., 2020; da Silva Machado et al., 2021; Rodríguez et al., 2021).

Los 81 estudiantes iniciales conformaron un total de 19 grupos, integrado por 2 o 3 estudiantes cada uno. Los grupos se mantuvieron hasta el final, aunque fueron desgranándose algunos de sus integrantes, de tal forma que 44 estudiantes fueron quienes completaron la tarea. El desgranamiento era previsible dado que la propuesta didáctica requería un compromiso y dedicación mayores que el estudio tradicional del tema; por lo cual la actividad no se planteó como obligatoria, sino como un complemento optativo del segundo parcial del curso.

En la plataforma Schoology[®] se habilitaron siete encuentros sincrónicos: uno de presentación, uno de cierre y cinco foros comunes de discusión (FC) en los que se trabajaba sobre la interpretación de dispositivos teóricos encontrados por los estudiantes en libros o internet. Cada grupo contaba con dos foros específicos asincrónicos (FE) –uno para cada escena a modelizar–. En la tabla 2 se resumen las actividades desarrolladas cada semana. En total se analizaron 76 creaciones: 38 instancias de modelización inicial (en la 4.ª semana) y 38 modelos finales (cada uno de los 19 grupos generó modelos para sendas escenas ficticias).

Tabla 2.
Cronograma de actividades desarrolladas durante las últimas diez semanas del curso virtual anual de Biofísica, indicando encuentros sincrónicos (ES), foros específicos por grupo (FE) y foros comunes de discusión (FC).

<i>Semana</i>	<i>Actividad realizada por estudiantes</i>	<i>Tipo de actividad</i>
1	Explicación de la consigna de trabajo. Visionado de escenas de película.	ES
	Cada grupo aportó descripciones iniciales sobre las escenas.	FE
	Presentación de simulador Nerve [®] (Benzanilla, 1998). Interpretaciones de resultados a partir de su uso y resolución de problemas.	FC
2 y 3	Cada grupo amplió sus descripciones y propuso términos de búsqueda de información.	FE
	Continuó el uso y discusión de problemas sobre el simulador Nerve.	FC
	Cada grupo mejoró la terminología utilizada y avanzó en la propuesta de aspectos parciales de la modelización	FE

<i>Semana</i>	<i>Actividad realizada por estudiantes</i>	<i>Tipo de actividad</i>
4	Cada grupo presentó un primer esbozo de modelo explicativo.	FE
5	Resolución y discusión de situaciones problemas sobre bases moleculares del potencial de acción del axón gigante del calamar.	FC
	Discusión de situaciones problema sobre el potencial de acción.	ES
	Cada grupo recibió la devolución escrita de su primer modelo explicativo.	FE
6 y 7	Resolución de situaciones problema sobre contracción muscular.	FC
	Revisión y mejora de modelos construidos a partir de devoluciones de la docente.	FE
8 y 9	Continúan ajustes y mejoras de modelos construidos a partir de devoluciones de la docente.	FE
10	Presentación y defensa oral de modelos explicativos finales aplicados a cada contexto ficticio.	ES

Cada grupo generó dos modelos, uno para cada escena ficticia. En la 4.^a semana se presentaron los modelos iniciales y en la 10.^a los modelos finales. En total fueron 19 modelos, totalmente diferentes entre sí, para cada escena (38 modelos en total).

La evaluación de los estudiantes en relación con esta propuesta fue de tipo procesual, hasta llegar a modelos finales apropiados; es decir, la evaluación fue muy diferente de una tradicional (Álvarez Valdivia, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio se centró sobre las dudas, errores y obstáculos transitados por los estudiantes durante sus procesos de aprender a modelizar, así como el análisis de las respectivas estrategias docentes que contribuyeron a su superación. Paralelamente a este, otro estudio utilizando categorías derivadas de un Repertorio de Competencias Científicas (RCC) (Umpiérrez, 2019) mostró que los estudiantes lograron 15 de las 27 competencias modelizadoras propuestas por el RCC (Umpiérrez et al., 2023).

Los resultados se presentan a continuación discriminados en tres fases, en consistencia con tres tipos de obstáculos epistemológicos encontrados durante el proceso de modelización. Estas fases no se corresponden con esquemas o partes de ciclos tradicionales sobre cómo indagar, argumentar o modelizar en clase (Couso et al., 2020), dado que no se esperaba arribar a un único modelo científico «final o verdadero», sino que se esperaba libertad imaginativa para articular creativamente diferentes modelos finales, utilizando informaciones sobre modelos teóricos parciales ya validados en la literatura científica.

Las tres fases se articulan con ubicaciones temporales de la propuesta didáctica (tabla 2) y fueron:

- Primeras descripciones de las escenas (semana 1, tabla 2).
- Primeras propuestas de relaciones estructura-función (semanas 2 y 3, tabla 2).
- Primeros modelos explicativos (semanas 4-9, tabla 2).

A continuación, se ejemplifica cada fase discutiendo los obstáculos epistemológicos detectados y las estrategias pertinentes dadas por la docente para orientar a los estudiantes a superar sus estancamientos en el proceso de modelización. Los ejemplos han sido seleccionados a partir de todos los datos registrados (Vasilachis, 2006; Monge Acuña, 2015), en función de sustentar cada obstáculo epistemológico; es decir, donde no tiene importancia el tamaño muestral, sino la relevancia representativa de estos.

Primeras descripciones de las escenas

La mayoría de los relatos iniciales se focalizaron en descripciones de aspectos macroscópicos de las escenas, con utilización de un lenguaje cotidiano, poco preciso. Ejemplos de estas descripciones son: i) «Se trata de seres bioluminiscentes, los cuales se sienten invadidos, reaccionan a modo de defensa haciendo que se produzca luz»; ii) «Se transmite algo que se propaga»; iii) «Con el contacto se prenden luces en diferentes lugares»; iv) «Al contacto se produce luz o se produce movimiento»; v) «Cuando el estímulo se repite no se cierra una sola estructura, sino varias».

Las intervenciones docentes orientaron para que las descripciones involucraran variables dentro de cada par estímulo-respuesta. Por ejemplo, se hicieron preguntas sobre el tiempo entre estímulo y la reacción, sobre la intensidad, la propagación –o no–, la sincronicidad –o no– y las relaciones entre intensidades y distancias de propagación de las respuestas. En la tabla 3 se presentan cuatro ejemplos de orientaciones, con las respectivas respuestas de los estudiantes. En la columna de la derecha se presenta cómo la precisión de variables permitiría encontrar elementos teóricos correlacionables.

Tabla 3.
Orientaciones docentes para mejorar las descripciones iniciales de las escenas y sus impactos para el posterior aprendizaje.

<i>Orientaciones docentes</i>	<i>Ejemplos de respuestas de los estudiantes</i>	<i>Elementos teóricos correlacionables</i>
Uds. plantearon que a partir del contacto físico del avatar se produce una emisión de luz. ¿Ambos eventos ocurren en el mismo lugar?, ¿veríamos la luz si esta se emitiera únicamente en el lugar donde se pisa?	«No la veríamos si fuera solo en el lugar de contacto y se parara allí... El fenómeno se produce desde la zona en donde llegó el estímulo físico al tocar o rozar alguna parte de dichas especies y se va expandiendo». «¡Ah! La respuesta es que se va expandiendo...»	Reflexionar sobre la distancia espacial y temporal entre el estímulo y la respuesta de emisión de luz, para deducir alternativas de respuestas eléctricas según la propagación (sin decremento) o conducción (con decremento) del estímulo.
Cuando un avatar pisa un tronco determina la emisión de luz. Enseguida, el segundo avatar pisa exactamente en el mismo lugar. ¿Qué ocurre con la emisión de luz?, ¿cambia la su intensidad?	«No cambió la intensidad de la luz. No sé si estará bien, pero se podría relacionar con un período refractario...».	Reconocer la no existencia de cambios en la intensidad de las respuestas ante la reiteración del estímulo permite llegar al concepto de refractariedad aplicado al disparo de potenciales de acción.
El avatar toca y la respuesta es el cierre de estructuras. ¿Cambia el tipo de respuesta a medida que se repite la estimulación?	«Ocurre una reacción en cadena de varias plantas... Podemos suponer que están conectadas entre sí, por un sistema semejante al sistema nervioso en el cuerpo humano». «Tal vez cada una de esas «plantas» sean una única célula, entonces cuando toca el avatar el estímulo no sea demasiado grande y logre solo una reacción solo local».	Reflexionar sobre la comunicación entre diversas estructuras biológicas –ficticias para estas escenas– permitirá explicar que la estimulación aplicada en una de ellas genere respuesta en otras; o bien, que se trate de una única estructura que pudiera actuar por diversos mecanismos.
¿Cómo es posible que un primer estímulo determine una respuesta aislada, y que su repetición determine una respuesta múltiple?	«Al aumentar el estímulo por repetición se logra que sea suficiente para generar un potencial de acción y que eso se expanda a las demás células...» «Hay que poder diferenciar bien las reacciones individuales de las reacciones en conjunto... pienso en que sea un proceso semejante a las sinapsis».	Buscar mecanismos que expliquen la respuesta múltiple. El caso del mecanismo de sumación se explica con la repetición del estímulo.

Estas primeras orientaciones fueron muy fructíferas: por un lado, cada grupo logró visualizar posibles articulaciones estructura-función para orientarse en búsquedas bibliográficas sobre mecanismos teóricos que abordaran tales cuestiones (Piríz y Galagovsky, 2021). Por otro lado, se facilitaron ajustes en el vocabulario (Almeida et al., 2021), ya que fue necesario, por ejemplo, diferenciar entre los términos «irritabilidad» o «excitabilidad», «estímulo» o «impulso», «tacto» o «estímulo mecánico» (Latorre et al., 1996; Kandel et al., 2001; Piríz, 2016).

Estos hechos configuran un primer obstáculo epistemológico detectado, constituido por una descripción ingenua, superficial, de las situaciones biológicas mostradas en las escenas disparadoras. La orientación docente impulsó a los estudiantes a profundizar en la observación de las escenas, de tal forma que se identificaran posibles variables dentro de cada fenómeno; es decir, se les solicitaba imaginación para discriminar y nombrar componentes desconocidos de un fenómeno biológico ficticio. Un indicador indirecto de este obstáculo podría ser el hecho de que 37 de los 81 estudiantes que iniciaron el proceso se desgranaron en esta etapa.

Primeras propuestas de relaciones estructura-función

Si bien los seres vivos ficticios de las escenas fueron, en general, considerados por los diferentes grupos como plantas, algas o microorganismos, las informaciones traídas desde la bibliografía a los primeros FE sobre estructuras teóricas de reactividad biológica frente a estímulos estuvieron fuertemente sesgadas hacia elementos del sistema nervioso animal, formado por neuronas, sinapsis y neurotransmisores. Las orientaciones docentes sugirieron incluir la irritabilidad de otros seres vivos.

Tras nuevas búsquedas bibliográficas, los estudiantes pudieron recoger e interpretar información ampliada sobre conceptos tales como sensor, receptor sensorial, mecanorreceptor, termorreceptor, feromonas, turgencia, plasmólisis, luciferina, luciferasa, electrotono, conducción, sumación, potencial de acción, propagación, refractariedad, entre otros. Si bien estas informaciones enriquecieron la variedad de los nuevos modelos incipientes, fueron insertadas como bloques aislados, desarticulados.

Esta situación fue evidencia de un segundo obstáculo epistemológico que consistía en la tendencia de exponer acríticamente información encontrada en literatura científica sobre relaciones estructura-función, manteniendo su funcionalidad teórica original. Es decir, los estudiantes tendían a presentar explicaciones teóricas fragmentadas, descontextualizadas, no correlacionadas con el caso ficticio. La orientación docente estimuló a los estudiantes a establecer inserciones imaginativas adaptadas a las situaciones ficticias.

Primeros modelos explicativos (semanas 4-9, tabla 2)

Durante la semana 4 cada grupo hizo la entrega de su primer modelo a través de una tarea en la plataforma Schoology®.

Los primeros modelos presentados aún persistían en incluir fracciones teóricas tomadas de bibliografía insertadas como partes aisladas, sin total articulación con argumentos que describieran mecanismos desde el estímulo inicial hasta la respuesta final, para cada escena ficticia. Las indicaciones docentes orientaron sobre la necesidad de hacer precisiones entre elementos estructurales y sus relaciones con: a) la detección de estímulos; b) la comunicación intercelular; c) la propagación de información; d) los mecanismos bioquímicos elegidos para las respuestas. Con cada grupo la docente promovió aquellas reflexiones específicas que incidían en la organización de un relato modelizado descriptivo-argumentativo; es decir, se estimularon habilidades cognitivas esperables en el pasaje de un estudiante novato a uno experto (Lyon, 2015). Así mismo, las orientaciones docentes señalaron para cada grupo la conveniencia de expresar sus modelos utilizando diferentes lenguajes (gráfico, verbal, de fórmulas químicas, etc.) (Buckley, 2000; Treagust y Tsui, 2013; Gómez Galindo et al, 2017; Ocelli et al., 2022).

El tercer obstáculo epistemológico fue, por lo tanto, la dificultad de integrar un modelo explicativo-argumentativo que atravesara todos los niveles biológicos y que se expresara en múltiples lenguajes para optimizar su comunicación. Haber utilizado escenas ficticias como disparadores fue un punto clave del diseño didáctico porque ponía en evidencia que el aprendizaje aislado de elementos teóricos encontrados en la literatura científica no resultaba suficiente para cumplir la consigna de modelizar.

A continuación se presentan tres ejemplos de modelos iniciales y las respectivas indicaciones docentes para mejorarlos:

Ejemplo 1: Necesidad de precisar la comunicación bioquímica o biológica entre componentes estructurales

Para la modelización de la escena 1, un grupo presentó la figura 3, acompañada por el siguiente texto: «El proceso de «recepción sensorial» en los seres vivos, inicia lo que se denomina la «transducción sensorial», que consiste en la generación de una respuesta eléctrica (potencial receptor), de manera que el potencial de membrana (V_m) se modifica por el pasaje de iones a través de la membrana celular». El escrito era la copia idéntica de un párrafo de un texto educativo utilizado como bibliografía del curso.

En la figura 3 el grupo indicaba con flechas rojas una secuencia desde el estímulo hasta la respuesta de luminiscencia. En el sector superior izquierdo se representa con forma de sombrero la estructura macroscópica sensible, nombrando la existencia de «células nerviosas y glandulares» como receptores ubicados en su superficie. En el sector derecho se presentaba un oportuno canal iónico mecanosensible, a modo de sensor del estímulo, que vincula mediante un electrotono (potencial receptor) con un tipo de «célula glandular fotoluciferina», que desencadenaría la respuesta de producción de luz. En el sector inferior izquierdo se presentaba un esquema de la reacción de luminiscencia. Excepto la imagen del sombrero, las restantes fueron tomadas de la web y ensambladas *ad hoc*.

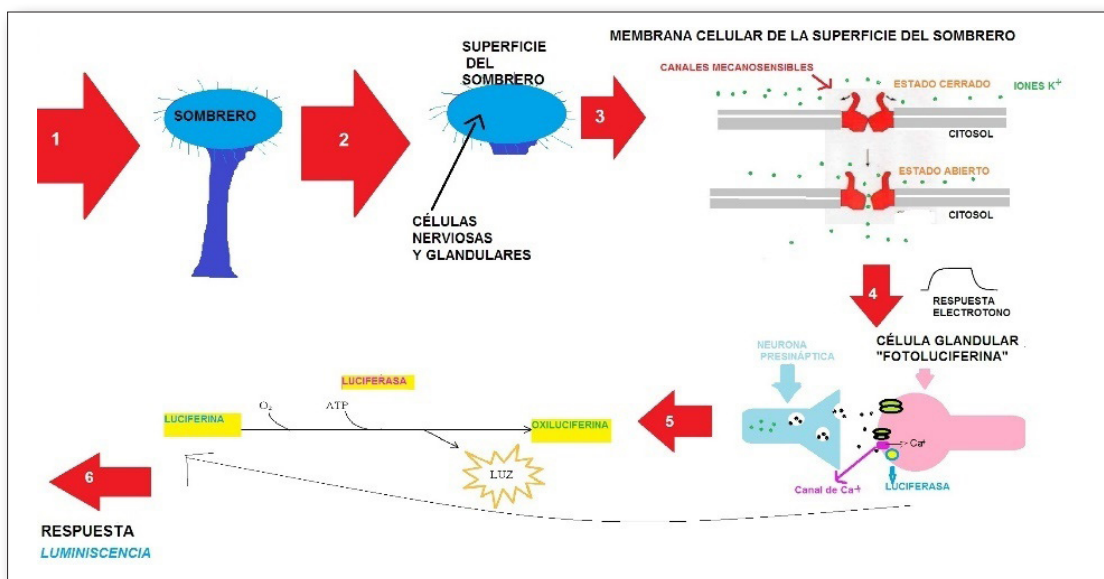


Fig. 3. Dibujo elaborado por un grupo para ilustrar su modelo inicial asociado a la escena 1.

La orientación docente señaló la necesidad de una mejora explicativa en cada asociación estructura-respuesta, involucrando las comunicaciones entre los diversos niveles de organización biológica (moléculas, organelos, células, tejidos, órganos), que estaban representadas en el dibujo por las flechas

rojas. Por ejemplo, se señaló que faltaba aclarar entre qué células ocurría la sinapsis, y que la inclusión de la representación de una reacción de luciferina-luciferasa no era suficiente como relato modelizado, pues no daba cuenta de por qué la emisión de luz no se daba en forma permanente si el oxígeno y los cofactores requeridos estuvieran presentes en el medio bioquímico de la reacción.

Ejemplo 2: Necesidad de incorporar mecanismos de articulación desde el estímulo inicial

En las respuestas que refieren al cierre de estructuras en la escena 2, el mecanismo mayoritariamente propuesto fue el de plasmólisis (Varela, 2010; Piríz et al., 2019), similar al que ocurre en plantas como la *Mimosa pudica*. Otros grupos explicaron el mecanismo por un proceso contráctil que involucra al citoesqueleto (Cingolani y Houssay, 2000; Cooper, 2006; Piríz, 2016), o una combinación de estos mecanismos.

La figura 4 fue presentada por un grupo que propuso un modelo de plasmólisis. En ella se incorporaban estructuras tales como pulvínulos y vacuolas, para explicar la pérdida de turgencia en las respuestas macroscópicas de las plantas ficticias.

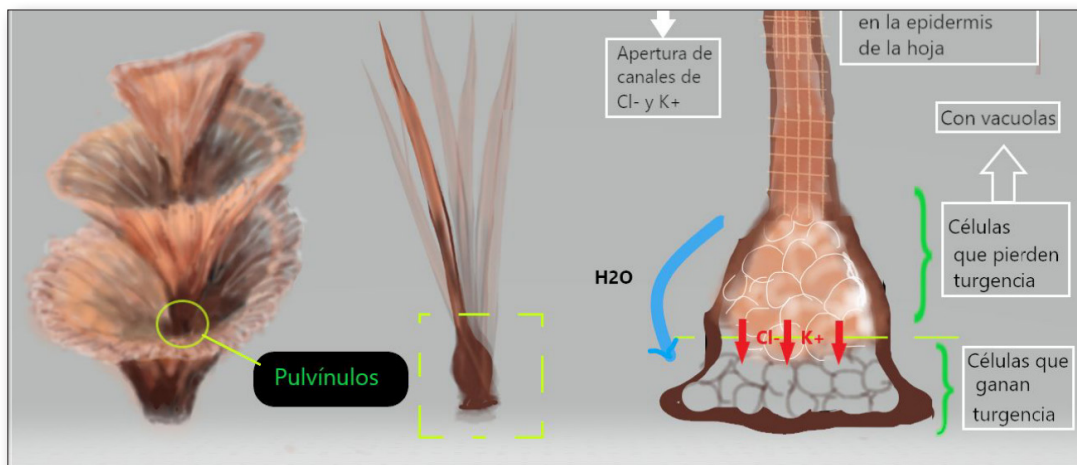


Fig. 4. Modelo inicial de un grupo que explicaba el plegamiento y cierre de las estructuras ficticias de la escena 2 mediante la rápida pérdida de agua, mediada por gradientes osmóticos a través de los pulvínulos.

Este grupo puso en evidencia cómo los estudiantes pudieron indagar en literatura procesos similares en seres vivos reales, para luego adaptarlos a la explicación de la escena 2. Las orientaciones docentes hicieron notar que faltaba explicar con qué estructuras y cómo se detectaría el estímulo macroscópico que luego desencadenaría las respuestas.

Ejemplo 3: Necesidad de incorporar mecanismos para la comunicación entre diversos tipos de células

En la figura 5 se presenta el dibujo elaborado por un grupo que incorporó para la escena 2 una posible «fitoneurona» intraestolón, que permitía la comunicación entre diversas células, habilitando una respuesta múltiple.

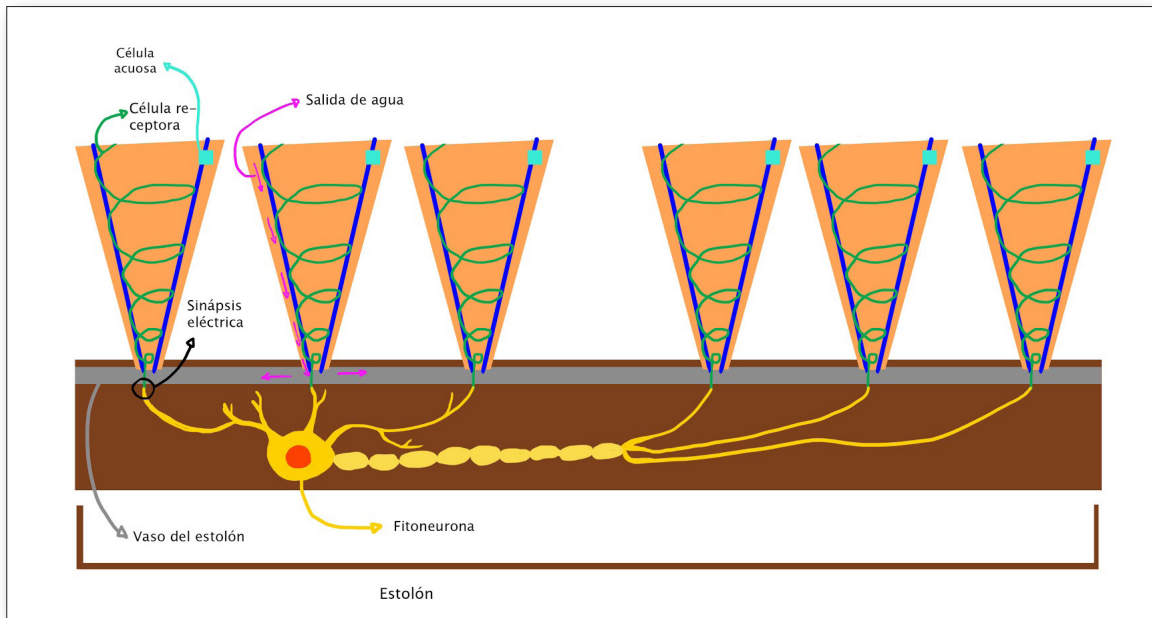


Fig. 5. Modelo para la escena 2 que incluye una «fitoneurona» intraestolón, como ajuste adaptativo para explicar la rápida comunicación entre diferentes células macroscópicas.

La incorporación de una sinapsis eléctrica al modelo constituía un elemento ficticio valioso, ya que permitía explicar tanto la conducción de un electrotono con una respuesta de plegamiento única, como la propagación de un potencial de acción con un plegamiento múltiple. Las orientaciones docentes estuvieron focalizadas en la necesidad de detallar los mecanismos celulares y moleculares implicados tanto en la recepción del estímulo como en el disparo de la respuesta, para lograr completar el modelo.

MODELOS FINALES

Dada la variedad y extensión de los 38 modelos finales producidos, a continuación se presentan solo dos representaciones parciales incluidas en modelos finales completos, a fin de ilustrar dispositivos creados *ad hoc*, que expresaban correctamente relaciones estructura-función imaginarias para la comunicación entre niveles biológicos.

La figura 6 ilustra la parte inicial de un modelo completo para la escena 1 donde con textos y dibujos se explicaba cómo inicialmente células receptoras sensibles a estímulos mecánicos disparaban potenciales de acción que eran, a su vez, los desencadenantes de la liberación de transmisores a una «hendidura» que separaría dicha célula de la célula luminiscente; es decir, se describen tres niveles biológicos con sus interacciones (macroscópico, celular y bioquímico). A la izquierda de la figura 6 se muestra el sistema macroscópico; en el centro se representa la interacción entre dos tipos de células: una mecanoreceptora y otra emisora de luz, mecanismo que se amplía a la derecha, precisando esa interacción como proceso bioquímico que desencadena la emisión de luz.

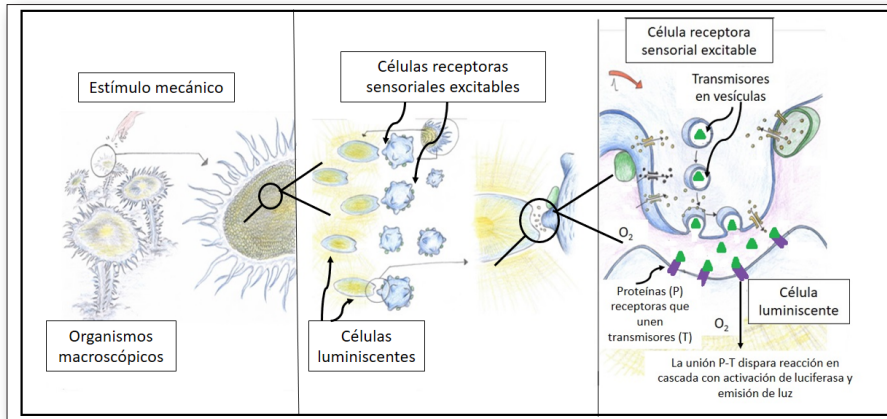


Fig. 6. Parte de un modelo final posible para la escena 1 donde se articulan tres niveles de interacción biológica: un inicio en una célula mecanorreceptora, una célula luminiscente y la descripción bioquímica de un posible mecanismo de comunicación entre ambas.

La figura 7 ilustra parte de un modelo completo generado para interpretar la escena 2. Este grupo ya había propuesto que las estructuras aéreas visibles podrían formar parte de un ser vivo que se comunicara por una estructura subterránea (estolón). En la parte izquierda de la figura 7 se representan gráficamente relaciones causa-efecto entre estímulos repetidos con intervalos de 30 o de 2 segundos, respectivamente, y la respuesta de cierre de una o más estructuras comunicadas bajo tierra. A su vez, en la parte derecha de la figura 7 se muestra una simulación realizada con Nerve[®]. En las explicaciones, el grupo destacó que, por un lado, el caso de dos estímulos separados por 30 segundos –respuestas graduadas separadas– desencadenaría el cierre repetido de una única estructura, lo cual se correspondería a las imágenes a)-c) de la figura 2. Por otro lado, el caso de estímulos separados por 2 segundos determinaría una suma temporal con disparo de un potencial de acción que, al propagarse sin decremento por el espolón, produciría el cierre de múltiples estructuras. Esta secuencia se correspondería con las imágenes d)-e) de la figura 2.

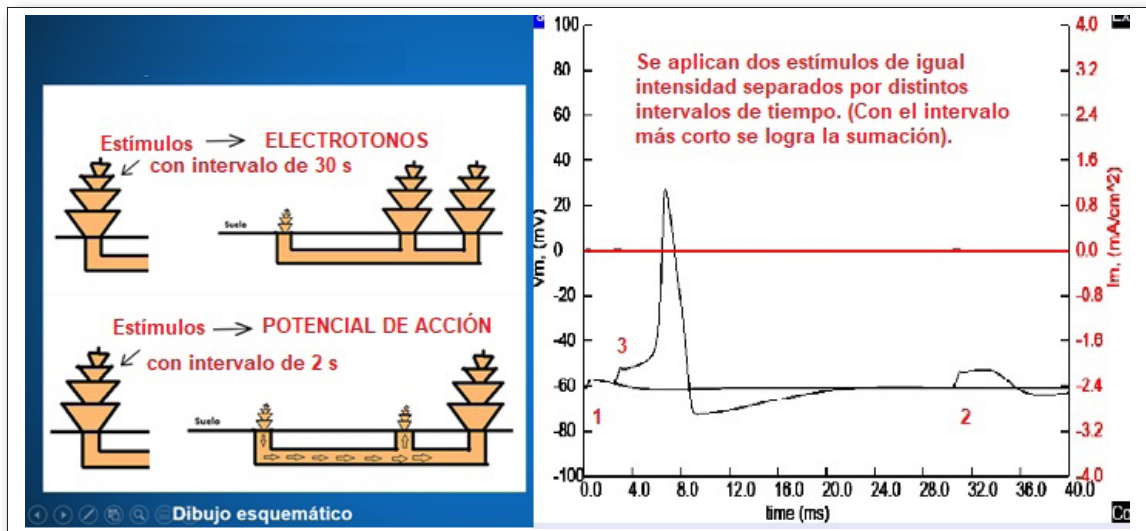


Fig. 7. Parte de un modelo final para la escena 2 donde se vinculan alternativas de respuestas graduadas o «todo o nada» en los mecanismos implicados en el cierre de las estructuras ficticias. A la derecha se incluye un gráfico proveniente del simulador Nerve[®].

Para cada grupo, arribar a su modelo final requirió vencer dificultades durante el proceso de modelización. Esos obstáculos epistemológicos se resumen en la figura 8, conjuntamente con las estrategias didácticas que estimularon pensamientos reflexivos para su superación.

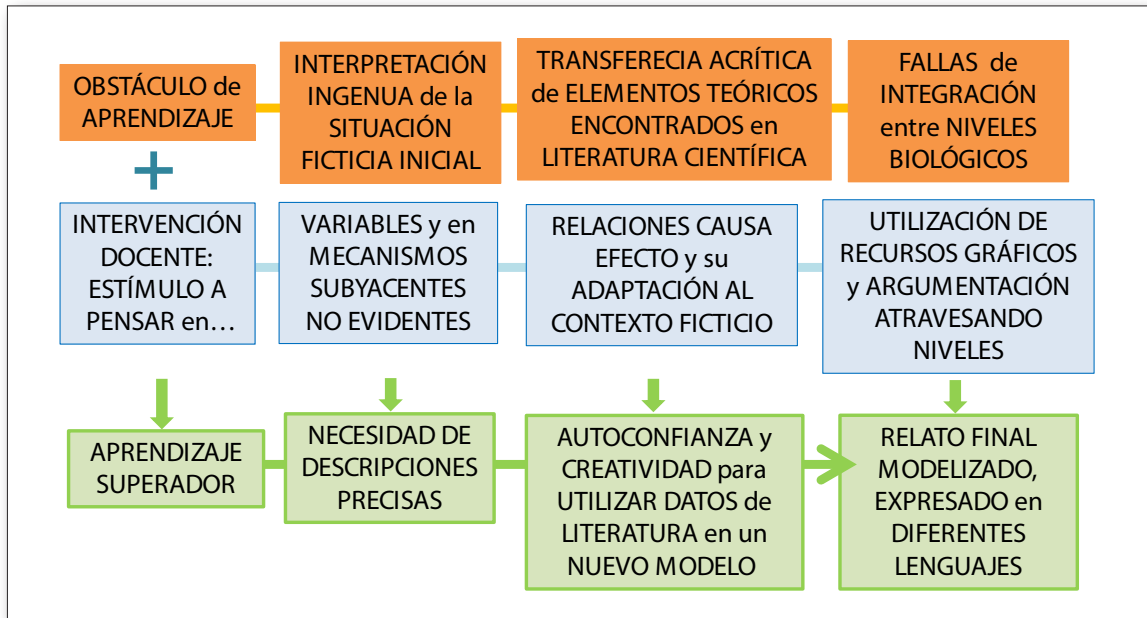


Fig. 8. Tres obstáculos de aprendizaje detectados durante el proceso de modelización y las respectivas orientaciones didácticas para superarlos.

CONSIDERACIONES FINALES

La modelización aporta autenticidad a la enseñanza de ciencias naturales, en cuanto que se permite que los estudiantes participen en prácticas que muestren a la ciencia como una actividad centrada en la generación de nuevo conocimiento, en lugar de como un cuerpo de conocimientos acabados (Couso, 2020). Este escenario se hace imprescindible para el nivel del profesorado (Amador-Rodríguez et al., 2023).

Sin embargo, la actividad de modelización no es frecuentemente abordada desde la investigación didáctica. Por ejemplo, Schwarz et al. (2009) han señalado que los docentes suelen asociar los modelos científicos solo con explicaciones de contenidos específicos para ser enseñados, sin considerar la importancia de la acción de modelizar. Así mismo, estos autores han relevado la escasez de materiales didácticos que sostengan el uso de modelización en el aula, y la consecuente falta de experiencia al respecto que suelen tener los docentes, lo que significa que desconocen cómo ayudar a los estudiantes a modelizar (Píriz et al., 2023).

El presente trabajo es un aporte innovador sobre el proceso didáctico de modelización, aplicada al contenido de la irritabilidad de los seres vivos, y realizado con estudiantes de profesorado de Biología. Tras haber publicado competencias desarrolladas por los estudiantes en sus intentos de modelización (Píriz et al., 2023), se presentan aquí las dificultades sistemáticas con las que ellos se enfrentaron, así como las estrategias de las intervenciones docentes específicas que los ayudaron a la superación de obstáculos epistemológicos.

Más allá de las dificultades de cada grupo, la clase final de presentación de todos los modelos finales (tabla 2) permitió a los estudiantes valorar la creatividad y el ingenio de sus compañeros. Desde la pers-

pectiva docente, se destaca que la propuesta logró la toma de conciencia sobre tres aspectos respecto de la naturaleza de la ciencia: por un lado, poder cuestionar aquella visión positivista que pregona la existencia única de una ciencia objetiva, lineal y secuencial, que se dirige asertivamente hacia el descubrimiento de verdades (Galagovsky, 2011; Amador Rodríguez et al., 2023). Es decir, aquel estudiante que pudo haber construido previamente la idea de que la observación-descripción de fenómenos es siempre objetiva y «ateórica», pudo vivenciar la necesidad de hacerse nuevas preguntas e inventar respuestas apropiadas –una actitud subjetiva, reflexiva y creativa– para poder avanzar en la modelización. Por otra parte, que es posible recrear en los estudiantes un sentimiento de satisfacción semejante al que atraviesan los científicos en su actividad; es decir, la propuesta didáctica resultó una recreación escolarizada de «hacer ciencia». La perspectiva de los estudiantes se puso en evidencia en sus respuestas a un cuestionario voluntario, que fue solicitado tras finalizar el año lectivo y contestado por 24 de los 44 estudiantes que entregaron los modelos finales. Dicha encuesta consistía en un formulario de Google con dos partes. La parte estructurada era de elección de palabras en relación con aspectos tales como el de trabajar a partir de las escenas ficticias, el tener que buscar información científica autónomamente para elaborar un modelo, el trabajo en pequeños grupos, el escuchar modelos de otros compañeros. En ella, el 87,5 % de los estudiantes eligieron solo términos de connotación positiva, y el 25 % agregaron palabras tales como «difícil», o «complicado» para algún ítem. La segunda parte del cuestionario solicitaba sus opiniones en formato no estructurado: todas las opiniones fueron muy positivas, enfatizando la importancia de vivenciar este tipo de experiencias didácticas innovadoras como forma de incorporar ideas para sus futuras prácticas docentes. A modo de ejemplo citamos algunas de esas opiniones: «si hay algo que admiro es la capacidad de jamás dar una respuesta y siempre lograr que lleguemos a ella»; «me encantó la propuesta. Al principio me pareció compleja y después empezó a tomar forma y me entusiasme muchísimo»; «fue una experiencia nueva e inolvidable, buenísima para tenerla en cuenta, por momentos complicada y entretenida»; «la propuesta me pareció muy interesante, distinta, difícil sí, pero muy productiva». Es decir, los estudiantes que respondieron la encuesta valoraron positivamente la propuesta, más allá de las dificultades que debieron sortear.

El aporte del presente trabajo es mostrar la importancia de una articulación efectiva entre las capacidades de los estudiantes para animarse a generar un modelo creativo y la necesaria orientación docente específica que –sin dar las respuestas– encauza con preguntas y alienta a superar obstáculos de aprendizaje, en la difícil tarea global de modelizar. Este punto resulta importante por tratarse de estudiantes que serán futuros profesionales de la educación y que, necesariamente, podrán dar nuevo sentido al concepto de creatividad humana, en épocas de pleno desarrollo de la inteligencia artificial (Quiroga, 2023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. y Oliva-Martínez, J. M. (2017). Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. *Revista científica*, 30, 155-166.
<https://doi.org/10.14483/23448350.12288>
- Acher, A. (2014). Cómo facilitar la modelización científica en el aula. *Tecné, episteme y didaxis*, 36, 63-76.
<https://doi.org/10.17227/01213814.36ted63.75>.
- Adúriz Bravo, A. (2015). Pensamiento «basado en modelos» en la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista del Instituto de Investigaciones en Educación*, 6 (año 6), 1-65.
<https://doi.org/10.30972/riie.063680> .

- Adúriz Bravo, A. y Revel Chion, A. (2019). Modelización y argumentación en la enseñanza de las ciencias experimentales. *Didacticae*, 5, 3-6. Monográfico. DOI: 10.1344/did.2019.5.3-6
- Almeida, S. A; Aguiar, O. G y Caixeta de Castro Lima, M. E. (2021). A língua absolvida: as palavras das crianças nas aulas de ciencias. *Ciência & Educação*, 27, e21040.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320210040>
- Álvarez Valdivia, I. (2005). Evaluación como situación de aprendizaje o evaluación auténtica. *Perspectiva Educacional, Formación de Profesores*, 45, 4568. <https://www.redalyc.org/pdf/3333/333329100004.pdf>
- Amador-Rodríguez, R., Valencia Cobo, J. A., Lozano, E., Flórez Nisperuza, E. P. y Adúriz-Bravo, A. (2023). Visiones sobre la naturaleza de la ciencia en docentes: Pistas para pensar cambios en su formación. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(1).
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.160
- Benzanilla, F. (1998). Simulador Nerve, recuperado en enero de 2023. <http://nerve.bsd.uchicago.edu/>.
- Buckley, B. (2000). Interactive multimedia and model-based learning in Biology. *Int. J. of Science Education*, 22(9), 895-935.
<https://doi.org/10.1080/095006900416848>
- Cingolani, H. E. y Houssay, A. B. (2000). *Fisiología humana*. 7.ª edición. El Ateneo: Buenos Aires.
- Cooper, G. M. y Hausman, R. E. (2006). *La Célula*. 3.ª edición.
- Cortés Cortés, M. E. (2013). *Módulo de autoaprendizaje del potencial de acción para estudiantes de Ciencias biomédicas y profesores de Química y Biología* [Tesis de grado, Universidad de Santiago de Chile]. [Modulo-de-autoaprendizaje-del-potencial-de-accion-para-estudiantes-de-ciencias-biomedicas-y-profesores-de-quimica-y-biologia.pdf](https://www.researchgate.net/publication/312544447-Modulo-de-autoaprendizaje-del-potencial-de-accion-para-estudiantes-de-ciencias-biomedicas-y-profesores-de-quimica-y-biologia) (researchgate.net)
- Develaki I. M. (2007). The model based view of scientific theories and the structure of school science programmes. *Science & Education*, 16, 725-749.
- Díaz Guevara, C. A., Garay, F. R. G., Paz, J. D. A. y Adúriz-Bravo, A. (2019). Los modelos y la modelización científica y sus aportes a la enseñanza de la periodicidad química en la formación inicial del profesorado. *Didacticae: Revista de Investigación en Didácticas Específicas*, 5, 7-25.
- Fernández Oliveras, P., Rodríguez Ponce, M. D. C. y Fernández Oliveras, A. (2020). Modelo semipresencial para la formación universitaria: aplicación a titulaciones técnicas. *Enseñanza de las Ciencias*, 38(3), 179-197. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3300>
- Fröhlich, H. (1986). Coherent Excitation in Active Biological Systems. En: Gutmann, F., Keyzer, H. (Eds.), *Modern Bioelectrochemistry*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2105-7_8
- Galagovsky, L. (Dir.). (2011). *Didáctica de las ciencias naturales. El caso de los modelos científicos*. Lugar Editorial.
- Garófalo, J., Galagovsky, L. y Alonso, M. (2014). Nueva propuesta teórica sobre obstáculos epistemológicos de aprendizaje. El caso del metabolismo de los carbohidratos. *Revista Enseñanza de las Ciencias*, 32(3), 155-171.
- Garrido Espeja, A., Soto Alvarado, M. S. y Couso Lagarón, D. (2022). Formación inicial de docentes de ciencia: posibles aportes y tensiones de la modelización. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(1), 87-105.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3286>
- Gómez Galindo, A. A. (2013). Explicaciones narrativas integradas y modelización en la enseñanza de la biología. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(1), 11-28.
<https://doi.org/10.5565/rev/ec/v31n1.733>
- Gómez Galindo, A. A. y García Franco, A. (2021). La modelización en una educación científica culturalmente relevante. *Bio-grafía*, Número extraordinario *Memorias del V Congreso Latinoamericano de Investigación en Didáctica de las Ciencias*. <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/15676>

- Gómez-Galindo, A. A., Pérez, G. y González-Galli, L. (2017). ¿Qué aportan los dibujos a la comprensión de los significados de las explicaciones de los estudiantes en biología evolutiva? *X Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias*. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/337617>.
- Gomez, Galindo, A. A. (2014). Progresión del aprendizaje basado en modelos: la enseñanza y el aprendizaje del sistema nervioso. *Bio-grafía*, 7(13), 101-107. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia101-107>
- González Novoa, M. A. (2016). *El impulso nervioso como problema de conocimiento* (tesis de Maestría). Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. Recuperado en Enero 2023 de <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/335/TO-19943.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guillaumin, G. (2005). *El surgimiento de la noción de evidencia*. UNAM.
- Izquierdo, M. (2005). Hacia una teoría de los contenidos escolares. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(1), 111-122. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3861>
- Jördens, J, Ashhoff, R., Kullmann, H. y Hammann, M. (2016) Providing vertical coherence in explanations and promoting reasoning across levels of biological organization when teaching evolution. *Int. J. of Science Education*, 38(6): 1-33. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1174790>
- Kandel, E., Jessel, T. y Schwartz, J. (2001). *Principios de Neurociencia*. Editorial Mcgraw-hill.
- Kutugata Estrada, A. (2016). Foros de discusión: herramienta para incrementar el pensamiento crítico en educación superior. *Apertura*, 8(2), 84-99. <https://doi.org/10.32870/ap.v8n2.887>
- Latorre, R., López-Barneo, J., Bezanilla, F. y R. Llinás (Eds.) (1996). *Biofísica y fisiología celular*. Universidad de Sevilla.
- Lombardi, O., Acorinti, H. y Martínez, J. C. (2016). Modelos científicos: el problema de la representación. *Scientia Zudia*, 14(1), 151-74. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662016000100008>
- Lyon, L. J. (2015) Development of teaching expertise viewed through the Dreyfus model of skill acquisition. *J. of the Scholarship of Teaching and Learning*, 15(1), 88-105. <https://doi.org/10.14434/josotl.v15i1.12866>
- Machado, J; Levy Pestana Fernandes, B. (2021). Concepções de Modelo na Pesquisa em Educação em Ciências: características e tendências. *Ciência & Educação*, 27, e21014. <https://doi.org/10.1590/1516-731320210014>
- Marzábal, A., Merino, C. y Rocha, A. (2014). El obstáculo epistemológico como objeto de reflexión para la activación del cambio didáctico en docentes de ciencias en ejercicio. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 9(1), 70-83.
- Monge Acuña (2015). La codificación en el método de investigación de la grounded theory o teoría fundamentada. *Innovaciones educativas*, 17(22), 77-84. <https://doi.org/10.22458/ie.v17i22.1100>
- Mora Zamora, A. (2002). Obstáculos epistemológicos que afectan el proceso de construcción de conceptos del área de ciencias en niños de edad escolar. *Inter Sedes*, III. (5-2002), 75-89. <https://www.redalyc.org/pdf/666/66630507.pdf>
- Ocelli, M., Pomar, S. y Gómez Galindo, A. A. (2022). Modelizar y construir representaciones externas sobre síntesis de proteínas: un estudio de diseño en la escuela secundaria. *Didáctica de las Ciencias Naturales y Sociales*, 42, 119-136. <https://doi.org/10723/DCES.42.20945>

- Oliva, J. M. (2019). Distintas acepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 37(2), 5-24.
- Perez, G., Gómez Galindo, A. A. y Gonzalez Galli, L. (2021). La regulación de los obstáculos epistemológicos en el aprendizaje de la evolución. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(1), 27-44. <https://enciencias.uab.cat/article/view/v39-n1-perez-gomez-gonzalez>
- Píriz Giménez, N. (2016). Biofísica para la formación del profesorado. Ediciones Ciencia. Biofísica para la formación del Profesorado (cfe.edu.uy).
- Píriz Giménez, N. (2022) ¿Es posible una enseñanza contextualizada del potencial de acción, sin ahondar en sus bases moleculares? *Bio-grafía. Escritos sobre Biología y su enseñanza*, 28, 1-12.
- Píriz Giménez, N., López Larrama, M. N. y Tucci, J. (Coord.) (2023). *Enseñanza de las Ciencias desde Aulas Creativas*. Consejo de Formación en Educación. Agencia Nacional de Educación Pública, Uruguay. https://www.cfe.edu.uy/images/stories/pdfs/publicaciones/2023/aulas_creativas/enseanza_ciencias_desde_aulas_creativas.pdf
- Píriz Giménez, N., López Larrama, M. N., Tucci, J., Cantero Charpentier, J. y Mallarini Ucha, V. (2019). Tonicidad: ¿una propiedad de las soluciones y/o de las células? Aprendizaje sustentable del transporte de agua. *Bio-grafía escritos sobre la biología y su enseñanza*, 12(22), 23-32. <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol.11.num22-8587>
- Píriz Giménez, N., Tucci, J. y López Larrama, M. N. (2018). La importancia cualitativa de los números en la enseñanza de la Biología. Aprendizaje sustentable del potencial de acción. *Química viva*, 3, 1-5.
- Píriz Giménez, N. y Galagovsky, L. (2021). ¿Es posible «hacer ciencia» en foros de aprendizaje? Modelización de respuestas a estímulos en seres vivos, por estudiantes de profesorado. En actas electrónicas del *XI Congreso Internacional en Investigación en Didáctica de las Ciencias* (1003-1007). <http://repositorio.cfe.edu.uy/handle/123456789/1520>
- Quiroga, C. (2023). Rebeca Hwang: la especialista en futuro respondió 16 preguntas clave para entender el futuro. <https://www.lanacion.com.ar/salud/rebeca-hwang-la-especialista-en-futuro-responde-15-preguntas-clave-para-entender-el-futuro-nid28062023/>
- Rodríguez Malebrán, M. E., Quintanilla-Gatica, M. R. y Manzanilla, M. A. (2021). Actitudes de los Profesores de Ciencias Naturales y Ciencias Sociales hacia la Enseñanza de Competencias de Consulta en Línea y sus Factores de Fondo en el Uso del Internet. *Ciência & Educação*, 27, e21008. <https://doi.org/10.1590/1516-731320210008>
- Ruiz Bolívar, C. y Dávila, A. A. (2016). Propuesta de buenas prácticas de educación virtual en el contexto universitario. *Revista de Educación a Distancia*, 49, 1-21. <https://doi.org/10.6018/red/49/12>
- Schneeweiß, N., Gropengiesser, H. (2019). Organising Levels of Organisation for Biology Education: A Systematic Review of Literature. *Educ. Sci.*, 9(3), 207. <https://doi.org/10.3390/educsci9030207>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Acher, A., Fortus, D. y Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *J. of Research in Science Teaching*, 46, 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S. y Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Sci. Educ.*, 92(3), 424-446.
- Silva Machado, E. da, Mello Arruda, S. de y Meneghello Passos, M. (2021). Caracterização da Aprendizagem da Cibercultura na Educação a Distância. *Ciência & Educação*, 27, e21013. <https://doi.org/10.1590/1516-731320210013>
- Tamayo Alzate, O. (2013). Modelos y modelización en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 3484-3487. <https://ddd.uab.cat/record/175655>.

- Thagard, P. (2010). How Brains Make Mental Models. En L. Magnani et al. (Eds.), *Model-Based Reasoning in Science y Technology*, SCI 314 (447-461). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-15223-8_25
- Treagust, D. F. y Tsui, C-Y. (Eds.) (2013). *Multiple Representations in Biological Education*. Models and Modeling in Science Education, Springer.
- Umpiérrez Oroño, S. (2019) Clasificación temática, construcción de sistema de categorías y repertorio de competencias científicas para el análisis cualitativo de trabajos finales de carrera. *Rutas de Formación: prácticas y experiencias*, 9, 55-69.
<https://doi.org/10.24236/24631388.n.2019.3315>.
- Umpiérrez Oroño, S., Píriz-Giménez, N., Olivero, M. J., Cabrera-Borges, C. y Donato, N. (2023). Competencias científicas y modelización: estudio de un caso en la formación de docentes. *Ciência & Educação*, 29.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320230046>
- Upmeier zu Belzen, A., Krüger, D. y van Driel, J. (eds.) (2019). *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education*. Springer.
- Varela, S. A. (2010). Aspectos básicos de la fisiología en respuesta al estrés y el clima como condicionante del mismo en las plantas. *INTA EEA Bariloche. Comun. Técnica*, 78, 1-23.
- Vasilachis, I. (2006). *Estrategias de investigación cualitativa*. Editorial Gedisa.

Construction of Models on Living Beings' Biological Responses to External Stimuli

Nazira Piriz Giménez

Profesora del Instituto de Profesores Artigas, Consejo de Formación en Educación, Administración Nacional de Educación Pública, Montevideo, Uruguay

Lydia Galagovsky

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto Centro de Formación e Investigación en Enseñanza de las Ciencias (CEFIEC), Universidad de Buenos Aires, Argentina.
lydia.galagovsky@gmail.com

Learning science is not only repeating theoretical concepts obtained by science, but also acquiring the skill of generating models.

The present approach demanded Biology teachers in training to create *ad hoc* models in order to interpret fictional living beings' reactions inserted in fantastic biological contexts, taken from two scenes from the movie *Avatar*[®]. In scene 1, the avatars walk through a forest where touching or stepping on each place produced a light emission. In scene 2 plant-like structures fold and close upon physical contact with the avatar.

Given the fictional nature of the scenes, a «true» scientific model was not expected, but rather the students should show imagination to organize original final models. The existing scientific models, in this regard, involve graded responses (electrotones) or «all or nothing» (action potentials), with subcategories within each type, which had to be articulated within the fictional situations. The students' proper models required to link different organization levels of life in which physical-chemical and biochemical explanations need to be articulated with cell signaling and physiological mechanisms.

The two objectives of this work have been a) to analyze the students' difficulties during the modeling process; b) to detect the teaching strategies that favored the overcoming of learning obstacles.

The didactic approach was developed during the 10 last weeks within the subject of Biophysics, for 81 freshmen of a public teacher training program in Biology –Artigas Institute, Montevideo, Uruguay–. It was a virtual course on the Schoology[®] platform during the academic years of 2021-2022. The proposal was optional, aimed at students who voluntarily wanted to take their part in it as an extra mark during the last examination.

The initial 19 groups remained; however, some of their members abandoned and just 44 students completed the tasks. Online activities –perfectly scheduled in advance– consisted of forums for each specific group and plenary meetings, in which all writings and discussions had been recorded.

Main results showed three epistemological learning obstacles (ELO).

The first ELO consisted of a naïve superficial description of the biological situations shown in the triggering scenes, as well as the use of everyday vocabulary. There were two teaching strategies to overcome this obstacle: on the one hand, to help to discriminate variables underlying each phenomenon by questions such as: Does the response to the stimulus maintain or fade quickly? How does the repetition of the stimulus affect? Does the response propagate, or is it local? On the other hand, adjustments were made to the vocabulary, since it was necessary to differentiate between the terms like *irritability* or *excitability*, *stimulus* or *impulse*, *touch* or *mechanical stimulus*. These teaching strategies helped students to conduct subsequent literature searches instead of receiving the answers.

Second ELO showed that structure-function devices recovered from literature were strongly biased towards elements of the animal nervous system. The teaching strategies suggested to include the irritability of other living beings, which allowed the incorporation of concepts such as *sensor*, *sensory receptor*, *mechanoreceptor*, *thermoreceptor*, *pheromones*, *turgor*, *plasmolysis*, *luciferin*, *luciferase*, *electrotonic*, *conduction*, *summation*, *action potential*, *propagation*, *refractoriness*, among others.

The third ELO was the fact that students tended to present fragmented theoretical explanations which were even decontextualized from the fictitious cases. The teaching strategies demanded precision between structural elements and their relationships with a) the detection of stimuli; b) the intercellular communication and the propagation of information; c) the biochemical mechanisms that interconnected biological levels, related to the triggering scenes.

Specific given examples show each ELO, as well as the complexity required to stimulate the students' imagination in order to create original models.