



**Maestría en Enseñanza de las Ciencias
Exactas y Naturales**

Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería

La modelización del origen de la célula
eucariota. Integración disciplinar y
metacientífica en la formación del
profesorado en Biología

Prof. Joaquín Álvarez Soria

Director: Dr. Eduardo E. Lozano

Codirectora: Dra. Cecilia Cremer

Resumen

La enseñanza de las ciencias basada en la modelización de fenómenos es una perspectiva didáctica esencial en la educación científica contemporánea, promueve el pensamiento teórico y emparenta las actividades científicas y escolares. Además, la integración disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado se constituye como una estrategia clave para crear una sinergia que propicie una comprensión más profunda y crítica de los modelos y de la propia actividad científica. Desde esta perspectiva teórica, y empleando una metodología cualitativa, esta tesis presenta los resultados del diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica que aborda la enseñanza del origen de la célula eucariota, junto con el desarrollo de ideas clave metacientíficas del eje “naturaleza de la ciencia”, vinculadas con la carga teórica de las observaciones y los consensos en la construcción de los hechos científicos. El objetivo de esta investigación es caracterizar e interpretar el desarrollo de los procesos de modelización en el contexto natural de las clases de “Introducción a la Biología” y “Pensamiento y actividad científica”, dentro del ámbito de la formación inicial del profesorado en biología en la universidad. Como conclusión, se demuestra que las y los estudiantes lograron discutir y construir modelos disciplinares e ideas metacientíficas más complejas, aplicándolos a un nuevo hecho científico contextualizado.

Abstract

Science teaching based on the modeling of phenomena is an essential didactic perspective in contemporary science education, as it promotes theoretical thinking and bridges scientific and school activities. Furthermore, the integration of disciplinary and metascientific content in teacher training constitutes a key strategy for creating synergy that fosters a deeper and more critical understanding of models and scientific activity itself. From this theoretical perspective, and using a qualitative methodology, this thesis presents the results of the design, implementation, and evaluation of a teaching unit addressing the teaching of the origin of the eukaryotic cell, along with the development of key metascientific ideas related to the Nature of Science, focusing on the theoretical load of observations and the consensus involved in the construction of scientific facts. The aim of this research is to characterize and interpret the development of modeling processes in the natural context of the courses 'Introduction to Biology' and 'Scientific Thought and Activity,' within the framework of initial biology teacher training at the university level. In conclusion, it is demonstrated that the students were able to discuss and construct disciplinary models and more complex metascientific ideas, applying them to a newly contextualized scientific fact.

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de un trabajo colectivo que no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas e instituciones, a quienes agradezco profundamente.

A mi maestro, Eduardo Lozano, por la confianza depositada en mí. Recuerdo claramente el día en que te envié un correo solicitando una reunión para contarte mis intenciones de elaborar una investigación que tenías pendiente sobre la enseñanza de uno de los temas que, dicho sea de paso, más curiosidad han despertado en toda mi vida: el origen de la célula eucariota. Te esperé en los pasillos de la universidad hasta el recreo, y entre el bullicio de las y los estudiantes, esbozaste en un papel lo que se convertiría en la culminación de este trabajo. Que nunca dejes de esbozar ideas.

A Cecilia Cremer, cuya contribución a los fundamentos teóricos sobre las células eucariotas fue indispensable para hacer posible, entre muchos aspectos, una de las actividades más relevantes e innovadoras de esta tesis.

A Pablo Macchi y Leonardo Salgado, por escucharme y aconsejarme en esos momentos en los que “no sabía que hacer”. Por las innumerables charlas, discusiones y consejos, libros, lecturas. Gracias por guiarme en el maravilloso mundo de la ciencia, por los microorganismos, el río y la evolución.

A mis amigas Lucía y Romina, cuyo acompañamiento en el aula y observaciones sobre lo que allí sucedía fueron cruciales para el desarrollo de las clases. También quiero mencionar a Lucas, con quien he transitado nuestra formación juntos y seguimos disfrutando mucho discutir sobre la ciencia. A Jazmín, quien me acompañó durante el comienzo de este trabajo y me ayudó a no perder el rumbo. A María Paz, por apoyarme en el último y más difícil tramo de la escritura, así como por su revisión y consejos sobre el formato de esta tesis.

A mí familia, mamá y Fermín.

A la Universidad pública.

Al Centro de Estudios e Investigación en Educación (CEIE).

En memoria de mi viejo

Índice

Resumen.....	I
Abstract	II
1. Planteamiento del problema y de los objetivos de la investigación.....	1
1.1 Fundamentos y relevancia del problema a investigar.....	1
1.2 La delimitación del problema en el ámbito de la formación del profesorado en biología	4
1.3 Antecedentes de investigaciones para la enseñanza del modelo de célula..	5
1.4 Hipótesis y propósito de la investigación	10
1.5 Preguntas de investigación	12
1.6 Objetivos de la investigación.....	13
1.6.1 Objetivo general.....	13
1.6.2 Objetivos específicos.....	13
2. Marco teórico	14
2.1 Introducción.....	14
2.2 El modelo cognitivo de ciencia y la concepción semántica de las teorías científicas.....	14
2.2.1 Los modelos teóricos según la perspectiva de Ronald Giere	16
2.2.2 La ciencia como actividad científica	19
2.3 El modelo cognitivo de ciencia escolar y la actividad científica escolar ..	20
2.4 La modelización en la actividad científica escolar	22
2.5 El eje naturaleza de la ciencia y su finalidad en la educación científica ...	24
2.5.1 Estructuración de la naturaleza de la ciencia para su enseñanza	25
2.6 El diseño de una unidad didáctica, desde la actividad científica escolar...	26
2.6.1 Los tipos de actividades de la unidad didáctica	26
2.7 La integración de la modelización disciplinar y metacientífica	27
3. Metodología	30

3.1	Una investigación cualitativa.....	30
3.2	Los estudios de diseño	32
3.2.1	Toma y registro de los datos y unidades de análisis	33
3.2.2	Implementación de la unidad didáctica	35
4.	Un análisis con enfoque histórico-epistemológico sobre la teoría del origen de la célula eucariota	38
4.1	Introducción al estudio del origen de la célula eucariota	39
4.2	Primer período. El OCE y la simbiosis en el ámbito de la biología del siglo XIX y principios del XX.....	41
4.2.1	Pensar la simbiosis en el contexto de la biología celular	43
4.2.2	Los primeros modelos de endosimbiosis: Explicar el origen de las mitocondrias y los cloroplastos de la célula eucariota	45
4.3	Obstáculos en la comprensión microbiana de la simbiosis	49
4.3.1	La influencia de la teoría germinal de las enfermedades: ¿Desde qué ventanas mirar a las bacterias?	49
4.3.2	Influencia del programa darwiniano	51
4.3.3	Una dis“tinción” muy notable: El “nucleocentrismo”	52
4.4	Segundo período: Membranas, sólo membranas	54
4.5	Tercer período: El resurgimiento de una teoría	56
4.5.1	“Lo que importa es lo de adentro”. La influencia del ADN en las discusiones sobre el OCE	57
4.5.1.1	Una búsqueda intencionada.....	57
4.5.2	“On the origin of mitosing cells”	60
4.5.3	Una controversia sobre la procedencia del material genético en mitocondrias y cloroplastos	62
4.5.4	Los argumentos de Taylor	63
4.6	Estado actual de la teoría del origen de la célula eucariota. Nuevos problemas y perspectivas.....	67
4.7	Construcción de las ideas claves disciplinares y metacientíficas como saberes a enseñar	71
4.7.1	Ideas claves disciplinares sobre aspectos del origen de la célula eucariota	72
4.7.2	Ideas claves metacientíficas como saberes a enseñar	72

5.	Diseño, implementación y evaluación de la unidad didáctica	74
5.1	Descripción de las actividades de la unidad didáctica.....	74
5.1.1	Actividades para iniciar la modelización	74
5.1.2	Actividades de modelización intermedia y de estructuración de los modelos e ideas clave metacientíficas	76
5.1.3	Actividades de aplicación	91
5.2	La implementación y evaluación de la unidad didáctica	99
5.2.1	Análisis de los resultados de las actividades de la unidad didáctica.....	99
5.2.1.1	La modelización inicial. Una oportunidad para pensar teóricamente el fenómeno del origen de la célula eucariota	99
5.2.1.2	Inicio de las actividades para la modelización intermedia. La construcción de ligaduras entre lo pensado por las y los estudiantes en la modelización inicial y los modelos científicos de la década de los 60'	109
5.2.1.3	Un emergente no previsto en la modelización intermedia y el diseño de una nueva actividad para la unidad didáctica	117
5.2.1.4	Volver a los modelos iniciales.....	118
5.2.1.5	Continuación de la modelización intermedia. Posicionarse teóricamente y explicar el fenómeno del origen de la célula eucariota	120
5.2.1.6	De interpretar un modelo científico a pensar porqué se lo elaboró. Inicio de las actividades para la modelización metacientífica.....	125
5.2.1.7	El origen de la célula eucariota en la actualidad	136
5.2.1.8	Actividades de aplicación	139
6.	Discusiones	148
6.1	Respecto del objetivo vinculado con el análisis histórico-epistemológico.....	148
6.2	Respecto del objetivo vinculado con la elaboración de las ideas clave de la UD	148
6.3	Respecto del objetivo vinculado con el diseño de la UD	149
6.4	Sobre las actividades de modelización inicial	150
6.5	Sobre las actividades de modelización intermedia	152
6.6	Respecto a los procesos de modelización metacientífica.	153
6.6.1	Sobre la idea clave referida a la carga teórica de las observaciones y los consensos en la actividad científica	153

6.6.2	Sobre la actividad de aplicación de los modelos disciplinares y metacientíficos	155
-------	---	-----

7.	Conclusiones.....	156
8.	Bibliografía.....	158

Índice de figuras

Figura 1 Integración disciplinar y didáctica en la formación del profesorado	3
Figura 2 Esquema del momento de implementación de la unidad didáctica.....	5
Figura 3 Esquema de modelo teórico de Giere.....	17
Figura 4 Esquema de modelo teórico adaptado a una forma de definición del modelo y un fenómeno de interés en el desarrollo de la UD.....	18
Figura 5 Esquema de organización del modelo cognitivo de ciencia escolar operativizado en la actividad científica escolar	22
Figura 6 Integración disciplinar y didáctica en la formación del profesorado	28
Figura 7 Esquema general de la Integración disciplinar y metacientífica en la UD	29
Figura 8 Vista parcial del aula de clases de Introducción a la biología el día de inicio de la unidad didáctica	37
Figura 9 Una cianobacteria del género Anabaena	42
Figura 10 Similitudes y diferencias entre cianobacterias y cloroplastos planteadas por Merezhkowsky	49
Figura 11 Origen de organelas por invaginación gradual de membrana.....	56
Figura 12 Modelo de la endosimbiosis en serie (SET) propuesta por Margulis ..	62
Figura 13 Estampilla del congreso en Leningrado	63
Figura 14 El modelo "Uralga", tal cual fue presentado en el congreso de Leningrado para explicar el OCE	66
Figura 15 Elementos de la transducción de energía en la respiración y fosforilación oxidativa en las mitocondrias	69
Figura 16 Relación entre el ADN bacteriano liberado tras una sepsis y el ADN mitocondrial liberado por un trauma severo. Ambos, desencadenan una misma respuesta inmunitaria	71
Figura 17 Línea de tiempo.....	75

Figura 18 Modelos gráficos de célula procariota y eucariota.....	75
Figura 19 Modelo gradualista propuesto por Robertson (1962).....	77
Figura 20 Modelo de endosimbiosis propuesto por Lynn Margulis (1967).....	77
Figura 21 Esquema de viñetas para el desarrollo de la actividad.....	78
Figura 22 Consigna entregada a los grupos de estudiantes para completar la actividad.....	80
Figura 23 Esquema de viñetas 1	82
Figura 24 Esquema de viñetas 2	82
Figura 25 Primera integración disciplinar y metacientífica.....	83
Figura 26 Modelo gráfico 1 extraído de un manual de biología	90
Figura 27 Modelo gráfico 2 extraído de un manual de biología	90
Figura 28 Modelo gráfico 1 extraído de un manual de biología	91
Figura 29 Titular de la noticia que contextualiza la actividad.....	92
Figura 30 Ejemplo de G3 al describir los planes celulares eucariota y procariota.	100
Figura 31 Estrategias explicativas construidas por los grupos.....	105
Figura 32 Estructura celulares identificadas por los grupos en el modelo	110
Figura 33 Ejemplo de intervención de G3.....	111
Figura 34 Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes.....	115
Figura 35 Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes.....	116
Figura 36 Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes.....	124
Figura 37 Ejemplo de intervención de G1.....	125
Figura 38 Ejemplo de intervención de G1.....	130

Figura 39 Estado final del proceso de intervención de los modelos de célula procariota y eucariota	139
Figura 40 Esquema que muestra la categorización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes en función de las perspectivas que adoptaron para explicar el SIRS	144
Figura41 Aplicación de la idea clave metacientífica: “la carga teórica de las observaciones” a un nuevo hecho científico.....	145

Índice de tablas

Tabla 1 Ejemplo de unidad de análisis y categorización	34
Tabla 2 Integrantes de los distintos grupos de trabajo.....	35
Tabla 3 Secuencia de actividades del eje disciplinar y metacientífico	94
Tabla 4 Modelos iniciales de los grupos.....	100
Tabla 5 Descripciones por grupos de la interpretación de los modelos de Robertson y Margulis.....	112
Tabla 6 Descripciones por grupos al confrontar los modelos iniciales con los científicos.....	119
Tabla 7 Descripciones de las explicaciones que dan los grupos sobre la presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos.....	121
Tabla 8 Comparación de los grupos sobre la presencia de ADN en cloroplastos y mitocondrias con el modelo de “filiación directa” de Taylor.....	126
Tabla 9 Descripciones iniciales de los grupos sobre la idea clave metacientífica “la carga teórica de las observaciones”	129
Tabla 10 Textos reescritos por los grupos advertidos por ideas metacientíficas	132
Tabla 11 Respuestas de los grupos al pensar sobre el origen de las diferentes organelas	134
Tabla 12 Respuestas de los grupos sobre el estado de ciencia normal en la teoría del origen de la célula eucariota	137
Tabla 13 Descripciones de los grupos de la actividad de aplicación del modelo disciplinar	140
Tabla 14 Descripciones de los grupos de la actividad de aplicación del modelo metacientífico	146

1. Planteamiento del problema y de los objetivos de la investigación

1.1 Fundamentos y relevancia del problema a investigar

Al examinar los planes de estudios de distintos profesorados universitarios en Argentina (CIN, 2012), e investigaciones previamente publicadas (Lozano, 2016), se puede constatar que la mayoría de ellos, se estructuran siguiendo una tradición académica: los profesorados comparten un tronco común de formación disciplinar con determinadas licenciaturas, y la formación específica en aspectos didácticos y pedagógicos se lleva a cabo en cursos que tienen un escaso diálogo con las materias disciplinares.

En los últimos años, han surgido otros enfoques para la estructuración de la formación del profesorado universitario, por ejemplo, en Biología, con el objeto de superar la mencionada dicotomía y promover una integración sinérgica de los distintos espacios de formación profesional (Resolución CDE y VE N.º 055/2017).

En el Profesorado de Nivel Medio y Superior en Biología (PNMSB) de la Universidad Nacional de Río Negro (UNRN), institución educativa en la cual se inscribe esta tesis, se ha trabajado durante más de una década en el marco de un plan de estudios en el que las materias del eje disciplinar biológico se han diseñado específicamente para la formación del profesorado. Este enfoque otorga autonomía para proyectar una formación biológica rigurosa y actualizada, orientada al desarrollo profesional de educadores en esta disciplina y no de investigadores en el campo disciplinar.

“A diferencia de lo que ocurre con la mayoría de las carreras de profesorado en ciencias que se desarrollan en las universidades de nuestro país, la formación disciplinar en biología y en materias disciplinares complementarias que prevé nuestro plan de estudios, no se lleva a cabo a partir de la estructura disciplinar de otra carrera, por ejemplo, una licenciatura en Biología, y esto permite el diseño de un plan de formación y de objetivos claramente vinculados a las competencias profesionales que

desarrollarán nuestros estudiantes de profesorado”. (Resolución CDE y VE N.º 055/2017, p. 10)

Además, en el plan de estudios se hacen explícitas algunas orientaciones didácticas, vinculadas con propiciar una “enseñanza basada en la modelización de fenómenos” (Izquierdo, 2000) y el abordaje de contenidos metacientíficos del eje “naturaleza de la ciencia” (Adúriz-Bravo, 2005a, 2010), como así también la contextualización de la enseñanza en el “abordaje de asuntos sociocientíficos” (Zeidler, et al., 2005) y el “desarrollo de enfoques complejos y multireferenciados” (Bahamonde, 2014, Lozano et al., 2016).

En este marco, se propicia el desarrollo de propuestas de formación integradas en los diferentes espacios curriculares, ya sean disciplinares (del eje biológico), metacientíficas o del campo de la didáctica. De este modo, las y los estudiantes, mientras aprenden un modelo biológico, también tienen oportunidades de reflexionar sobre la propia ciencia, pensar en cómo aprendieron y construir ideas actualizadas y críticas sobre la enseñanza.

Aunque estas perspectivas se encuentran explícitamente detalladas en el plan de estudios vigente, especialmente en su última versión (Resolución CDE y VE N.º 055/2017), la complejidad y regulación de las prácticas profesionales docentes del profesorado hacen que, en parte de su formación, se continúen privilegiando formas de enseñanza más tradicionales. Estas, se encuentran vinculadas con un modelo de transposición didáctica analítico, en el cual los modelos biológicos se enseñan fragmentados en sus diferentes aspectos y no guardan relación directa con hechos del mundo a los cuales podrían dar significado (Sanmartí, 2002). Esto provoca que las y los estudiantes confieran menor relevancia a sus aprendizajes, disminuyendo su motivación y persistencia para continuar sus estudios (Lozano 2024; Pérez, 2024; Tinto, 2009).

Esta situación ha sido observada por el autor de esta tesis, quien fue estudiante de este profesorado y se ha desempeñado como auxiliar de docencia en asignaturas de diferentes campos de la formación. Esta experiencia le ha proporcionado un

conocimiento más profundo del caso, al haber adoptado diversas perspectivas para observar e intervenir en el contexto donde se desarrolla la tesis.

Desde el Centro de Estudios e Investigación en Educación (CEIE) de la UNRN, y con el objeto de contribuir al cumplimiento de las prescripciones del plan de estudios, se han desarrollado diversas investigaciones que implican el diseño, evaluación e implementación de unidades didácticas (UD) que, en diferentes espacios curriculares del PNMSB de la UNRN, integran la modelización biológica, el desarrollo de ideas metacientíficas y la formación didáctica. Los equipos de investigación están conformados por docentes que enseñan en los tres campos implicados (biología, metaciencias y didáctica). En este marco, la presente tesis constituye un aporte más a la mencionada línea de producción didáctica, con el objetivo de fortalecer, desde las prácticas educativas, la identidad de la formación del profesorado. (Lozano y Zanon, 2014; Lozano, 2016; Lozano et al., 2016; Bahamonde y Lozano 2017; Diaco, 2017; Diaco et al., 2019; Lozano, et al., 2018; Álvarez Soria y Lozano, 2020; Lozano, et al., 2020; Bahamonde et al., 2020; Lozano et al., 2021a; Lozano et al., 2021b; Álvarez Soria y Lozano, 2022; Bahamonde y Lozano, 2023; Rodríguez, et al., 2023) (**Figura 1**).

Figura 1

Integración disciplinar y didáctica en la formación del profesorado



1.2 La delimitación del problema en el ámbito de la formación del profesorado en biología

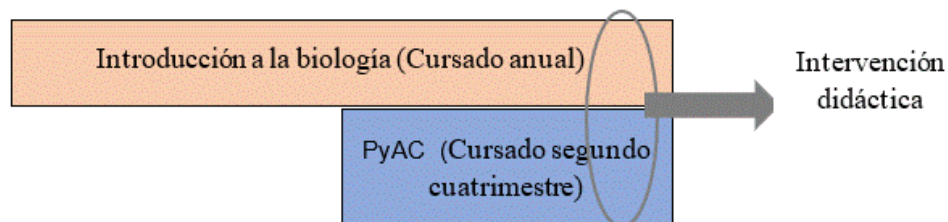
Las materias Introducción a la Biología (IB) y Pensamiento y Actividad Científica (PyAC), en las cuales el docente investigador se desempeña como auxiliar de docencia, han desarrollado diversas experiencias de enseñanza a partir del diseño e implementación de UD que integran la modelización disciplinar y el abordaje de ideas clave sobre la ciencia. Con el objeto de ampliar el banco de experiencias sistematizadas y evaluadas, y colaborar con el desarrollo curricular de la carrera, se llevó a cabo el diseño, implementación y evaluación de una UD destinada a la enseñanza del modelo de Origen de la Célula Eucariota (OCE), junto al desarrollo de ideas sobre la ciencia desde la perspectiva NOS. La implementación de la UD en IB se desarrolló en las últimas semanas de clases, en paralelo con el cursado de la asignatura PyAC, que comparte el mismo grupo de estudiantes. Las decisiones sobre la sincronicidad de la implementación son particulares por dos razones: en primer lugar, al llegar a ese momento, las y los estudiantes ya han modelizado previamente distintos fenómenos biológicos en IB, requeridos para complejizar las discusiones sobre el OCE, tal como se detallará en los resultados mediante la evaluación de los modelos iniciales. Por otro lado, en PyAC, el grupo-clase tendrá oportunidades de profundizar en temáticas metacientíficas que vienen desarrollando, pero ahora contextualizadas en la enseñanza del modelo de OCE. **(Figura 2).**

Respecto del modelo del OCE, se constituye como uno de los temas fundamentales y más controvertidos de la biología evolutiva (Lang, 2014). La historia de la construcción de este modelo (Martin, et al., 2015), su relevancia y estatus actual dentro de la comunidad científica (Bock y Knoop, 2012; Martin y Müller, 2007), sus controversias y su relación con la sociedad (Sapp, 1994), lo hacen un corpus teórico con gran potencialidad disciplinar y metacientífica, que integra conocimientos de las materias IB y PyAC, del PNMSB. En su abordaje, las y los estudiantes en formación inicial pueden construir herramientas teóricas más robustas para poder comprender, argumentar y explicar un proceso clave en la

evolución de la vida en nuestro planeta, y también hechos científicos y sociocientíficos, significativos y relevantes en los que algunos aspectos de este modelo puedan implicarse. Por ejemplo, el carácter endosimbiótico de organelas como las mitocondrias, la presencia de material genético en ellas y el carácter bacteriano específico de ese ADN, está implicado en la explicación de algunos mecanismos autoinmunes, como el Síndrome de Respuesta Inflamatoria Sistémica (SIRS, por sus siglas en inglés), que es producido, en algunos casos, por la liberación al torrente sanguíneo de ese ADN, producto de traumatismos graves en accidentes (Calfee y Matthay, 2010). Por su parte, las controversias generadas entre sobre el origen de ciertas organelas, como los cloroplastos (Margulis, 1967; Taylor, 1976), están en la base de la comprensión de ideas clave metacientíficas como el lugar que ocupa la carga teórica en la construcción de los hechos científicos y en los procesos de producción de consensos al interior de las comunidades científicas.

Figura 2

Esquema del momento de implementación de la unidad didáctica



1.3 Antecedentes de investigaciones para la enseñanza del modelo de célula

“El concepto de célula no se construye temprano en los niños a partir de sus observaciones cotidianas, sino más tarde en la escuela, cuando las primeras imágenes de células que encuentran estructuran su concepción de la célula”

(Clément et al., 2003, como se citó en Clément, 2006, p. 428).

Desde hace cincuenta años, el modelo de ser vivo y sus diferentes niveles de organización han sido objeto de estudio en la enseñanza de las ciencias, con enfoques que han variado según las corrientes teóricas predominantes en cada época: “Históricamente en la investigación educativa se han dado importantes

avances que comenzaron por estudiar las concepciones de los alumnos, determinando sus características y rasgos definitorios hasta llegar a considerarlas actualmente como representaciones mentales”. (Rodríguez Palmero y Moreira, 2002, p. 79)

Siguiendo a estos autores, la década de los años setenta estuvo marcada por el auge de las investigaciones sobre concepciones alternativas de estudiantes y docentes. Al respecto, Giordan (1987), señalaba que “los conceptos previos no pueden ser considerados como un fin de la investigación educativa en sí mismos. No observamos modificaciones espontáneas que permitan el paso directo de las representaciones subjetivas al conocimiento científico” (p. 110). Posteriormente, en los años ochenta, la atención se dirigió al cambio conceptual, el cual tenía como objetivo reemplazar esas concepciones por el conocimiento científico validado, aunque se demostró que este proceso no era tan rápido ni sencillo:

“El tratamiento que ha tenido la investigación de estas representaciones no se ha mostrado adecuado o, cuanto menos, no ha resultado plenamente satisfactorio por haberse caracterizado por una visión excesivamente descriptiva y, quizás, un tanto simplista. Se observa, pues, la necesidad de un replanteamiento, a partir de la situación descrita, y la posibilidad de que una salida sea considerar dichas representaciones como estructuras mentales con entidad propia, como "modelos mentales". (Rodríguez Palmero y Moreira, 1999, p. 123)

En los años noventa, la investigación se enfocó en el papel de las representaciones mentales, considerando que el aprendizaje no es solo la adquisición de información, sino un proceso cognitivo en el que la mente construye modelos internos del mundo. En este marco, los registros que dan cuenta de las representaciones mentales de las y los estudiantes resulta clave para diseñar estrategias de enseñanza que favorezcan la evolución de estas, hacia modelos más cercanos al conocimiento científico.

“Las representaciones pueden ser tanto externas como internas. El objeto de la investigación educativa (...) es la representación interna, es decir, aquel

modo cognitivo de operar que nos ocupa y que se pone en juego en los procesos de aprendizaje; y para ello esa misma investigación utiliza representaciones externas, o sea, aquellos registros, elaboraciones y materiales aportados por el alumnado que nos permiten establecer deducciones e inferencias sobre aquellos modos de operar mentalmente”. (Rodríguez Palmero y Moreira, 2002, p. 80)

Desde los estudios sobre el modelo de ser vivo (Gómez Galindo, 2006; Gómez Galindo et al., 2007) y el nivel de organización de los sistemas de órganos y la biología del desarrollo (Alfonso et al., 2021; Bahamonde y Galindo, 2016; Buckley, 2000; Felipe et al., 2005; Gómez Galindo, 2014; Giordan y De Vecchi, 1988) nos interesan las referencias de investigaciones sobre el nivel celular, ya que se vincula directamente con el tema de esta tesis: la enseñanza del OCE. En esta línea, Rodríguez Palmero (1997) realizó una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la enseñanza de la estructura y el funcionamiento de la célula, y permitió determinar el estado de la investigación en este campo. En sus conclusiones, señala que “la célula y su funcionamiento resultan contenidos clave en el desarrollo del conocimiento biológico” (p. 139). En este sentido, destaca la importancia de los modelos mentales para la comprensión de la célula, afirmando que:

“Efectivamente la célula supone un concepto científico, un conocimiento cuya comprensión requiere y reclama un modelo mental que permita su interpretación, lo que queda claramente de manifiesto ante la lectura y observación de lo que los estudiantes nos han entregado como expresión y producto de su forma de percibirla y concebirla”. (Rodríguez Palmero et al., 2001, p. 259)

Esta afirmación da cuenta de la importancia de los modelos mentales en la enseñanza de la biología celular, dado que la construcción de un concepto robusto sobre la célula, o sobre su origen, depende de cómo las y los estudiantes la representen. Por ello, en el capítulo 2, dedicado al marco teórico, se analizarán

cómo se han tratado estos modelos en la educación científica y qué estrategias didácticas favorecen su desarrollo.

Así, entre los antecedentes más relevantes se pueden destacar los estudios que analizan las representaciones de las y los estudiantes sobre la célula antes y después de un curso de nivelación universitaria (Rodríguez Palmero y Moreira, 1999; Rodríguez Palmero et al., 2001). Asimismo, se han investigado las representaciones construidas sobre la célula tras la enseñanza escolar y su estabilidad luego de cinco años, con resultados que indican su persistencia a lo largo del tiempo. En síntesis, estas investigaciones resaltan la importancia de describir los modelos y concluyen que es necesario diseñar estrategias didácticas que promuevan un diálogo más coherente entre los mismos y los de la comunidad científica (Rodríguez Palmero y Moreira, 2002).

Por otro lado, se han analizado las representaciones gráficas de la célula y su relación con los modelos presentes en los libros de texto (Rodríguez Palmero, 2003); así como el estudio de los modelos de estudiantes antes y después de observar células al microscopio, comparando sus representaciones con sus observaciones posteriores (Díaz de Bustamante y Aleixandre, 1996). Peresan et al. (2012), presenta una categorización de las representaciones sobre la célula muscular en el contexto de la enseñanza de la histología y se destacan relaciones isomórficas entre las células y los organismos a nivel de sistemas.

En el marco de los Next Generation Science Standards (NGSS), Flores et al. (2003) llevaron a cabo un estudio que propone el desarrollo de la modelización celular y ponen el foco en la construcción de modelos tridimensionales para la enseñanza.

Clément (2006), referencia las representaciones en la historia de la ciencia al investigar la persistencia de los “dibujos prototípicos” de célula animal y vegetal en manuales, docentes y estudiantes de biología, así como los obstáculos didácticos que se generan en el aprendizaje del modelo celular.

“El principal problema didáctico es la forma en que se introduce un prototipo vinculado a un concepto. Si no se da una explicación sobre los

orígenes del/los prototipo(s), en el caso de la célula, por ejemplo, los estudiantes pueden quedar atrapados con esta referencia única, sin poder concebir otras” (Clément, 2006, p. 437)

En esta línea, otras investigaciones también establecen vínculos con la historia de la ciencia y se enfocan en el diseño de UD fundamentadas en el “modelo cognitivo de ciencia escolar” (Izquierdo et al., 1999). En el caso de la célula eucariota animal, los trabajos de Jara et al. (2012) y Camacho González et al. (2012), se destacan por organizar las representaciones en familias de modelos y por su vinculación con modelos científicos contruidos a lo largo de la historia.

Los trabajos de Verhoeff (2003), Verhoeff et al. (2008), Cobb (2003) y Lijnse (1995), sobre la enseñanza del modelo celular, se inscriben en la línea de modelos y modelización (Gilbert y Justi, 2016) y en el diseño e implementación de ciclos de modelización que pueden ser iterativos (Psillos y Kariotoglou, 2016). Finalmente, la modelización de estructuras subcelulares, como la membrana plasmática (Johann, et al., 2022; Lozano, 2016) y los lisosomas (Ospina Quintero, 2024), amplían un panorama de antecedentes de estudios sobre la célula que pueden vincularse con el objeto de esta tesis.

Por otra parte, la incorporación de contenidos metacientíficos en la enseñanza de las ciencias naturales, desde la perspectiva de la “naturaleza de la ciencia”, también ha adquirido un papel central dentro de los marcos teóricos y metodológicos en la didáctica de las ciencias naturales. Diversos autores han destacado la importancia de integrar estos contenidos en las aulas para propiciar una comprensión más profunda sobre: cómo se construye el conocimiento científico, cómo evolucionan las teorías y modelos en el ámbito de la ciencia, cuál es el papel de la comunidad científica en estos procesos y cómo se relaciona la ciencia con la sociedad (Adúriz-Bravo, 2005a, 2010; Matthews, 2017; McComas et al., 1998; Lederman, 1992, 2006; Lederman et al., 2002).

De este modo, y en cuanto a los antecedentes relacionados con la enseñanza de ideas metacientíficas del eje “naturaleza de la ciencia”, sincrónica con el desarrollo

de modelos disciplinares a nivel de organismos, sistemas y células, se han desarrollado diversas investigaciones (Álvarez Soria et al., 2021; Álvarez Soria y Lozano, 2022; 2024; Bahamonde y Lozano, 2017; Lozano, 2016; Lozano et al., 2021a; 2021b; Bahamonde et al., 2016; Lozano et al., 2018, Carrasco, 2024; Vistarop et al., 2023; 2024; Ospina Quintero, 2024). Para este trabajo interesan particularmente aquellas que se orientaron al desarrollo de ideas metacientíficas básicas y preliminares sobre la carga teórica de las observaciones y el desarrollo de consensos en la construcción de los hechos científicos (Lozano et al., 2016, 2020).

En cuanto a investigaciones específicas sobre los procesos de modelización disciplinar y/o discusiones de ideas metacientíficas sobre el OCE, no se han encontrado publicaciones que den cuenta del abordaje del fenómeno en ningún nivel educativo. Los estudios referenciados en los antecedentes serán utilizados en las discusiones que se den en la tesis para confrontar y evaluar avances.

1.4 Hipótesis y propósito de la investigación

Las intervenciones realizadas a partir del diseño de la UD, enmarcadas en el “modelo cognitivo de ciencia escolar” (Izquierdo, et al., 1999) -operativizadas en la “actividad científica escolar” (Izquierdo, 2000; Sanmartí, 2002)- y el abordaje del eje “naturaleza de la ciencia” (Adúriz-Bravo, 2010), permitirán el desarrollo integrado de la modelización biológica y el desarrollo de ideas metacientíficas significativas para las y los estudiantes. Esto conducirá a la construcción de modelos e hipótesis teóricas sobre el fenómeno del OCE y a la comprensión de hechos científicos actuales que puedan ser explicados con ese modelo, y a su aplicación a nuevas problemáticas científicas y sociocientíficas.

Por otro lado, la sinergia entre los espacios de formación disciplinar y metacientífica, en sintonía con las directrices teóricas provenientes de los espacios de formación en didáctica del profesorado en biología, redundará en una mejora en la calidad de la educación científica que reciben las y los estudiantes (Bahamonde, 2014). Estos aspectos resultan imprescindibles y fundamentales para que los aprendizajes vinculados con los modelos que construya el alumnado sean más

significativos y estables en el tiempo, y permitirá caracterizar los procesos de modelización llevados a cabo por las futuras profesoras y profesores, e identificar las condiciones que puedan facilitar u obstaculizar este tipo de innovaciones en la formación del profesorado (Lozano, 2015).

En esta tesis, se pretende que las y los estudiantes piensen cómo las bacterias se transformaron en células eucariotas, hecho que fue objeto de intensos debates en el seno de la comunidad científica en las décadas de 1960 y 1970, y que contó con la participación de grandes referentes de la biología, como Margulis, Robertson y Taylor. Salvar esa discontinuidad evolutiva mediante la producción de modelos teóricos escolares, esto es, pensar “cómo ocurrió” a través de la modelización y luego poner a discutir esas producciones con los modelos científicos, es una de las tareas principales del trabajo. Es importante aclarar esto ya que, el estudio del OCE podría sugerir que esta tesis se encuentra orientada a enseñar modelos de biología evolutiva, como lo han concretado otros trabajos también desde una perspectiva de la enseñanza basada en la modelización (Diacó, 2017; Pérez, 2022). El énfasis en el “cómo ocurrió”, constriñe a pensar a nivel de cambios estructurales, y se hace consistente con las explicaciones en disputa presentadas por la comunidad científica en el período histórico mencionado (“ocurrió porque se complejizaron los sistemas de endomembranas y dieron lugar a la formación de organelas”, o “es el resultado de endosimbiosis estables a largo plazo”) y no se extiende a otros aspectos que las y los estudiantes implican en las discusiones, como por ejemplo: ¿Por qué lo hicieron?, ¿Para qué? Estas preguntas, junto al análisis de los procesos que regularon el ¿Cómo ocurrió? estarían en la base de una modelización de ideas evolutivas que podrían tratarse desde la perspectiva de las concepciones y los obstáculos epistemológicos en la construcción de modelos evolutivos (Pérez, 2022). En ese sentido, la asignatura “Teorías sobre la Evolución” del PNMSB, podría retomar las discusiones del OCE y desarrollar actividades que permitan la reflexión y la construcción de modelos de evolución, como el de selección natural, que aborden los aspectos mencionados anteriormente (González Galli y Meinardi, 2013).

1.5 Preguntas de investigación

Para la estructuración del saber de referencia:

- ¿Cómo fue la génesis, evolución y desarrollo del modelo del OCE en la historia? ¿Qué dificultades aparecieron en su constitución? ¿Qué aspectos de interés disciplinar y metacientífico de este análisis pueden incorporarse al desarrollo de la UD?

- ¿Cuál es el modelo sobre el OCE que en la actualidad ha quedado normalizado en los manuales de biología universitarios y qué aspectos recuperan de las discusiones implicadas en la historia de su construcción?

A partir del desarrollo de un análisis histórico-epistemológico sobre el OCE: ¿Qué ideas claves serían relevantes para esta etapa inicial de la formación de las y los estudiantes en biología y en “naturaleza de la ciencia”?

Para la tarea de organizar la enseñanza:

- ¿Cómo, desde la perspectiva de la Actividad Científica Escolar, organizar una UD para enseñar el OCE a ingresantes a la universidad, que integre el campo de formación biológico y metacientífico mediante el diseño de actividades que traccionen dichos campos e incorpore aportes del análisis histórico-epistemológico?

Para la tarea de modelización que deben llevar a cabo las y los estudiantes:

- ¿Qué modelos iniciales ponen en juego al abordar la explicación sobre cómo las bacterias se transformaron en células eucariotas?

- ¿Qué procesos de modelización intermedia y de vinculación con el modelo científico del OCE llevan a cabo durante el desarrollo de la UD?

- ¿Con qué nivel de significatividad ponen en juego un aspecto central del modelo construido en la UD para comprender una nueva situación de interés sociocientífico?

- ¿Cómo reflexionan sobre el lugar de la carga teórica de las observaciones y sobre la cuestión de los consensos en la construcción de los hechos científicos? ¿Cómo las aplican a una nueva situación?

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

- Caracterizar e interpretar procesos de modelización científica y metacientífica a partir de la implementación de una unidad didáctica sobre el origen de la célula eucariota, producidos por estudiantes de primer año del profesorado en biología en el contexto natural de las clases de biología.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar, a partir de un análisis exhaustivo con enfoque histórico-epistemológico, los aspectos centrales implicados en la construcción del modelo de origen de la célula eucariota desde fines del siglo XIX hasta la actualidad, para obtener insumos significativos que permitan contextualizar la enseñanza de ideas clave disciplinares y metacientíficas en la formación del profesorado.
- Elaborar ideas claves disciplinares y metacientíficas sobre el origen de la célula eucariota, para ser enseñadas durante la implementación de la unidad didáctica.
- Diseñar una versión de unidad didáctica para las materias Introducción a la Biología y Pensamiento y Actividad Científica, con una serie de actividades que promuevan procesos de modelización disciplinar y metacientífica integrados.
- Implementar la unidad didáctica y obtener datos para analizar los procesos de modelización llevados a cabo.

2. Marco teórico

2.1 Introducción

Diversos enfoques actuales y relevantes en el ámbito de la didáctica de las ciencias naturales (DCN) y la filosofía de la ciencia ofrecen los fundamentos teóricos para esta tesis, la cual tiene como principal objeto de estudio caracterizar e interpretar procesos de modelización científica y metacientífica sobre el fenómeno del OCE. Entre ellos se incluye el “modelo cognitivo de ciencia escolar” (MCCE) (Izquierdo, et al., 1999; Izquierdo, 2000); la “concepción semántica de las teorías científicas” (Gieryn, 1988, 1992; Adúriz-Bravo, 2013); el concepto de “actividad científica” y sus “contextos” (Echeverría, 1998); y el componente curricular sobre la “naturaleza de la ciencia” (NOS, por sus siglas en inglés “Nature of Science”) para la educación metacientífica (Adúriz-Bravo, 2005a, 2010). Estas directrices teóricas, las cuales se operativizan en las clases a través de la “actividad científica escolar” (ACE) (Izquierdo, 2000; Izquierdo, et al., 1999; Sanmartí, 2002), se encuentran en la base de la perspectiva de “integración de la formación disciplinar y metacientífica” que se desarrolla en esta línea de investigación (Lozano, 2016; Diaco, 2017; Lozano, et al., 2018).

A continuación, se desarrollan las principales ideas teóricas de las cuales se nutre esta tesis.

2.2 El modelo cognitivo de ciencia y la concepción semántica de las teorías científicas

En los años setenta, emergió una corriente epistemológica innovadora denominada la "concepción semántica o semanticista de las teorías científicas" (Adúriz-Bravo, 2013). Esta perspectiva representó una alternativa a las ideas más tradicionales que se tenían sobre la ciencia, basada en una concepción sintáctico-axiomática y representativas del positivismo lógico del siglo XX (Adúriz-Bravo y Ariza, 2012). La concepción semántica ofreció un enfoque diferente para comprender cómo funcionan y se desarrollan las teorías científicas, desviándose de las tradicionales que ponían un énfasis primordial en la estructura lógica y formal de las teorías,

especialmente en el campo de la física, con lo cual, otras ciencias como las biológicas quedaban relegadas. Esta nueva corriente generó un debate intelectual entre las y los filósofos de la ciencia y una reconsideración de las bases mismas de la investigación científica (Estany, 1993), desafiando las ideas establecidas y abriendo nuevas vías para el estudio y comprensión de la ciencia.

El “modelo cognitivo de ciencia” (MCC), asociado a esa concepción, se fundamenta en varias disciplinas de las ciencias cognitivas. Fue propuesto principalmente por el epistemólogo estadounidense Ronald Giere (1988, 1992)¹ y ha marcado un giro significativo en la manera de concebir a la ciencia, como así también, a los enfoques educativos como se verá más adelante (Izquierdo, 1999, 2000).

“Las ciencias cognitivas reúnen diversas áreas como la inteligencia artificial, las neurociencias, la lingüística y la psicología cognitiva. Su objetivo es investigar cómo surge y opera el conocimiento humano. Este enfoque ha dado lugar al MCC. Según esta visión, la ciencia se concibe como el resultado de procesos cognitivos”. (Izquierdo, 1999, p. 47)

En su seno se plantea que la actividad central de las y los científicos es la construcción de “modelos teóricos” (Estany, 1993; Nersessian, 1999), los cuales son representaciones que le dan sentido y significado a los fenómenos del mundo, y habilitan a la intervención (Hacking, 1983, como se citó en Echeverría, 1998).

“Según este enfoque, el lenguaje, en forma de proposiciones, puede usarse no para describir directamente el mundo, sino para construir un "modelo mental", que es un "análogo estructural" de una situación real o imaginada. Una vez construido, el modelo mental puede producir "imágenes", que son

¹ Aunque este enfoque también se asocia a otros autores como Van Fraassen y Suppe, se referencia solo a Giere ya que sus ideas se vinculan directamente con la función docente (en Estany, 1993, p. 189).

modelos mentales vistos desde una perspectiva particular. Esta interacción de proposiciones, modelos e imágenes proporciona una descripción más rica de los recursos representativos de los científicos que la empleada por los empiristas lógicos o la mayoría de sus críticos”. (Giere, 1992, p. XVII)

Desde la psicología cognitiva, por ejemplo, Nersessian (1999) plantea que la distinción respecto a la visión axiomática de la ciencia, radica en que los “modelos” no se emplean aquí en el sentido lógico de asignar de manera abstracta “cosas” a términos de un axioma, sino más bien en un sentido analógico, como una estructura destinada a ser “isomorfa” con algún aspecto de la realidad. Siguiendo a esta autora, los modelos son las representaciones mentales que se utilizan para realizar una parte significativa del razonamiento, permitiendo pensar y comprender la realidad a través de la lente de una estructura conceptual (Nersessian, 1999). Estas representaciones, solo existen y se construyen en la mente de las personas que imaginan.

2.2.1 Los modelos teóricos según la perspectiva de Ronald Giere

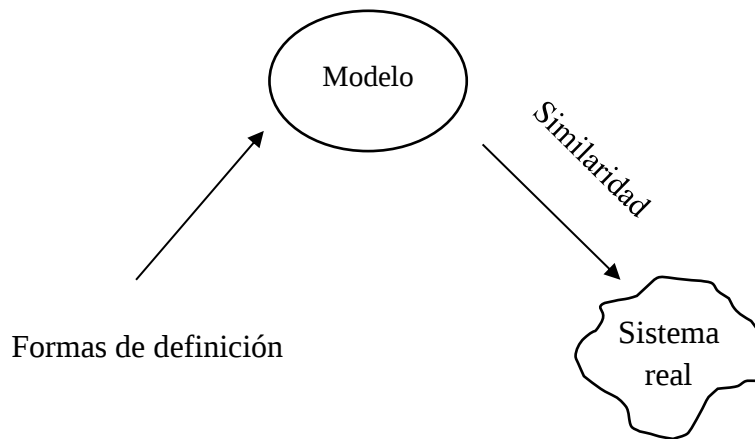
“Lenguajes diferentes imponen al mundo estructuras diferentes” (Kuhn, 1989, p.99, como se citó en Echeverría, 1988, p. 17).

La propuesta de Giere hace hincapié en la importancia central de los modelos teóricos en la construcción del conocimiento científico (Giere, 1988, 1992). Es a partir de los mismos que, las y los científicos, pueden explicar y darles significado a los fenómenos del mundo. Desde esta perspectiva, los modelos se caracterizan por ser representaciones que actúan como subrogados, esto es, como sustitutos de los sistemas reales bajo estudio (Adúriz-Bravo e Izquierdo-Aymerich, 2009). El modelo teórico se relaciona con dos elementos: por un lado, un conjunto de recursos simbólicos que lo definen y expresan (principios, leyes, ecuaciones, tablas, gráficos, analogías) y, por el otro, el mundo o sistema real bajo estudio al cual representa modélicamente (Adúriz-Bravo, 2011) (**Figura 3**). Al referirse a la relación entre el modelo y el sistema real, Giere (1988) plantea lo siguiente:

“La relación apropiada, sugiero, es la de similitud. Entonces, las hipótesis reclaman una similitud entre los modelos y los sistemas reales. Pero dado que cualquier cosa es similar a cualquier otra en algunos aspectos y en algún grado, las afirmaciones de similitud son vacías sin al menos una especificación implícita de aspectos relevantes y grados. La forma general de una hipótesis teórica es así: un sistema real identificable como tal es similar a un modelo designado en los aspectos y grados indicados”. (p. 81)

Figura 3

Esquema de modelo teórico de Giere



Nota. Adaptado de Explaining Science. A cognitive approach (p. 93), por Giere, 1988, The University of Chicago Press.

Desde este punto de vista, las “hipótesis teóricas” constituyen el medio lingüístico utilizado para expresar afirmaciones empíricas sobre la realidad. Las hipótesis indican cómo el modelo se asemeja al sistema en ciertos aspectos y con ciertos niveles de precisión y, como resultado, pueden ser evaluadas, confirmadas o descartadas, de manera parcial y aproximada durante la investigación científica (Giere, 1988).

En contraposición a la visión tradicional sobre la ciencia, Giere desde una postura realista moderada (Giere, 1999), sugiere centrar la atención en los “detalles” de similitud entre el modelo y el sistema real, más que a una idea de “verdad” como pretendía, por ejemplo, el positivismo lógico:

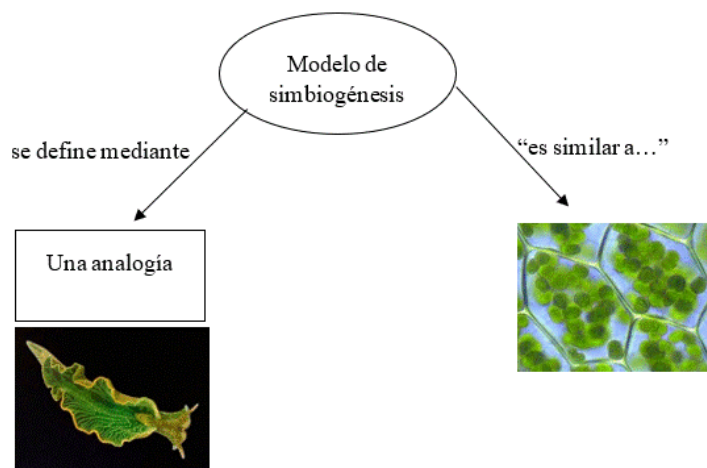
“La evidencia acumulada de las ciencias cognitivas, incluyendo incluso las neurociencias, sugiere que la cognición y la percepción humanas operan sobre la base de algún tipo de métrica de similitud. Esto refuerza la idea de que la similitud es una relación particularmente prometedora para usar en una teoría naturalista de la ciencia”. (Giere, 1988, p. 82)

En la

se presenta un esquema de modelo teórico de Giere, adaptado al modelo de “simbiogénesis”, esto es, el origen de un nuevo organismo mediante un proceso de simbiosis que se establece de manera permanente. Se utiliza la analogía con un molusco, *Elysia clorótica*, propuesta por Sapp (1994): “la analogía entre las algas simbióticas que viven en las células de muchos animales translúcidos y la naturaleza de los cloroplastos en las plantas era obvia para muchos botánicos” (Sapp, 1994).

Figura 4

Esquema de modelo teórico adaptado a una forma de definición del modelo y un fenómeno de interés en el desarrollo de la UD



Nota. Adaptado de Explaining Science. A cognitive approach (p. 93), por Giere, 1988, The University of Chicago Press.

2.2.2 La ciencia como actividad científica

La nueva filosofía de la ciencia del siglo XX (Kuhn, 2019; Hanson, 1977) plantea que el conocimiento científico está influenciado por las perspectivas teóricas de las y los investigadores o de la comunidad científica en general (Izquierdo, 1999). El aporte de otras disciplinas relacionadas, también conocidas como metaciencias, por ejemplo, la sociología de la ciencia (Knorr-Cetina, 2005; Latour y Woolgar, 1995) y la historia de la ciencia (Koyré, 1987) han ampliado los enfoques teóricos que se tenían hasta antes de la década del 60' sobre la ciencia y sobre lo que hacen las y los científicos. Según Echeverría (1998), estas contribuciones pusieron de manifiesto una crisis y surgieron nuevas y fructíferas reflexiones.

Siguiendo a Izquierdo (1999), “se ha pasado de considerar que la ciencia es un conjunto organizado y validado de conocimientos que explican cómo es el mundo en que vivimos a creer que la ciencia es un tipo de actividad humana y, por ello, compleja y difícil de describir” (p. 47). Esto implica reconocer que la ciencia es una construcción humana y, como tal, está sujeta a la subjetividad de los individuos que desarrollan representaciones para explicar fenómenos del mundo, en el seno de la cultura y una sociedad determinada. En otras palabras, la ciencia está influenciada por valores (Echeverría, 1998; Izquierdo, 2000).

Por ello, para fundamentar teóricamente una enseñanza de las ciencias genuina, resulta insuficiente basarse solo en el aspecto epistemológico y “acabado” de los modelos en la construcción del conocimiento científico. Es decir, centrarse únicamente en el contexto de justificación, como lo propuso el filósofo Reichenbach en el seno del empirismo lógico (Reichenbach, 1938, como se citó en Echeverría, 1998), no resulta muy adecuado, dado que:

“La distinción de Reichenbach parte de un malentendido fundamental, que afecta a toda la tradición de la concepción heredada de la filosofía de la ciencia, a saber: *la reducción de la ciencia al conocimiento científico*. Contrariamente a esta concepción, que ha tenido y sigue teniendo gran

influencia, hay que considerar que la ciencia es una *actividad*, y que los estudios sobre la ciencia, en los cuales participan historiadores, sociólogos, antropólogos, psicólogos, filósofos y otros profesionales, no pueden restringirse únicamente a los aspectos cognoscitivos de la actividad científica”. (p. 52)

En este sentido, Echeverría (1998) ofrece directrices teóricas que fundamentan esta nueva concepción de la ciencia considerada como una “actividad científica” cargada de valores epistémicos y no epistémicos.

2.3 El modelo cognitivo de ciencia escolar y la actividad científica escolar

En los párrafos anteriores se presentaron los principales aportes que constituyen la base del MCC. Como argumentan varias autoras y autores, estos fundamentos teóricos sostienen una auténtica educación científica basada en la modelización (Adúriz-Bravo, 2013; Izquierdo et al., 1999).

Giere (1988) plantea que “las representaciones que los científicos construyen no pueden ser demasiado (...) diferentes en naturaleza de las empleadas por los humanos en general” (p. 62). Por lo tanto, es razonable y deseable que, en las aulas de ciencias, las y los estudiantes tengan la oportunidad de construir modelos teóricos que les permitan explicar y dar sentido a los diferentes fenómenos naturales para intervenir en ellos, sin descuidar el componente axiológico que los guía. Este es uno de los aspectos centrales del MCCE, el cual representa el núcleo teórico que sustenta esta investigación.

Estos principios del MCCE se operativizan en lo que se denomina ACE (Izquierdo, 2000; Sanmartí, 2002). Esta actividad, que llevan a cabo las y los estudiantes en las aulas de ciencia, “se parece” o “es similar” a la actividad que desarrollan las y los científicos en su núcleo más irreducible, que correspondería a la capacidad de pensar el mundo con teorías.

Así, en el diseño de la ACE, se ha de tener en cuenta cuáles son los hechos del mundo que pueden tener sentido para las y los estudiantes a fin de transformarlos,

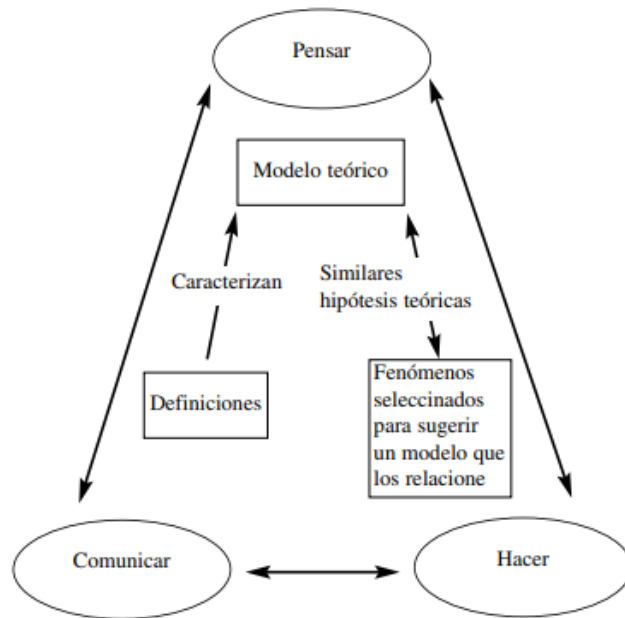
mediante el conocimiento teórico, en hechos paradigmáticos que funcionarán a modo de modelos teóricos escolares. Por ello, y como menciona Izquierdo (2007):

“Las teorías científicas, en el diseño de la ACE, no pueden formularse como axiomas o verdades (que no tendrían sentido para los alumnos puesto que no forman parte de la comunidad científica), sino como un conjunto de «casos» que han sido bien resueltos y que por ello son ejemplares” (p. 132).

Desde este marco didáctico, la ACE consiste en montar un escenario, esto es, una situación que sea significativa para las y los estudiantes, “en la cual tengan sentido las principales preguntas que están en el corazón de las disciplinas, así como las ‘reglas del juego’ para contestarlas, porque facilitan una representación abstracta de la situación inicial en la cual se ponen en juego diversos sistemas de valores que van a permitir evaluar la actividad” (Izquierdo, 2007, pp. 132-133). Estas ideas se resumen en la **Figura 5**, que relaciona el proceso de construcción de modelos teóricos para dar sentido a los fenómenos del mundo en el marco de la ciencia escolar, en el cual se van ajustando las conexiones entre el pensamiento, el discurso y la acción mediante una argumentación en clase que vaya introduciendo la perspectiva propia de los modelos teóricos y de los lenguajes disciplinares.

Figura 5

Esquema de organización del modelo cognitivo de ciencia escolar operativizado en la actividad científica escolar



Nota. Adaptado de Enseñar ciencias. Una nueva ciencia (p. 133), por Izquierdo, 2007, Enseñanza de las ciencias sociales.

2.4 La modelización en la actividad científica escolar

“Nos ha parecido que podría ser útil una reflexión sobre las aportaciones de las ciencias cognitivas a la didáctica, concretada en la influencia que puedan tener los modelos cognitivos de ciencia en el diseño y fundamentación de la enseñanza de las ciencias. Estos nuevos modelos de ciencia parten de un enfoque global del conocimiento humano y de su génesis e incluyen consideraciones sociológicas y lingüísticas. Hacen menos rígida la separación entre conocimiento cotidiano o de sentido común y conocimiento científico, dando al primero la importancia máxima”. (Izquierdo, 1999, p. 3)

El proceso de modelización se vuelve un aspecto fundamental para el aprendizaje de las ciencias, y existe un creciente desarrollo de investigaciones que apuntan en

este sentido (Gilbert 2004, 2010; Gilbert y Boulter, 1993). Estas plantean que una de las principales finalidades de la educación científica debería centrarse en generar oportunidades para experimentar el proceso de modelización, ya que debería ser lo más cercano posible a la práctica científica "real". De esta forma, los modelos y la modelización son fundamentales para este tipo de currículo, ya que, como plantea Gilbert (2004), "permiten participar en el aspecto creativo de la ciencia y experimentar su valor cultural" (p. 117).

Según Adúriz-Bravo e Izquierdo-Aymerich (2009), la modelización supone una serie de cuestiones, a saber: por un lado, implica construir argumentos en los que se subsumen los hechos científicos bajo modelos existentes que los expliquen o los representen; este proceso incluye ajustar modelos existentes cuando surgen nuevos datos "anómalos" durante la investigación, contrastando hipótesis teóricas. También, involucra aplicar los modelos existentes para explicar nuevos hechos ya conocidos en un contexto educativo.

Desde esta perspectiva, el foco principal de la enseñanza no está en señalar el "error" de los modelos iniciales de las y los estudiantes, sino en permitir que estos atraviesen el proceso de modelización que dará lugar a la construcción de un modelo científico escolar consistente con el fenómeno analizado. Este proceso implica desarrollar formas de pensar los fenómenos naturales que se ajusten a las perspectivas científicas y también generar modos de comunicación que respeten las reglas establecidas por la ACE alineadas con el lenguaje científico.

Por otro lado, y siguiendo a Nersessian (1999), los modelos mentales iniciales que ponen en juego el grupo de estudiantes, se pueden considerar como estructuras temporales construidas en la "memoria de trabajo" para una tarea de razonamiento específica, por ejemplo, explicar por primera vez cómo suponen que fue el OCE. Luego, al avanzar en las actividades de modelización, es posible identificar modelos intermedios que funcionan como aproximaciones parciales al modelo de arribo (López-Mota y Rodríguez-Pineda, 2013). Estos modelos tienen la capacidad de ajustar un fenómeno analizado y contienen algunos elementos del modelo

científico, pero aún están sujetos a modificaciones, ajustes y complejizaciones. En este contexto, las analogías desempeñan un papel crucial para fortalecer los procesos de modelización, ya que ayudan a atribuir significados y a establecer conexiones entre los modelos y los hechos del mundo (Gilbert, 2004).

2.5 El eje naturaleza de la ciencia y su finalidad en la educación científica

Desde hace varias décadas, se ha argumentado que las y los estudiantes en proceso de escolarización deben tener oportunidades para desarrollar un pensamiento crítico sobre la ciencia. Esto implica comprender qué es la ciencia, cómo se elabora, cuál es su historia y cómo se relaciona con la sociedad (Adúriz-Bravo, 2005a, 2010). De este modo, la inclusión de contenidos metacientíficos desde la perspectiva de la NOS se ha convertido en un eje fundamental dentro de los lineamientos de la DCN (Matthews, 2017; McComas et al., 1998; Lederman, 1992, 2002, Lederman et al., 2006).

A través de este enfoque, y mediante la implementación de actividades concretas que den lugar a su aprendizaje, se busca fomentar una reflexión sobre "esa cosa llamada ciencia" (Chalmers, 2010), para que estudiantes y ciudadanos en general, desarrollen una visión más ajustada, actualizada y crítica de la actividad científica (Adúriz-Bravo, 2005a, 2005b; Lederman, 1992; Matthews, 1994, 2017; Driver et al., 1996)

“En educación hay una vieja tradición que defiende los beneficios culturales, educativos, personales y científicos de inyectar historia y filosofía de la ciencia en las clases de ciencia, en los planes de estudio y en la formación de maestros, o, en términos modernos, de incluir la naturaleza de la ciencia en las aulas, los planes de estudios y los programas para maestros. Ésta, que puede ser llamada la tradición normativa de la naturaleza de la ciencia, sostiene que los alumnos que aprenden ciencia también deberían aprender sobre la ciencia, en particular, sus características filosóficas o metodológicas distintivas, para satisfacer una diversidad de propósitos personales, culturales y educativos”. (Matthews, 2017, p. 491)

Matthews (2017) señala que, en tiempos recientes, ha habido un cambio hacia la investigación empírica de la NOS. Esta investigación se ha centrado menos en las razones por las cuales se debería aprender sobre la NOS y más en cómo aprenden las y los estudiantes y si realmente han comprendido la materia (p. 492). Esta perspectiva "empírica" caracteriza a esta tesis, que se materializa a través del diseño, implementación y evaluación de una UD que incluye actividades sobre temas metacientíficos.

Si bien existen en la literatura, distintas formas de dar sentido a la NOS (Matthews, 2017), en esta investigación se adopta la perspectiva de Adúriz-Bravo por su vinculación directa con la profesión de enseñar ciencias. Desde este punto de vista, la NOS se define como un conjunto de contenidos metacientíficos con valor para la educación científica, a partir del cual, las y los estudiantes pueden construir imágenes de ciencia más ajustadas a lo que actualmente se sabe sobre la ciencia (Adúriz-Bravo, 2001, 2005b, 2007).

2.5.1 Estructuración de la naturaleza de la ciencia para su enseñanza

En cuanto a la labor específica de estructurar la enseñanza de la NOS en la formación inicial del profesorado, es posible evaluar ciertos aspectos que servirían como “puntos clave” para la elaboración de la UD, los que pueden ser incorporados de manera coherente al proceso de la ACE y la tipología de actividades que aquí se adopta (Sanmartí, 2002) y que se describirá más adelante.

Para esta tesis se adopta una propuesta que está orientada a la construcción de entidades metateóricas específicas o formulación de ideas claves (Adúriz-Bravo, 2005b; Adúriz-Bravo y Ariza, 2012). Se considera que este enfoque es necesario para estructurar un modelo que sea fecundo para el profesorado y que potencie y haga más significativa la formación disciplinar y didáctica que lleven a cabo, en el marco de la ACE. Desde esta perspectiva, la especificación de los aspectos a enseñar se realiza mediante la formulación de ideas clave metacientíficas, que son afirmaciones sencillas pero muy significativas para las y los estudiantes.

2.6 El diseño de una unidad didáctica, desde la actividad científica escolar

Según Sanmartí (2000; 2002), el diseño de UD es la tarea más importante que tiene un docente. Es a partir de la práctica que se concretan sus ideas e intenciones educativas, validadas en un contexto particular y que tienen como finalidad el logro del aprendizaje de contenidos por parte de las y los estudiantes:

“Desde las nuevas visiones sobre el aprendizaje y sobre la enseñanza según las cuales son los propios alumnos quienes construyen su conocimiento, la función del profesorado es promover este proceso constructivo, que forzosamente será distinto para cada estudiante y para cada grupo-clase. Consecuentemente, un buen diseño didáctico es aquel que mejor responde a las necesidades diversas de los estudiantes”. (Sanmartí, 2000, p. 241)

Desde esta perspectiva, el diseño didáctico se estructura en torno a un conjunto de actividades que responden a objetivos y propósitos explicitados por el docente. Es importante señalar que estas actividades no deben considerarse de forma independiente, ya que es su secuenciación la que favorece los procesos de enseñanza y aprendizaje basados en la modelización (Sanmartí, 2002). De este modo, se define cómo las y los estudiantes construirán conocimiento científico y metacientífico.

2.6.1 Los tipos de actividades de la unidad didáctica

A continuación, se sintetizan las ideas principales de las actividades según la tipología propuesta por Sanmartí (2002):

- Actividades de iniciación, de exploración, que dan lugar al planteamiento del problema y la elicitación de los modelos iniciales por parte de las y los estudiantes. A partir las mismas, se empiezan a percibir los objetivos de aprendizaje.
- Actividades para promover la evolución de los modelos iniciales, orientadas a la generación de instancias de modelización intermedia que permitan complejizar las representaciones iniciales, a partir de la identificación e introducción de nuevas variables, de nuevos puntos de vista, de analogías, etc.

- Actividades de estructuración del conocimiento, de síntesis, que permiten la regulación de los nuevos aprendizajes y del “camino recorrido”, “el alumno ha de ser capaz de hablarse a sí mismo, de decirse que está aprendiendo” (Sanmartí, 2002, p. 191) y poner en diálogo con los modelos eruditos para compararlos.
- Actividades de aplicación del conocimiento, para poder pensar en nuevos fenómenos del mundo, que pueden ser explicados con el mismo modelo o alguno de sus aspectos e intervenir en él.

La **Figura 6**, da cuenta del proceso de modelización implicado en el desarrollo de la UD.

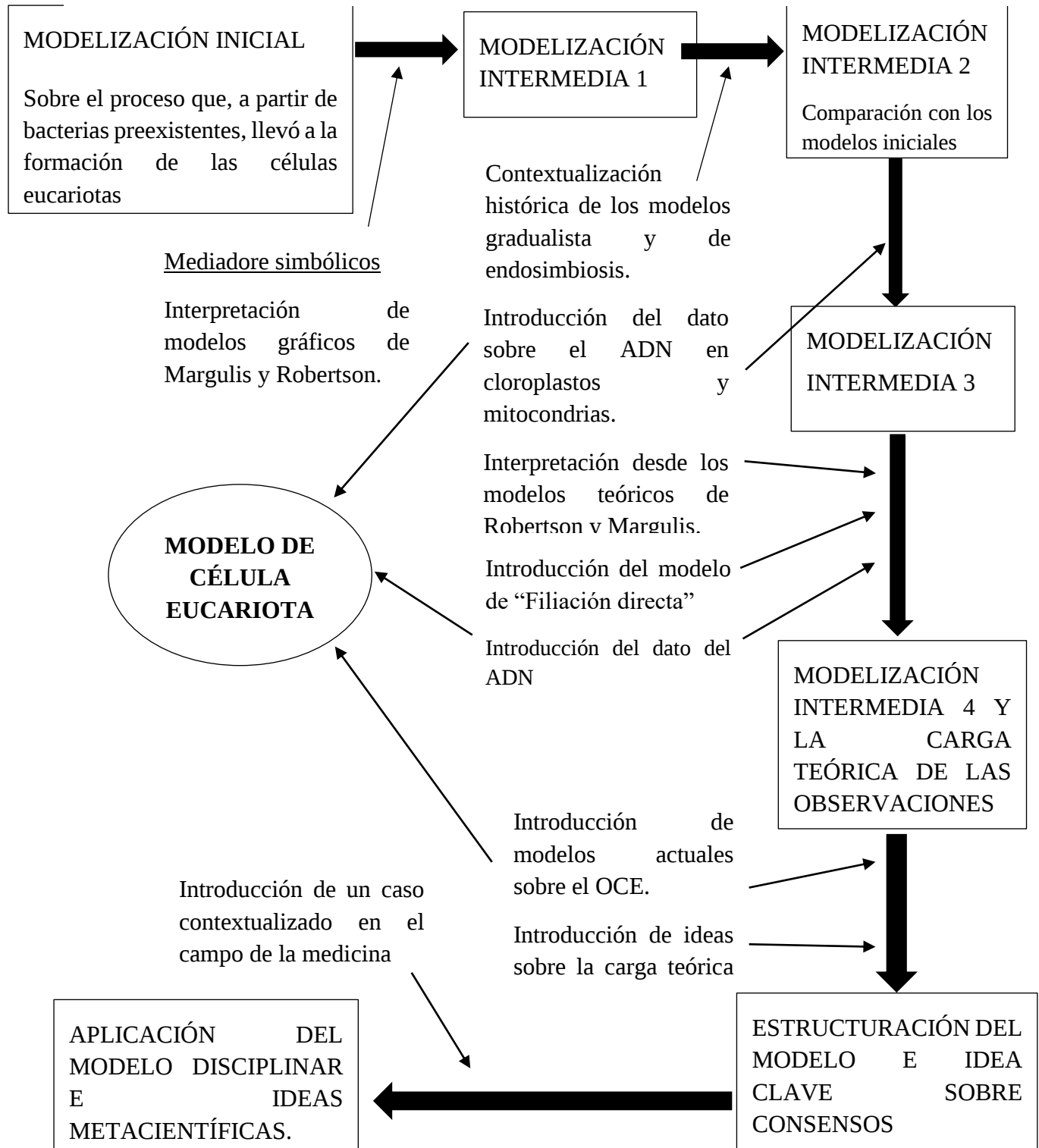
2.7 La integración de la modelización disciplinar y metacientífica

La UD está orientada por un diseño que busca la integración de diversos campos: disciplinar, metacientífico y didáctico, en la formación del profesorado en biología (Lozano et al., 2021). En el caso de la integración disciplinar y metacientífica, objeto de la UD de la tesis, se busca que los grupos de estudiantes puedan, por un lado, modelizar un fenómeno del mundo para pensarlo teóricamente y, por otro, construyan ideas sobre aspectos de la ciencia desde la perspectiva NOS. De esta manera, se promueve una educación metacientífica donde las y los estudiantes "aprenden sobre la ciencia mientras aprenden ciencia" (Gilbert y Justi, 2016). Como se muestra en la

Figura 7, ciertas actividades del eje disciplinar "traccionan" las del eje metacientífico, a partir de un problema construido, y también a la inversa (Bahamonde, 2014; Lozano, 2015, Lozano, et al., 2021a).

Figura 6

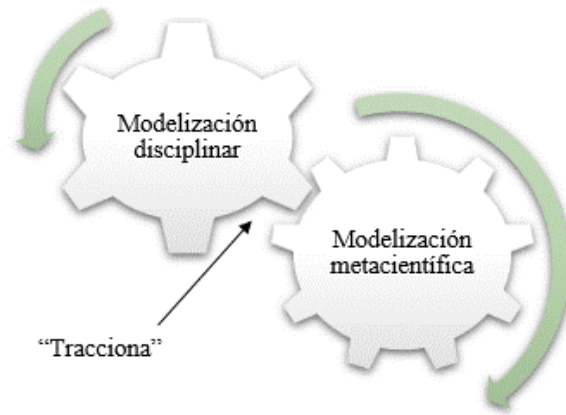
Integración disciplinar y didáctica en la formación del profesorado



Nota. Adaptado de Diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica para la enseñanza de modelos de membrana celular en la formación biológica del profesorado, con aportes de ideas metacientíficas provenientes del eje naturaleza de la ciencia. (p. 30), por Lozano. 2016, Universidad Nacional del Comahue.

Figura 7

Esquema general de la Integración disciplinar y metacientífica en la UD



3. Metodología

3.1 Una investigación cualitativa

El enfoque propuesto en la presente tesis se inscribe en la tradición cualitativa (Taylor, 2014). En el caso específico del ámbito educativo, se pueden identificar varios elementos fundamentales que forman la base de lo que se entiende como investigación cualitativa:

- La investigación cualitativa es empírica. Utiliza datos de la realidad para estudiar cualidades, centrándose en los significados y su comprensión en contextos específicos.
- El investigador debe involucrarse personalmente en el entorno natural donde ocurren los acontecimientos que estudia, dedicando un período prolongado para observar su objeto de interés y considerando las influencias del contexto circundante.
- En los métodos cualitativos, se considera que todas las perspectivas y situaciones son valiosas y dignas de análisis, reconociendo que el investigador puede influir en las personas o fenómenos estudiados.
- El investigador cualitativo procura apartar sus propias creencias y perspectivas para abordar el estudio de manera lo más imparcial posible.

En este marco, se entiende que ciertos aspectos de la investigación que dio lugar a esta tesis se sitúan dentro de los enfoques cualitativos, particularmente en aquellos aspectos vinculados con la investigación acción (Kemmis y McTaggart, 1988):

- En el ámbito de la formación docente, esta investigación se enfoca en trabajar con producciones específicas de las y los estudiantes relacionadas con procesos de modelización disciplinar y metacientífica sobre el fenómeno del OCE, e interesa analizar los significados que les asignan a estas producciones y comprender las condiciones de implementación de este tipo de trabajos.

- El docente/investigador, que es auxiliar de docencia, estuvo a cargo del diseño y la implementación de la UD, en el contexto natural en el que se llevan a cabo las clases de IB y PyAC.
- Los datos que se analizaron provienen de una intervención particular del investigador, a partir del diseño de una UD orientada por directrices teóricas provenientes del campo de la DCN. Sin embargo, el análisis de los datos y la construcción de categorías se han realizado desde el marco que ofrece el “análisis de contenido” (Bardin, 1986), dando lugar a las perspectivas de las y los estudiantes e interpretando los significados que les han atribuido a las diversas situaciones planteadas.
- Se trata de un proceso que ha sido sistemático, en el que se ha integrado teoría y práctica, orientado al desarrollo de la praxis. Esto se refiere a una acción informada y comprometida de manera crítica, con la intención de intervenir y mejorar el estado de la formación docente.

Rinaudo y Donolo (2010, como se citó en Steffe et al., 2000) proponen un nuevo enfoque respecto a los roles tradicionales de los miembros de los equipos de trabajo e investigación. Desde una perspectiva sociocultural, los vínculos en el contexto educativo trascienden la simple relación entre el investigador y los datos que se toman y estudian.

“Profesores, estudiantes, directores, padres y hasta diferentes tipos de colaboradores dentro de una institución educativa tienen, generalmente, espacios y roles que han sido asignados y asumidos desde mucho tiempo antes de la decisión de participar en una investigación. Las perspectivas de estos diversos participantes acerca del sentido de la intervención que se programa deben ser consideradas en todas las etapas del estudio”. (Rinaudo y Donolo, 2010, p. 8)

Desde este enfoque, es importante resaltar el carácter voluntario de la participación de las y los docentes que acompañaron la implementación de la UD. El equipo estuvo integrado por el docente/investigador, quien se desempeña como auxiliar de

docencia, el docente a cargo de las asignaturas quien es además el director de la tesis, y dos auxiliares de docencia que se desempeñan en IB. Se procuró que tanto las y los profesores como el grupo-clase acordaran con las metas establecidas y las estrategias propuestas para lograrlas, las cuales fueron comunicadas a las y los estudiantes antes de iniciar la UD. Por estas razones, la actividad investigativa es "cooperativa, para marcar la orientación de las relaciones entre los miembros que conformarán el equipo de trabajo" (Rinaudo y Donolo, 2010, p. 8).

3.2 Los estudios de diseño

Desde el enfoque cualitativo adoptado, esta tesis se enmarca en un estudio que emplea la metodología de Investigación Basada en Diseño (IBD) o DBR (por sus siglas en inglés, Design-Based Research). Según Rinaudo y Donolo (2010):

“Los investigadores que adoptan esta metodología en el campo educativo están interesados en generar conocimiento que contribuya a mejorar la calidad de las prácticas instructivas en diferentes niveles, contextos y áreas disciplinarias. Son estudios de campo, en los que un equipo de investigación interviene en un contexto de aprendizaje particular para atender, mediante un diseño instructivo, al logro de una meta pedagógica explícitamente definida”. (p. 3)

El término diseño en este contexto se refiere al proceso de diseñar una UD, llevar a cabo su implementación y someterla a una evaluación crítica. Sin embargo, la IBD no solo se reduce al diseño y puesta en marcha de la intervención en particular, sino que “toda investigación de diseño lleva como propósito la producción de contribuciones teóricas, ya sea para precisar, extender, convalidar o modificar teoría existente o para generar nueva teoría (Reigeluth y Frick, 1999, como se citó en Rinaudo, 2010, p. 3).

Desde esta perspectiva, la intervención busca identificar los aspectos teóricos y prácticos que puedan dificultar u obstaculizar el proceso de modelización disciplinar y metacientífica del OCE. El objetivo es determinar las mejores vías alternativas para la enseñanza y aprendizaje de esta teoría. Rinaudo (2010, como se

citó en Confrey, 2006), denomina corredores conceptuales a este “conjunto de caminos fructíferos posibles para el aprendizaje de un contenido conceptual” (p. 3). Así, la meta primaria de esta investigación se alcanzará mediante la elaboración de un diseño instructivo, su implementación y posterior análisis que dé lugar a la construcción, por parte de las y los estudiantes, de modelos robustos que permitan explicar hechos científicos sobre el OCE y el análisis de dicho modelo a partir del eje de la NOS.

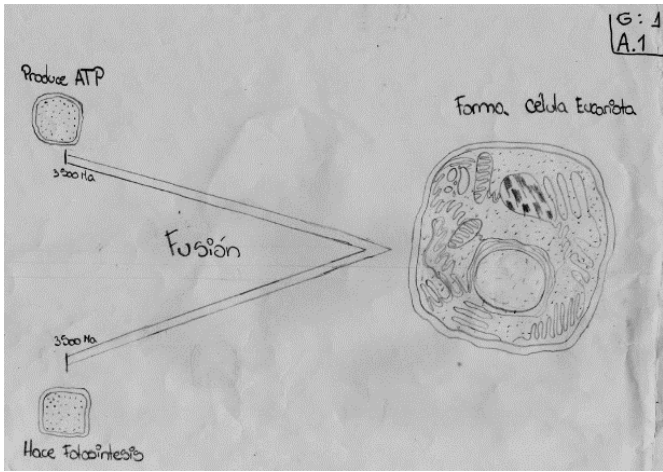
3.2.1 Toma y registro de los datos y unidades de análisis

Durante la implementación de la UD, se recogieron producciones de textos escritos, gráficos y esquemas realizados por las y los estudiantes, producidos todos en instancias grupales. Se tomaron registros de audio del contenido de las discusiones que los grupos llevaron a cabo en las instancias de la modelización inicial, intermedia, de arribo y de aplicación de los modelos, también de las puestas en común en clase y, al finalizar, de apreciaciones respecto del proceso de modelización. En la **Tabla 3** se encuentran especificadas cada una de las unidades de análisis obtenidas en cada actividad de la UD, a partir de las cuales se identificaron las unidades de registro que se utilizaron para el trabajo de categorización. Se elaboró también un diario de investigación, en el cual se registraron apreciaciones al finalizar cada uno de los encuentros y las reflexiones con el equipo acompañante del tesista.

En cuanto al análisis y categorización de los datos, se llevó a cabo un proceso recursivo “inductivo-teórico” (Bardín, 1986). A partir de una descripción exhaustiva del contenido de las unidades de análisis se pudieron establecer unidades de sentido las cuales fueron tensionadas con visiones teóricas sobre el fenómeno. Por ejemplo, el análisis de los modelos iniciales sobre el OCE producidos por las y los estudiantes, dio como resultado la conformación de dos grupos de estrategias para explicar: cambios en una célula, o cambios por asociación o reunión de células. Estas unidades de sentido se pudieron, razonablemente, hacer consistentes con ciertos aspectos de los modelos gradualista o endosimbiótico y, un ejemplo, se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Ejemplo de unidad de análisis y categorización

Unidad de registro: Gráficos y textos complementarios sobre modelos del OCE	Categoría
 Pensamos que las células procariotas se pueden distinguir entre si por diferentes características o procesos que pueden llevar a cabo, como por ejemplo una puede producir ATP y otra puede hacer fotosíntesis, entonces la idea es que dos células procariotas con características diferentes se fusionaron dando lugar a una célula que reúne las características de ambas. Esto no fue un proceso rápido sino que fue de forma gradual, dando lugar a que las nuevas células se fusionen con otras que tengan características similares pero no iguales y que se pueden distinguir de otras, como por ejemplo la célula eucariota de las plantas posee pared celular y la célula eucariota animal no la posee.	Modelo de fusión de bacterias que se asimila al modelo endosimbiótico.

Las evidencias de la evolución de los modelos de las y los estudiantes surgieron del análisis comparativo de las producciones entre la modelización inicial y los modelos de arriba, los cuales incluyen modelos gráficos y textos explicativos. Además, y como otra instancia de evaluación de la consistencia y aplicabilidad de

los modelos construidos, se cuenta con la evidencia recogida en el desarrollo de la actividad de aplicación del modelo a un nuevo hecho científico. A efectos de robustecer los análisis y hacerlos más consistentes, las categorías construidas se compartieron y discutieron con las y los propios estudiantes y también al interior del equipo que conforma el tesista, sus directores e invitadas/os externos.

3.2.2 Implementación de la unidad didáctica

La implementación de la UD se llevó a cabo en el contexto natural de las clases de las asignaturas los martes de 18:00 a 22:00 horas.

Antes de dar comienzo con las actividades, se comunicó a las y los estudiantes que el trabajo que realizarían en las próximas cuatro clases sería parte de un proyecto de investigación de posgrado enfocado en mejorar la enseñanza de la biología en la formación docente. Se indicó que se trataría de mantener la dinámica de las clases habituales y la propuesta fue muy bien recibida y demostraron una actitud positiva y disposición hacia el trabajo presentado.

Todas las actividades de la UD se llevaron a cabo de forma grupal por parte de las y los estudiantes. Para el análisis de los modelos, se utilizaron las producciones de 6 de los 7 “grupos de trabajo” (G), los cuales estaban conformados por un total de 33 estudiantes (**Tabla 2**). El grupo 7 estaba integrado por estudiantes que recursaban la materia y ya habían transitado experiencias de aprendizaje vinculadas al OCE, por lo que se consideró apropiado no incluirlo en el análisis.

Tabla 2

Integrantes de los distintos grupos de trabajo

Grupo	Nombre de las y los integrantes
1	María, Sabrina, Valeria, María Paz, Melina.
2	Facundo, Lara, Bianca, Sofía.

3	Bárbara, Jenifer, Juliana, Cintya, Naira.
4	Antonella. Franco, María Cecilia, Matías.
5	Juan Marcos, Erika, Jeremías, Narella.
6	Ricardo, Kevin, Natasha, Yessica, Cintia.

Los grupos estaban dispuestos en mesas de forma rectangular, lo que facilitaba la interacción constante entre estudiantes y docentes, facilitando el diálogo continuo durante el desarrollo de toda la UD (**Figura 8**). Además, dado el reducido número de estudiantes en comparación con el tamaño del aula y el distanciamiento social requerido según el Decreto de Necesidad y Urgencia (DNU) establecido debido a la pandemia de Covid-19, el movimiento del docente investigador y del equipo de trabajo fue fluido y sin dificultades para desplazarse entre los grupos.

En este excepcional contexto educativo, se realizó la presentación de las actividades en un formato híbrido, en el cual las mismas se presentaron y desarrollaron en la clase presencial y, a su vez, también se discutieron con aquellas/os estudiantes que cursaron en la virtualidad, a través de la plataforma de videoconferencias Meet y la plataforma virtual Moodle. Sin embargo, esta tesis se centró exclusivamente en el análisis de las producciones de los grupos que asistieron de manera presencial.

Figura 8

Vista parcial del aula de clases de Introducción a la biología el día de inicio de la unidad didáctica



Nota. Fotografía tomada por el autor.

En función de las implicancias que tiene para las y los estudiantes el desarrollo de los procesos de modelización, se alentó a los grupos a presentar sus propias ideas, a discutirlos, a valorarlos y aceptarlos como puntos de partida significativos. La función del docente en este contexto es crucial, requiriendo su intervención constante para guiar a las y los alumnos en la reflexión y el análisis de sus modelos. El docente facilita este proceso mediante preguntas orientadoras, discusiones grupales y actividades diseñadas específicamente para poner a prueba las ideas de los grupos.

Por último, y también como un aspecto metodológico a explicitar en la producción del AHE sobre el OCE, se utilizó un método de análisis documental cualitativo (Sampieri, 2010), de fuentes primarias y secundarias. El análisis se orientó a identificar y destacar episodios de interés, valorados desde las perspectivas teóricas didácticas asumidas para la enseñanza basada en la modelización, disciplinar y el desarrollo de ideas claves metacientífica.

4. Un análisis con enfoque histórico-epistemológico sobre la teoría del origen de la célula eucariota

Con el objetivo de colaborar en el diseño de propuestas de enseñanza integradoras de aspectos disciplinares de la biología y de contenidos metacientíficos, se desarrolló un AHE sobre el fenómeno del OCE (Adúriz-Bravo, 2010; Matthews, 1994; Lozano et al., 2016, 2018). A través de este análisis se buscó la adopción de una postura metacientífica explícita en el proceso de enseñanza del modelo en cuestión.

Por una parte, los AHE se enfocan en las variables internas de la dinámica de la producción de los modelos científicos abordados, de aquí que pueden considerarse estudios “internalistas”, y los análisis producidos de orden epistemológico, permiten describir y comprender aspectos del desarrollo de los modelos, la estructura que sostiene las vinculaciones entre el modelo teórico y los aspectos de la realidad que explica, las tensiones, la dinámica argumentativa de los ajustes teórico-empíricos realizados en el tiempo, entre otros aspectos (Giere, 1988; Adúriz-Bravo y Ariza, 2012). Además, estos enfoques proporcionan información valiosa sobre las circunstancias históricas y también sobre los contextos de pensamiento en que surgieron y normalizaron los modelos teóricos. Los mismos permiten describir y analizar el devenir que los modelos han tenido hasta su estado de actual consolidación (Kuhn, 2019).

En función de diseñar una UD para la enseñanza del OCE, este análisis se puede definir como plantea Adúriz-Bravo (2010): “una descomposición cuidadosa del contenido a enseñar con el fin de construir un texto argumentativo que lo fundamente metacientíficamente” (p. 129). En relación con su escritura, los AHE deben dar respuesta a las siguientes preguntas vertebradoras: ¿Cómo fue la génesis, evolución y desarrollo de los modelos que explican el OCE? ¿Qué dificultades, obstáculos, y discusiones aparecieron en su producción y en qué contextos (históricos, sociales, epistemológicos) se dieron? Estas preguntas se formulan con el objetivo de identificar episodios de la ciencia que proporcionen ideas, materiales,

recursos, analogías, enfoques y también textos que contextualicen, que sirvan como escenario para ambientar la discusión sobre determinados temas metacientíficos a enseñar (Adúriz-Bravo, 2005b), pertinentes a esos episodios y considerados de interés para la formación de las futuras profesoras y profesores en biología.

4.1 Introducción al estudio del origen de la célula eucariota

“Cada ser vivo es un microcosmos, un pequeño universo, formado por una multitud de organismos autopropagantes inconcebiblemente diminutos y numerosos como las estrellas en el cielo” (Darwin, como se citó en Sapp, 1994).

Uno de los temas más controvertidos de la biología es la teoría del OCE (Lang, 2014, p. 4). Esta teoría ofrece una familia de modelos explicativos que busca dar respuesta a una de las mayores discontinuidades evolutivas entre todos los organismos vivos y extintos del planeta: aquella que divide a las células procariotas de las eucariotas (Sapp, 2006).

En la comunidad científica actual existe un fuerte consenso que respalda la idea de que ciertas estructuras de las células eucariotas, como los cloroplastos y las mitocondrias, evolucionaron mediante un proceso de simbiosis entre comunidades bacterianas altamente integradas que se establecieron de manera permanente. Además, se sostiene que otras estructuras de las células eucariotas, como el núcleo, el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi, son el resultado de una evolución gradual de pliegues y sistemas complejos de endomembranas operados por el citoesqueleto.

Como se analizará en el desarrollo de este AHE, es importante aclarar que las caracterizaciones de "gradualista" y "autógeno" aplicadas al OCE, corresponden a la terminología utilizada en los modelos propuestos por Taylor (1974; 1976) y Robertson (1962) en un contexto histórico específico: la década de 1960 y mediados de los años 70'. Así, la adopción del par gradualismo/endosimbiosis en esta tesis responde al contexto en el que se desarrollaron esas discusiones, ya que la endosimbiosis también se considera un proceso de evolución gradual, moldeado por la selección natural y definido por elementos como la heredabilidad de los

caracteres, las mutaciones al azar, las limitaciones ambientales y la probabilidad de supervivencia y reproducción (González Galli, 2011).

“Sea cual fuere el origen de la variación evolutiva objeto de estudio, es la selección natural la que incesantemente elimina los seres cuya forma, cuya fisiología, cuyo comportamiento y cuya química no resultan adecuados para un medio dado en un tiempo y en un lugar determinados, sean cuales fueren sus detalles. Las células bacterianas tienen un único genoma que adquirió sus conjuntos de genes -habitualmente mil o más- de procariotas, de uno en uno o de dos en dos. Los eucariotas adquieren e integran genomas completos para formar individuos.” (Margulis y Sagan, 2003, pp. 16-17)

Según Margulis y Sagan (2003), estas asociaciones entre organismos de diferentes tipos no son aleatorias (en referencia con la aleatoriedad que tienen las mutaciones en el material genético), sino que ocurren bajo condiciones específicas del entorno. Por ejemplo, en algunos casos una de las partes puede nutrir a la otra, generalmente en detrimento o incluso causando la muerte, lo que se conoce como simbiosis parasitaria. Estas asociaciones tienden a ser muy sensibles al estrés ambiental, ya que un parásito que mata a su anfitrión suele acabar también con su propia existencia. Con el tiempo, las relaciones entre las especies pueden evolucionar, transformando las asociaciones explotadoras en convivencia, hasta el punto de que ambos organismos dependen mutuamente para su supervivencia. Este tipo de simbiosis estable a largo plazo, que lleva a cambios evolutivos, se denomina simbiogénesis.

En el caso concreto del establecimiento completo de la relación endosimbiótica, expresada en cloroplastos y mitocondrias, habría ocurrido en múltiples etapas, con adaptaciones y cambios genéticos en ambas células. Este proceso habría tomado millones de años, con modificaciones graduales que darían como resultado que la asociación fuera más estable. Una evidencia de esto son los estudios genéticos que han mostrado que los genomas de las mitocondrias y los cloroplastos se han

reducido con el tiempo, transfiriendo muchos genes al núcleo de la célula, como se muestra en la **Figura 15**.

El AHE permitió identificar aspectos centrales de la historia que antecedió al establecimiento del actual consenso, que implicó diversas controversias que se fueron desarrollando en diferentes momentos y contextos teóricos y tecnológicos. De este modo, se ha considerado apropiado adoptar la clasificación en tres periodos propuesta por Sapp (2014).

4.2 Primer período. El OCE y la simbiosis en el ámbito de la biología del siglo XIX y principios del XX

“Si los adversarios de la teoría de la descendencia nos objetan que sería maravilloso e incomprensible que un organismo pluricelular, en extremo complejo, haya podido provenir, a través de las edades, de un organismo unicelular, podemos responder muy sencillamente que tan increíble maravilla se realiza a cada instante a nuestra vista”. (Haeckel, 1878, p. 43)

El estudio de modelos sobre el OCE y, en particular, la consideración de la importancia que tuvo la visión endosimbiótica, implica un necesario reconocimiento a las primeras descripciones del fenómeno de la "simbiosis"² y a quiénes la consideraron como posible mecanismo implicado en la evolución.

En esos trabajos aparecen dos destacados biólogos: el alemán Heinrich Anton de Bary (1831-1888) y el suizo Simón Schwendener (1829-1919). Sus contribuciones tuvieron lugar a finales del siglo XIX, cuando Schwendener propuso en 1868 la naturaleza "dual" de los líquenes, argumentando que eran el resultado de una asociación entre un hongo y un alga (Sapp, 2002). Posteriormente, en una conferencia del año 1873, de Bary expandió teóricamente este modelo, aplicándolo a diversos casos de simbiosis que agrupó y definió como: "una asociación viva de

² Palabra que proviene del latín: “*vivir juntos*”.

dos organismos con diferentes nombres, que están en íntima relación y son dependientes uno del otro para su subsistencia" (Bary, como se citó en Sapp, 2002). A su vez, este botánico consideró que la simbiosis podía actuar como un mecanismo de innovación evolutiva, complementando la evolución gradual por selección natural basada en la acumulación de variaciones individuales en las poblaciones de especies. Aunque de Bary no aborda la importancia relativa de estos mecanismos evolutivos, propuso la necesidad de desarrollar investigaciones en este campo de forma experimental (Sapp, 1994).

En esa época, la comunidad científica tenía conocimiento de diversos casos de interacciones simbióticas similares a los líquenes. El propio Schwendener escribió un manual que contenía más de 1000 casos documentados (Sapp, 1994). Algunos ejemplos incluían la simbiosis entre hongos micorrízicos y las raíces de los árboles, la asociación de algas con animales translúcidos como las anémonas de mar, los corales y las planarias (Sapp, 2002). También, se describe la simbiosis entre helechos acuáticos y cianobacterias, como el caso de *Azolla filiculoides*, realizada por de Bary (Lechno-Yossef y Nierzwicki-Bauer, 2002) (**Figura 9**).

Figura 9

Una cianobacteria del género Anabaena



Nota. Microfotografía tomada por el autor. Preparado fresco tomado del río Negro, a partir de una muestra de la planta *Azolla filiculoides*, con una resolución de 640 X.

A pesar de la existencia de varios casos documentados de simbiosis (Sapp, 1994), que predominantemente se observaban a nivel macroscópico, estos fenómenos eran considerados "meras curiosidades" por los naturalistas de la época, recibiendo escasa atención (Sapp, 1994, 2007, 2014).

4.2.1 Pensar la simbiosis en el contexto de la biología celular

“Las observaciones microscópicas sobre los elementos del cuerpo animal tienen tan mala reputación entre ciertos naturalistas, que no me atrevo a suponer muchos lectores para esta memoria. El resultado general de mis observaciones es que los elementos orgánicos son extraordinariamente simples, que la diversidad que reina en la conformación y la acción de los órganos compuestos no debe depender de diferencias considerables de sus elementos anatómicos, sino de una diferencia de los principios químicos con los que los últimos están combinados entre sí... Quizá se llegará con la ayuda del microscopio a aprehender las diferencias ligeras de estas combinaciones químicas”. (Treviranus, 1825, como se citó en Albarracín Teulón, 1983, p. 25)

En un contexto en el que la teoría celular se consolidaba (Baker, 1952; Harris, 2000) y se debatía la recién formulada teoría darwiniana de la evolución (Salgado y Arcucci, 2016), las y los biólogos en aquellos tiempos centraban su atención en la interpretación de las estructuras celulares observadas mediante el uso de microscopios y diferentes técnicas de tinción. Así, las primeras investigaciones sobre simbiosis en el campo de la biología celular, estrechamente relacionadas con el OCE, fueron desarrolladas en el siglo XIX por científicos de diversas disciplinas y regiones del mundo, abarcando Europa, Asia y Estados Unidos (Margulis, 2002; Sapp, 2014). El objetivo de estos investigadores era elaborar explicaciones acerca de la función y el origen de las estructuras intracelulares, fundamentándose en el estudio de la morfología y la fisiología comparada (Albarracín Teulón, 1983; Sapp, 2007), que era el paradigma dominante de ese tiempo y el terreno en el cual se elaboraban los problemas y las soluciones y, en este contexto, el consenso que implicó la teoría celular (TC) fue clave. Así, y de manera análoga a los casos de

simbiosis observados en animales y plantas, se sugirió la posibilidad de que las células fueran el resultado de simbiosis de entidades más pequeñas e interdependientes, esto es, de otras células. De este modo, tanto la TC como la simbiosis contribuyeron significativamente a la unificación del conocimiento biológico en esa época:

“A finales del siglo XIX, se acumulaban evidencias sobre la existencia de varios cuerpos celulares que poseían propiedades de crecimiento, asimilación y división. Cuando se asociaban con casos de líquenes y de algas viviendo en "animales inferiores", esta evidencia llevó a varios biólogos, tanto zoólogos como botánicos, a considerar la posibilidad de que la célula, y por ende el individuo, fuera una simbiosis de varios cuerpos auto reproductores de origen filogenético diferente. (...) La idea de que el organismo complejo estaba compuesto por organismos elementales más pequeños, independientes e interdependientes: las células, era un principio básico de la teoría celular del desarrollo. No fue un gran salto sugerir que las propias células estaban compuestas de organismos aún más pequeños y mutuamente interdependientes. De hecho, a primera vista, el origen y la naturaleza simbiótica de plantas y animales podrían parecer estar en sintonía con los conceptos contemporáneos del organismo”. (Sapp, 1994, pp. 35-36)

Un ejemplo que ilustra la carga teórica presente en las observaciones de estos biólogos es el trabajo del histólogo alemán Richard Altmann (1852-1900), quien introdujo el modelo de "bioblastos"³, gránulos que, según él, se encontraban en el protoplasma de todas las células animales. Altmann atribuyó a los bioblastos propiedades vitales, considerándolos organismos responsables de diversas funciones celulares, como la secreción de sustancias y la formación de “fibras”

³ Es muy probable que estas estructuras sean las actuales “mitocondrias”.

(Sapp, 1994). En su perspectiva, los bioblastos constituían la unidad elemental de la vida, proponiendo que la célula era, en esencia, una colonia de estos elementos.

4.2.2 Los primeros modelos de endosimbiosis: Explicar el origen de las mitocondrias y los cloroplastos de la célula eucariota

“Cada célula lleva una vida doble: una totalmente autónoma, correspondiente tan sólo a su adecuado desarrollo, y otra mediata o indirecta, por la que llegará a ser parte integrante de la planta. Pero es fácil observar que, tanto para la fisiología vegetal como para la fisiología comparada en general, el proceso vital de cada célula singular debe constituir primordialmente el fundamento absolutamente indispensable, razón por la cual tiene que surgir en primer término la pregunta: ¿cómo se origina entonces, realmente, este peculiar y diminuto organismo, la célula?”. (Schleiden, 1938, como se citó en Albarracín Teulón, 1983, p. 48)

Uno de los pioneros en abogar por el origen simbiótico de todas las células nucleadas, fue el zoólogo japonés Shôsaburô Watasé (1862–1929), quien realizó numerosos estudios en distintas universidades de los Estados Unidos. En una serie de conferencias que presentó sobre la segmentación del huevo del calamar, que era su objeto de estudio, Watasé propuso “una teoría simbiótica del origen de todas las células nucleadas de dos tipos de organismos filogenéticamente distintos” (Sapp, 2007, p. 60).

“Watasé argumentó que se podían estudiar los órganos⁴ celulares desde tres puntos de vista: cómo las partes se adaptaban en forma y estructura para realizar su función fisiológica; dónde y cómo se originan en la célula; y los pasos probables en la historia ancestral por los cuales estas estructuras llegaron a existir. Todos estos casos, argumentó, destacaban el hecho de que ciertas partes de un organismo, que alguna vez se consideraron elementos

⁴ En el siglo XIX se daba la denominación de “órgano” a las estructuras subcelulares.

integrales del organismo derivados de la diferenciación del germen, eran en realidad el resultado de la asociación de dos o más organismos diferentes. Todos mostraron que lo que uno llama órganos, desde un punto de vista fisiológico, eran en realidad organismos por sí mismos”. (Sapp, 1994).

Durante las primeras décadas del siglo XX, las mitocondrias fueron objeto de intensa investigación y se mencionaban en la bibliografía científica de la época con una diversa nomenclatura y asignación de funciones variada. Los modelos fisiológicos propuestos para las mitocondrias, como el de Altmann, respaldaron la idea de que las mitocondrias eran gránulos formativos que seleccionaban sustancias del citoplasma circundante y las transformaban en diversos productos y estructuras, e incluso, se llegó a proponer que la propia diferenciación de las mitocondrias originaba a los cloroplastos (Sapp, 2007).

En ese contexto, el fisiólogo francés Paul Portier (1866-1962) despertó un interés particular en este creciente campo, al presentar, en su obra célebre titulada "Les Symbiotes" (1918), las primeras ideas sobre el origen bacteriano de las mitocondrias (Sapp, 1994; Lang, 2014). En esta obra, Portier proporcionó por primera vez una definición sólidamente fundamentada de las mitocondrias como "simbiontes" de origen bacteriano, un concepto teórico acuñado por el propio científico:

"Todos los seres vivos, todos los animales desde la Ameba hasta el Hombre, todas las plantas desde los Criptógamas hasta las Dicotiledóneas están constituidos por una asociación, el "emboitement" - *‘entrelazado’ o ‘entrecruzado’, en francés*- de dos seres diferentes. Cada célula viva contiene en su citoplasma formaciones que los histólogos llaman 'mitocondrias'. Estas organelas son, para mí, nada más que bacterias simbióticas, a las que llamo 'simbiontes’". (Portier, 1918, como se citó en Sapp, 2007, p. 61)

En su trabajo experimental, Portier logró cultivar con éxito simbiontes de diferentes organismos, como por ejemplo de los nódulos de las raíces y del interior de las

larvas de insectos xilófagos, como las termitas, a los que consideró como “análogos” a las mitocondrias de la célula. Ante la dificultad de extraer estas últimas, argumentó que el estado fisiológico de la célula podría influir en la capacidad para cultivarlas en el laboratorio:

“Después de millones de años de evolución, podrían haberse adaptado tanto a su entorno intracelular que no podrían sobrevivir fuera de él. Por lo tanto, argumentaba que el fracaso en cultivar mitocondrias nunca podría tomarse como evidencia en contra de su naturaleza simbiótica. Sin embargo, lo inverso no era cierto: la capacidad de cultivarlas podría considerarse como evidencia de su naturaleza simbiótica”. (Sapp, 1994, p. 89)

El biólogo celular estadounidense Ivan Wallin (1883-1969), también postuló, al igual que Portier, la posibilidad de que las mitocondrias pudieran haber surgido a partir de bacterias aeróbicas, en su libro titulado “Symbiontism and the Origin of Species” (Wallin, 1925). Como plantea Sapp (1994), “su interés en las mitocondrias y la simbiosis en la evolución reflejó la difusión de tales estudios de Europa a Estados Unidos” (p. 113). Además, también propuso la hipótesis de que la diferenciación de estas mitocondrias podría haber dado origen a otros orgánulos celulares, como es el caso de los cloroplastos.

La comunidad científica rusa también emprendió investigaciones fructíferas sobre simbiosis. Uno de los científicos más destacados en el ámbito del OCE fue el botánico Constantin Sergeevich Merezhkowsky (1855-1921)⁵, cuya contribución resultó fundamental en la formulación teórica de la endosimbiosis. Basándose en los escritos de Schimper y Watasé (Sapp, 1994), Merezhkowsky desarrolló un modelo teórico que denominó “simbiogénesis”, donde definió “el origen de organismos por la combinación o asociación de dos o más seres que entran en simbiosis” (Merezhkowsky, 1910, como se citó en Sapp, 2014). Propuso y

⁵ Este biólogo dio una conferencia en Ginebra el mismo mes en que se publicó *Les Symbiotes* (1918), de Portier.

desarrolló la idea de los cloroplastos como simbioses (Merezhkowsky 1905), aunque, a diferencia de Portier y Wallin, rechazó por completo la simbiosis mitocondrial (Sapp, Carrapiço y Zolotonosov, 2002).

Una de las principales estrategias a favor del modelo endosimbiótico, al interior del paradigma de la fisiología y morfología comparada, implicaba la investigación de las características físicas y funcionales de estructuras celulares particulares, su comparación por analogía con microorganismos "libres" específicos, y la propuesta de una secuencia lógica de etapas simbióticas que pudieron haber dado origen a las células vegetal y animal. La otra estrategia buscaba validar la naturaleza simbiótica de la célula a través de experimentos que implicaban la extracción y cultivo *in vitro* de sus componentes constituyentes (Sapp, 1994).

Merezhkowsky (1905) argumentaba que no hay diferencias relevantes entre las algas simbióticas del organismo *Amoeba viridis*, a las que denomina "zoochlorellas"⁶, y los cromatóforos (cloroplastos) de cualquier alga verde. Considera que ambas estructuras no dependen del núcleo, que se dividen de individuos preexistentes y se comportan como organismos independientes. "Una analogía tan completa hace extremadamente probable que los cromatóforos, al igual que las zoochlorellas, representen organismos independientes que han entrado en una coexistencia simbiótica con células incoloras" (Merezhkowsky, 1905, p. 290).

Finalmente, el botánico sugiere en la **Figura 10** que las cianofíceas o cianobacterias son los únicos organismos de vida libre que muestran una gran similitud con los cloroplastos.

⁶ La antigua nomenclatura de "zoochlorellas" se refería a las algas verdes unicelulares que vivían simbióticamente dentro de organismos multicelulares. La palabra "zoochlorellas" viene de "zoo" (animal) y "chloros" (verde), indicando la relación simbiótica entre el organismo animal y las algas.

Figura 10

Similitudes y diferencias entre cianobacterias y cloroplastos planteadas por Merezchkowsky

<i>Cyanophyceae</i> (<i>Aphanocapsa</i> , <i>Microcystis</i> and the like)	<i>Chromatophores</i>
1. Small, blue-green, round or oval bodies of very simple structure.	1. Small, green (probably blue-green originally, as with <i>Cyanomonas</i>), round or oval bodies of very simple structure.
[p. 600]	
<i>Cyanophyceae</i>	<i>Chromatophores</i>
2. The green pigment saturates the plasma uniformly or is distributed therein in the form of very small droplets. ⁴	2. The green pigment saturates the stroma uniformly or is distributed therein in the form of very small droplets.
3. Do not possess a true nucleus, rather just certain structures (nucleic granules) that can be viewed as a predecessor of the nucleus. ⁵	3. Do not possess a true nucleus, rather just certain structures (pyrenoids) that can be viewed as a transformed, primitive nucleus.
4. Nutrition: assimilation of CO ₂ in the light.	4. Nutrition: Assimilation of CO ₂ in the light.
5. Reproduction: through division.	5. Reproduction: through division.

Nota. Adaptado de Annotated English translation of Mereschkowsky's 1905 paper 'Über Natur und Ursprung der Chromatophoren im Pflanzenreiche', (p. 291), por Martin y Kowallik, 1999, European Journal of Phycology.

4.3 Obstáculos en la comprensión microbiana de la simbiosis

4.3.1 La influencia de la teoría germinal de las enfermedades: ¿Desde qué ventanas mirar a las bacterias?

"La introducción de la noción del simbiote modifica el sentido de la palabra 'asepsia'... Ya sea cultivable o no, la presencia de un simbiote nunca puede ser vista como una contaminación" (Portier, 1918, como se citó en Sapp, 1994).

El planteamiento de una nueva perspectiva sobre la función y la evolución de los cloroplastos y las mitocondrias está intrínsecamente ligado a un punto de inflexión en la comprensión de las enfermedades: la teoría germinal (Sapp, 2014). Esta teoría, emergente en su época y desarrollada principalmente por Louis Pasteur (1822-1895) y Robert Koch (1843-1910), entre otros, postula que las enfermedades en plantas y animales tienen un origen microbiano, estableciendo a los

microorganismos como los principales agentes infecciosos y causantes de las mismas.

Según esta concepción, el estudio de la historia evolutiva de las bacterias, organismos de gran diversidad y antigüedad que han habitado la Tierra por miles de millones de años, quedaba relegado a un segundo plano en las discusiones científicas. Esto se debió en parte a la creciente atención y recursos destinados a comprender y combatir las enfermedades infecciosas causadas por microorganismos patógenos. Como resultado, las investigaciones sobre la vasta diversidad bacteriana y su evolución a lo largo del tiempo no recibieron la misma prioridad en la agenda científica de la época (Lazcano Araujo, 2002).

Por su parte, en la introducción de su obra "Symbiontism and the Origin of Species", Wallin (1921) plasmó firmemente estas ideas:

“La propuesta de que las bacterias, (...) puedan representar el factor causal fundamental en el origen de las especies es bastante chocante. La evidencia de las actividades constructivas de las bacterias ha estado ahí desde hace muchos años, pero las concepciones populares de las bacterias han quedado teñidas principalmente por sus actividades destructivas, cuya representación es la enfermedad. Esta concepción destructiva se ha vuelto tan arraigada en la mente popular que las persona promedio considera bacterias y enfermedad como sinónimos.” (p. 8).

La hipótesis de Portier sobre el origen simbiótico de las mitocondrias tampoco pasó desapercibida por la comunidad científica de la época. Según Sapp (1994): “los críticos de Portier en Francia rechazaron todas sus ideas. ‘Pasteurizando’ efectivamente a sus simbioses, insistieron en que la identificación de mitocondrias con bacterias, en función de la morfología y las propiedades de tinción, era puramente ilusoria” (Sapp 1994, p. 62).

El francés compartía la perspectiva de Wallin sobre el papel evolutivo de las mitocondrias en el OCE. Desde su punto de vista, Portier abogaba por considerar la microbiología “desde la ventana de la fisiología comparativa”, en lugar de verla

“desde la ventana de la medicina” (Portier, 1918, p. 294, como se citó en Sapp, p. 82), lo cual resalta las diferencias en la carga teórica al tratar de explicar un mismo fenómeno. Sin embargo, esta expresión de pensamiento no fue muy aclamada por la comunidad científica francesa, tal como atestigua esta carta escrita por el científico:

“He recibido muchos elogios desde diversas perspectivas. Aparte de algunas excepciones, solo el Instituto Pasteur mantiene reservas... hasta que se vuelva realmente hostil; no hay ilusiones al respecto. Nunca este establecimiento, equipado con los poderosos medios de investigación que conoces, perdonará a un trabajador aislado por haber abierto un camino que debería haber encontrado hace mucho tiempo” (Portier, 1919, citado de Sapp, 1994, p.85).

Así, Les Symbiotes se convirtió en el centro de una intensa discusión en Francia: aclamado por algunos como el marcador de una revolución científica, criticado por muchos otros, ridiculizado, olvidado y finalmente desestimado de los anales de la ciencia (Sapp, 1994).

4.3.2 Influencia del programa darwiniano

La noción de simbiosis comenzaba a colisionar con las ideas establecidas por el darwinismo clásico y con la visión arraigada de la “competencia individual por la supervivencia” (Sapp, 1994), al menos, hasta entrado el siglo XIX. Durante las décadas de 1930 y 1940, la nueva síntesis evolutiva se caracterizaba por una concepción limitada de la evolución que excluía a los microorganismos (Sapp, 2007). La transferencia de genes entre especies era vista comúnmente como una infracción de las leyes naturales, y los ejemplos conocidos de simbiosis intracelular, eran típicamente considerados como meras rarezas, clasificados como "aspectos peculiares de la vida" y percibidos como poco relevantes para la biología en su conjunto (Sapp 1994, 2007, 2014; Margulis, 2002).

Por otro lado, inspiradas en las ideas filosóficas y sociológicas de Kropotkin (1989) las investigaciones de la comunidad científica rusa también entraban en conflicto. Según Lazcano y Peretó (2017):

"en agudo contraste con la mayoría de sus colegas ingleses y estadounidenses, la mayoría de los naturalistas rusos no identificaron la teoría de la selección natural con un énfasis en la competencia entre especies o la lucha intraespecífica que encarnaban las metáforas de Malthus, sino que tendían a verla como una teoría de la ayuda mutua". (p. 2)

Por ejemplo, en el caso particular de Merezhkovsky, estaba convencido de que sus puntos de vista eran irreconciliables con las ideas de Darwin, mientras que Famintsyn y Kozo-Polyansky (2010), creían que sus propuestas eran compatibles con el modelo de selección natural (Vucinich, 1992, como se citó en Lazcano y Peretó, 2017, p. 2).

4.3.3 Una dis“tinción” muy notable: El “nucleocentrismo”

Además de los obstáculos de conocimiento ya mencionados, como el paradigma predominante de la época sobre las enfermedades y la influencia clásica darwiniana de la "lucha por la existencia", las y los investigadores también se enfrentaron a las limitaciones de los microscopios ópticos. Estos ofrecían una “escasa” precisión en relación con las magnitudes y, a ese aspecto, se sumó la ausencia aún de una gama de tinciones celulares que pudieran facilitar nuevas descripciones y explicaciones sobre las estructuras celulares y subcelulares. Así, y en el marco de una visión dominante centrada en el estudio del núcleo celular, el material genético y los genes, denominada “nucleocentrismo”, era razonable esperar que esa estructura subcelular fuera puesta en un primer plano en el concierto de los trabajos de tinción y observación al microscopio.

Este enfoque, nucleocéntrico, era liderado por el destacado genetista y premio Nobel Thomas Hunt Morgan (1866-1945) y tenía sus raíces en el campo de la genética mendeliana y experimental, donde Morgan era una figura muy respetada e influyente (Sapp, 2014). Así, la genética en Estados Unidos se consolidó como

una disciplina autónoma, con sus propias publicaciones científicas, sociedades especializadas, problemas, objetivos, modelos y técnicas bien definidas (Sapp, 1994).

Bajo este marco teórico, el concepto de herencia citoplasmática propuesto para los cloroplastos y las mitocondrias, explicado a través del modelo de endosimbiosis, entraba en conflicto. El fortalecimiento de la creencia de que todas las estructuras en el citoplasma eran derivadas directamente del núcleo se vio impulsado con los avances en la teoría mendeliana de la herencia de los cromosomas a principios del siglo XX (Sapp, 1994). En este escenario, Morgan sentenciaba:

“Puede no parecer descabellado suponer que puede haber otros cuerpos en el citoplasma que crezcan y se dividan, y, por extensión, podría no parecer demasiado extravagante suponer que el propio protoplasma (excepto por sus productos de secreción) consista en unidades que crecen y se dividen y son heredadas. Nadie, creo, negará esto como una posibilidad, pero es sorprendente encontrar que aquellos que defienden esta opinión (o miran con anhelo en esta dirección) pasan por alto uno de los resultados mejor establecidos del trabajo genético. Es así que, excepto en los raros casos de herencia de plastos, la herencia de todos los caracteres conocidos puede explicarse suficientemente por la presencia de genes en los cromosomas. En pocas palabras, el citoplasma puede ser ignorado genéticamente” (Morgan, 1926, p. 491).

Además, el creciente enfoque científico experimental por intentar comprender las estructuras moleculares del interior del núcleo, ejerció una influencia indirecta en los esfuerzos por explicar la naturaleza de las mitocondrias. Este obstáculo técnico fue expresado por Cowdry (1918), quien señaló:

“Virchow y sus seguidores en citología patológica dirigieron su atención principal hacia el núcleo; y los biólogos, dominados por el problema de la herencia, enfocaban sus estudios en esa misma dirección. Por lo tanto, sus objetivos al fabricar fijadores celulares era mostrar detalles nucleares. (...)

Ahora bien, estas sustancias (...) destruyen las mitocondrias; de modo que cuanto más atención se centrara en el núcleo, menos posibilidades habían de observar las mitocondrias. Así, se produjo y mantuvo un círculo vicioso, hasta que se introdujeron fijadores compuestos a base de formalina, bicromato o ácido ósmico”. (p. 45)

4.4 Segundo período: Membranas, sólo membranas

"Para muchos, sin duda, tales especulaciones pueden parecer demasiado fantásticas para ser mencionadas en la sociedad educada; sin embargo, está dentro del rango de posibilidad que algún día puedan requerir una consideración seria" (Wilson, 1925, p. 739).

Las décadas del treinta al cincuenta del siglo XX fueron una época de gran desarrollo de la teoría sintética de la evolución (Salgado y Arcucci, 2016). A partir de ella “los arquitectos clásicos de la llamada ‘síntesis evolucionista’ (...) habían convenido desde hace tiempo que la mutación y la recombinación genética dentro de las especies eran las únicas fuentes de innovación evolutiva por selección natural” (Sapp, 2014, p. 94). Durante las décadas de 1930 y 1940, la síntesis evolutiva se caracterizaba por una concepción limitada de la evolución que excluía a los microorganismos (Sapp, 2007; Lazcano y Peretó, 2017). Este período, poco propicio para el desarrollo de visiones alternativas sobre la evolución, no se destacó por un auge de publicaciones que relacionaran el OCE con las visiones endosimbióticas.

A medida que la teoría sintética de la evolución continuaba creciendo, los avances en microscopía electrónica y las nuevas investigaciones en genética molecular se desarrollaban simultáneamente. Esta rápida "molecularización"⁷ de la biología abrió nuevos horizontes, revelando estructuras subcelulares hasta entonces

⁷ Extraído del curso titulado “Origen de la vida”, que llevó a cabo el tesista de manera virtual en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ciencias, dictado por el Dr. Antonio Lazcano Araujo, durante el segundo semestre del año 2020

desconocidas que necesitaban ser interpretadas, así como nuevos desafíos que la teoría evolutiva debía enfrentar (Lazcano y Peretó, 2017).

En este contexto, el modelo propuesto por David Robertson en 1962, publicado en *Scientific American* en 1970, ejemplifica la influencia del paradigma darwiniano (adaptacionista/gradualista) en la explicación evolutiva del OCE. Acuñó el término "unidad de membrana" para describir la característica biológica constante, presente en todas las células, tanto en la superficie celular como en las que forman parte de los sistemas de endomembranas de los eucariontes y “extendió” este modelo, para explicar el origen de las organelas:

“Si las células primordiales sencillas fuesen de este tipo, las células más complejas podrían haber evolucionado por invaginación o enrollamiento de la membrana superficial. Inversamente, podrían haber evolucionado por evaginaciones o desdoblamiento de secciones de la matriz citoplasmática junto con su membrana. La hipótesis implica que cualquier trozo de membrana de la célula debe provenir de membranas preexistentes; no se formó normalmente de novo en el citoplasma o en cualquier otro lugar. Membranas hacen membranas”. (Robertson, 1970, p. 83)

Bajo esta perspectiva, la evolución de la célula eucariota se interpreta como el resultado de modificaciones graduales en la membrana celular de bacterias ancestrales. Estas fueron seleccionadas a largo del tiempo por la naturaleza, dando lugar a una célula más compleja. Según este modelo, las mitocondrias, por ejemplo, “se forman cuando el citoplasma penetra en una cavidad limitada por una membrana interna, la cual luego se corta y se separa del sistema continuo” (Robertson, 1962, p. 83).

En la **Figura 11**, se muestra de forma gráfica el origen de las organelas según la perspectiva de Robertson (1962). En la primera imagen, se ve una célula primordial con el citoplasma rodeado por una unidad de membrana. En la segunda, el citoplasma se desplaza hacia afuera, formando pseudópodos. En la tercera, las membranas evaginadas se retraen, dando origen a las membranas nucleares y a un

rudimentario retículo endoplasmático. De este modo, es probable que la mayoría de los orgánulos hayan surgido de la estructura de la unidad de membrana celular.

Figura 11

Origen de organelas por invaginación gradual de membrana



Nota. Adaptado de La membrana de la célula viva, (pp. 80-83), por Robertson, 1962, Selecciones de Scientific American. Madrid: Blume.

4.5 Tercer período: El resurgimiento de una teoría

En las décadas de los sesenta y setenta del siglo XX, se suscitaron intensos debates en torno al fenómeno de la endosimbiosis. Durante ese tiempo, fue objeto de discusión en más de cincuenta artículos científicos y, en 1966, la Sociedad Internacional de Biología Celular organizó un simposio específico al respecto (Sapp, 2014, p. 86). El resurgimiento de estas discusiones fue principalmente impulsado por una corriente crítica hacia las posturas evolucionistas nucleocéntricas predominantes, que influyó significativamente en el estudio de las mitocondrias y los cloroplastos, liderado por jóvenes biólogos y biólogas estadounidenses que abogaban por la revalorización de las ideas formuladas en las publicaciones del primer período (Sampedro, 2007). Ahora bien, el contexto se modificó, y el nuevo terreno en el cual se buscarían pruebas, y también en el cual se dirimirían controversias, sería bajo el paradigma de la biología molecular.

4.5.1 “Lo que importa es lo de adentro”. La influencia del ADN en las discusiones sobre el OCE

Uno de los principales aportes que llevó a reconsiderar las implicaciones bacterianas en la hipótesis de un origen endosimbiótico de mitocondrias y cloroplastos, fue el hallazgo de moléculas de ADN en ambos orgánulos. A partir de estos datos, la antigua idea de que estas estructuras fueran producto de un proceso endosimbiótico, y no de un cambio evolutivo gradual de membrana y diferenciación citoplasmática (Robertson, 1962), se pusieron nuevamente en discusión dentro de la comunidad científica de mediados del siglo XX (Sapp, 2014).

Estos hallazgos se hicieron posible como resultado de la revolución científica que significó la “acelerada molecularización” de las ciencias de la vida. Esta transición facilitó un estudio más detallado de las estructuras moleculares y subcelulares de las células eucariotas, como es el caso particular del ácido nucleico que constituye el material genético de los organismos. Así, “el punto de inflexión para la aceptación de la simbiosis en la evolución celular fue a principios de los sesenta, cuando se hallaron moléculas de ADN y ribosomas en las mitocondrias y los cloroplastos, y se examinaron los orgánulos al microscópico electrónico” (Sapp, 2014, p. 84). De esta manera, las nuevas técnicas de fijación y tinción que acompañaron al desarrollo de la microscopía electrónica, permitieron construir modelos y lenguajes más concretos y precisos en el conocimiento del material genético y en los estudios moleculares de distintos tipos de células y sus orgánulos (Lazcano y Peretó, 2017).

4.5.1.1 Una búsqueda intencionada

La investigación que puso en reconsideración el posible origen endosimbiótico de las organelas fue realizada por el sueco y experto en microscopía electrónica Hans Ris (1914-2004), quien era, para ese entonces, director de la Instalación de Microscopios Electrónicos de Alto Voltaje de la Universidad de Wisconsin, Madison, y fue fundador de la Sociedad Estadounidense de Biología Celular (Margulis, 2005; Löffelhardt, 2014). A principios de la década de 1960, Ris y

Walter Plaut publicaron un artículo titulado "Ultrastructural of DNA containing areas in the chloroplast of Chlamydomonas" (1962), una investigación que consistió en un estudio molecular detallado de los cloroplastos de un alga del género Chlamydomonas.

La familiaridad con la literatura existente sobre la naturaleza de los plástidos (Famintsyn, 1907; Merezkhovsky, 1905) condujo a estos microbiólogos a albergar sospechas acerca de su origen. La noción de autonomía en los cloroplastos, en un proceso fundamental como la herencia, posibilitó la construcción de nuevos problemas dentro del campo de la biología molecular. Por ejemplo, se planteó la posibilidad de una maquinaria genética específica e independiente para estas organelas, lo que desafió las concepciones más arraigadas del "nucleocentrismo" (Morgan, 1926). Partiendo de estas premisas teóricas, Ris y Plaut investigaron los cloroplastos de Chlamydomonas.

Según los propios autores, el objetivo general de la investigación fue: "Investigar la posibilidad de que los plástidos contengan ADN estructuralmente organizado y, por lo tanto, proporcionen una base para suponer que el sistema genético de los plástidos es básicamente similar a los sistemas nucleares conocidos" (Ris y Plaut, 1962, p. 383). Esta hipótesis estuvo implicada en el hallazgo de ADN en el interior de los cloroplastos y orientó el desarrollo del programa de investigación, como si de "faros" teóricos se tratasen, iluminando las observaciones desde una perspectiva endosimbiótica.

El estudio se centró en la utilización de complejas tinciones químicas para analizar ácidos nucleicos mediante microscopía electrónica. Al aplicar estas técnicas en Chlamydomonas, se observaron "pequeños cuerpos que contienen ADN estrechamente asociados con el cloroplasto" (Ris y Plaut, 1962, p. 385).

Con el fin de ajustar el modelo, se comparó el material genético del núcleo y del cloroplasto utilizando una reciente técnica de tinción desarrollada por Ryter (Ryter et al., 1958). Esta técnica, específicamente diseñada para el ADN procarionte, sirvió como punto de partida para el análisis. La siguiente cita del estudio destaca la carga

teórica de estos biólogos: "Como estábamos interesados en comparar las regiones que contienen ADN del cloroplasto con el nucleoplasma de los microorganismos, utilizamos fijadores y postratamientos desarrollados para bacterias" (Ris y Plaut, 1962).

En su artículo, señalan que llevaron a cabo los mismos procedimientos técnicos en diferentes especies de *Chlamydomonas* para asegurar la precisión de sus observaciones. Los resultados revelaron dos hallazgos importantes: se encontró ADN en el citoplasma de todos los cloroplastos, y, en segundo lugar, este material genético mostró similitudes con el ADN presente en células procariotas, cuya relación filogenética está estrechamente vinculada con las cianobacterias.

Según plantea Margulis (2005), los estudios de Ris "lo llevaron a ser el primer científico moderno en documentar [no solo] la similitud, si no la identidad, entre los nucleoides de las cianobacterias [y los cloroplastos de *Chlamydomonas*]" (el resaltado es nuestro). A su vez, dejó abierto un camino propicio para que futuras investigaciones dieran sustento a la teoría endosimbiótica que comenzaba a tomarse en reconsideración (Margulis, 2005). La conclusión de su artículo muestra la influencia teórica de los pensadores del Este de Europa:

"Muestra cierta relación histórica y respalda la vieja hipótesis de Famintsyn (1907) y Merezhkovsky (1905) de que los cloroplastos se originaron a partir de algas endosimbióticas verdeazuladas. (...) La evolución de la célula compleja, con su conjunto de orgánulos más o menos autónomos, de la organización más simple que se encuentra en Monera, es una cuestión que se ha descuidado. Con la demostración de la similitud ultraestructural de una organela celular y organismos de vida libre, la endosimbiosis debe considerarse de nuevo seriamente como un posible paso evolutivo en el origen de sistemas celulares complejos". (Ris y Plaut, 1962, p. 388)

Tan solo dos años después, Nass y Nass (1963) harían el mismo hallazgo en las mitocondrias de células de embriones de pollo: "La presencia de ADN en las

mitocondrias parece requerir la modificación y extensión de algunas hipótesis generalmente aceptadas de la función celular que consideran que el núcleo es el sitio exclusivo del ADN celular y la información genética”. (Nass y Nass, 1963, p. 627).

4.5.2 “On the origin of mitosing cells”

“Hace veinte años, cuando grabé por primera vez todas estas ideas para los estudiantes, mi conferencia se llamó ‘La teoría simbiótica del Origen de las células superiores’. Desde entonces me he dado cuenta que hablar en términos de formas de vida ‘superiores’ o ‘inferiores’ no tiene ningún significado: Charles Darwin tenía razón cuando nos instaba a no utilizar los términos ‘superior’ e ‘inferior’ para los organismos vivos; todos ellos han evolucionado igualmente por el hecho de que están presentes en el mundo contemporáneo”. (Margulis, 1994, p. 158)

Hacia finales de la década del sesenta el conocimiento sobre el OCE encuentra un punto de inflexión (Sapp, 2014): La publicación de un artículo de una bióloga llamada Lynn Margulis (1938-2011)⁸, titulado “On the Origin of Mitosing Cells” (Sagan, 1967)⁹, y publicaciones posteriores (Margulis, 1970), puso en reconsideración las antiguas ideas de endosimbiosis en el campo de la evolución de la célula eucariota.

La investigación se destacó por el desarrollo de un programa de trabajo que unificó conocimientos de diferentes campos científicos, el cual articuló y los apoyó con una serie de datos citológicos, bioquímicos, paleontológicos, genéticos e incluso

⁸ “La publicación de su extenso documento marcó el final de una larga serie de rechazos por parte de más de una docena de importantes publicaciones académicas que habían desestimado su manuscrito, en algunos casos sin siquiera leerlo, basándose en una serie de argumentos que iban desde críticas científicas poco fundamentadas hasta prejuicios intelectuales y sociales bastante explícitos” (Lazcano y Peretó, 2017, p. 4).

⁹ En este artículo la autora firma con el apellido primero de casada, “Sagan”.

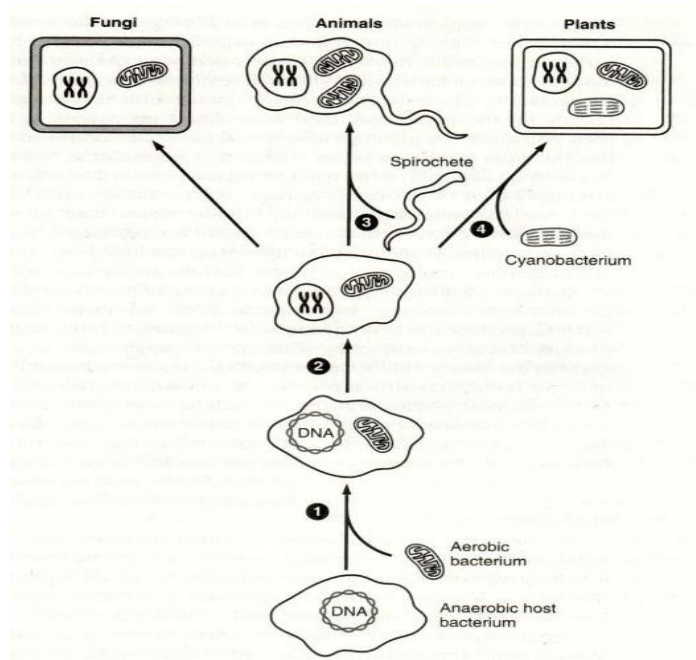
geológicos (Sagan, 1967; Sapp, 2014; Lazcano y Peretó 2017). Este enfoque holístico, como nunca antes se había presentado, permitió consolidar una nueva perspectiva en la explicación sobre el OCE (Lazcano y Peretó, 2017), generando una diversidad de nuevas discusiones, problemas, modelos teóricos y, no menor aún, una amplia literatura de divulgación científica sobre este tema (Margulis, 1970, 1971, 1981, 1987; Margulis y Chapman, 2009; Margulis y Olendzenski, 1996, 2002; Margulis y Sagan, 2003,; Dolan y Margulis, 2011).

“Su propuesta no fue una mera recapitulación de ideas pasadas, sino una narrativa coherente del papel de la endosimbiosis en el origen de los eucariotas, que desarrolló más allá que nunca antes. Además, desde el principio dedicó considerables esfuerzos a rescatar las ideas y contribuciones de sus predecesores científicos del olvido. Desde su primer artículo en adelante, nunca dejó de citar su trabajo, un esfuerzo que llevaría a la traducción y publicación en inglés del trabajo de aquellos que, debido a barreras idiomáticas, habían permanecido desconocidos en los Estados Unidos”. (Lazcano y Peretó, 2017, p. 9)

Estas ideas contemporáneas sobre endosimbiosis se denominan comúnmente como la teoría de la endosimbiosis en serie o seriada (SET, por sus siglas en inglés). Según la definición de Margulis (1992), “este término se refiere a la adquisición de simbioses concretos en un cierto orden” (p. 160). En el esquema que se muestra en la **Figura 12** se presenta una de las versiones de la SET, de los varios esquemas propuestos por la autora en diversa literatura. Según este gráfico, el primer evento simbiótico descrito para el OCE, fue la adquisición de una bacteria aerobia que dio origen a las mitocondrias; en tercer lugar, la fusión de una espiroqueta, una bacteria móvil con la nueva célula eucariota, dio origen a los undulipodios en las células animales; y, por último, las células vegetales adquirieron una cianobacteria que se convirtió en cloroplasto. Como afirma Margulis (1992), todas las células animales tienen al menos tres tipos de ancestros y todas las células vegetales tienen al menos cuatro, lo que las convierte en quimeras” (p. 160).

Figura 12

Modelo de la endosimbiosis en serie (SET) propuesta por Margulis



Nota. Adaptado de Five-kingdom classification and the origin and evolution of cells (p. 25), por Margulis, 1974, Springer US.

4.5.3 Una controversia sobre la procedencia del material genético en mitocondrias y cloroplastos

La presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos, junto con los significativos aportes de Margulis, implicó a los biólogos del campo de la teoría sintética en la necesidad de profundizar los modelos de evolución de los eucariontes, discutir el “supuesto” origen bacteriano de esas organelas y la nueva evidencia puesta en juego, y formular explicaciones que asimilaran ese hecho al marco teórico de referencia. En este contexto, el prositólogo y experto en diatomeas Frank John Rupert “Max” Taylor, de la Universidad Británica de Columbia, propuso una serie

de modelos alternativos desde una perspectiva gradualista, a la “Robertson”, que denominó “filiación directa” (Taylor, 1974, 1976)¹⁰.

Las ideas expuestas en este artículo fueron previamente comunicadas a la comunidad científica mediante una presentación oral durante el duodécimo Congreso Internacional de Botánica en el año 1975. Esta exposición se llevó a cabo en el Simposio titulado "Origen de las Células Eucariotas", que se celebró en Leningrado (USSR) (**Figura 13**) y, durante el evento, Margulis (1976) también compartió sus investigaciones más recientes sobre endosimbiosis y una crítica a la propuesta de Cinco Reinos de Whittaker¹¹. Entre Taylor y Margulis, suscitó una intensa controversia.

Figura 13

Estampilla del congreso en Leningrado¹²



Nota. En esta imagen se puede apreciar la clasificación de la vida en cinco reinos.

4.5.4 Los argumentos de Taylor

Taylor comienza el artículo estableciendo una distinción entre dos marcos teóricos alternativos que explican el OCE. Uno de estos marcos, al que adhiere y defiende,

¹⁰ Cabe destacar que el nombre de “teoría de la endosimbiosis en serie” (SET), fue propuesta por este autor y no por Margulis.

¹¹ Estas dos conferencias formaron parte de artículos publicados en la revista científica TAXON.

¹² Extraído de: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Botanical_Congress

forma parte de un modelo dentro de la perspectiva gradualista de la evolución. Como se mencionó previamente, este enfoque se fundamenta en los trabajos de Robertson (1962), entre otros (Threadgold, 1967; Raff y Mahler, 1972; Uzzell y Spolsky, 1974), y señala que:

“La visión clásica asume lógicamente que todos los orgánulos eucariotas primarios se producen por la diferenciación de la propia sustancia celular (...), es decir, de forma autógena. Por el contrario, se han propuesto varias hipótesis en las que se cree que una o más organelas (...) surgieron de un número de células extrañas que se convirtieron en endosimbiontes permanentes de un huésped protoeucariótico. Este punto de vista se puede agrupar como alternativa exógena”. (Taylor, 1975, p. 377)

También aborda los nuevos problemas a los que se enfrenta el modelo autógeno ante el resurgimiento del modelo endosimbiótico, como, por ejemplo, dar cuenta de la presencia de ADN de naturaleza bacteriana en cloroplastos y mitocondrias, y la consideración de la hipótesis de "filiación directa" como una solución teórica a esta cuestión. Otro ejemplo al que se enfrentó la perspectiva autógena del OCE, fue la necesidad de explicar la aparente convergencia evolutiva de la maquinaria fotosintética presente en organismos tan diversos como plantas, algas y bacterias, discusión que se enmarca en el campo de la biología molecular:

“Como ambos fotosistemas I y II (...) se encuentran en los procariotas verdeazulados, así como en las algas eucariotas y plantas superiores, todo el complejo tendría que aparecer al menos dos veces en existencias diferentes”. Por lo tanto, “(...) se piensa que un stock eucariota ancestral no fotosintético es altamente improbable en hipótesis totalmente autógenas, al igual que polifiléticamente, requiere la invocación de una evolución paralela excesiva”. (Taylor, p. 379)

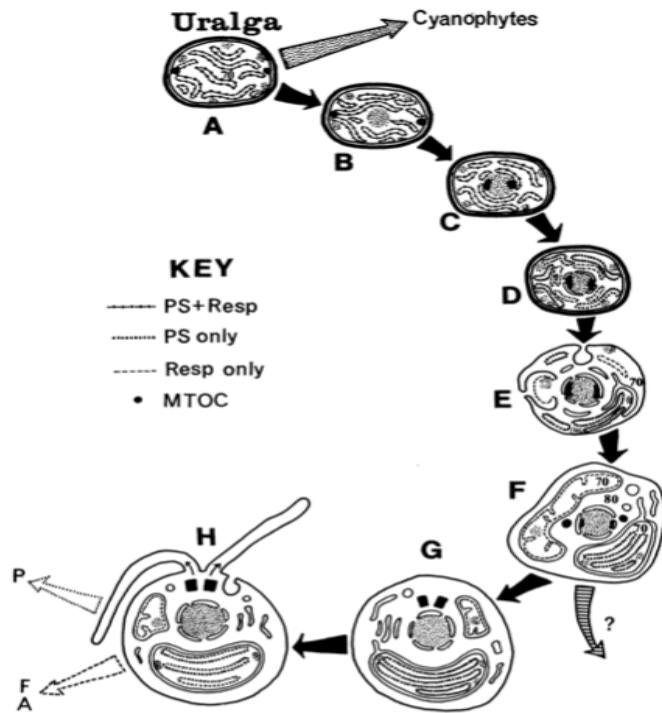
En respuesta a estos problemas, Taylor propone el modelo “Uralga” (Klein y Cronquist, 1967; Cavallier-Smith, 1975)¹³. Este modelo, ofrece una alternativa totalmente autógena para explicar el origen de mitocondrias y cloroplastos, dar cuenta de la presencia de ADN y explicar razonablemente la similitud de los complejos macromoleculares de los cloroplastos con la hipotética bacteria ancestral de todos los eucariontes.

Según esta perspectiva de la evolución de las células, el eucariota ancestral era capaz de llevar a cabo la fotosíntesis utilizando clorofila “a”, realizar la respiración del ciclo de Krebs y poseía una cadena transportadora de electrones que terminaba en el citocromo oxidasa, únicas características presentes en los cianófitas o cianobacterias (Taylor, 1975). Por lo tanto, consideró razonable proponer este modelo hipotético de organismo como el ancestro de todos los eucariontes fotosintetizadores (**Figura 14**).

¹³ Usando el alemán “Ur” indicando ancestral, original, primordial. “La evidencia es clara de que las bacterias fotosintéticas dieron lugar a las algas primitivas, y que estas ‘Uralgas’ fueron los antepasados de todas las demás formas de vida por encima del nivel bacteriano” (Klein y Cronquist, 1967).

Figura 14

El modelo "Uralga", tal cual fue presentado en el congreso de Leningrado para explicar el OCE



Nota. Adaptado de Autogenous theories for the origin of eukaryotes, (p. 381), por Taylor, 1976, Taxon.

Para la explicación de la presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos desde esta perspectiva, se sugiere que “evolucionaron sin mediación de la simbiosis, (...) todos ellos surgieron como pellizcos del ADN del núcleo” (Margulis, p. 96). Luego menciona, sin mucho detalle, que “los ribosomas citoplasmáticos de la célula comenzaron a aumentar de tamaño, a aproximadamente 80s”, como las actuales eucariotas (Taylor, 1975, p. 383).

De esta manera, Taylor construye una explicación que respalda el OCE sin mediación de la endosimbiosis, y pone de manifiesto la complejidad de los modelos evolutivos en el contexto de la biología molecular, como así también la continua controversia entre los modelos alternativos.

Además de la presentación de la hipótesis totalmente autógena del OCE, Taylor plantea que: “el artículo concluye con algunos comentarios acerca de las hipótesis que involucran la endosimbiosis, incluyendo las particularidades de una “hipótesis de compromiso”, en la cual la mitocondria surge de forma autógena, mientras que los cloroplastos surgen por endosimbiosis” (Taylor, 1976, p. 377). De esta manera, construye una serie de otros modelos explicativos, en el cual plantea un origen autógeno para cloroplastos, pero endosimbiótico para el caso de las mitocondrias.

4.6 Estado actual de la teoría del origen de la célula eucariota. Nuevos problemas y perspectivas

La controversia en torno al ADN se dirimió en favor del modelo de endosimbiosis en los primeros años de la década de 1980, cuando se logró demostrar que el ARN ribosómico contenido en cloroplastos y mitocondrias tenía un origen alfa-proteobacteriano y cianobacteriano, respectivamente (Margulis 2002; Sapp, 2014; Löffelhardt, 2014). Sin embargo, para que este modelo fuera ampliamente aceptado por la comunidad científica, se requirieron casi 20 años de intensas controversias y objeciones, en la que Margulis tuvo un papel primordial en defensa del modelo endosimbiótico.

En la actualidad, y luego de transcurridos casi 50 años, el análisis de los manuales para la formación de biólogas y biólogos, depositarios de los modelos de ciencia normal, da como resultado una coexistencia de modelos para explicar el OCE. Que estos orgánulos membranosos provienen de procariontes ahora se considera un hecho básico en los libros de texto: mitocondrias y cloroplastos son reconocidas como organelas con un origen endosimbiótico y otras estructuras celulares como el retículo endoplásmico y el aparato de Golgi, se propuestas como el resultado de progresivas invaginaciones de membrana (Alberts et al., 2004; Karp, et al., 2009).

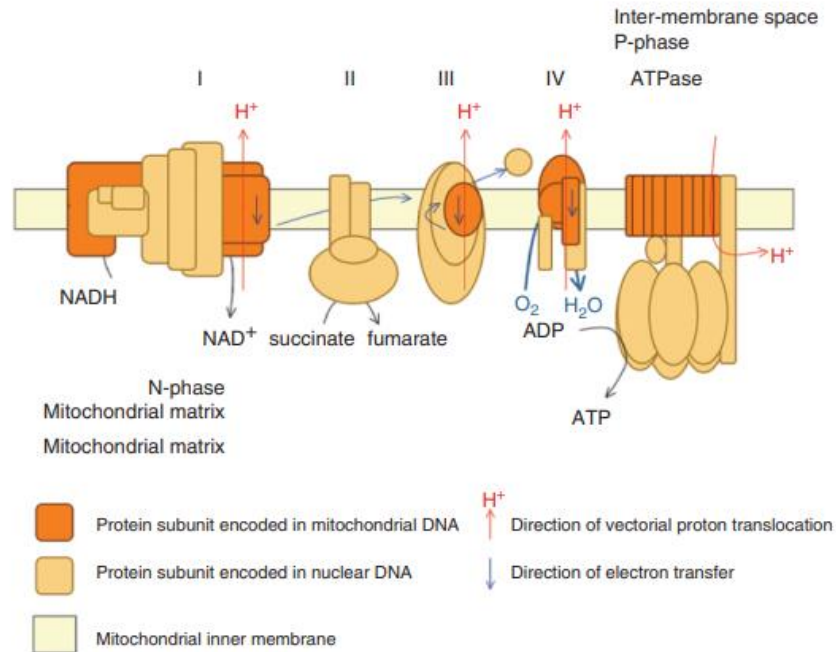
La biología molecular ha ampliado los conocimientos sobre la evolución de los organismos. El estudio de la maquinaria molecular de mitocondrias y cloroplastos, como los procesos de replicación, transcripción y traducción de proteínas, junto con la clasificación de los organismos basado en los análisis comparativos de

secuencias genómicas y proteínas, ha generado nuevos problemas y soluciones dentro de este nuevo marco teórico (Wolf y Karol, 2012; Martin y Müller, 2007; Löffelhardt, 2014; Rai, Bergman y Rasmussen, 2002).

Un ejemplo representativo de este enfoque es la identificación de las subunidades de los complejos proteicos de las mitocondrias involucrados en la cadena transportadora de electrones, y su relación con el origen de los genes que las codifican, ya sean del núcleo o del propio ADN mitocondrial, lo cual refleja la estrecha e íntima relación evolutiva de este proceso esencial para el desarrollo de la célula eucariota (Allen, Van Der Giezen, y Allen, 2007). En la **Figura 15**, se muestra la ubicación de los genes codificadores de estas subunidades mediante diferencias de color. Las subunidades en tono marrón rojizo están codificadas por genes en la mitocondria y se sintetizan en la matriz mitocondrial; por otro lado, las subunidades marrones claro tienen sus respectivos genes en el núcleo y se importan desde el citosol como precursores.

Figura 15

Elementos de la transducción de energía en la respiración y fosforilación oxidativa en las mitocondrias



Nota. Adaptado de *Origin, Function, and Transmission of Mitochondria*, (p. 44), por Allen, Van Der Giezen, y Allen, 2007, Springer.

Como plantea Sapp (2007), el cambio de paradigma respecto a los orígenes de los orgánulos por endosimbiosis no se produjo al resolver anomalías del paradigma anterior, sino más bien al entender en términos biomoleculares la estructura y función de las mitocondrias y cloroplastos. La adopción de nuevos métodos moleculares para clasificar bacterias, superando enfoques previos basados en la morfología y fisiología comparativa característicos de los científicos del primer periodo, permitió esclarecer el origen simbiótico de estas organelas y allanar el camino para la identificación de otras nuevas estructuras celulares con evidencia de orígenes simbióticos, como el caso de los hidrogenosomas y mitosomas (Tachezy y Dolez, 2007).

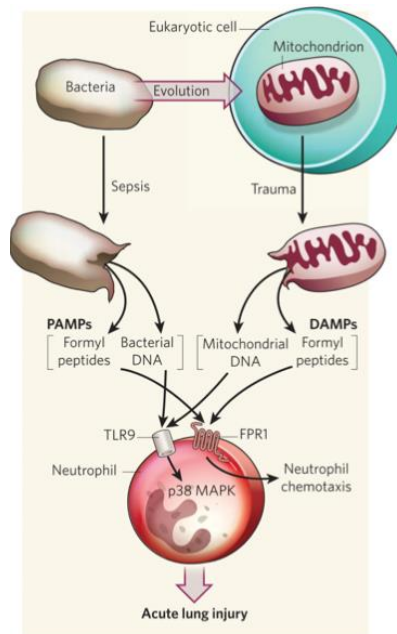
Por último, en las últimas dos décadas el carácter endosimbiótico de las mitocondrias ha comenzado a tener relevancia en el campo de la medicina, especialmente en relación con procesos fisiológicos y patológicos en el ser humano, ya que el ADN mitocondrial (ADNmt) ha demostrado ser capaz de generar respuestas inflamatorias. Se han investigado los mecanismos mediante los cuales el ADNmt, así como otros componentes mitocondriales con características bacterianas (como la citosina-fosfato-guanosina, el lípido de membrana cardiolipina y péptidos N-formilados), se translocan al citosol y al espacio extracelular. En estos contextos, dichos componentes activan células inmunitarias a través de receptores de reconocimiento de patrones tipo Toll (PPR).

Así, la alteración celular por trauma libera a la circulación sanguínea DAMPs mitocondriales, que tienen similitudes evolutivamente conservadas con los PAMPs bacterianos. Al activar la señalización inmune, esto puede generar un síndrome de respuesta inflamatoria sistémica (SIRS, por sus siglas en inglés: Systemic Inflammatory Response Syndrome) que, en casos de lesiones graves, es clínicamente muy parecido a la sepsis o infecciones bacterianas (Calfee y Matthay, 2010; Zhang et al., 2010; West y Shadel, 2017) (**Figura 16**). Este síndrome se caracteriza por ser una complicación postraumática altamente mortal y compromete múltiples órganos del cuerpo humano.

Es importante destacar que, en el contexto de una disfunción mitocondrial, las células han desarrollado varios sistemas de prevención. Uno de estos sistemas es la autofagia, que permite a las células reciclar las mitocondrias dañadas y evitar la fuga de su contenido al citosol o al espacio extracelular. Sin embargo, en situaciones de estrés celular significativo y lesión tisular, el sistema puede verse sobrecargado, lo que provoca la liberación de DAMPs mitocondriales en el citoplasma o el espacio extracelular, desencadenando una respuesta proinflamatoria. Por lo tanto, además de su función bien conocida como generadoras de energía, las mitocondrias actúan como depósitos celulares enriquecidos con DAMPs. Diversas condiciones celulares pueden liberar estos DAMPs y mediar la acción del sistema inmunológico.

Figura 16

Relación entre el ADN bacteriano liberado tras una sepsis y el ADN mitocondrial liberado por un trauma severo. Ambos, desencadenan una misma respuesta inmunitaria



Nota. Adaptado de *Culprits with evolutionary ties*, (p. 42), por Calfee y Matthay, 2010, Nature.

4.7 Construcción de las ideas claves disciplinares y metacientíficas como saberes a enseñar

Como se desarrolló en el marco teórico, las ideas clave son afirmaciones simples y sencillas pero que muestran los aspectos más relevantes del modelo científico o de la imagen de la ciencia que se propone que las y los estudiantes aprendan, haciendo evidentes las intenciones educativas del docente (Adúriz-Bravo, 2006).

4.7.1 Ideas claves disciplinares sobre aspectos del origen de la célula eucariota

En relación con la teoría del OCE, el estudio sobre el saber de referencia permitió constatar que, a lo largo de la historia, la comunidad científica ha desarrollado básicamente dos modelos que explican este fenómeno y que, en el actual “período de ciencia normal” (Kuhn, 2019), se ha llegado a una visión de consenso (Alberts, 2004, Karp, et al., 2009). Para la elaboración de las ideas clave se adopta también el par gradualismo/endosimbiosis, tal como se fundamentó al inicio del AHE.

- *Según el “modelo gradualista”, el origen de las organelas de las células eucariotas son el resultado de un proceso paulatino de evaginaciones e invaginaciones de la membrana plasmática.*
- *Según el “modelo endosimbiótico”, el origen de ciertas organelas como mitocondrias y cloroplastos de las células eucariotas son el resultado de antiguas interacciones simbióticas entre bacterias de vida libre que pasaron a ser permanentes.*
- *El modelo actual propone una visión de consenso, en la cual el “modelo endosimbiótico” explica la presencia de mitocondrias y cloroplastos y el “modelo gradualista” explica los sistemas de endomembranas que forman el núcleo, retículo endoplasmático y el aparato de Golgi.*

4.7.2 Ideas claves metacientíficas como saberes a enseñar

El AHE sobre el OCE, a partir de fuentes primarias y secundarias, permitió identificar episodios científicos relevantes que podrían vincularse de manera consistente con campos estructurantes de la epistemología y la sociología de la ciencia (Adúriz-Bravo y Ariza, 2012). Como antecedentes de trabajos sobre estas ideas, se referencian las investigaciones sobre el modelo de membrana celular y de presión arterial (Lozano et al., 2018, 2016)

- *Las percepciones de los hechos se fabrican en las mentes humanas y en las comunidades científicas utilizando material cultural previo y creencias y por lo tanto tienen carga teórica.*

- *Los hechos científicos no son hechos naturales enunciados científicamente. Son construcciones orientadas teóricamente, condicionadas socialmente y se manifiestan a través de consensos que por un tiempo son aceptados por la comunidad científica.*

5. Diseño, implementación y evaluación de la unidad didáctica

5.1 Descripción de las actividades de la unidad didáctica

La UD que se diseñó consta de actividades específicas para la modelización inicial, la reelaboración de los modelos iniciales y la estructuración del modelo científico, y también para la aplicación del modelo disciplinar y de ideas claves metacientíficas a un nuevo hecho científico (Sanmartí, 2002). Los aspectos centrales de cada tipo de actividad se encuentran explicitados en el marco teórico.

5.1.1 Actividades para iniciar la modelización

A partir de una problematización sobre el OCE, se espera que las y los estudiantes, organizados en grupos, puedan discutir, construir y presentar sus modelos iniciales, definidos a nivel gráfico y acompañados de textos explicativos.

Sobre la Actividad 1: Se llevará a cabo una contextualización antes de presentar la primera consigna, que dará lugar a la modelización inicial del OCE por parte de las y los estudiantes. Se recuperarán y revisarán los aspectos principales de los planes celulares “procariota” y “eucariota”, que han sido abordados previamente durante el desarrollo de la materia introducción a la biología. Para hacer más consistente la contextualización del problema a resolver, se le ofrecerá a cada grupo una copia impresa de una línea de tiempo en la que se recuperarán hitos ya analizados sobre el desarrollo de la vida en nuestro planeta (**Figura 17**) y unos modelos gráficos de célula procariota y eucariota para que los intervengan con textos descriptivos que hagan alusión a sus principales características (**Figura 18**).

Además, el modelo gráfico de célula eucariota acompañará todo el proceso de modelización ya que en él se irán incorporando los nuevos aspectos implicados en las ideas clave de la UD. Por otro lado, se explicitará que, para dar cuenta del OCE, al interior de la comunidad científica se ha consensuado la hipótesis que explica su origen a partir de bacterias preexistentes.

Luego de proporcionar un tiempo razonable, para dar lugar a una comprensión significativa de la consigna y el desarrollo de ideas diversas y discusiones teóricas

por parte de las y los estudiantes de cada grupo, se llevará a cabo una puesta en común en la cual se socializarán las explicaciones, las consistencias y las dificultades que cada uno presenta. Para favorecer y hacer más significativa esta instancia, el equipo de la materia tomará fotografías de los modelos gráficos producidos y serán proyectados en ese momento, para que cada grupo los pueda mostrar al resto y explicarlos.

Figura 17

Línea de tiempo

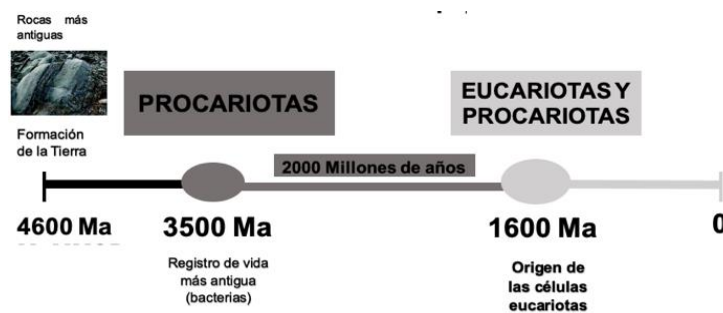
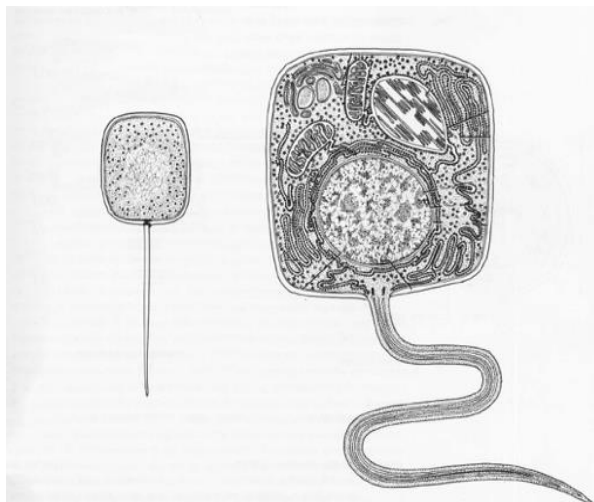


Figura 18

Modelos gráficos de célula procariota y eucariota



Consignas de la Actividad 1:

1.a Piensen, discutan y construyan un modelo gráfico, acompañado de textos, explicando con el mayor detalle posible: *¿Cómo consideran que fue el proceso que, a partir de bacterias existentes, llevó a la formación de las primeras células eucariotas y sus diferentes organelas hace aproximadamente 2000 millones de años?*

1.b Puesta en común. *¿Cómo explicaron el proceso que dio lugar a la aparición de la célula eucariota y sus diferentes organelas?*

5.1.2 Actividades de modelización intermedia y de estructuración de los modelos e ideas clave metacientíficas

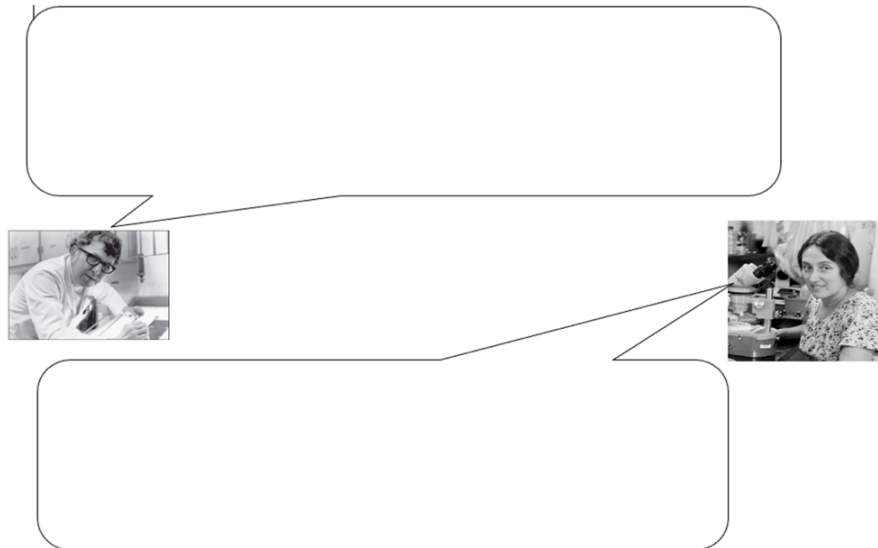
Las mismas tienen como finalidad el logro de la complejización de los modelos iniciales mediante la introducción de nuevas variables y puntos de vista, para poder aproximarlos y contrastarlos con los modelos científicos y también propiciar el desarrollo de ideas iniciales sobre la ciencia y su estructuración en el campo metacientífico (Sanmartí, 2002).

Sobre la Actividad 2: En el AHE llevado a cabo sobre el OCE, se expuso que, en un momento clave del desarrollo teórico de este fenómeno, a fines de la década del 60' y comienzos del 70', se postularon dos modelos que explicaron el OCE desde diferentes posiciones teóricas: el modelo endosimbiótico de Lynn Margulis (Margulis, 1967) y el modelo gradualista propuesto por David Robertson (Robertson, 1970).

Tomando como referencia esas perspectivas, se ofrecerán a los grupos de estudiantes, y de manera impresa, un modelo gráfico explicativo del OCE producido por Robertson (**Figura 19**) y otro producido por Margulis (**Figura 20**), con el objetivo de analizarlos, interpretarlos y poder desentrañar cuál es el aspecto central del modelo de OCE que propone cada uno. Para plasmar este trabajo dispondrán de una viñeta que les permitirá expresar la hipotética explicación del

Figura 21

Esquema de viñetas para el desarrollo de la actividad



Luego de compartir las elaboraciones de las viñetas en una puesta en común y de consensuar los aspectos básicos de cada modelo identificados por los diferentes grupos, se continuará con una exposición teórica a cargo del docente investigador, en la cual se mostrarán los aspectos y características más relevantes de los modelos científicos, dándole sentido al OCE a partir de los mismos. Además, se realizará una contextualización histórica y social del proceso de desarrollo científico en el que tuvo lugar, la cual se complementará con diversas imágenes y fotografías para enriquecer la presentación del tema, como así también citas textuales de los autores extraídas de sus principales artículos científicos (Margulis, 1967; Robertson, 1970), y que serán entregadas de forma impresa por el equipo docente durante el desarrollo de la clase teórica. Los mismos se muestran a continuación:

Textos que contextualizan:

En palabras de Robertson:

“En una revisión de las clases más diferentes de células animales, vegetales y bacterias, no se ha presentado un solo caso en el que la membrana no estuviese presente. Parece ser, por tanto, una constante biológica común a la superficie de todos los tipos de células”. Se ha visto que la membrana de la célula es algo más que una cubierta externa; en la mayoría de las células forma parte esencial de la estructura interna de las mismas, como las organelas. Si las células primordiales sencillas como las bacterias son de este tipo, las células más complejas como las eucariotas podrían haberse originado por invaginación o enrollamiento de la membrana superficial” (página, 1970).

En palabras de Margulis:

“La teoría de endosimbiosis establece que los orgánulos de las células eucariotas –mitocondrias (orgánulos de producción de energía, ATP) y cloroplastos (orgánulos de fotosíntesis) se originaron de bacterias simbiotes”. El término “simbiosis en serie” se define simplemente como la adquisición física a largo plazo de bacterias que son miembros de diferentes especies. La endosimbiosis nos permite comprender que el proceso de aparición de la célula eucariota fue producto de la integración de bacterias en serie que se han establecido de manera permanente” (Margulis y Olendzenski, p. 160, 1996).

Al concluir esta etapa, se pedirá a los grupos que, basándose en los modelos teóricos analizados, comparen las similitudes y diferencias con las modelizaciones iniciales realizadas en la Actividad 1 y lo completen en una hoja con dicha consigna (**Figura 22**).

Figura 22

Consigna entregada a los grupos de estudiantes para completar la actividad

Vuelvan a los modelos iniciales que realizaron en la Actividad 1. ¿Qué aspectos consideran que fueron consistentes con los modelos científicos y cuales no tuvieron en cuenta?

Así, la Actividad 2, está orientada a promover la evolución y estructuración de los modelos iniciales, a partir del establecimiento de relaciones y de identificación de diferencias y también de consistencias que puedan hacer con los modelos científicos presentados. En este marco, la implementación de las actividades que den continuidad a la UD, y las discusiones que se lleven a cabo, estarán ahora informadas por este nuevo marco teórico construido, aún controversial, lo que permitirá que las y los estudiantes continúen el proceso de modelización contextualizado ahora en la historia de la ciencia.

Consignas de la actividad 2:

2.a Analicen los siguientes modelos gráficos.

2.b Identifiquen cuál creen que es la idea o teoría sobre el origen de la célula eucariota que está detrás de cada modelo. Elaboren textos en primera persona, como si fueran Robertson y Margulis, quienes explican sus modelos y completen las viñetas.

2.c Exposición teórica a cargo del docente investigador

2.d Teniendo en cuenta similitudes y diferencias, comparen con los modelos expuestos en la puesta en común anterior y completen la siguiente tabla.

Sobre la Actividad 3: Antes de presentar la consigna se hará explícito que, mientras se desarrollaban las discusiones entre partidarios gradualistas y de la endosimbiosis, se publicaron investigaciones que daban cuenta de la identificación de ADN en cloroplastos y mitocondrias (Ris y Plaut, 1962; Nass y Nass, 1963). Como se muestra en el análisis histórico-epistemológico, este episodio fue un punto de inflexión en el desarrollo teórico del OCE en la década del 60' y 70'.

Se les dará un tiempo para que puedan agregar este nuevo aspecto, la presencia de ADN en las organelas mencionadas, al modelo gráfico de célula eucariota.

Luego, se les solicitará a los grupos posicionarse desde las dos “teorías rivales”, endosimbiótica y gradualista respectivamente, y pensar en las posibles hipótesis que darían cada uno ante una nueva problemática: la de explicar el origen de ese ADN presente en esas organelas. Para ello, se entregará a cada grupo dos fotocopias que contienen viñetas para completar, por un lado, si consideran que ambos modelos teóricos ofrecerían la misma la explicación a este hecho (esquema de viñetas 1) (**Figura 23**) y, por el otro, si piensan que plantearían una hipótesis distinta (esquema de viñetas 2) (**Figura 24 y Figura 24**).

Así, la Actividad 3, permitirá incorporar un nuevo aspecto al modelo de célula eucariota (que hay organelas que tienen su propio ADN) y también ofrecerá una

nueva oportunidad de desarrollo del pensamiento teórico por parte de las y los estudiantes, al tener que construir explicaciones sobre el origen del ADN consistentes con cada uno de los modelos en pugna.

Figura 23

Esquema de viñetas 1

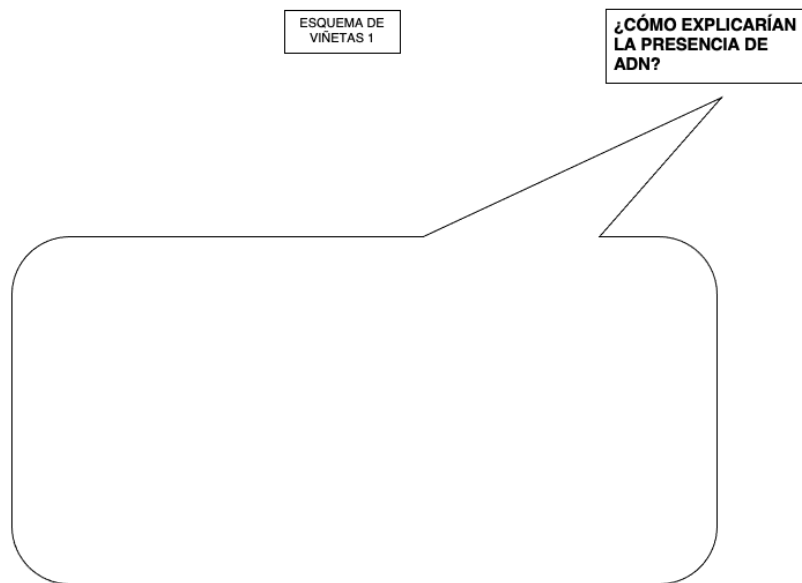
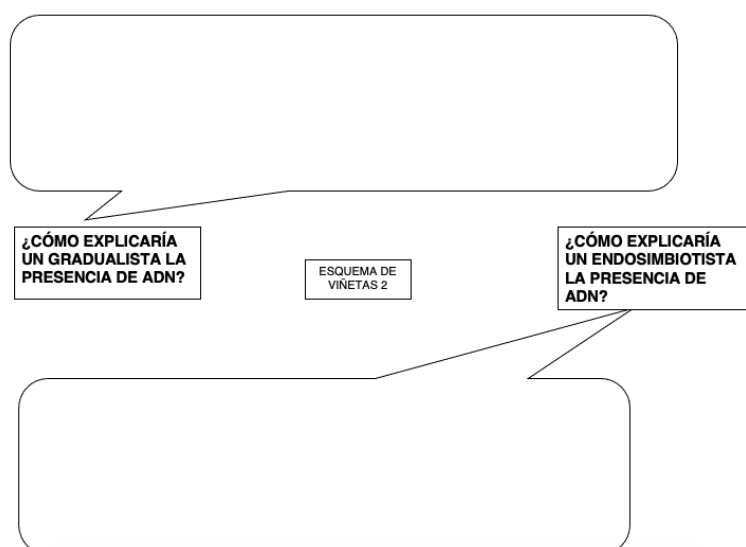


Figura 24

Esquema de viñetas 2



Consignas de la actividad 3:

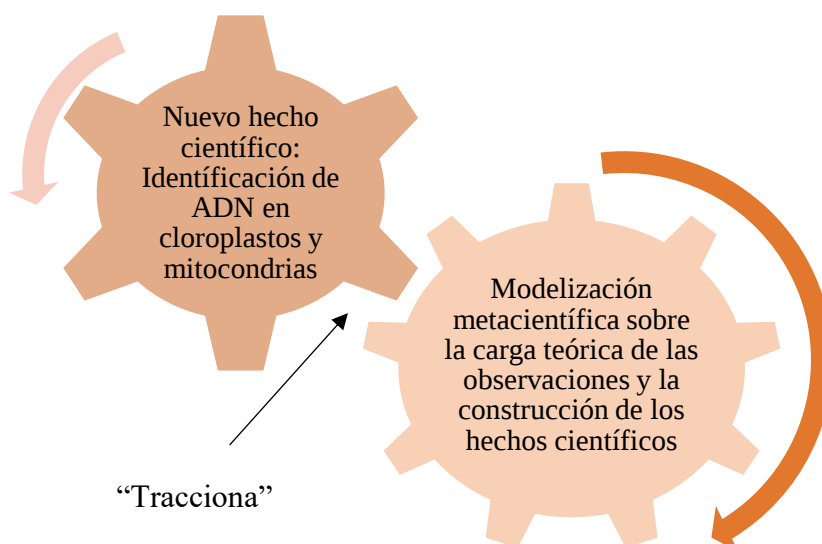
3.a Incorporar el dato de ADN en cloroplastos y mitocondrias en el modelo gráfico de la célula eucariota.

3.b ¿Cómo explicarían un biólogo orientado por la perspectiva endosimbiótica y un gradualista, que las mitocondrias y los cloroplastos tienen ADN? Si creen que coincidirían en la explicación, utilicen el esquema de viñetas 1. Si creen que darían explicaciones diferentes, usen el esquema de viñetas 2, y escribanlas en primera persona.

Sobre la Actividad 4: La presencia de ADN en cloroplastos y mitocondrias y las discusiones sobre su origen “traccionarán” la modelización metacientífica, relacionada con las ideas clave de NOS sobre “la carga teórica de las observaciones” y la “construcción de los hechos científicos” (**Figura 25**).

Figura 25

Primera integración disciplinar y metacientífica



Se retomarán las explicaciones que elaboraron los y las estudiantes sobre el origen del ADN de mitocondrias y cloroplastos y se confrontarán, identificando diferencias y también consistencias, con las ideas que en ese momento histórico se sostenían desde el modelo endosimbiótico y desde el modelo gradualista: “el ADN es de origen bacteriano”, “el ADN proviene del núcleo”, respectivamente.

Luego, desde la visión gradualista, se retomará específicamente un episodio desarrollado en el estudio histórico epistemológico, el referido al modelo de “Filiación directa” propuesto por el microbiólogo Max Taylor, de la Universidad Británica de Columbia, quien planteó que estas organelas “evolucionaron sin mediación de la simbiosis, (...) todas ellas surgieron como pellizcos del ADN del núcleo” (Margulis, p. 96).

A continuación, y ya en el ámbito del eje metacientífico de la UD, se presentará una actividad para pensar sobre los posibles motivos que guiaron a Taylor a proponer la hipótesis de “Filiación directa”, en un contexto en el cual la teoría de endosimbiosis comenzaba a ser aceptada por gran parte de la comunidad científica, y desde esa perspectiva teórica, era más consistente y también más simple resolver la cuestión del ADN como “el ADN de las bacterias”.

Así, la Actividad 4 es una interfase entre la modelización disciplinar del OCE, “ambientada en la historia de la ciencia”, y el inicio de la discusión y desarrollo de ideas “sobre la ciencia”, también contextualizadas en episodios históricos relevantes del desarrollo del modelo OCE.

Consignas de la actividad 4:

4.a *Comparen los modelos científicos que explicaron el origen del ADN en mitocondrias y cloroplastos con las viñetas producidas por ustedes en la actividad anterior ¿Encuentran alguna similitud en las explicaciones? ¿Cuáles? Desarrollen.*

4.b *Desde el modelo endosimbiótico parece “más razonable” explicar la presencia de ADN en las mitocondrias y cloroplastos (“es el ADN de las bacterias”). Ahora bien ¿Por qué piensan que Taylor emprendió la tarea de construir una explicación diferente? Fundamenten.*

Sobre la Actividad 5: Luego de socializar las discusiones iniciales sobre las posibles razones que, según las y los estudiantes, motivaron a Taylor a producir la hipótesis de “Filiación directa” en un contexto de afianzamiento del modelo endosimbiótico, cada grupo recibirá un material teórico de lectura escrito por el filósofo de la ciencia Alan Chalmers (Chalmers, 2010). En este texto, se exponen las principales implicancias que representa la experiencia y el papel de la carga teórica en las observaciones e interpretaciones de los hechos en la construcción del conocimiento científico. Luego, el docente investigador llevará a cabo una exposición teórica sobre las ideas abordadas en la lectura.

Se pedirá a las y los estudiantes que revisen las ideas presentadas en la actividad anterior (Actividad 4.b), donde se plantearon los posibles motivos que llevaron a Taylor a proponer el modelo de “Filiación directa”. A partir de este análisis, se les solicitará que reconsideren la explicación de Taylor a la luz de las ideas presentadas por Chalmers.

En esta etapa se comienza a trabajar sobre la idea clave: “la carga teórica de las observaciones”.

El material teórico de lectura se muestra a continuación:

Texto 1:

Un observador humano tiene un acceso más o menos directo a algunas propiedades del mundo exterior en la medida en que el cerebro registra esas propiedades en el acto de ver. Dos observadores que vean el mismo objeto o escena desde el mismo lugar “verán” lo mismo. Una combinación idéntica de rayos de luz alcanzará el ojo de cada observador, será enfocada en sus retinas normales por sus lentes oculares normales y dará lugar a imágenes similares. Así pues, una información similar viajará al cerebro de cada observador a través de sus nervios ópticos normales, dando como resultado que los dos observadores “vean” lo mismo. Veremos por qué este tipo de representación es seriamente engañoso. La opinión común mantiene que los hechos del mundo exterior nos son dados directamente a través del sentido de la vista. Sólo tenemos que ponernos frente al mundo y registrar lo que hay en él para ver (Chalmers, 2010, pp.4-5).

Texto 2:

Pareciera como si, en cierto sentido, lo que ve un observador resulta afectado por su conocimiento y su experiencia. Se puede sugerir la siguiente pregunta: “¿Qué tienen que ver estos ejemplos artificiales con la ciencia?”. La respuesta es que no resulta difícil proporcionar ejemplos procedentes de la práctica científica que ilustren la misma cuestión, a saber, que lo que ven los observadores, las experiencias subjetivas que tienen cuando ven un objeto o una escena, no está determinado únicamente por las imágenes formadas en sus retinas, sino que depende también de la experiencia, el conocimiento y las expectativas del observador. Michael Polanyi (1973, p. 101) describe los cambios efectuados en la experiencia perceptual de un estudiante de medicina cuando se le enseña a diagnosticar mediante el examen por rayos X:

Pensemos en un estudiante de medicina que sigue un curso de diagnóstico de enfermedades pulmonares por rayos X. Mira, en una habitación oscura, trazos indefinidos en una pantalla fluorescente colocada contra el pecho del paciente y

oye el comentario que hace el radiólogo a sus ayudantes, en un lenguaje técnico, sobre los rasgos significativos de esas sombras. En un principio, el estudiante está completamente confundido, ya que, en la imagen de rayos X del pecho sólo puede ver las sombras del corazón y de las costillas, que tienen entre sí unas cuantas manchas como patas de araña. Los expertos parecen estar imaginando quimeras; él no puede ver nada de lo que están diciendo. Luego, según vaya escuchando durante unas cuantas semanas, mirando cuidadosamente las imágenes siempre nuevas de los diferentes casos, empezará a comprender; poco a poco se olvidará de las costillas y comenzará a ver los pulmones. Y, finalmente, si persevera inteligentemente, se le revelará un rico panorama de detalles significativos: de variaciones fisiológicas y cambios patológicos, cicatrices, infecciones crónicas y signos de enfermedades agudas. Ha entrado en un mundo nuevo. Todavía ve sólo una parte de lo que pueden ver los expertos, pero ahora las imágenes tienen por fin sentido, así como la mayoría de los comentarios que se hacen sobre ellas (Chalmers, 2010, pp.7-8).

Texto 3:

Los observadores que ven la misma escena desde el mismo lugar ven la misma cosa, pero interpretan de diferente modo lo que ven. Estas experiencias no están dadas de modo unívoco ni son invariantes, sino que cambian con las expectativas y el conocimiento. Lo que viene unívocamente dado por la situación física, y estoy dispuesto a admitir esto, es la imagen formada en la retina del observador, pero el observador no tiene contacto perceptual directo con la imagen.

Mientras que las imágenes de nuestras retinas forman parte de la causa de lo que vemos, otra parte muy importante de esa causa está constituida por el estado interno de nuestras mentes o cerebros, el cual dependerá a su vez de nuestra educación cultural, nuestro conocimiento y nuestras expectativas. y no estará determinado únicamente por las propiedades físicas de nuestros ojos y de la escena observada. De ahí que, cuando unos cuantos observadores miran un dibujo, un trozo de un aparato, una platina de microscopio o cualquier otra cosa, en cierto

sentido todos ellos se enfrentan y miran la misma cosa y, por tanto, ven la misma cosa. Pero de esto no se sigue que tengan experiencias perceptuales idénticas (Chalmers, 2010, pp.8-9).

Consignas de la Actividad 5:

5.a Lean y analicen el texto 1, 2 y 3 del material de lectura.

5.b Vuelvan sobre el texto que escribieron en el punto 4.b ¿Encuentran consistencias con los materiales de lectura abordados? ¿Cómo lo reescribirían, en función de las ideas que plantea Chalmers respecto de las observaciones (en este caso de ADN en mitocondrias y cloroplastos) y lo que ocurrió con Taylor y su modelo de “Filiación directa” para explicar la procedencia del ADN en mitocondrias y cloroplastos?

Sobre la Actividad 6: Luego de realizar una puesta en común sobre la actividad anterior, se llevará a cabo una exposición teórica sobre la investigación que puso fin a la controversia sobre el ADN en cloroplastos y mitocondrias, como fue la determinación que se hizo en la década de 1980 (Sapp, 2014), en cuanto a que el ARN ribosómico contenido en las organelas mitocondrias y cloroplastos, tenía un origen alfa-proteobacteriano y cianobacteriano respectivamente, lo cual significó una nueva evidencia que se sumó a las características previas (Margulis, 2002; Sapp, 2014). Luego, se dará un tiempo para que agreguen dicha información al modelo gráfico de célula eucariota.

Hasta el momento, las discusiones sobre el OCE fueron referidas a mitocondrias y cloroplastos. En la Actividad 6, se pretende que las y los estudiantes puedan analizar, teniendo en cuenta el modelo endosimbiótico y gradualista, el posible origen de las demás organelas que no formaron parte de los debates, como, por ejemplo, el retículo endoplasmático, aparato de Golgi, núcleo, etc.

Consignas de la Actividad 6:

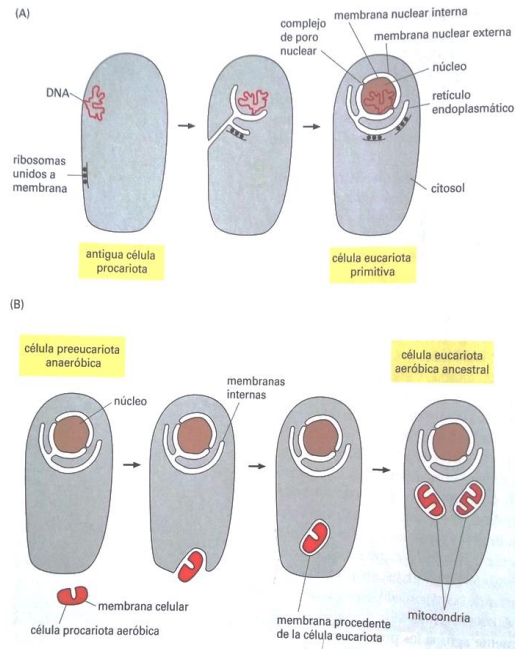
6.a Incorporar en el modelo gráfico de célula eucariota el carácter bacteriano del ADN de mitocondrias y cloroplastos.

6.b Piensen en el resto de las organelas del modelo gráfico de célula eucariota (Retículo endoplásmico, Aparato de Golgi, Vacuolas, etc.) que no formaron parte de las discusiones que se abordaron y vuelvan a sus modelos iniciales. ¿Cuál de los dos modelos teóricos analizados hasta aquí, consideran más razonable para explicar el origen de estas organelas? ¿Por qué?

Sobre la Actividad 7: Luego de las discusiones y reflexiones llevadas a cabo sobre el desarrollo teórico del modelo OCE a lo largo de la UD, se pedirá al grupo de estudiantes que analicen modelos gráficos extraídos de los manuales de biología que se encuentran en la biblioteca de la universidad, y que son utilizados y recomendados para el estudio de la materia (**Figura 26, Figura 27, Figura 28**). Así, el sentido de esta actividad es el de finalizar, por una parte, el proceso de modelización disciplinar del OCE, incorporando al gráfico de la célula eucariota el origen de las diferentes organelas en acuerdo a los modelos actuales y, también, para introducir la idea clave metacientífica sobre los “consensos” en la actividad científica.

Figura 26

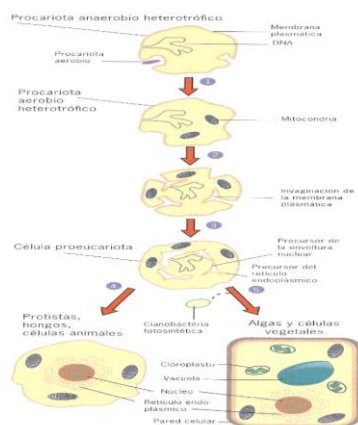
Modelo gráfico 1 extraído de un manual de biología



Nota. Adaptado de *Biología molecular de la célula*, (p. 758), por Alberts et al., 2004, Artmed editora.

Figura 27

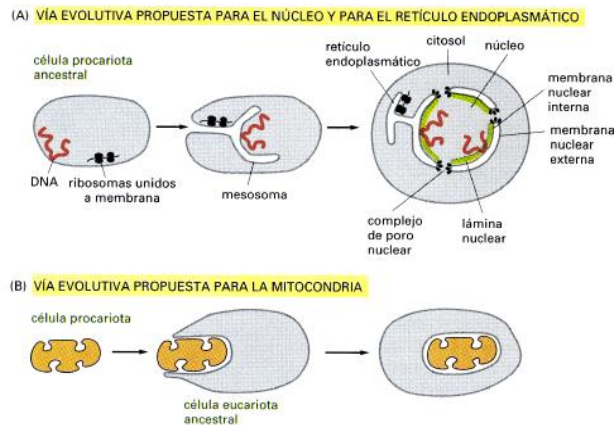
Modelo gráfico 2 extraído de un manual de biología



Nota. Adaptado de *Biología molecular de la célula*, (p. 758), por Alberts et al., 2004.

Figura 28

Modelo gráfico 1 extraído de un manual de biología



Nota. Adaptado de Biología celular y molecular. Conceptos y experimentos (p. 758) por Karp et al., 2009, Mc Graw Hill.

Consigna de la Actividad 7:

7. a Analicen los siguientes modelos gráficos presentes en los manuales de biología.

7. b Completen el modelo de célula eucariota indicando los diferentes orígenes de las organelas. ¿Cómo resolvió la comunidad científica la controversia planteada en la década del 60' respecto del origen de la célula eucariota? ¿Por qué consideran que lo hicieron así?

5.1.3 Actividades de aplicación

En esta instancia se pretende que las y los estudiantes puedan aplicar, por un lado, el aspecto endosimbiótico del modelo de OCE, y por otro, la idea clave metacientífica referida a la “carga teórica de las observaciones”, a un nuevo hecho científico que contextualiza.

Sobre la Actividad 8: Se presentará una problemática en el campo de la medicina que aborda las nuevas interpretaciones teóricas sobre los cuadros autoinmunes derivados del Síndrome de Respuesta Inflamatoria Sistémica (SIRS por sus siglas en inglés), que, “iluminadas” por el modelo de endosimbiosis y específicamente por el carácter bacteriano del ADN mitocondrial, ofrecen explicaciones robustas sobre la posibilidad de desarrollar nuevos tratamientos para este cuadro clínico (Calfee y Matthay 2010). Este episodio se contextualizará a partir de una noticia periodística (**Figura 29**), y se le pedirá a las y los estudiantes que la analicen y resuelvan la consigna “a” de la Actividad 8.

Luego, se llevará a cabo una puesta en común y el docente investigador realizará una exposición teórica sobre la relación entre el origen bacteriano de las mitocondrias y el SIRS, utilizando el modelo de Calfee y Matthay (2010) que se detalla en el AHE (**Figura 16**).

Además, el hecho científico también permitirá un análisis metacientífico, ya que, en el pasado, la comunidad médica sostenía que la infección altamente mortal que se desencadenaba después del SIRS era provocada por la liberación de bacterias del intestino al torrente sanguíneo, lo que generaba las infecciones sistémicas graves. En esta actividad, está implicada la idea clave metacientífica sobre la “carga teórica de las observaciones” y corresponde a la consigna “b” de la Actividad 8.

Figura 29

Titular de la noticia que contextualiza la actividad



Texto:

Tras un accidente de tránsito una de las personas involucradas terminó gravemente herida. Luego de varios días de hospitalización, el paciente presentó un cuadro clínico similar al que se produce cuando existe una infección, con síntomas y reacciones característicos que el organismo hace frente a ella. La médica que recibió a los familiares, les comentó que este fenómeno se produce tras la rotura de las células que forman los tejidos, y la posterior liberación del contenido celular al torrente sanguíneo, que se distribuyen por todas las regiones del cuerpo, comprometiendo así a muchos órganos. Allí, el sistema de defensa da una respuesta inflamatoria “como si el cuerpo se enfrentara a una infección”, pero sin que exista un ingreso de bacterias patógenas del exterior, lo que puede desencadenar cuadros graves que afectan diferentes órganos del cuerpo humano, pudiendo llevar a la muerte del paciente.

Consignas de la Actividad 8:

8.a *Teniendo en cuenta las ideas abordadas en las últimas clases sobre el origen de la célula eucariota ¿Cuáles de ellas te parece que podrían estar implicadas en la explicación de este fenómeno?*

8.b *“Al analizar el cuadro de un paciente politraumatizado, que presenta una respuesta inmune como si fuera una infección, intentamos identificar bacterias exógenas que pudieran causarla, y el resultado fue negativo. Por lo tanto, creemos que las bacterias que normalmente habitan en el intestino y colaboran con nuestra nutrición, al romperse pasaron al torrente sanguíneo y se distribuyeron por el resto del organismo, desencadenando una respuesta inmune grave que afecta a todos los órganos. De este modo, la comunidad médica explicaba estos cuadros clínicos, antes de que se normalizara el modelo de endosimbiosis para las mitocondrias”. ¿Con qué aspectos del desarrollo de la Actividad Científica ustedes vincularían esta situación presentada?*

Tabla 3

Secuencia de actividades del eje disciplinar y metacientífico

Actividades de la unidad didáctica

Actividad 1

Contextualización: Análisis de una línea de tiempo intervenida con episodios sobre la aparición de las primeras bacterias y células eucariotas, y se recupera una descripción básica (con modelos gráficos) de los dos planes celulares. Se explicita que, para dar cuenta del origen de las células eucariotas, al interior de la comunidad científica se ha consensuado la hipótesis que explica su origen a partir de las bacterias preexistentes.

Consignas:

1.a Piensen, discutan y construyan un modelo gráfico, acompañado de textos, explicando con el mayor detalle posible: ¿Cómo consideran que fue el proceso que, a partir de bacterias existentes, llevó a la formación de las primeras células eucariotas y sus diferentes organelas hace aproximadamente 2000 millones de años?

1.b ¿Cómo explicaron el proceso que dio lugar a la aparición de la célula eucariota y sus diferentes organelas?

Unidades de análisis: Gráficos y textos explicativos de los modelos iniciales. Notas en el cuaderno del investigador. Modelos.

Actividad 2

Contextualización: Se presentan los modelos gráficos de Robertson y Margulis sin información sobre sus alcances explicativos.

Consignas:

2.a Analicen los dos modelos gráficos.

2.b Identifiquen cuál creen que es la idea o teoría sobre el origen de la célula eucariota que está detrás de cada modelo. Elaboren textos en primera persona, como si fueran Robertson y Margulis, quienes explican sus modelos, y completen las viñetas.

Exposición teórica a cargo del ° investigador, sobre las características explicativas de los modelos de Robertson y Margulis. Se contextualiza de forma histórica el surgimiento de los modelos.

2.c Teniendo en cuenta similitudes y diferencias, comparen con los modelos y los nombres propuestos por ustedes en la puesta en común anterior y completen la tabla.

Unidades de análisis: Para 2.b Textos producidos en las viñetas. Para 2.c Textos producidos en una tabla comparativa.

Actividad 3

Contextualización: En momentos de gran desarrollo de la microscopía electrónica, Hans Ris y Walter Plaut, quienes trabajaban con estas técnicas, identificaron ADN en los cloroplastos en el año 1962, y un año después, en 1963, Margit Nass y Sylvan Nass lo hicieron en mitocondrias.

Consignas:

3.a Incorporar el dato de ADN en cloroplastos y mitocondrias en el modelo gráfico de la célula eucariota.

3.b ¿Cómo explicarían un biólogo orientado por la perspectiva endosimbiótica y un gradualista, que las mitocondrias y los cloroplastos tienen ADN? Si creen que coincidirían en la explicación, utilicen el

esquema de viñetas 1. Si creen que darían explicaciones diferentes, usen el esquema de viñetas 2, y escribanlas en primera persona.

Unidades de análisis: Textos producidos en las viñetas.

Actividad 4

Contextualización: Se presentan los modelos que, desde una y otra teoría, explicaron la presencia de ADN en las mitocondrias: ADN de origen bacteriano (Margulis) y la hipótesis de la “filiación directa” (pellizco de ADN del núcleo) propuesta por Taylor. Se da continuidad a línea teórica Robertson-Taylor.

Consigna para la actividad grupal:

4.a Comparen con las viñetas producidas por ustedes en la actividad anterior ¿Encuentran alguna similitud en las explicaciones? ¿Cuáles? Desarrollen.

4.b Desde el modelo endosimbiótico parece “más razonable” explicar la presencia de ADN en las mitocondrias y cloroplastos (es el ADN de las bacterias). Ahora bien ¿Por qué piensan que Taylor emprendió la tarea de construir una explicación diferente? Desarrollen.

Unidades de análisis: Textos producidos por las y los estudiantes.

Actividad 5

Consignas:

5.a Lean y analicen el texto 1 del material de lectura.

5.b Lean y analicen el texto 2 y 3 del material de lectura.

5.c Vuelvan sobre el texto que escribieron en el punto 4.b ¿Cómo lo reescribirían, en función de las ideas que plantean Hanson y Kuhn respecto de las observaciones (en este caso de ADN en mitocondrias y cloroplastos) y lo que ocurrió con Taylor y su modelo de “filiación directa” para explicar la procedencia del ADN en mitocondrias y cloroplastos?

Unidades de análisis: Textos producidos por las y los estudiantes.

Actividad 6

Contextualización: Se presentan los datos que permitieron identificar que el ADN de cloroplastos y mitocondrias es más parecido al de las bacterias que al de las células eucariotas.

Consignas:

6.a Incorporar en el modelo gráfico de célula eucariota el carácter bacteriano del ADN de mitocondrias y cloroplastos.

6.b Piensen en el resto de las organelas del modelo gráfico de célula eucariota (Retículo endoplásmico, Aparato de Golgi, Vacuolas, etc.) que no formaron parte de las discusiones que se abordaron y vuelvan a sus modelos iniciales. ¿Cuál de los dos modelos teóricos analizados hasta aquí, consideran más razonable para explicar el origen de estas organelas? ¿Por qué?

Actividad 7

7.a Analicen detenidamente los modelos presentes en los manuales de biología y completar el modelo de célula eucariota indicando los diferentes orígenes de las organelas. ¿Cómo resolvió la comunidad científica la

controversia planteada en la década del 60' respecto del origen de la célula eucariota? ¿Por qué consideran que lo hicieron así?

Unidades de análisis: Textos producidos por las y los estudiantes.

Actividad 8

Contextualización: Se presenta una noticia periodística sobre una problemática del campo de la medicina.

8.a *Teniendo en cuenta ideas abordadas en las últimas clases sobre el origen de la célula eucariota ¿Cuáles de ellas te parece que podrían estar implicadas en la explicación de este fenómeno? Expliquen.*

8.b *Al analizar el cuadro de un paciente politraumatizado, que presenta una respuesta inmune como si fuera una infección, intentamos identificar bacterias exógenas que pudieran causarla, y el resultado fue negativo. Por lo tanto, creemos que las bacterias que normalmente habitan en el intestino y colaboran con nuestra nutrición, al romperse pasaron al torrente sanguíneo y se distribuyeron por el resto del organismo, desencadenando una respuesta inmune grave que afecta a todos los órganos. De este modo, la comunidad médica explica estos cuadros clínicos, antes de que se normalizara el modelo de endosimbiosis bacteria para las mitocondrias. ¿Con qué aspectos del desarrollo de la Actividad Científica ustedes vincularían esta situación presentada?*

Unidades de análisis: Textos producidos por las y los estudiantes.

5.2 La implementación y evaluación de la unidad didáctica

5.2.1 Análisis de los resultados de las actividades de la unidad didáctica

5.2.1.1 La modelización inicial. Una oportunidad para pensar teóricamente el fenómeno del origen de la célula eucariota

La actividad de modelización inicial fue una de las tareas más intensas del desarrollo de la UD. Se decidió proporcionar un período de tiempo amplio y flexible, sin un límite establecido, con el fin de permitir que los diferentes grupos de estudiantes propusieran explicaciones y discutieran las consistencias e inconsistencias de los modelos para lograr hacerlos más robustos. En el diario del investigador se registró un clima de trabajo colaborativo, y el docente investigador y el equipo de auxiliares del proyecto participaron como oyentes de las discusiones, interviniendo para solicitar aclaraciones cuando las ideas debatidas eran confusas o también lo eran los dibujos y gráficos realizados, o para estimular la recuperación de ideas implicadas en la problemática. Así, y en función de que las y los estudiantes ya poseían ideas respecto de la edad de las bacterias y de las primeras células eucariotas y también podían hacer descripciones de las características principales de cada plan celular, volcaron estos datos en las imágenes, como se ejemplifica en la **Figura 30** (en la **Figura 39** se muestra un ejemplo de la suma de las intervenciones realizadas por uno de los grupos al finalizar la UD). La cuestión central era ahora pensar cómo vincular evolutivamente a esos grupos de organismos, generando modelos teóricos sobre la transformación de bacterias en células más complejas.

Como resultado de ese trabajo, se recolectaron los siguientes modelos gráficos acompañados de textos explicativos, que ofrecieron los diferentes grupos. Los mismos se muestra en la

Tabla 4.

Figura 30

Ejemplo de G3 al describir los planes celulares eucariota y procariota

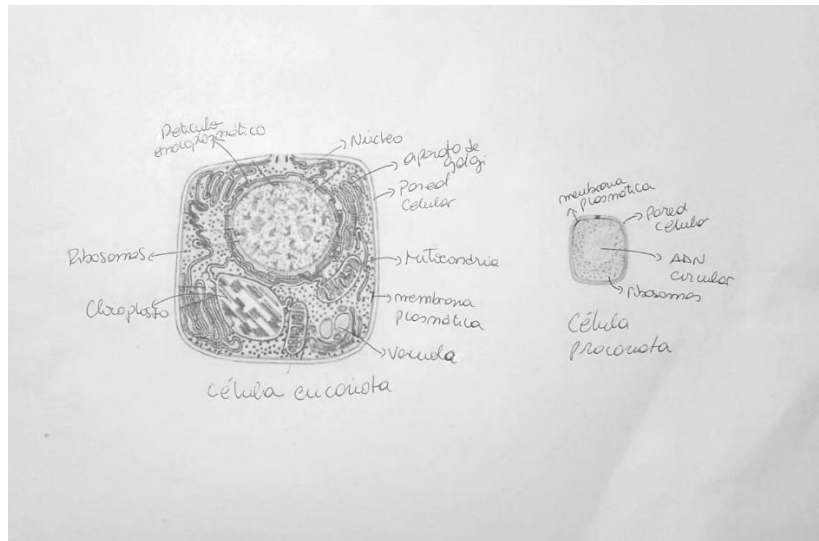
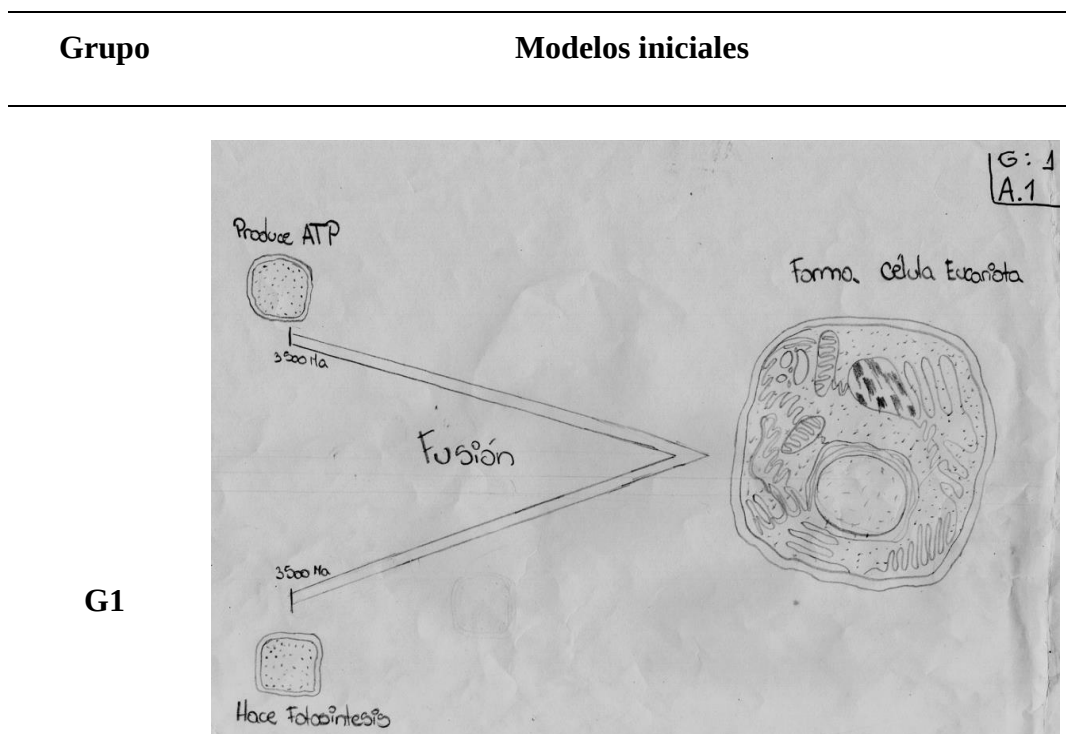


Tabla 4

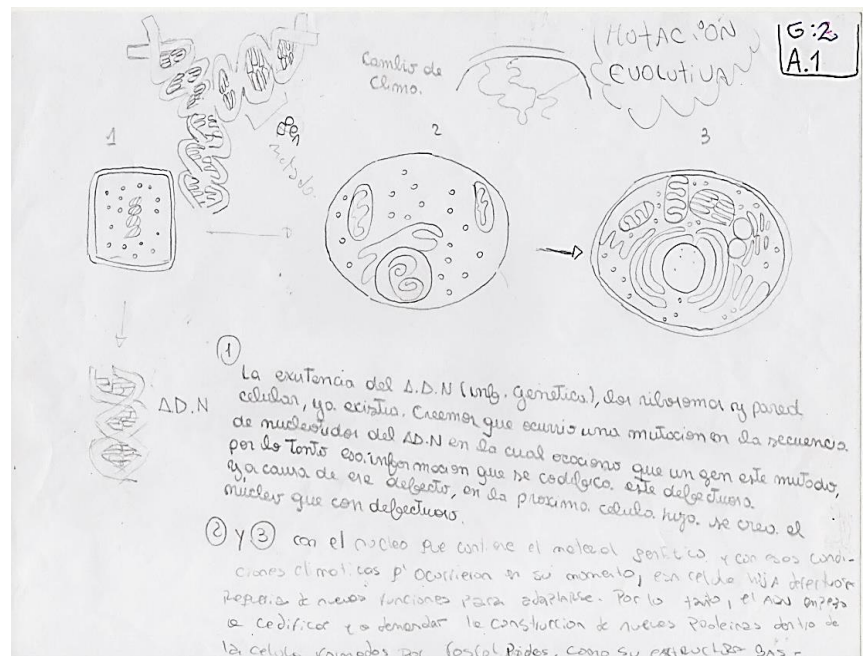
Modelos iniciales de los grupos



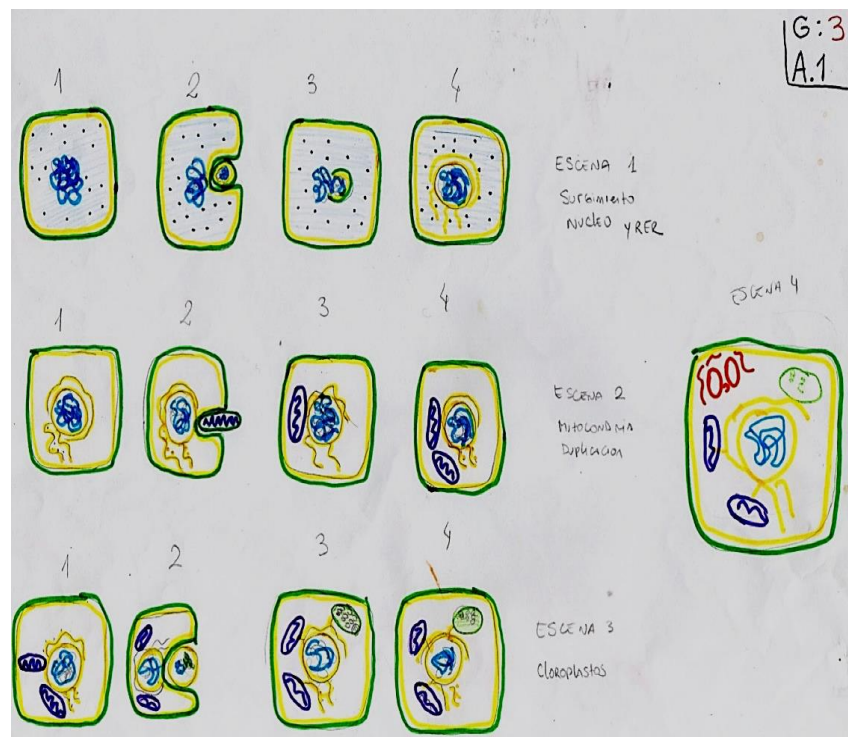
G1

Pensamos que las células procariotas se pueden distinguir entre si por diferentes características o procesos que pueden llevar a cabo, como por ejemplo una puede producir ATP y otra puede hacer fotosíntesis, entonces la idea es que dos células procariotas con características diferentes se fusionaron dando lugar a una célula que reúne las características de ambas. Esto no fue un proceso rápido sino que fue de forma gradual, dando lugar a que las nuevas células se fusionen con otras que tengan características similares pero no iguales y que se pueden distinguir de otras, como por ejemplo la célula eucariota de las plantas posee pared celular y la célula eucariota animal no la posee.

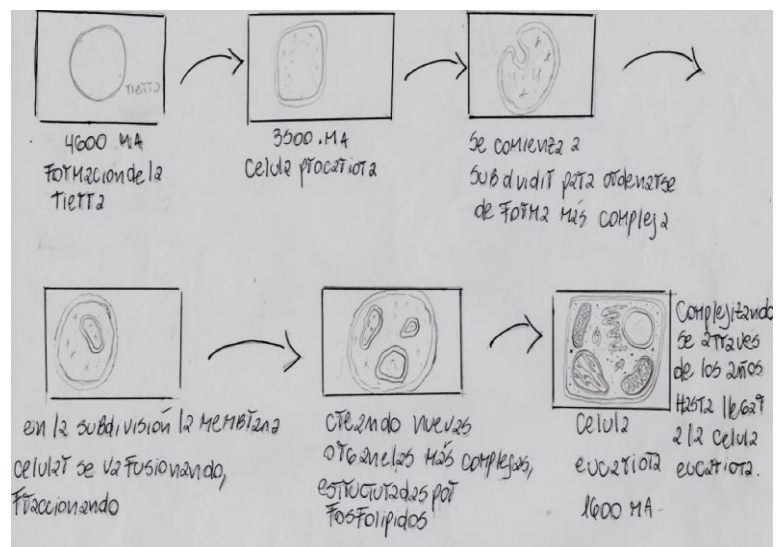
G2

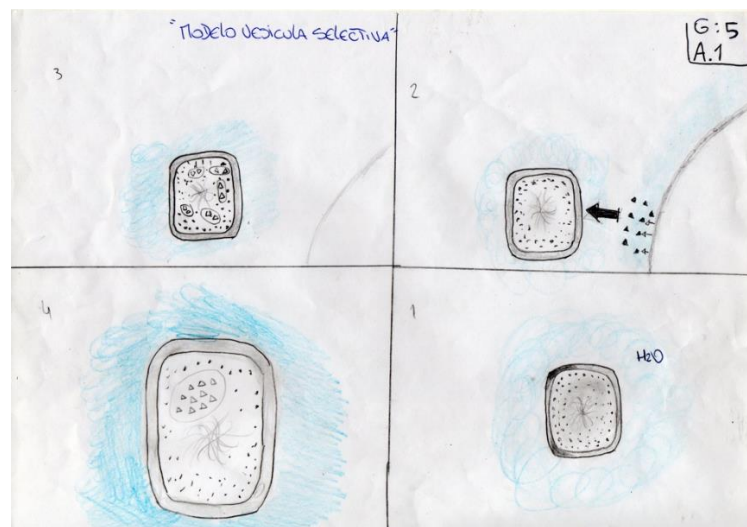


G3



G4





G5

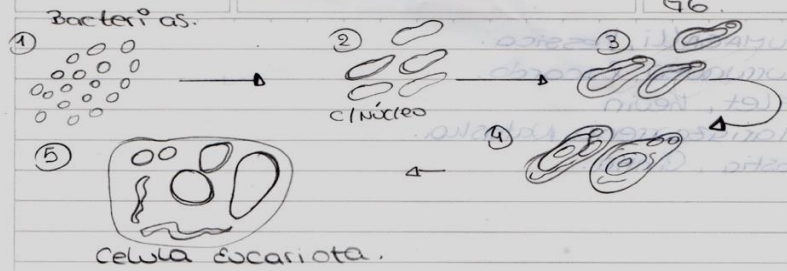
LA BACTERIA VIVIA EN UN MEDIO ACUOSO, ESTE MEDIO ACUOSO SE VIO AFECTADO POR EL ACERCAMIENTO A LA TIERRA, POR LO TANTO SU ALIMENTO SE VIO ALTERADO, CONSUMIENDO MINERALES U OTROS NUTRIENTES DESCARBADOS.

COMO MECANISMO DE DEFENSA, ESTE SE VIO OBLIGADO A UTILIZAR FOSFOLIPIDOS DE SU MEMBRANA PARA ENCERRARLOS Y ASI DESORDENARLOS PARA PODER ORDENARLOS A SU FAVOR, Y ASI BUSCARLE ALGUNA FUNCION O DESECHARLOS, ETC.

A PARTIR DE ESTE MECANISMO SE FUERON FORMANDO LAS DIFERENTES ORGANELAS

G5

EVOLUCION



① Colonia de Bacterias.

② De esa colonia de Bacterias, ~~una~~ un grupo sufre una alteración en la transcripción de su material genético, formando una nueva célula que contiene en su interior contenidos núcleo rodeado por una membrana.

③ De ese grupito reducido, al pasar el tiempo sufre una nueva alteración en su ADN dando paso a una nueva célula con núcleo, y organelas rodeados por una membrana lipídica.

④ Al pasar el tiempo estas dos células casi completas evolucionan reorganizándose su contenido intracelular, es decir

• dando una función específica a estas organelas de membrana lipídica.

Al evolucionar 4 de ellos dos es más apta para subsistir en el ambiente que se encuentra, dando lugar a lo que hoy

llamamos célula eucariota: mitocondria, ADN, núcleo, pared celular, ribosomas, cloroplasto membrana.

G6-A

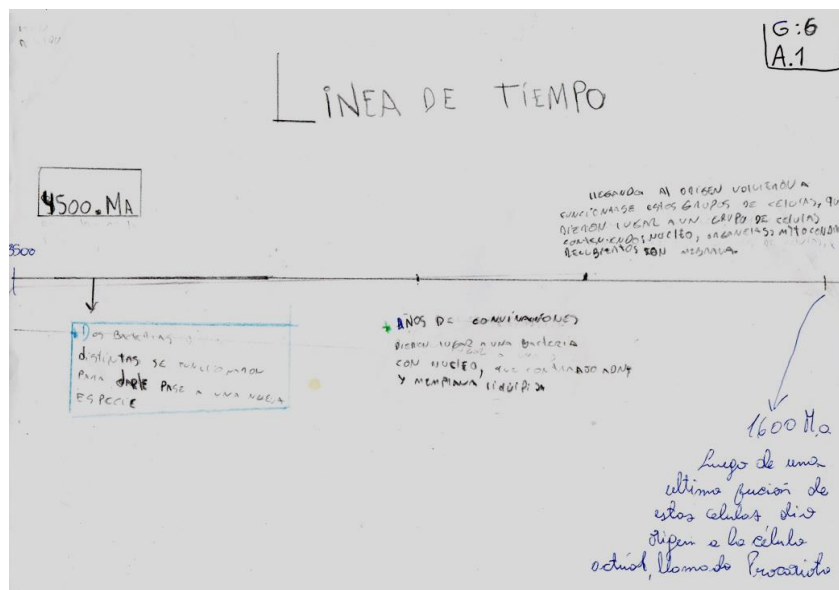


Figura 31

```
graph TD; A[Modelos Iniciales sobre OCE] --> B[Explicaciones basadas en la fusión/combinación de bacterias o la fagocitación de bacterias por otras (G1; G3; G6-B)]; A --> C[Explicaciones basadas en cambios producidos en una bacteria o en bacterias de una población o su descendencia (G2; G4; G5; G6-A)];
```

Modelos Iniciales sobre OCE

Explicaciones basadas en la fusión/combinación de bacterias o la fagocitación de bacterias por otras (G1; G3; G6-B)

Explicaciones basadas en cambios producidos en una bacteria o en bacterias de una población o su descendencia (G2; G4; G5; G6-A)

A continuación, se presentan descripciones detalladas de cada uno de los modelos iniciales. En ellas se identifican diferentes aspectos de modelos biológicos que las y los estudiantes consideraron pertinentes para explicar el OCE.

Explicaciones basadas en cambios producidos en un organismo/población o su descendencia.

Grupo 2: Según la modelización llevada a cabo por este grupo, el OCE es el resultado de distintas mutaciones que se producen en una célula como una respuesta adaptativa a un cambio en el clima. Como primer paso, describen una serie de mutaciones que suceden en los nucleótidos del “ADN/gen”, y que, a raíz de esta “información defectuosa”, se origina al núcleo. Luego, manifiestan que esa misma célula “defectuosa” “requería nuevas funciones para “adaptarse” y, por lo tanto, “codifica la construcción de nuevas proteínas” en el interior de la misma. Como condición previa al proceso descrito, la célula ya contenía ADN y ribosomas, y presentaba una pared celular.

Este modelo está básicamente advertido por ideas de mutación y de síntesis de proteínas, fenómenos que dinamizan el origen de estructuras como las organelas.

Grupo 4: El grupo hace explícita la idea de que la membrana de una célula primitiva “se comienza a subdividir para ordenarse de forma más compleja”. Mediante este proceso, que el grupo define como “subdivisión”, “la membrana celular se va fusionando, fraccionando”, a partir del cual se van “creando nuevas organelas más complejas, estructuradas por fosfolípidos, (...) complejizándose a través de los años hasta llegar a la célula eucariota”. En la explicación aparecen palabras claves como: “subdividir, fusionar y fraccionar”, referidas específicamente a la membrana plasmática de una célula.

En esta explicación, se pueden evidenciar algunos aspectos del modelo de membrana celular y de algunas de sus propiedades, como la de producir pliegues, invaginaciones y de la búsqueda de complejidad como un objetivo de estos organismos.

Grupo 5: Se describe una bacteria que habita un medio acuoso que se ve modificado y como consecuencia, la célula produce evaginaciones de membrana que utiliza para tomar nuevos nutrientes y “encerrarlos y así desordenarlos para poder ordenarlos a su favor, y así buscarles una función o desecharlos (...). A partir de este mecanismo se fueron formando las diferentes organelas”.

En esta explicación, se evidencia la aplicación del modelo de membrana, y de ideas básicas de metabolismo, por ejemplo, cuando mencionan “orden” y “desorden”, como una propiedad emergente del nivel de organización celular.

Grupo 6-A: Este modelo comienza con una población inicial de bacterias, de las cuales “un grupo sufrió una alteración en la transcripción de su material genético, formando una nueva célula que contiene en su interior un núcleo rodeado por una membrana”. De esa nueva población, un grupo reducido de bacterias sufre una nueva alteración, en este caso, en el ARN mensajero, y así se explica el origen de las demás organelas. Luego de este proceso, las células “evolucionan reorganizando su contenido intracelular, (...) dando una función específica a estas organelas de membrana lipídica. Al evolucionar una de ellas dos es más apta para subsistir en el ambiente en que se encuentra, dando lugar a lo que llamamos célula eucariota”.

Las explicaciones de este grupo están advertidas por ideas de cambio genético, expresión génica y evolución, poniendo el foco en un nivel de organización de población y teniendo en cuenta a la membrana plasmática.

Explicaciones basadas en la fusión/combinación de bacterias, fagocitación de bacterias por otras.

Grupo 1: El grupo presenta un modelo de “fusión” de dos células procariotas primitivas. Mencionan que cada una poseen características metabólicas particulares, por ejemplo, realizan fotosíntesis y respiración celular respectivamente. El grupo comenta que: “dos células procariotas con características diferentes se fusionaron dando lugar a una célula que reúne las características de ambas”. Por lo tanto, las funciones metabólicas que cumplen organelas tales como cloroplastos y mitocondrias en las células eucariotas vegetales, tienen su origen a

partir de este mecanismo, el cual, según las y los estudiantes, es un proceso “que no fue rápido, sino que se dio de manera gradual”, y en el cual las nuevas células son capaces de fusionarse con otras.

En esta explicación, se evidencian ideas de procesos metabólicos como fotosíntesis y respiración celular y su vinculación con las funciones de las organelas como cloroplastos y mitocondrias respectivamente.

Grupo 3: En este modelo, las y los estudiantes explican que en un momento dado “convivían bacterias con estructuras diferentes”, y que, organelas como núcleo, mitocondrias y cloroplastos, surgieron por un proceso que denominan “fagocitación”. Para ejemplificar este mecanismo, el grupo describe el origen del núcleo del siguiente modo: una bacteria “entra adentro de otra” y, “una vez dentro, la bacteria más pequeña *se come* el ADN de la otra para poder sobrevivir (simbiosis)” (la cursiva es nuestra). En el caso de mitocondrias y cloroplastos, mencionan que el proceso es similar, una bacteria es fagocitada por otra, “solo que se come otra bacteria distinta” y, de esta forma, se originan los cloroplastos y mitocondrias. En el caso del aparato de Golgi y el retículo endoplásmico, el grupo no especifica si se originaron por este mismo proceso.

Grupo 6-B: Este grupo también explica el OCE a partir de un modelo de “fusión” de bacterias. “Dos bacterias distintas se fusionaron para darle paso a una nueva especie”. Expresan que este mecanismo no fue rápido ni lineal, sino que fue un proceso que llevó años en el que estuvieron implicadas “distintas combinaciones de bacterias” y que dieron origen a las diferentes organelas de la célula eucariota. Cabe destacar que, en el modelo, expresan erróneamente que el resultado fue el origen de una célula “llamada procariota”, pero la explicación previa que presentan es consistente y ratificaron luego que debía decir “eucariota”.

Para finalizar la etapa de modelización inicial del OCE, en la Actividad 1.b, se llevó a cabo una puesta en común. En esa instancia las y los estudiantes compartieron y explicaron los modelos producidos por cada grupo (el equipo tomaba fotografías de cada uno y luego se proyectaban en la pizarra).

El docente investigador realizó comentarios y preguntas que colaboraran en hacer más transparentes las explicaciones y a identificar los diferentes modelos biológicos a los que habían recurrido para elaborarlas y hacerlas consistentes. En esa instancia, las y los estudiantes ya pudieron advertir que habían trabajado básicamente sobre dos perspectivas. Una, con explicaciones del OCE a partir de transformaciones que les ocurrían a células precursoras sin intervención de otras, y una segunda, con explicaciones que se basaban en vinculaciones diversas de bacterias para formar un nuevo organismo.

5.2.1.2 Inicio de las actividades para la modelización intermedia. La construcción de ligaduras entre lo pensado por las y los estudiantes en la modelización inicial y los modelos científicos de la década de los 60'

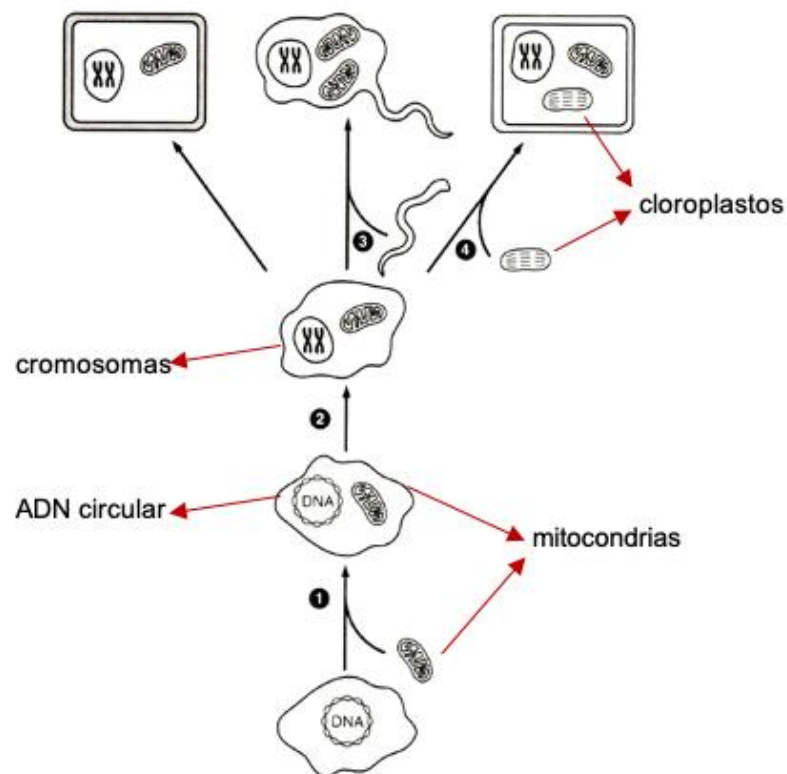
Como continuación de la puesta en común, el docente investigador planteó que, del mismo modo que las y los estudiantes pensaron teóricamente el fenómeno del OCE, la comunidad científica también lo hizo en un momento histórico dado, abordando el mismo interrogante que se planteó en la Actividad 1, a partir del cual se construyeron (y construyen en la actualidad) modelos robustos para dar respuestas a este hecho (Bock y Knoop, 2012; Martin, y Müller, 2007; Löffelhardt, 2014). Este aspecto resultó motivador para el estudiantado, ya que les permitió revalorizar lo que habían desarrollado en la modelización inicial, como protagonistas de un tipo de actividad teórica semejante a la que ha llevado a cabo la comunidad científica. Así, en la Actividad 2.a que tenía que ver con la presentación de los modelos gráficos contruidos por Robertson y Margulis, algunas/os estudiantes manifestaron sensaciones de sorpresa y asombro al encontrar parecidos entre, por un lado, los modelos que presentó la comunidad científica y, por el otro, las modelizaciones iniciales que ellos llevaron a cabo.

Al entregar las copias impresas de los gráficos, se les concedió un tiempo para que los observaran. Mientras esto sucedía, se hicieron aclaraciones, a modo de andamiajes, sobre los elementos presentes en ellos. Por ejemplo, en el modelo de Margulis, las y los estudiantes identificaron sin inconvenientes las estructuras que

corresponden a mitocondrias y cloroplastos, pero fue necesario hacer una mención en el mismo modelo al proceso de empaquetamiento del ADN circular bacteriano, en cromosomas visibles en mitosis de células eucariotas, ya que la interpretación de ese elemento generó confusión en la mayoría de los grupos (**Figura 32**). En relación con el modelo de Robertson, el grupo-clase no manifestó inconvenientes o confusión en la interpretación de los elementos presentes en ella.

Figura 32

Estructura celulares identificadas por los grupos en el modelo



Nota. Las estructuras identificadas por los grupos están señaladas con flechas rojas. Entre el paso "1" y "2", se destacan los elementos que generaron confusión en los grupos, siendo estos el ADN circular y los cromosomas (en negro imagen original).

Al concluir esta instancia se presentó la consigna de la Actividad 2b, la cual los ponía a construir una explicación que sostuviera a cada uno de los modelos gráficos y a expresarla en primera persona, como Robertson y Margulis, en una viñeta. Durante el desarrollo de esta actividad, que los implicaba en la tarea de interpretar los modelos teóricos que subyacen a los gráficos, las y los estudiantes comenzaron a establecer relaciones con sus propios modelos iniciales, que habían elaborado y compartido en la Actividad 1. Luego de un trabajo de acompañamiento por los diferentes grupos y aclaración de dudas, se completaron las viñetas y el contenido se muestra en la **Tabla 5**. Un ejemplo representativo de este trabajo se muestra en la **Figura 33**.

Figura 33

Ejemplo de intervención de G3

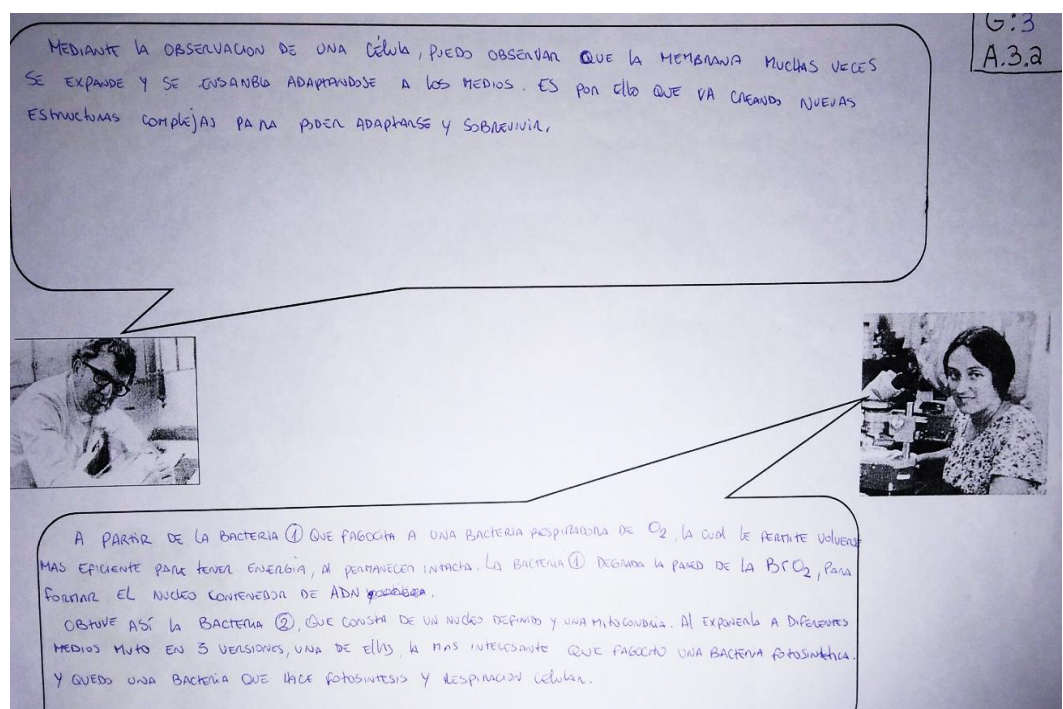


Tabla 5

Descripciones por grupos de la interpretación de los modelos de Robertson y Margulis

Grupo	¿Cómo explica el OCE el modelo gráfico de Robertson?	¿Cómo explica el OCE el modelo gráfico de Margulis?
1	<i>“En este modelo la célula procariota va modificando su membrana con el paso del tiempo, formando estructuras membranosas que se expanden, dando lugar a las organelas”.</i>	<i>“La célula procariota se fusiona con una bacteria productora de oxígeno, se fusiona con cromosomas y bacteria fotosintética para formar una célula vegetal”.</i>
2	<i>“Yo creo que mi idea de la célula “nueva” fue que la misma célula procariota empezó a codificar la información genética distinta, por lo tanto, para poder adaptarse comenzó a expandirse y a crear nuevas organelas y esto fue con ayuda de la misma membrana a lo que la célula “nueva” requería para su subsistencia”.</i>	<i>“Estaba trabajando en un proyecto y me replantee el origen de la célula eucariota: ¿Cómo fue que se desarrolló? Estaba pensando en ese momento. Se me ocurrió que a la célula procariota en su inicio se fagocitó una bacteria respiradora de oxígeno. Ya que vivía en un medio acuoso en donde convivía con muchas de ellas. ¿Cómo fue que mutó en diferente forma? A causa de convivir en un medio bacteriano mi hipótesis fue que a medida que se encontraba en diferente hábitat (sic), fagocitaba la bacteria que creía necesaria.</i>

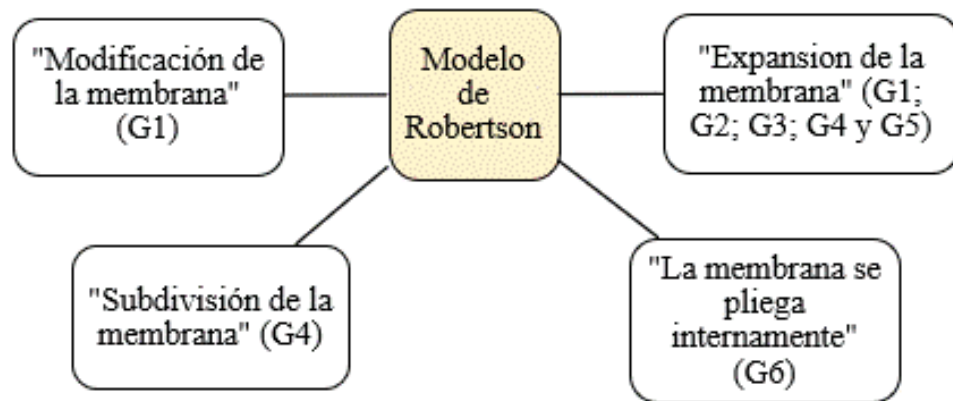
	Por ejemplo (bacteria fotosintética) célula vegetal”. “A partir de la bacteria “1” que fagocita a una bacteria respiradora de oxígeno, la cual le permite volverse más eficiente para tener energía, al permanecer intacta. La bacteria “1” degrada la pared de la bacteria respiradora de oxígeno, para formar el núcleo contenedor de ADN. Obtuve así la bacteria “2”, que consta de un núcleo definido y una mitocondria. Al exponerla a diferentes medios mutó en tres versiones, una de ellas, la más interesante que fagocitó una bacteria fotosintética y quedó una bacteria que hace fotosíntesis y respiración celular”.
3	“Mediante la observación de una célula, puedo observar que la membrana muchas veces se expande y se ensambla adaptándose a los medios. Es por ello que va creando nuevas estructuras complejas para adaptarse y sobrevivir”.
4	“En mi modelo la célula procariota se expande, específicamente la membrana celular se va subdividiendo dando a origen a las organelas”. “En este modelo explico que diferentes bacterias con diferentes características, como por ejemplo una bacteria fotosintética da origen a los cloroplastos o una bacteria que puede respirar da origen a las mitocondrias. Se van fusionando para dar lugar a dos células más complejas”.

5	<i>“Investigando el proceso de formación de la célula descubrí que esta célula eucariota se formó mediante el crecimiento, expansión e invaginación de su membrana, dando lugar así y creando lugar a sus organelas”.</i>	<i>“Investigando el proceso de formación de la célula, descubrí que una bacteria respiradora se introduce a la célula, ubicándose en determinado lugar cerca del ADN, así como también se introduce una bacteria fotosintética, así creando la organela de los cloroplastos formando la célula vegetal”.</i>
6	<i>“El modelo que yo planteo el cual da origen a la célula eucariota se basa en la modificación de su estructura en la membrana lipídica, plegándose internamente, con el correr de los tiempos, hasta formar su estructura intracelular, es decir, sus organelas, núcleo, mitocondrias, etc.”.</i>	<i>“Mi modelo explica la creación de las células eucariotas, por la fusión de dos bacterias distintas entre sí, una con ADN y otra anaeróbica. De su unión se forma una bacteria que contiene cromosomas. Y esta sigue evolucionando y se une a otra bacteria fotosintética, creando la célula eucariota”.</i>

Del análisis de los datos surge que, en el caso del modelo de Robertson, todos los grupos realizaron interpretaciones consistentes y que tienen en cuenta un proceso que involucra cambios en la membrana o límite de la célula, que posteriormente da origen a las organelas de la célula eucariota (**Figura 34**).

Figura 34

Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes



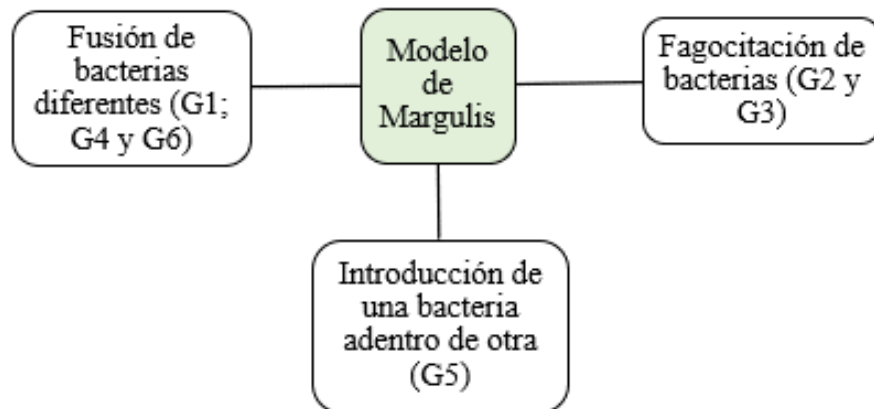
De los seis grupos de trabajo, G2, además, incorporó explicaciones sobre el probable origen de las modificaciones de membrana: “la misma célula procariota empezó a codificar la información genética distinta, por lo tanto, para poder adaptarse comenzó a expandirse y a crear nuevas organelas y esto fue con ayuda de la misma membrana”. Por otro lado, nótese que G4 menciona que el proceso se debe a una “expansión y subdivisión de la membrana”, del mismo modo que explicaron en la modelización inicial (

Tabla 4).

En relación con el modelo de Margulis, los 6 grupos describieron y explicaron el OCE basándose en la integración de bacterias con diferentes características (**Figura 35**). Por ejemplo, G1, G2, G4 y G5, mencionaron o realizaron vinculaciones entre bacterias que realizan el proceso de fotosíntesis con los cloroplastos y el surgimiento de la célula vegetal, y G2, G3, G4 y G5, muestran la misma asociación, pero en relación con bacterias respiradoras de oxígeno y las mitocondrias. Además, algunos grupos incorporaron ideas sobre el posible origen del núcleo (G3) y los cromosomas (G1 y G6) en sus explicaciones.

Figura 35

Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes



Así, esta actividad de análisis de las definiciones gráficas de una y otra vertiente teórica, hizo posible que todos los grupos se implicaran en la interpretación de modelos que podían o no coincidir con el sesgo que les habían dado a sus modelos iniciales.

En la Actividad 2.c, el docente investigador recuperó los textos producidos por los diferentes grupos y los vinculó explícitamente con las posiciones teóricas en pugna sobre las que se asientan los modelos gráficos analizados de Robertson y Margulis. Desarrolló en la clase una perspectiva histórica para identificar las líneas teóricas de cada uno (el nucleocentrismo gradualista en Robertson y la simbiosis y captación de genomas en Margulis) y sus antecedentes, haciendo evidentes los desacuerdos que llevaron a una controversia en los 60'. En el transcurso de esta actividad, las y los estudiantes mostraron un gran interés por las discusiones llevadas a cabo y, mientras se abordaban los aspectos centrales de cada modelo, el docente respondió las dudas que surgían y también proporcionó aclaraciones cuando fueron necesarias. Las discusiones fueron sintetizadas en la clase por el docente/investigador en las siguientes proposiciones:

- En la década de los 60' se produjo una controversia en el campo de la biología celular y molecular y se enfrentaron dos modelos teóricos antagónicos para explicar el OCE.
- El modelo de Robertson establecía que el OCE es el resultado de un proceso gradual y progresivo de pliegues de membrana originado a partir de mutaciones que dieron origen a las organelas.
- El modelo de Margulis explicaba el OCE como resultado de un proceso en serie de integración de bacterias que se habían establecido de manera permanente y habían dado origen a determinadas organelas como cloroplastos y mitocondrias.

5.2.1.3 Un emergente no previsto en la modelización intermedia y el diseño de una nueva actividad para la unidad didáctica

Al finalizar la actividad 2 de la UD, emergió una problemática derivada del análisis de los modelos iniciales. Se observó que las explicaciones de algunos grupos, que se centraron en “explicaciones basadas en cambios producidos en una bacteria”, asumían la existencia de transformaciones en la membrana celular de una bacteria sin explicar cómo podrían haber ocurrido. Por ejemplo, G2 y G6A mencionaban “mutaciones”, pero no especificaban cómo se traducían y daban lugar a los pliegues de membrana. G4 y G5, explicaban que la membrana de la bacteria se “subdivide”, “fracciona”, “fusiona” o “invagina”, sin explicar cómo se llevaba a cabo este proceso. El docente investigador consideró oportuno problematizar al grupo de la clase respecto de esta cuestión, esto es: ¿Cómo pensaban que podrían haberse formado pliegues, invaginaciones en membranas formadas por fosfolípidos? Las y los estudiantes no ofrecieron explicaciones y mostraron cierta perplejidad ante la situación planteada. Recuperaron una analogía de la membrana celular con una “pompa de jabón”, que habían utilizado en su formación previa, pero no podían resolver a partir de ella las posibles causas que produjeran transformaciones/deformaciones en su estructura.

El docente investigador en reunión con su equipo de dirección, analizaron esta situación y decidieron incluir una actividad de modelización en la próxima clase, que permitiera iluminar un aspecto central del modelo de Robertson. Los resultados de esta actividad, que implicó la modelización del citoesqueleto como elemento central para organizar, direccionar y complejizar las membranas y el análisis del modelo de de Duve (1996), quién formalizó esta idea, fueron publicados en la revista “Bio-Grafía. Escritos sobre la Biología y su enseñanza” (Álvarez Soria y Lozano, 2022) y el artículo se encuentra en el Anexo¹⁴.

5.2.1.4 Volver a los modelos iniciales

En la Actividad 2.d, cada grupo tuvo la oportunidad de confrontar formalmente sus modelos iniciales con los modelos científicos expuestos. Para ello, se entregó una fotocopia con un cuadro comparativo en el que debían responder la consigna propuesta (**Tabla 6**). Como esta actividad se llevó a cabo después de la modelización del origen de los pliegues de membrana, al analizar los modelos iniciales, algunos grupos consideran también el no haber tenido en cuenta la función del citoesqueleto en las versiones de sesgo gradualista.

¹⁴ Para acceder a los resultados de esta actividad ingresar al siguiente enlace: <https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/9526>. Se puede comenzar a leer desde la página 1196, el apartado “Discusiones sobre los pliegues de membrana”.

Tabla 6

Descripciones por grupos al confrontar los modelos iniciales con los científicos

Grupo	¿Qué aspectos consideran que fueron consistentes con los modelos científicos y cuáles no consideraron? Teniendo en cuenta similitudes y diferencias, comparen con los modelos expuestos en la puesta en común anterior y completen la siguiente tabla.
1	<i>“A nuestro modelo lo planteamos como una fusión de células procariota con distintas funciones, que daban origen a una célula eucariota. Omitimos hablar de citoesqueleto e invaginaciones”.</i>
2	<i>“Coincidimos en que en la célula eucariota lo principal es que se formó el núcleo y que el ADN comanda la información. Lo que no tuvimos en cuenta fue lo de la idea de evaginación e integración de bacterias, tampoco la formación de cloroplastos”.</i>
3	<i>“Los aspectos que consideramos consistentes tienen que ver con la adquisición física de otras bacterias y su integración al medio de la célula, para así formar las distintas organelas. No tuvimos en cuenta la función del citoesqueleto que le proporciona a la célula cambiar su estructura”.</i>
4	<i>“En nuestro modelo podemos hacer comparaciones con el gradualismo de Robertson ya que consideramos la invaginación para la creación de organelas. Lo que no tuvimos en cuenta fue la evaginación como primera etapa y la fagocitosis de bacterias de distinta especie, como explica el modelo de Margulis. Tampoco consideramos el aspecto del citoesqueleto”.</i>

-
- 5 *“No consideramos el citoesqueleto. Consideramos el medio exterior. **Estaba bien la consideración de la membrana**”.*
- 6 *“No tuvimos en cuenta la endosimbiosis en serie, que da explicación a los cloroplastos y mitocondrias. Sí tuvimos en cuenta el ADN. No tuvimos en cuenta la evaginación e invaginación y el citoesqueleto. **Tuvimos en cuenta la evolución gradual**”*
-

Los resultados muestran que cinco de los seis grupos (G1, G3, G4, G5, G6) identificaron, con diferentes niveles de desarrollo, aspectos que les permitían vincular razonablemente a sus modelos iniciales para explicar el OCE con los modelos de Robertson y/o Margulis. En cuanto a G2, sólo pudo identificar el rol del ADN en su modelo inicial.

5.2.1.5 Continuación de la modelización intermedia. Posicionarse teóricamente y explicar el fenómeno del origen de la célula eucariota

La Actividad 3 introdujo un nuevo hecho científico: “El hallazgo de ADN en cloroplastos y mitocondrias”. Luego de la contextualización histórica de este hecho, las y los estudiantes agregaron esta información al modelo gráfico de célula eucariota. Luego, la Actividad 3.b los implicó en tener que explicar el probable origen del ADN en esas organelas, adoptando las perspectivas teóricas gradualista y endosimbiótica. Para esto, contaban con viñetas que expresarían las explicaciones elaboradas desde uno u otro enfoque teórico. El docente investigador acompañó las primeras discusiones al interior de los grupos, aclarando el sentido y los alcances de la consigna (“Sitúense en el modelo gradualista y en el modelo endosimbiótico sobre el OCE: ¿Cómo se podría explicar desde cada uno la presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos?”).

Esta tarea convocó con mucho interés a los diferentes grupos, en función de considerar que estaban recreando nuevamente situaciones de discusión teórica que

se habían dado casi setenta años atrás en el seno de la comunidad científica. En la **Tabla 7** se muestran los textos elaborados por los diferentes grupos.

Tabla 7

Descripciones de las explicaciones que dan los grupos sobre la presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos

Grupo	¿Cómo explicaría un partidario gradualista la presencia de ADN?	¿Cómo explicaría un partidario de la endosimbiosis la presencia de ADN?
1	<i>“La célula tiene distribuido el ADN en todo su interior y al formarse las evaginaciones e invaginaciones el ADN se fue concentrando en las organelas”.</i>	<i>“Las bacterias simbiotes fotosintéticas y productoras de ATP ya tenían su propio ADN y por lo tanto cuando se integran en una única célula ese ADN se conserva en los cloroplastos y mitocondrias respectivamente”.</i>
2	<i>“Desde mi perspectiva como gradualista, creo que los cloroplastos y la mitocondria tiene ADN diferente al de su núcleo, ya que, al principio de la formación de las evaginaciones e invaginaciones, la célula se encontraba con el material genético disperso. Por esta misma razón cuando se fueron produciendo las evaginaciones e invaginaciones el ADN se fue</i>	<i>“Desde mi punto de vista, teniendo en cuenta de que las diferentes bacterias ya contenían ADN, en el momento en el que se unen la bacteria respiradora de oxígeno y la bacteria fotosintética para formar el simbiote, estas quedan con su ADN y no son desarmadas, ya que, así como están son beneficiosa para la célula”.</i>

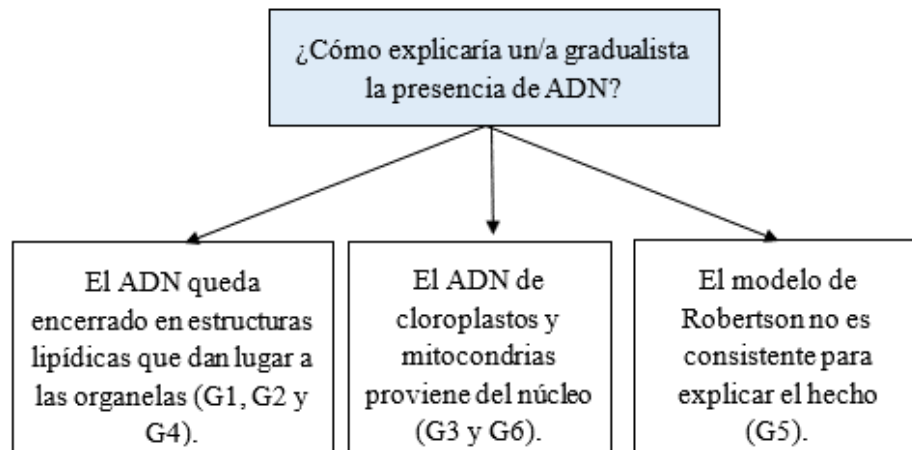
	quedando donde más le convenía. Además de formar las distintas organelas hizo en este proceso que las mitocondrias y los cloroplastos tengan ADN diferente.”	
3	“En la evaginación del núcleo se desprende una porción de ADN quedando separado, formando invaginaciones que más tarde dieron origen a las diferentes organelas con ADN: mitocondrias y cloroplastos”.	“La presencia de ADN en mitocondria y cloroplasto se debe a la fagocitación de otras bacterias distintas. La mitocondria de una bacteria respiradora de oxígeno y el cloroplasto de una bacteria fotosintética”.
4	“Explicaría la presencia de ADN en cloroplastos y mitocondrias de la siguiente forma: durante la diferenciación de las organelas, el ADN que se encontraba disperso en el citoplasma es fraccionado y distribuido en distintos espacios intercelulares que luego dieron lugar a mitocondrias y cloroplastos”.	“Explicaría la presencia de ADN, con la incorporación de las bacterias que a futuro terminó en organelas (la bacteria contiene ADN)”.
5	“Desde mi opinión contemplo que Margulis puede tener razón ya que mi modelo contempla la formación de pseudópodos, pero	“En nuestra opinión, las bacterias se comieron a todas cuya organelas tenían cloroplastos, por lo cual, al fagocitarlas, se apropiaron del ADN de los cloroplastos, un

	<i>no la formación de organelas con ADN propio".</i>	<i>ejemplo similar sería el caso de las mitocondrias".</i>
6	<i>"Mi teoría es que cuando se iba formando la célula y se fueron produciendo invaginaciones y formándose las mitocondrias y cloroplastos, estas arrastraron al seguir fagocitando otras ADN del núcleo, por eso es que hoy podemos encontrar ADN propio en las mitocondrias y cloroplastos".</i>	<i>"MI teoría es que cuando la primera bacteria fagocita a la otra bacteria respiradora de oxígeno cada una llevaba su propio ADN, bacterias dieron origen a la mitocondria y cloroplastos de la célula eucariota y así cada una conservó su propio ADN".</i>

Desde la perspectiva gradualista, tres de los seis grupos de estudiantes (G1, G2 y G4), sostienen que la presencia de ADN en las mitocondrias y los cloroplastos se debe a los "pliegues de la membrana que dieron origen a las organelas". Por otra parte, en el caso de G3 y G6, consideran que la formación del núcleo con material genético fue un paso previo al origen de las mitocondrias y los cloroplastos, y que el ADN identificado en estas últimas, en realidad proviene del núcleo (Tabla subrayada en negrita). En cuanto a G5, proponen que el modelo de Robertson solo puede explicar organelas que no contienen ADN, y plantean que el modelo de Margulis resulta más consistente para dar cuenta de este hecho (**Figura 36**).

Figura 36

Esquema que muestra la organización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes

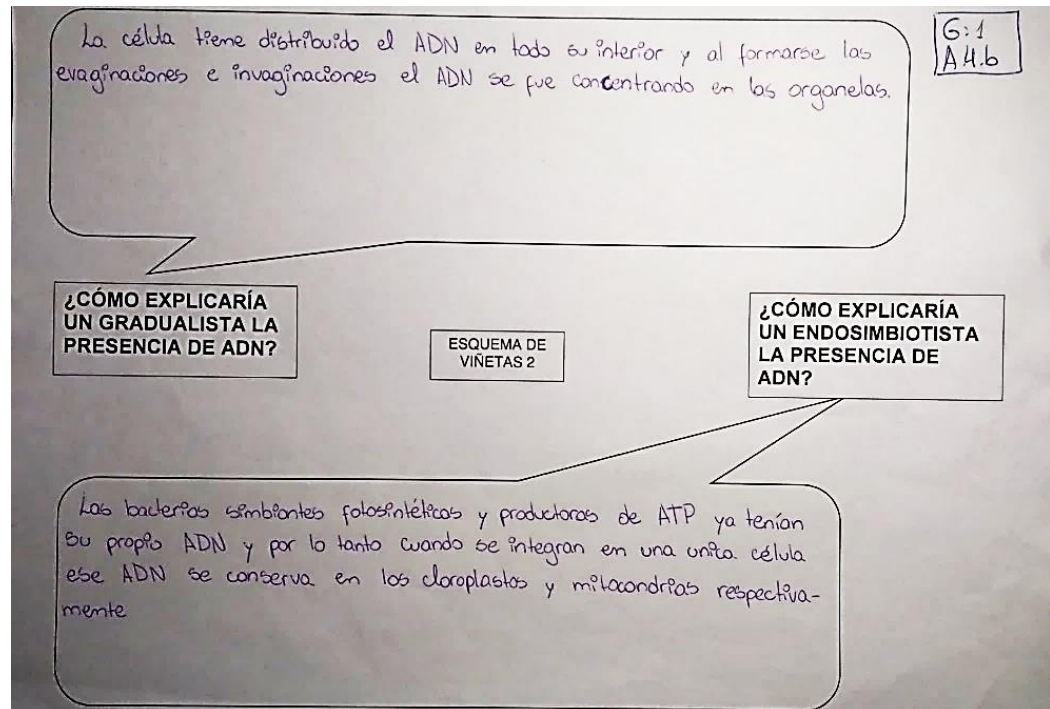


Desde la visión endosimbiótica, todos los grupos concuerdan en que la presencia del ADN en las mitocondrias y los cloroplastos se debe a su conservación como resultado de su origen bacteriano (**Tabla 7**).

Un ejemplo ilustrativo de las respuestas desarrolladas en esta actividad se muestra en siguiente imagen, correspondientes a G1 (**Figura 37**).

Figura 37

Ejemplo de intervención de G1



En la puesta en común llevada a cabo y a partir de los aportes de las y los estudiantes, se consensuó que la hipótesis endosimbiótica parecía ser una explicación "más sencilla" para dar cuenta de la presencia de ADN (las bacterias portaban su propio ADN) mientras que, para los defensores del gradualismo, implicaba la necesidad de desarrollar una explicación más compleja para abordar este nuevo hecho. Esta idea sirvió como inicio para la siguiente actividad, que se centró en la introducción de un episodio histórico de la ciencia relacionado con esta problemática y la presentación de un defensor del gradualismo, como Max Taylor.

5.2.1.6 De interpretar un modelo científico a pensar porqué se lo elaboró.

Inicio de las actividades para la modelización metacientífica

Luego de plantear a las y los estudiantes una breve descripción de las investigaciones que llevaron a la identificación de ADN en cloroplastos y mitocondrias (las que estuvieron orientadas por hipótesis endosimbióticas - esto

implica que se buscaba deliberadamente ADN en esas organelas y que su hallazgo se asumía como una validación de esa hipótesis (Ris y Plaut, 1962; Nass y Nass, 1963), se llevó a cabo la presentación teórica del modelo de “Filiación directa” propuesto por Taylor (1976), para explicar el origen del ADN desde una visión gradualista (Ver anexo con la presentación en PowerPoint de la clase). El grupo-clase se mostró muy interesado por el episodio histórico y las ideas planteada por este científico. La Actividad 4.a, dio la posibilidad a las y los estudiantes de identificar nuevamente similitudes entre las explicaciones que elaboraron, situados en una perspectiva gradualista y el modelo de “Filiación directa” de Taylor.

Al analizar los datos, se observó que G1, G2, G3, G4 y G6 fueron los grupos que pudieron establecer vinculaciones directas con el modelo de “filiación directa” propuesta por Taylor, pero no así en el caso de G5, quienes de alguna manera anticipan un posible mecanismo de acuerdos que está en la base de la idea metacientífica sobre los consensos científicos (**Tabla 8**).

Tabla 8

Comparación de los grupos sobre la presencia de ADN en cloroplastos y mitocondrias con el modelo de “filiación directa” de Taylor

Grupo	Comparen con las viñetas producidas por ustedes en la actividad anterior ¿Encuentran alguna similitud en las explicaciones? ¿Cuáles? Desarrollen.
1	- “Robertson, Margulis, Taylor, coinciden que el ADN se concentra en mitocondrias y cloroplastos. - Robertson y Taylor, afirman que el ADN proviene de la misma célula (causa: evaginaciones; pellizcos). - No consideramos el núcleo a la hora de explicar cómo lo hizo Taylor”.

-
- 2 “El modelo de Taylor coincide mucho con el de Robertson, ambos plantean con el proceso de las invaginaciones y evaginaciones, **el ADN queda en forma de restos en la formación de dichas organelas como los cloroplastos y mitocondrias**”.
- 3 “Sí, encontramos muchas similitudes.
- Gradualismo: **Se separa una porción-pelizco y se invagina dando origen a las organelas con ADN.**
 - Endosimbiosis: **Similitud 100%**”.
- 4 “Detectamos las mismas explicaciones teóricas entre Taylor y nuestro modelo explicativo. Nosotros **referimos a esos “pellizcos” a seccionamientos del ADN** durante la diferenciación de las organelas”.
- 5 “No encontramos similitudes, **porque en nuestro modelo los gradualistas ceden el lugar a la teoría de endosimbiosis**”.
- 6 “1) En la teoría gradualista sí encontramos similitudes con la propuesto de Taylor, ya que **su modelo de Filiación directa propone que todos ellos surgieron de pellizcos de ADN del núcleo y nosotros proponemos que fueron arrastrando pequeños fragmentos del núcleo al formarse las invaginaciones.**
- 2) En la segunda viñeta sí encontramos similitudes ya que **Margulis explica su modelo como que cada bacteria tiene su propio ADN, y concuerda con la explicación de nosotros**”.
-

Hasta el momento, las actividades se habían centrado en la modelización disciplinar sobre el OCE, contextualizada en diferentes episodios de la historia de este modelo.

Ahora, la introducción del hecho científico sobre la presencia de ADN en las organelas permitió “traccionar” la Actividad 4.b, que fue el punto de partida para la construcción de una idea clave metacientífica. Esta idea tiene que ver con el papel que ocupa la carga teórica en las explicaciones científicas y la construcción de los hechos científicos.

A partir de la presentación de esta consigna, se fomentó el debate dentro de cada grupo en relación con la cuestión metacientífica, al preguntarles sobre las “posibles motivaciones” que llevaron a Taylor a desarrollar un modelo explicativo para la presencia de ADN, en un momento en el que el modelo endosimbiótico comenzaba a ser reconocido en la comunidad científica y, el “hallazgo” de ADN en cloroplastos y mitocondrias se asumía como una evidencia fuerte respecto del origen bacteriano de esas organelas.

Los registros de clase del investigador indican que los grupos experimentaron cierto desconcierto a la hora de abordar la actividad. Pensar cómo un gradualista hubiese explicado la presencia de ADN en las organelas, les había resultado más operativo que pensar ahora sobre las razones que motivaron a Taylor a elaborar un modelo gradualista en un contexto que no le era favorable teóricamente, al menos, para dar cuenta del origen de ese ADN. En función de esto, el equipo docente se dedicó a recorrer los grupos para orientar las discusiones. Además, el docente investigador realizó intervenciones y aclaraciones generales para guiar el proceso de modelización. Esto permitió que todos los grupos comprendieran el sentido de la tarea y comenzaran a responder la consigna.

Los resultados muestran que todos los grupos identificaron en la elaboración de la hipótesis de “Filiación directa” por parte de Taylor una vinculación y un compromiso del investigador con el modelo gradualista, los cuales se muestran resaltados en negrita en la **Tabla 9**. De acuerdo con esta perspectiva, la motivación detrás de la construcción de una explicación alternativa al modelo endosimbiótico radica en que este científico operaba dentro de un marco teórico del OCE con un enfoque gradualista, al igual que Robertson.

Tabla 9

Descripciones iniciales de los grupos sobre la idea clave metacientífica “la carga teórica de las observaciones”

Grupo	Desde el modelo endosimbiótico parecería “más razonable” explicar la presencia de ADN en las mitocondrias y cloroplastos (es el ADN de las bacterias). Ahora bien ¿Qué creen que motivó a Taylor a construir una explicación diferente?
1	<i>“Taylor dice que el ADN aparece en mitocondrias y cloroplastos a través de pellizcos del ADN (apoyando la teoría del gradualismo), esto le ayudaría a entender por qué solo se concentraba ADN en mitocondrias y cloroplastos y no en otras organelas”.</i>
2	<i>“Creemos que Max Taylor tenía una posición gradualista, por eso le intenta dar una explicación razonable al modelo de Robertson, en cuanto a la formación de dichas organelas”.</i>
3	<i>“A Taylor lo motivó explicar el modelo gradualista ya que para él era inconcebible que dentro de un organismo existieran más de una ADN, porque consideraba que cada organismo tuviera un ADN único”.</i>
4	<i>“Lo que motivó a Taylor a construir una nueva explicación para dicho fenómeno fue su necesidad de abordar una nueva problemática con el mismo foco teórico gradualista”.</i>

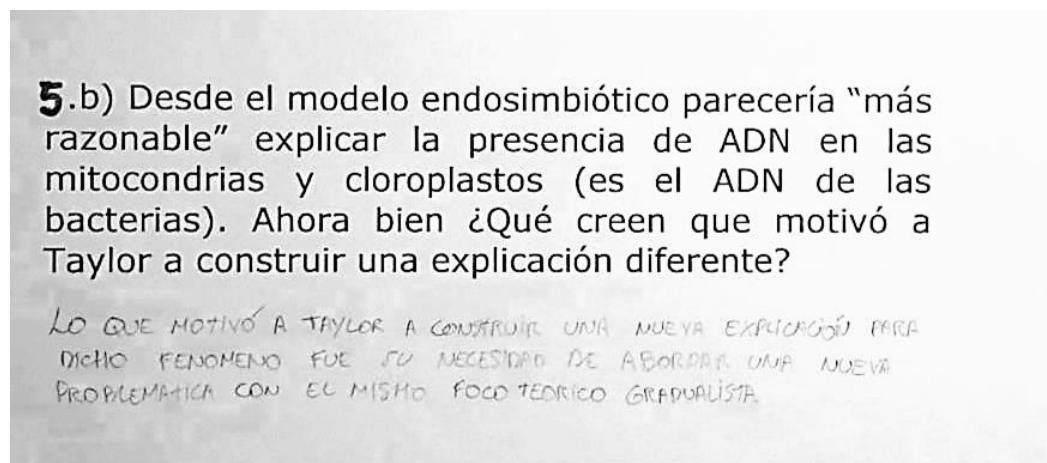
5 “Creemos que **Taylor quería defender su teoría diciendo que era autógeno**, quiere decir que no necesita nada del exterior para formarse”.

6 “**Taylor defendía la teoría gradualista** ya que el no contemplaba la teoría de la endosimbiosis, porque no creía que una bacteria que fuera fagocitada y no “pasara nada” (digerida). Es por esto que lo **llevó a Taylor a construir otra explicación diferente**: modelo de “filiación directa”.

Un ejemplo ilustrativo de las respuestas desarrolladas en esta actividad se muestra en la **Figura 38**, correspondientes a G1.

Figura 38

Ejemplo de intervención de G1



Al finalizar esta actividad, se llevó a cabo una puesta en común y se presentó la Actividad 5.a, que tuvo como objetivo la estructuración de la idea clave metacientífica, a partir de la introducción de aspectos claves provenientes del eje epistemológico de la NOS, referidos a la carga teórica de las observaciones.

Luego de la presentación y lectura de los textos de Chalmers (2010), se llevó a cabo una puesta en común acerca de las ideas abordadas en los mismos. Además, se realizó una exposición teórica complementaria, en la cual el docente investigador dejó planteado que:

- La observación no es una ventana neutral para conocer el mundo, sino que está cargada de teoría.
- Las percepciones de los hechos se fabrican en las mentes humanas y en las comunidades científicas utilizando material cultural previo y creencias.
- Con la modificación de esas matrices, puede darse la desaparición de ciertos hechos y la emergencia de otros, lo que conduce a que tanto científicas/os como observadoras/es tengan ideas preconcebidas y numerosos prejuicios sobre el funcionamiento del mundo (Hanson, 1977).

Así, las y los estudiantes se dispusieron a trabajar en la consigna de la Actividad 5.b, la cual tuvo como objetivo una reescritura de los textos producidos en la Actividad 4.b.

A partir del análisis de los textos “reconstruidos”, se pudo dar cuenta que todos los grupos lograron estructurar sus ideas iniciales en función de los aportes teóricos del campo de la filosofía de la ciencia, al hacer uso de un lenguaje que se puede considerar “más cercano” y “afín” a dicho campo del conocimiento. De esta manera, las reflexiones teóricas se han robustecido al incluir, a estas explicaciones, aspectos de las ideas claves metacientíficas, que dan cuenta de una vinculación entre, por un lado, la influencia de la perspectiva gradualista y, por otro, la construcción del modelo de “filiación directa” de Taylor, los cuales se muestran resaltados en la **Tabla 10**.

Tabla 10

Textos reescritos por los grupos advertidos por ideas metacientíficas

Grupo	Vuelvan sobre el texto que escribieron en el punto 4.b ¿Encuentran consistencias con los materiales de lectura abordados? ¿Cómo lo reescribirían, en función de las ideas que plantea Chalmers respecto de las observaciones (en este caso de ADN en mitocondrias y cloroplastos) y lo que ocurrió con Taylor y su modelo de “Filiación directa” para explicar la procedencia del ADN en mitocondrias y cloroplastos?
1	<i>“Creemos que Taylor en base a sus observaciones, experiencia, cultura, expectativas y conocimiento teórico creó una hipótesis en base al modelo gradualista”.</i>
2	<i>“Podríamos decir que Max Taylor tenía ideas preconcebidas en torno al modelo del gradualismo, dejándose influenciar por la carga teórica que Robertson tenía. Por eso cuando se comprobó que las mitocondrias y el cloroplasto tenían su propio ADN, él se vio obligado desde su perspectiva a tratar que dicho marco teórico encaje mediante un nuevo modelo llamado filiación directa”.</i>
3	<i>“Taylor tenía una idea preconcebida del origen de la célula eucariota, basado en el modelo gradualista. A la hora de explicar que las mitocondrias y los cloroplastos tienen ADN, considera que son pellizcos con porción de ADN que se desprendió del núcleo. Sostiene esa hipótesis por producto de su conocimiento y educación”.</i>
4	<i>“Ambos postulados difieren en la interpretación del mismo fenómeno debido a que cada investigador dispone de una</i>

	<i>distinta carga teórica que genera sesgos observacionales/interpretativos, definidos por sus experiencias, cultura, conocimiento, etc. De esta forma es que Taylor observa un “pellizco de ADN del núcleo” como explicación del ADN presente en los cloroplastos y mitocondrias. A diferencia del modelo de Margulis, que postula la simbiogénesis (fagocitación de distintas bacterias con ADN) ”.</i>
5	<i>“Creemos que como Taylor es gradualista, su observación estaba influenciada por sus cargas teóricas y conocimientos, ya que la mirada que él pone en la aparición de ADN en las mitocondrias y cloroplastos no es neutral”.</i>
6	<i>“Taylor después de estudiar el modelo teórico de Robertson y ya verlo con sus ojos, pudo explicar la aparición del ADN en las mitocondrias y cloroplastos. El defendía el modelo gradualista por su carga teórica, entonces la visión de él no concordaba con el modelo de la endosimbiosis”.</i>

Luego de realizar una puesta en común de la actividad anterior, el docente investigador introdujo datos de la investigación que llevó a inclinar hacia el modelo endosimbiótico la controversia sobre el origen de ADN en cloroplastos y mitocondrias, como fue la determinación de que el ARN ribosómico contenido en las organelas tenía un origen alfa proteobacteriano y cianobacteriano respectivamente (Margulis, 2002; Sapp, 2014).

A finalizar esta instancia se concedió un tiempo para que agreguen dicha información al modelo gráfico de célula eucariota (Actividad 6.a) y se presentó la Actividad 6.b. Al solicitarles pensar en el origen de las organelas que no se discutieron a lo largo de la UD, como, por ejemplo, el retículo endoplásmico, el aparato de Golgi, las vacuolas y el núcleo, los grupos pudieron establecer relaciones

razonables entre los modelos gradualista y endosimbiótico y el interrogante planteado (Tabla 11).

Tabla 11

Respuestas de los grupos al pensar sobre el origen de las diferentes organelas

Grupo	Piensen en el resto de las organelas del modelo gráfico de célula eucariota (Retículo endoplásmico, Aparato de Golgi, Vacuolas, etc.) que no formaron parte de las discusiones que se abordaron y vuelvan a sus modelos iniciales. ¿Cuál de los dos modelos teóricos analizados hasta aquí, consideran más razonable para explicar el origen de estas organelas? ¿Por qué?
1	No responde.
2	<i>Creemos que el origen de la célula eucariota se fue dando principalmente por evaginaciones e invaginaciones, formando distintas organelas (retículo endoplásmico, vacuola, aparato de Golgi, núcleo), estas formadas por fosfolípidos y fueron de los pliegues de membrana. También de forma simbiótica como por ejemplo mitocondrias y cloroplastos, ya que estos poseían ADN en su interior con una función específica se fagocitaron dichas bacterias como la respiradora de oxígeno y la fotosintética.</i>
3	<i>Modelo endosimbiótico: Mitocondria, cloroplasto, núcleo.</i> <i>Modelo gradualista: Complejo de Golgi, retículo endoplásmico rugoso, vacuola.</i>
4	<i>Determinamos que todas las organelas corresponden al modelo del gradualismo excepto cloroplastos y mitocondrias, que a estas organelas las ubicamos con el modelo de Margulis,</i>

endosimbiosis. Las ubicamos a estas dos organelas con este modelo porque presentan ADN bacteriano a diferencia del resto.

Endosimbiosis: Mitocondrias, cloroplastos, núcleo. Debido a que poseen ADN propio.

5 ***Gradualistas: Retículo Endoplasmático, aparato de Golgi, vacuolas. Debido a que su forma “física” parece ser vesicular o de pliegues invaginales.***

Citoesqueleto: Gradualista.

Membrana del núcleo: Gradualista.

Núcleo: Gradualista.

Aparato de Golgi: Gradualista.

6

Pared celular: Gradualista.

Membrana: Ya se encontraba.

Ribosomas: Ya se encontraban.

Cloroplastos y mitocondrias: Endosimbiótico.

Algunos grupos hacen mención a las características propias de cada modelo para atribuirle un origen a las organelas. Por ejemplo, los grupos G2 y G5, consideran que el retículo endoplásmico, el aparato de Golgi y las vacuolas se originaron de manera gradualista:

- *“Creemos que el origen de la célula eucariota se fue dando principalmente por evaginaciones e invaginaciones, (...) están formados por fosfolípidos y fueron causa de los pliegues de membrana” (G2).*

- *“Debido a que su forma “física” parece ser vesicular o de pliegues invaginales” (G5).*

En cuanto al núcleo, los grupos G3 y G5, le otorgan a este un origen endosimbiótico. Por ejemplo, G5, lo ubican bajo este modelo, “debido a que posee ADN propio”. Esta relación resulta inconsistente, ya que, según el modelo, no se discute o plantea qué tipo de ADN es. De este modo existen una consistencia argumentativa, pero no va en la línea del modelo endosimbiótico. G3, no especifica la razón de su origen.

5.2.1.7 El origen de la célula eucariota en la actualidad

Con el propósito de confrontar las ideas que las y los estudiantes habían expresado en la Actividad 6.b, cuando se les solicitó pensar el origen de las organelas de la célula eucariota, se les planteó la siguiente pregunta: “¿Dónde buscarían información para determinar el estado actual de esta cuestión?”. Después de discutir algunos minutos, se acordó que una fuente confiable de búsqueda serían los manuales de biología universitarios, depositarios de lo que Kuhn denomina período de “ciencia normal”. Al indagar sobre los mismos, se aceptó que algunas/es autoras/es representativos serían Campbell, et al. (2007), Curtis, et al. (2008), Alberts, et al. (2016) y Sadava, et al. (2005), los cuales constituyen la bibliografía de referencia de la asignatura.

Luego de este debate, se presentó la Actividad 7, la cual tenía que ver con el análisis de los modelos gráficos sobre el OCE presentes en estos libros y el inicio de la construcción de una idea clave metacientífica sobre los “consensos” en la actividad científica.

Las producciones realizadas por las y los estudiantes concluyen que en la actualidad ambos modelos “coexisten” en las explicaciones sobre del OCE. Por ejemplo, G1, G3 y G6 coinciden en que esta “convivencia” se debe a que el modelo endosimbiótico y gradualista pueden, respectivamente, explicar diferentes características de este hecho científico. Por otro lado, G2, G4 y G5 presentan ideas

relacionadas con la consideración de la ciencia como ámbito de acuerdos y consensos (Tabla 12).

Tabla 12

Respuestas de los grupos sobre el estado de ciencia normal en la teoría del origen de la célula eucariota

Grupo	¿Cómo resolvió la comunidad científica la controversia planteada en la década del 60' respecto del origen de la célula eucariota? ¿Por qué consideran que lo hicieron así?
1	<i>“Nosotras creemos que ambos modelos coexisten porque cada uno puede explicar ciertos aspectos de cómo se compone una célula y limitarse en otros, como, por ejemplo: el modelo de endosimbiosis explica el ADN bacteriano en cloroplastos y mitocondrias, pero no concuerda con el resto de las organelas que no lo contienen, porque esto puede explicarse con el modelo gradualista”.</i>
2	<i>“Tuvieron que llegar a un consenso para plantear el origen de la célula eucariota intercambiando modelos que sustenten dicha teoría, llegando a concluir resultados óptimos para su investigación, ya que el modelo gradualista tenía un modelo consistente sobre ciertas organelas, mientras que el modelo endosimbiótico tenía resultados consistentes de otras organelas (mitocondrias y cloroplastos)”.</i>
3	<i>“La comunidad científica lo resolvió utilizando ambos modelos anteriormente planteados. El modelo gradualista permitió explicar la conformación del núcleo y sistema de endomembranas, como organelas conectadas de manera directa. En el caso del modelo endosimbiótico explicaría el</i>

	origen de mitocondrias y organelas dentro de una célula eucariota las cuales presentan un ADN bacteriano, que no es el mismo que el que contenía el núcleo.”.
4	“Hoy sabemos que el modelo está compuesto por ambas teorías tanto el de Margulis como el de Robertson, los dos aportaron descubrimientos consistentes, consensuando las dos teorías, ajustan mejor a la realidad”.
5	“En resumen aceptaron los dos modelos porque, las organelas con ADN propio tienen un origen distinto, mientras que el resto se produce por invaginación. Lo consideramos así porque, ambas fuentes son considerablemente razonables y fácilmente acoplables”.
6	“Como grupo acordamos que la comunidad científica acordó usar los dos modelos gradualista y endosimbiosis, para explicar el origen de la célula eucariota, ya que el modelo de Margulis, no explica el origen de las organelas como el citoesqueleto, etc. esto lo explicaría el modelo gradualista. Y el modelo gradualista no explicaría el origen de mitocondrias y cloroplastos, que contienen ADN bacteriano”.

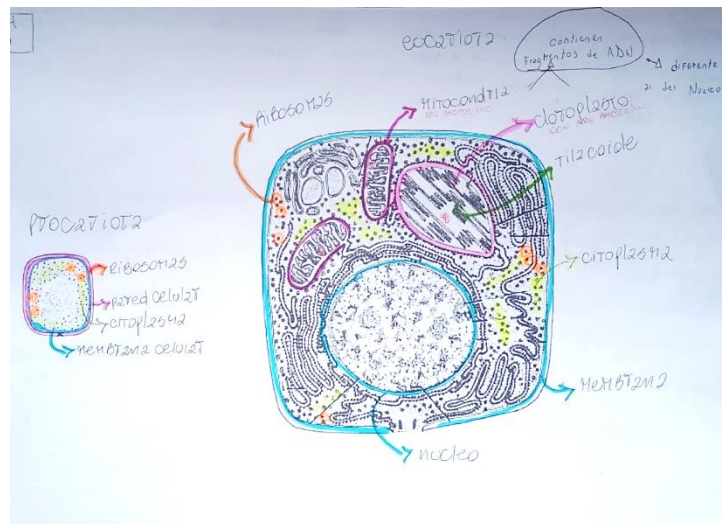
Luego de realizar una puesta en común sobre los modelos de ciencia normal del OCE, se explicitaron las siguientes ideas básicas:

- En la actualidad, existen dos modelos que explican el OCE. El primero es el “modelo gradualista”, que se aplica a las organelas que forman vesículas, como el retículo endoplasmático, el aparato de Golgi y el núcleo. El segundo es el “modelo endosimbiótico”, que se aplica a las organelas que contienen ADN similar al bacteriano, como las mitocondrias y los cloroplastos.
- La ciencia se caracteriza por la generación de acuerdos y consensos dentro de la comunidad científica.

Al finalizar, se les concedió un tiempo para que intervengan nuevamente los esquemas de célula procariota y eucariota, y un ejemplo del estado final de este proceso se muestra en la **Figura 39**.

Figura 39

Estado final del proceso de intervención de los modelos de célula procariota y eucariota



5.2.1.8 Actividades de aplicación

Estas actividades tuvieron lugar en el tercer y último día de implementación de la UD. Tal como se detalló en la descripción de las actividades, los grupos tuvieron la

oportunidad de abordar un nuevo hecho científico. Este les permitió, por un lado, aplicar el modelo endosimbiótico en el contexto del OCE y, por el otro, la idea clave metacientífica referida a “la carga teórica de las observaciones”, ambas asociadas a una situación problemática inédita del campo de la medicina.

Cada uno de los grupos recibió una copia de la noticia periodística que sirvió como contexto para el inicio de la Actividad 8.a. El docente-investigador procedió a leerla en voz alta, acompañada de la consigna correspondiente. En ese momento, las y los estudiantes no encontraron una conexión entre los modelos y la problemática. Después de darles unos minutos para que reflexionaran sobre el propósito de la actividad, se llevaron a cabo las siguientes aclaraciones:

- Les recordamos que tengan presente el modelo de célula eucariota que fueron interviniendo con la distinta información sobre el OCE, ya que proporcionaba información valiosa de las discusiones y acuerdos llevados a cabo.
- Que este momento no constituye una actividad de modelización inicial; por lo tanto, algunas de las ideas abordadas sobre el OCE deberían/podrían estar implicadas en las respuestas.

A partir de estas aclaraciones, todos los grupos comenzaron paulatinamente a establecer relaciones consistentes.

Del análisis de los resultados de la actividad, se observó que G1 y G3 propusieron dos hipótesis para responder a la consigna. Esto devino en 8 modelos explicativos (**Tabla 13**).

Tabla 13

Descripciones de los grupos de la actividad de aplicación del modelo disciplinar

Grupo	Teniendo en cuenta ideas abordadas en las últimas clases sobre el origen de la célula eucariota ¿Cuáles de ellas te parece que podrían estar implicadas en la explicación de este fenómeno? Expliquen.
1	<i>“Hipótesis 1: La rotura de las células, libera el contenido celular del que forma la mitocondria, que libera el ADN “bacteriano” al torrente sanguíneo.</i> <i>Hipótesis 2: En nuestro cuerpo tenemos diversas bacterias que son combatidas por agentes protectores que nos protegen de estas, si estos agentes se mueren, las bacterias tienen el paso libre para atacar y a su vez multiplicarse. En el caso del texto podemos decir que pasó algo similar, digamos que al paciente se le haya roto el tejido del intestino, las células se encuentran muertas (siendo incapaz de cumplir sus funciones) la cantidad de agentes se reducen por lo sucedido, las bacterias comenzaran a provocar la infección dicha en la noticia”.</i>
2	<i>“Para explicar este modelo utilizamos 4 modelos. Al producirse la ruptura de las células por ósmosis se desarma en sus respectivas organelas (mitocondria, aparato de Golgi) y también en sus biomoléculas que se esparcen por el torrente sanguíneo produciendo una desestructuración en el transporte de proteínas, nutrientes, oxígeno. Es así que por esto el sistema actúa como defensa porque encuentra el torrente contaminado con el contenido intracelular”.</i>

“Para explicar la infección sin agentes externos que la produzcan tenemos dos hipótesis:

- 3
- 1) *Fagocitosis: En el organismo **hay bacterias específicas** que colaboran con algunas funciones, por ejemplo, en el intestino. **Al ocurrir el accidente salen de su lugar de origen ingresando al torrente sanguíneo “desparramándose” por el cuerpo.** Entonces las células de defensa del organismo las detectan y las atacan fagocitándolas”.*
 - 2) *ADN mitocondrial: “Pensando en el origen de la célula eucariota que dice que **las mitocondrias tienen ADN bacteriano**, ocurriría lo mismo que en la primera hipótesis. Las mitocondrias **se disiparían por el torrente sanguíneo y las células de defensa las atacarían”.***

4

*“Al impactar el vehículo con el cuerpo se produce la rotura de los tejidos y las células. Estos residuos entran al torrente sanguíneo liberando las **mitocondrias** al sistema. Estas **son identificadas como agentes bacterianos por su ADN y son “atacado” por el organismo**”.*

5

*“Cuando se rompen las células, **se distribuyen por el torrente sanguíneo, ADN bacterianos que contienen las mitocondrias.** Por lo tanto, el cuerpo actúa de manera rápida como mecanismo de defensa, con una respuesta inflamatoria que pueden desencadenar graves consecuencias que llevan la muerte”*

6

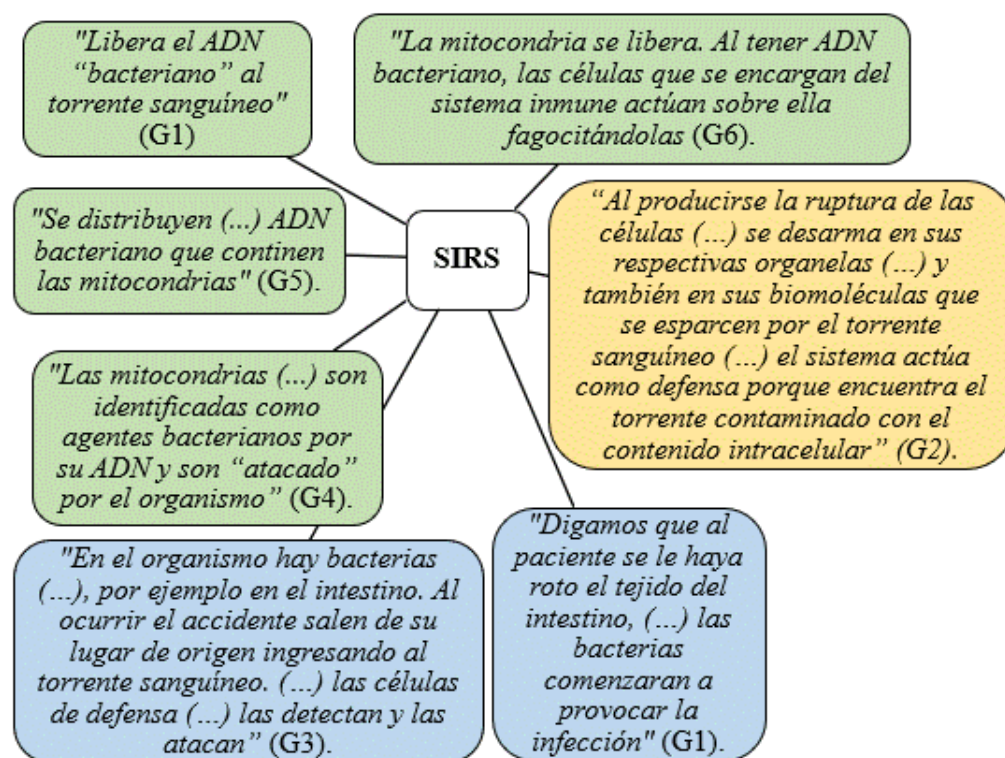
*“El contenido intracelular se libera al torrente sanguíneo, y la mitocondria se libera, esto al tener ADN bacteriano, las células que se encargan del sistema inmune actúan sobre ella **fagocitándolas**, ya que son cuerpos extraños. pero al haber una destrucción masiva de células el proceso de defensa se aplica por*

todo el cuerpo generando inflamación por el cuerpo, es decir, una infección masiva, el cual el sistema inmune no puede contrarrestarlo y la persona fallece.”

Tras analizar los datos, se dio cuenta que G1, G3, G4, G5 y G6 lograron establecer relaciones consistentes entre el SIRS y el aspecto endosimbiótico del OCE, específicamente en lo referido al carácter bacteriano del ADN de las mitocondrias (resaltado en color verde en la **Figura 40**). A su vez, G1 y G3 construyeron un segundo modelo, en el cual explican el fenómeno como consecuencia de la “liberación” hacia la sangre de las bacterias que, normalmente, habitan en el intestino y que desencadenan así el proceso de infección generalizada (resaltado en color azul en la **Figura 40**). Por último, G2, construyó un modelo explicativo que da cuenta de una relación entre “moléculas que circulan por la sangre” y el proceso de inflamación e infección (resaltado en color amarillo en la **Figura 40**).

Figura 40

Esquema que muestra la categorización de las respuestas dadas por los grupos de estudiantes en función de las perspectivas que adoptaron para explicar el SIRS



Luego, se llevó a cabo una puesta en común y se discutieron, en detalle, los alcances explicativos y consistencias de cada uno de los modelos presentados por los grupos. Las explicaciones que consideraban el carácter bacteriano del ADN en las mitocondrias, se utilizaron como punto de partida para iniciar la posterior exposición teórica por parte del docente-investigador. Durante esta, se presentó el modelo teórico que explica la relación entre los cuadros autoinmunes y el carácter bacteriano del ADN mitocondrial, y cómo, a partir de esta nueva interpretación, la comunidad médica está habilitada a pensar nuevos tratamientos para el SIRS.

Para finalizar con la implementación de la UD, se comenzó con la Actividad 8.b, la cual implicó la modelización metacientífica a partir de la presentación de la hipótesis predominante en la comunidad médica antes de que se estableciera el modelo de endosimbiosis para las mitocondrias, modelo que consideraba bacterias que se liberaban del intestino al torrente sanguíneo. A su vez, y mientras esto

sucedía, se retomaron las ideas presentadas por G1 y G3 en la actividad anterior, ya que también resultaron razonables para dar cuenta del SIRS y se vinculan con el modelo teórico que sostenían los médicos (resaltado en color azul en la **Figura 40**).

Al analizar los resultados de la actividad: “¿Con qué aspectos del desarrollo de la Actividad Científica ustedes vincularían esta situación presentada?”, se pudo dar cuenta que G1, G2, G3, G5 y G6 pudieron vincular de forma consistente el hecho científico con la idea clave metacientífica: “la carga teórica de las observaciones” (**Figura41**). Por otro lado, G4 presentó una respuesta que el docente-investigador consideró no ser consistente con el hecho, al hacer uso de la noción de paradigma. Las ideas generales de los grupos se muestran en la **Tabla 14**.

Figura41

Aplicación de la idea clave metacientífica: “la carga teórica de las observaciones” a un nuevo hecho científico

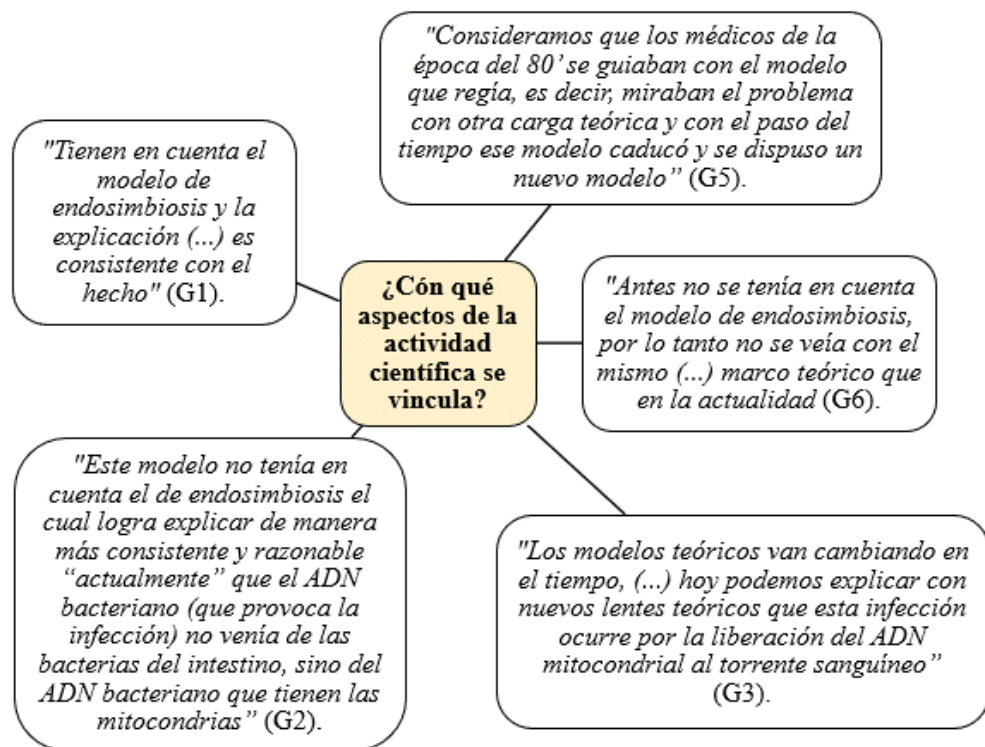


Tabla 14

Descripciones de los grupos de la actividad de aplicación del modelo metacientífico

Grupo	¿Con qué aspectos del desarrollo de la Actividad Científica ustedes vincularían esta situación presentada?
1	<i>“Las relacionamos con el aspecto de carga teórica y el razonamiento. Desde la carga teórica se tienen en cuenta los modelos de endosimbiosis y en el de razonamiento porque la explicación principalmente dada es consistente con el hecho”.</i>
2	<i>“Al tener este modelo en la década del 96’, sí era razonable explicar la infección de esa manera, pero este modelo no tenía en cuenta el de endosimbiosis, el cual sí logra explicar de manera más consistente y razonable “actualmente” que el ADN bacteriano (que provoca la infección) no venía de las bacterias del intestino, sino del ADN bacteriano que tienen las mitocondrias”.</i>
3	<i>“El aspecto del desarrollo de la actividad científica que vinculamos con la situación se debe a que los modelos teóricos van cambiando con el tiempo.</i> <i>Antes del modelo teórico de las mitocondrias con ADN bacteriano planteado por Margulis, la explicación a este sistema real “infección sin agente externo” provenía de que se reconocía como agente externo a la bacteria completa de las que convivían en el intestino.</i> <i>Tras el “descubrimiento” del origen de las mitocondrias, hoy podemos explicar con nuevos lentes teóricos que esta infección ocurre por la liberación del ADN mitocondrial al torrente sanguíneo”.</i>

-
- 4 *“**Vinculamos en la situación con la noción de paradigma**, ya que ambas teorías están ubicadas dentro del nuevo paradigma, un paradigma que va ajustándose con nuevas soluciones a nuevas problemáticas que van surgiendo”.*
- 5 *“**Consideramos que los médicos de la época del 80’ se guiaban con el modelo que regía, es decir, miraban el problema con otra carga teórica** y con el paso del tiempo ese modelo caducó y se dispuso un nuevo modelo”.*
- 6 *“El aspecto de la actividad científica sería que antes **no se tenía en cuenta el modelo de endosimbiosis, por lo tanto, no se vería con el mismo modelo de marco teórico que en la actualidad.***
Antes al analizarse los cuadros de los pacientes politraumatizados, el modelo teórico solo se aplicaba en aquellos con rotura intestinal, igualmente este modelo era incompleto porque solo contemplaba ese marco teórico (intestino).
Ajusta a más órganos.
Correspondencia entre modelo y sistema real.
-

6. Discusiones

En este apartado se discutirán los resultados obtenidos a la luz de las líneas teóricas asumidas y los antecedentes y avances de investigaciones referenciadas, en función del logro de cada uno de los objetivos específicos planteados en la investigación.

6.1 Respetto del objetivo vinculado con el análisis histórico-epistemológico

Este análisis, situado desde una posición modelo-teórica sobre la ciencia, proporcionó insumos imprescindibles para el desarrollo de la UD, como la selección de citas textuales que permitieron contextualizar las discusiones entre los modelos en pugna, el uso de diferentes maneras de averiguar puestas en juego y diversos hechos científicos contruidos en el seno de cada perspectiva teórica. De este modo, los resultados se inscriben en la línea de las principales usinas de producción de modelos para la educación metacientífica (Matthew, 2017, Lederman, 1992, Adúriz-Bravo, 2005a) muestran un avance y dan respuesta a ciertos reclamos que desde esas líneas se hacen, referidos específicamente a que la historia y la filosofía de la ciencia ingresen de manera significativa en la enseñanza, sirviendo de escenario y ambientándola, y que se avance en el desarrollo de campos de formación que integren sincrónicamente la enseñanza de modelos científicos junto al desarrollo de ideas claves sobre la propia ciencia (Lozano et al., 2020).

6.2 Respetto del objetivo vinculado con la elaboración de las ideas clave de la UD

Las ideas clave producidas se alinean con la perspectiva de Adúriz-Bravo y Ariza (2005a) en función de haber elaborado proposiciones sencillas, pero de alto contenido teórico a ser contruidas en el transcurso de las clases, tanto para los modelos del OCE como para línea de formación metacientífica.

Estas ideas clave se utilizaron como proposiciones compartidas en el aula, como se muestra en los resultados de las Actividades 2, 5 y 7. Esto permitió a los grupos de estudiantes, durante la modelización intermedia, confrontar sus construcciones teóricas con las ideas clave de referencia. Se les invitó a reflexionar sobre la relación

de estas ideas con el trabajo en el aula y su semejanza con las conclusiones emergentes en cada actividad. De este modo, consideramos que se amplía, en el contexto de la enseñanza del OCE, el enfoque didáctico que propone el uso de ideas clave para discutir y contrastar las concepciones desarrolladas por las y los estudiantes a lo largo de la UD, como ya se ha planteado en investigaciones previas (Lozano et., 2016, 2018).

Otra cuestión para discutir es la adopción del par gradualismo/endosimbiosis en la elaboración de aquella idea clave que hace referencia al modelo actual. Consideramos que si bien da continuidad a la contextualización histórica que atravesó todo el desarrollo de la UD y a la estrategia didáctica de responder a la pregunta: ¿Qué ocurrió con estas discusiones en el tiempo y qué quedó de esas teorías en los modelos actuales?, tiene como desventaja que no atiende a la visión actual consensuada, en la cual la endosimbiosis es considerada también como un proceso gradual de evolución. Pensamos que, en el espacio de la formación del profesorado destinado específicamente al desarrollo de la biología evolutiva, podría retomarse esta primera aproximación y complejizarla bajo una mirada teórica actual. Otra estrategia posible, para una futura implementación de la UD, es modificar la idea clave sobre el modelo actual del OCE e incluir allí, aunque fuera de manera preliminar, a los dos modelos (“invaginoso” y endosimbiótico) como familiares del enfoque gradualista.

Respecto de las ideas clave metacientíficas, se da continuidad a las investigaciones referenciadas que abordaron la cuestión de la carga tórica de las observaciones en la construcción de los hechos científicos y la elaboración de consensos en la comunidad científico (Lozano et al., 2016, 2018), articulándolas, ahora, a la enseñanza de un nuevo modelo disciplinar.

6.3 Respecto del objetivo vinculado con el diseño de la UD

El diseño de la UD que se obtuvo como resultado puede considerarse como un avance en la línea de desarrollo de la ACE (Sanmartí, 2002). El itinerario didáctico construido se constituye como un nuevo “corredor conceptual” validado para

enseñar el OCE (Rinaudo y Donolo, 2010) y, al mismo tiempo, como un nuevo ejemplo de un ciclo completo de modelización (Lozano et al., 2016, 2018; Garrido Espeja y Couso, 2017), con actividades que favorecen al desarrollo sincrónico de ideas biológicas y metacientíficas en un campo integrado para la formación del profesorado. Este aspecto, habilita la posibilidad de que las y los estudiantes puedan realizar un tránsito fluido entre esos campos durante el desarrollo de las clases (Lozano, et al, 2021a). Quedan para discutir las cuestiones vinculadas con las actividades para la autorregulación y metacognición por parte de las y los estudiantes (Sanmartí, 2002, 2017), que podrían hacer más robusta a la UD dentro del MCCE y que en este estudio no fueron desarrollados.

6.4 Sobre las actividades de modelización inicial

Los resultados obtenidos en la modelización inicial se inscriben en la línea de trabajos que se han ocupado del estudio de las representaciones que las y los estudiantes construyen sobre la célula y las distintas formas en que las externalizan (Rodríguez Palmero y Moreira, 1999, 2002; Rodríguez Palmero et al., 2001). La multimodalidad de los registros (Kress, 2009), que incluye gráficos, textos y maquetas producidas por las y los alumnos sobre el OCE, por una parte, ofrecieron elementos para construir una categorización que los hizo consistentes con los modelos provenientes del AHE. Este punto, emparenta la investigación con estudios como el de Clément (2006), Clément et al. (2006), Rodríguez Palmero, (2003), Peresan et al., (2012), Jara et al. (2012) y Camacho González et al. (2012), y, por otra parte, se constituyeron como la principal plataforma de análisis y discusiones para el desarrollo del pensamiento teórico de las y los estudiantes. Un aspecto de interés a discutir está relacionado con el hecho de que la producción de modelos iniciales se llevó a cabo de manera grupal. Esto lo vincula con diferentes trabajos (Diacó, 2017; Bahamonde et al., 2020) y lo diferencia también de la mayor parte de las investigaciones que analizan modelos iniciales individuales.

Respecto a esta cuestión, es necesario abonar líneas de trabajo que estudien los procesos de regulación, socialización y negociación de las ideas que se dan al

interior de los grupos, cuando esta es la opción elegida para el desarrollo de la modelización inicial, proceso que culmina con la producción de las versiones que luego cada grupo expone. Si bien se contó con registros de audio de las discusiones, y tanto el docente investigador como el equipo participaron como oyentes y como “frontón” de ideas dentro de cada grupo, se entiende que el estudio de esos procesos excede los objetivos planteados en la tesis y se pueden inscribir en líneas como las de interacción sociocognitiva, aprendizaje colaborativo, entre otras.

Otro aspecto que consideramos relevante discutir a partir de los resultados es la propuesta de una modelización inicial condicionada por un conjunto explícito de ideas. La pregunta “¿Cómo creen que se originó la célula eucariota?”, debía responderse considerando una serie de datos iniciales (ver **Figura 17** Línea de tiempo). Esto implica que la modelización es inicial porque el fenómeno a ser teorizado es inédito, pero no es completamente “libre”, ya que las y los estudiantes debían considerar la idea de que las células eucariotas evolucionaron a partir de bacterias.

Consideramos que la definición de los problemas que impulsan las modelizaciones iniciales debe ser discutidos en profundidad, dado que las opciones generadas presentan fortalezas y debilidades, que deben evaluarse en el diseño de una enseñanza basada en la modelización.

Así, el pensamiento teórico, “modélico abductivo”, que desarrollaron para dar cuenta del OCE, se encontraba condicionado por diversos saberes que ya poseían y esto se hizo evidente en el análisis de los resultados que muestran un variado “almacén de explicaciones” que remiten a diversos modelos biológicos. Lo mismo ocurrió en la década del 60’ con los modelos que produjeron Robertson, Taylor y Margulis y, un principio básico que sostenemos quienes investigamos en esta línea, es que, si las condiciones de partida para la modelización son adecuadas, las y los estudiantes y la gente en general, logra pensar de manera consistente (no idéntica) a como se pensaron en algún momento los mismos fenómenos. Así, los conocimientos que poseían nuestros estudiantes de primer año al finalizar el

cursado de Introducción a la Biología, momento en el cual se desarrolló la UD, no exceden los modelos que se sostenían en la década del '60 (membrana fluida “invaginosa”, ADN, etc.)

En este sentido, creemos que los resultados de la investigación amplían el horizonte de la mayoría de los estudios previos, que no contemplan el análisis de las condiciones de la modelización inicial.

6.5 Sobre las actividades de modelización intermedia

Los resultados obtenidos en esta etapa de la implementación de la UD son valorados especialmente en virtud de la vacancia de estudios que provean datos de ciclos de modelización completa vinculados con la enseñanza del modelo de célula. En general, los estudios describen modelos iniciales y finales, intermediados por una instrucción no descripta, que podría asimilarse a formatos tradicionales transmisivos. Respecto de estudios que presentan diseños instruccionales (Verhoeff, 2003; Verhoeff et al., 2008; Cobb, 2003; Lijnse, 1995), consideramos que la modelización intermedia llevada a cabo en la investigación tiene como particularidad que las y los estudiantes pudieron hacer más consistentes los modelos iniciales sobre el OCE, en diálogo con la evolución de los propios modelos científicos en la historia y el abordaje de los obstáculos que aparecieron en su desarrollo. Los resultados muestran que las actividades propuestas en las cuales debían asumir las perspectivas de las y los investigadores de la época, como la 2b, 3b y 4b, aparecen significativas para el desarrollo de los propios modelos iniciales, particularmente en las discusiones que se dieron sobre la presencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos. En esas situaciones pudieron construir explicaciones consistentes desde cada teoría y esto los llevó a complejizar el modelo del OCE.

Otro aspecto de interés en la modelización intermedia fue el desarrollo de una actividad *ad hoc* ante la necesidad planteada por las y los estudiantes de comprender el origen de los pliegues de membrana mientras exploraban los diferentes puntos implicados en el modelo autógeno. Esta situación, pone a discutir el carácter estructurado o más flexible del diseño de la UD y el modo por el cual se atienden a

las diferentes derivaciones que puede tener el proceso de discusión y transformación de los modelos iniciales. Consideramos que, en este sentido, los estudios de diseño (Rinaudo y Donolo, 2010) constituyen una perspectiva que orienta a una revisión permanente del devenir del itinerario didáctico y a un estado de vigilia epistémica para tomar decisiones sobre el diseño previo, que sean significativas, aunque no hayan estado previstas. Esta es una de las cuestiones que Khan (2011) reclama, particularmente en lo referido al ciclo sistemático de evaluación y modificación, cuando, en lugar de realizar múltiples ciclos de evaluación y modificación, la enseñanza se basa en un proceso lineal y jerárquico, y esto reduciría las oportunidades para que las y los estudiantes revisen y enriquezcan sus modelos a lo largo del tiempo.

6.6 Respecto a los procesos de modelización metacientífica.

6.6.1 Sobre la idea clave referida a la carga teórica de las observaciones y los consensos en la actividad científica

En el contexto de los antecedentes considerados (Álvarez Soria et al., 2021; Álvarez Soria y Lozano, 2022; 2024; Bahamonde y Lozano, 2017; Lozano, 2016; Lozano et al., 2021a; 2021b; Bahamonde et al., 2016; Lozano et al., 2018, Vistarop et al., 2023, 2024; Carrasco 2024) los resultados muestran que fue posible, mediante las actividades diseñadas, desarrollar un tránsito significativo entre la modelización del OCE y la elaboración de algunas ideas claves por parte de los grupos de estudiantes, respecto de la propia actividad científica implicada en ese proceso. Así, y en el sentido de los trabajos de Adúriz-Bravo, las y los estudiantes participaron de un proceso de discusión y lograron adoptar posiciones metacientíficas explícitas respecto del devenir de algunos hechos, como, por ejemplo, las discusiones sobre el origen del ADN presente en mitocondrias y cloroplastos y las relaciones entre su “descubrimiento” y los diferentes marcos teóricos para interpretarlos (**Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10**). Estos resultados avanzan sobre un estudio previo que hizo una presentación preliminar de la estrategia didáctica (Lozano, 2016) y sobre otros estudios que promueven que las y los estudiantes adopten perspectivas

teóricas presentes en la historia de la construcción de un modelo, para elaborar y discutir ideas clave metacientíficas (Lozano. et al., 2018). De este modo, se ofrecieron oportunidades para comenzar a discutir el lugar y la naturaleza epistémica de la observación en la investigación científica, que es un tópico relevante en el desarrollo del enfoque de NOS para discutir visiones inductivistas ingenuas (Adúriz, 2005b, Chalmers, 2010) y, lo es más aún, en función de considerar que, en este caso, son estudiantes de primer año de la universidad y que, para la gran mayoría de ellas y ellos, las actividades de la materia PyAC y las incluidas en la UD de la investigación, constituyen la primera oportunidad de discutir ideas de segundo orden en un ámbito educativo. Ahora bien, consideramos que el recorrido didáctico y los materiales utilizados deberían ser discutidos nuevamente en profundidad y, probablemente, modificados en el rediseño de la UD, especialmente para ajustar la relación entre el episodio seleccionado y los textos que orientan a discutir a la observación como cargada de teoría. No es menor la cuestión de poder determinar la consistencia entre ciertos hechos científicos y los diferentes matices que han ofrecido las discusiones sobre la naturaleza de la percepción de hechos y la interpretación que se hace sobre ellos (Hanson, 1977).

Por otra parte, las **Tabla 11** y **Tabla 12** muestran que los grupos de estudiantes pudieron volver sobre los modelos de OCE y, junto a esto, pensar aspectos relacionados con la definición de controversias y la adopción de consensos. Hicieron consideraciones respecto del valor que se otorga a los modelos “que explican mejor” y también a que las comunidades científicas hacen acuerdos y que esto se plasma en los modelos normales de ciencia. Estos resultados se pueden, de alguna manera preliminar, poner a dialogar con el desarrollo de líneas que específicamente abordan la cuestión de las controversias en la enseñanza de las ciencias (Díaz-Moreno y Jiménez Liso, 2014; Díaz-Moreno et al., 2019; Pabón et al., 2015) y resaltan los aspectos positivos que tiene en la formación de las y los estudiantes, en virtud del desarrollo de la argumentación y sus componentes modélico, retórico y pragmático (Revel Chion y Adúriz-Bravo, 2019).

6.6.2 Sobre la actividad de aplicación de los modelos disciplinares y metacientíficos

Después de orientar a las y los estudiantes y colaborar con ellas y ellos en el establecimiento de los vínculos de esta actividad, con el desarrollo de la UD, el trabajo de aplicación sobre el hecho científico abordado resultó ser muy potente. Los resultados muestran que las y los estudiantes pudieron aplicar un aspecto del modelo disciplinar, específicamente el carácter bacteriano del ADN de las mitocondrias, a un caso del campo de la medicina, y también lograron vincularlo con la idea clave metacientífica relacionada con la “carga teórica de las observaciones”, al asumir que los síntomas podían ser interpretados desde diferentes marcos teóricos. Al revisar los antecedentes, consideramos que el diseño e implementación de las actividades de aplicación, en el marco de un ciclo de modelización, constituye otro aspecto poco explorado (Khan, 2011) y la investigación aporta un ejemplo más a la línea de trabajo que sí las contempla (Lozano et al., 2024, Vistarop et al., 2022, 2024).

7. Conclusiones

Consideramos que los resultados obtenidos validan un corredor conceptual viable para la enseñanza disciplinar y metacientífica del fenómeno del OCE en la formación del profesorado, logrado a través de la implementación de una UD que integra ambos campos. Al igual que en otras investigaciones desarrolladas en el CEIE de la UNRN (Lozano y Zanon, 2014; Lozano, 2016; Lozano et al., 2016; Bahamonde y Lozano 2017; Diaco, 2017; Diaco et al., 2019; Lozano, et al., 2018; Álvarez Soria y Lozano, 2020; 2022; Lozano, et al., 2020; Bahamonde et al., 2020; Lozano et al., 2021a; Lozano et al., 2021b;; Bahamonde y Lozano, 2023; Rodríguez, et al., 2023), nuestra contribución a esta línea de investigación demuestra que la enseñanza basada en la modelización y que integra diversos campos de la formación (en este caso biológico y metacientífico) es un componente sumamente potente para la formación del profesorado.

El diseño de actividades dentro del ámbito de la ACE, siguiendo la tipología de actividades adoptada (Sanmartí, 2002), permitió que los modelos iniciales se complejizaran y estructuraran de manera progresiva y espiralada. Las y los estudiantes sintieron y manifestaron que sus ideas eran valoradas, especialmente cuando se evidenciaban las relaciones entre sus modelos y los modelos científicos de referencia. Esto probablemente contribuyó al compromiso constante de los estudiantes con las tareas, motivado por las emociones académicas positivas asociadas con los logros y la relevancia otorgada a los aprendizajes (Pérez, 2024).

Otro aspecto relevante es la confirmación de la importancia de la participación activa del equipo docente en los procesos de modelización llevados a cabo por los grupos. Por ejemplo, cuando se les pidió que adoptaran diferentes modelos científicos en pugna, “poniéndose diferentes lentes teóricos” para construir explicaciones, resultó ser un proceso cognitivo muy desafiante que requirió el acompañamiento docente en las discusiones que llevaron a cabo y que les permitió un aprendizaje metacientífico valorable, considerando que se dio en el marco de la formación básica de materias del primer año del profesorado.

También, consideramos que se logró una contextualización histórica efectiva. Ambientar ese período con fotografías representativas de las y los científicos más influyentes, sus espacios de trabajo y sus publicaciones más relevantes, junto con el uso de citas textuales, fue una estrategia que enriqueció las discusiones y la modelización. Es importante destacar que diversos episodios históricos surgidos en el AHE, que no fueron utilizados en la UD, podrían enriquecer futuros diseños de itinerarios didácticos.

Por último, es intención del tesista continuar investigando en esta línea, y establecer y fortalecer nuevos vínculos con otros centros de investigación, con el objeto de lograr acciones colaborativas, especialmente para el desarrollo de esta perspectiva que integra diversos campos en la formación del profesorado, mediante el diseño, implementación y evaluación de UD.

8. Bibliografía

- Adúriz Bravo, A. (2001). *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. Tesis. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona.
<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/4695/aab1de3.pdf?sequence=1>
- Adúriz-Bravo, A. (2005a). Una introducción a la naturaleza de la ciencia. La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales. Buenos Aires: Fondo Editorial Económico.
- Adúriz-Bravo, A. (2005b). ¿Qué naturaleza de la ciencia hemos de saber los profesores de ciencias? Una cuestión actual de la investigación didáctica. *Tecné, Episteme y Didaxis*, 23-33.
- Adúriz-Bravo, A. (2006). La epistemología en la formación de profesores de ciencias. *Revista Educación y Pedagogía*, 18(45), 25-36.
- Adúriz-Bravo, A. (2010). Aproximaciones histórico-epistemológicas para la enseñanza de conceptos disciplinares. *Revista Electrónica EDUCyT*, 1, 125-140.
- Adúriz-Bravo, A. (2011). Concepto de modelo científico: una mirada epistemológica de su evolución, Galagovsky, L. (coord.). *Didáctica de las ciencias naturales* (pp. 141-157). Lugar editorial.
- Adúriz-Bravo, A. (2013). A ‘semantic’ view of scientific models for science education. *Science & Education*, 22, 1593-1611.
- Adúriz-Bravo, A. y Ariza, Y. (2012). Importancia de la filosofía y la historia de la ciencia en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. En Z. Monroy Nasr, R. León- Sanchez y G. Álvarez Díaz de León (Eds), *Enseñanza de la ciencia* (pp. 79-92). Universidad Autònoma de México.

- Adúriz-Bravo, A., e Izquierdo-Aymerich, M. (2009). Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*, 4(1), 40-49.
- Aguilar, A., Raviolo, A., & Ramírez, P. (2021). El uso de recursos audiovisuales en el aula de Biología: análisis de dos propuestas de enseñanza. *Revista de Educación en Biología*, 24(1), 55-69.
- Albarracín Teulón, A. (1983). *La teoría celular*. Madrid: Alianza Editorial.
- Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., y Watson, J. (2004). *Biología Molecular de la Célula*. 4ta. Ed. Edit. Omega. Barcelona-España.
- Allen, C. A., Van Der Giezen, M., y Allen, J. F. (2007). Origin, function, and transmission of mitochondria. En Martin, W. F., y Müller, M. (Eds.). *Origin of mitochondria and hydrogenosomes* (pp. 39-56). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Álvarez Soria, J. y Lozano, E. (2020). Análisis histórico-epistemológico preliminar sobre el modelo de endosimbiosis para enseñar biología celular y naturaleza de la ciencia al profesorado. *Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia*, 89-97.
- Álvarez Soria, J., Lozano, E. E., y Cremer, M. C. (2021, December). La modelización del origen de la célula eucariota en la formación del profesorado. Integración disciplinar y metacientífica. En *Memorias de las Jornadas Nacionales y Congreso Internacional en Enseñanza de la Biología* (Vol. 3, No. Extraordinario, pp. 339-341).
- Álvarez Soria, J. y Lozano, E. E. (2022). La modelización del origen de la célula eucariota en la formación del profesorado en biología. Aspectos vinculados a una visión gradualista. *Revista Bio-grafía. Escritos sobre la Biología y su enseñanza*. Número Extraordinario, 1191- 1202.
- Álvarez Soria J., y Lozano E. E. (2024). El modelo de simbiosis en el campo de la teoría celular: Un análisis con enfoque histórico-epistemológico para

enseñar naturaleza de la ciencia al profesorado en biología. *Libro de actas del VIII Congreso Nacional y VI Internacional de Investigación Educativa. Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad Nacional del Comahue*. En prensa.

Bahamonde, N., y Lozano, E. (2023). Diseño e implementación de una unidad didáctica multirreferenciada sobre la alimentación humana en la formación del profesorado en Biología. *Revista Bio-grafía. Escritos sobre la Biología y su enseñanza*, 16 (Extraordinario),

Bahamonde, N. (2007). Los modelos de conocimiento científico escolar de un grupo de maestras de educación infantil: un punto de partida para la construcción de “islotes interdisciplinarios de racionalidad” y “razonabilidad” sobre la alimentación humana. [Tesis de doctorado, Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona].
<https://hdl.handle.net/10803/4720>

Bahamonde, N. (2014). Pensar la educación en Biología en los nuevos escenarios sociales: la sinergia entre modelización, naturaleza de la ciencia, asuntos sociocientíficos y multirreferencialidad. *Bio-grafía, Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 7 (13), 87-98.

Bahamonde, N., y Galindo, A. A. G. (2016). Caracterización de modelos de digestión humana a partir de sus representaciones y análisis de su evolución en un grupo de docentes y auxiliares académicos. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 34(1), 129-147.

Bahamonde, N. y Lozano, E. (2017). El diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica sobre el modelo de Presión Arterial advertido por ideas metacientíficas en la formación de profesorado de Biología. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 449-454.

- Bahamonde, N.; Cremer, C.; Mut, P. y Eduardo L. (2020). El desarrollo de una línea disciplinar para la enseñanza del modelo de Presión Arterial en la formación del profesorado en Biología. *Tecné Episteme y Didaxis: TED*, (47), 143-159.
- Bahamonde, N., Lozano, E. E., y Diaco, P. S. (2014, octubre). Una comunidad de aprendizaje para pensar la enseñanza de las ciencias en el ámbito de la universidad. In *XI Jornadas Nacionales y VI Congreso Internacional de Enseñanza de la Biología*. ADBiA. General Roca. Río Negro.
- Baker, J. R. (1948). The cell-theory: a restatement, history, and critique. *Journal of Cell Science*, 3(5), 103-125.
- Bardin, L. (1986). *Análisis de contenido*. Madrid: Akal.
- Bock, R., y Knoop, V. (Eds.). (2012). *Genomics of chloroplasts and mitochondria* (Vol. 35). Springer Science & Business Media.
- Buckley, B. C. (2000). Interactive multimedia and model-based learning in biology. *International journal of science education*, 22(9), 895-935.
- Camacho González, J. P. C., Colicoy, N. J., Orellana, C. M., García, N. R., Guerrero, T. M., y Tirado, G. R. (2012). Los modelos explicativos del estudiantado acerca de la célula eucarionte animal. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las Ciencias*, 9(2), 196-212
- Calfee, C. S., y Matthay, M. A. (2010). Culprits with evolutionary ties. *Nature*, 464(7285), 41-42.
- Carrasco L. y Lozano E. (2024, octubre). Avances de una tesis de maestría sobre la integración de la enseñanza disciplinar y mtacientífica del modelo Protista. *X Jornadas de Investigación Educativa y IX Jornadas de Práctica de la Enseñanza del Profesorado en Ciencias Biológicas de la FCEfyN, UNC - XV Jornadas Nacionales en Enseñanza de la Biología- X Congreso Internacional en Enseñanza de la Biología*. En prensa.

- Chalmers, A. F. (2010). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* siglo XXI.
- CIN (2012). Lineamientos generales de la formación docente comunes a los profesorados universitarios. Consejo Interuniversitario Nacional. Resolución CE, N° 754/12. Buenos Aires.
- Clément, P. (2006). Introducing the cell concept with both animal and plant cells: A historical and didactic approach. *Science & Education*, 16, 423-440.
- Clément, P., Forissier, T. y Carvalho, G. (2003). The structuring influence of the first images on the construction of science concepts. An historical and didactical approach. En ESERA 2003: Research and the Quality of Science Education. ESERA, Noordwijkerhout, CD.
- Cobb, P., Confrey, J., DiSessa, A., Lehrer, R., y Schauble, L. (2003). Design experiments in educational research. *Educational researcher*, 32(1), 9-13.
- Confrey, J. (2006). The evolution of design studies as methodology. En R. Keith Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (135-152). Nueva York: Cambridge University Press.
- Cowdry, E. V. (1918). *The mitochondrial constituents of protoplasm*. Carnegie Institution of Washington.
- Diacó, P. S., Bahamonde, N., y García, G. (2019). El diseño, implementación y evaluación de unidades didácticas como estrategia para la formación de profesores de biología. *Revista De Educación En Biología*, 22(2), 25-38.
- Diacó, P. (2017). El diseño de unidades didácticas sobre el modelo de evolución Darwiniana en la formación en Didáctica de las Ciencias Naturales del profesorado de Biología. [Tesis de maestría: Universidad Nacional del Comahue].
- Díaz de Bustamante, J. D., y Aleixandre, M. P. J. (1996). ¿Ves lo que dibujas? Observando células con el microscopio. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 14(2), 183-194.

- Díaz-Moreno, N., y Jiménez-Liso, R. (2014). Las controversias sociocientíficas como contexto en la enseñanza de las ciencias. *XXVI Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 693-701.
- Moreno, N. D., Martín, E. C., y Nieto, J. E. S. (2019). Las controversias sociocientíficas como herramienta didáctica para el desarrollo de la alfabetización científica. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, (12), 261-281.
- Dolan, M. F., y Margulis, L. (2011). *Los inicios de la vida: La evolución en la Tierra precámbrica*. Universitat de València.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R. y Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Buckingham: Open University Press
- Echeverría, J. 1998. *Filosofía de la ciencia*. Madrid: Akal Ediciones.
- Estany, A. 1993. Introducción a la filosofía de la ciencia. Crítica.
- Famintzin, A. (1907). Die Symbiose als Mittel der Synthese von Organismen. *Biol. Centralbl*, 27(12), 353-364.
- Felipe, A., Gallarreta, S., y Merino, G. (2005). La modelización en la enseñanza de la biología del desarrollo. *Revista electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 4(3), 1-33.
- Flores, F., Tovar, M. E., y Gallegos, L. (2003). Representation of the cell and its processes in high school students: An integrated view. *International Journal of Science Education*, 25(2), 269-286.
- Garrido Espeja, A., & Couso, D. (2017). La modelización en la formación inicial de maestros: ¿qué mecanismos o estrategias la promueven? *Enseñanza de las Ciencias*, (Extra), 0137-144.
- Giere, R. (1999). Del realismo constructivo al realismo perspectivo. *Enseñanza de las Ciencias*, 2(extra), 9, 13.

- Giere, R. N. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (Ed.). (1992). *Cognitive models of science* (Vol. 15). U of Minnesota Press.
- Giordan, A. (1987). Los conceptos de biología adquiridos en el proceso de aprendizaje. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 105-110.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2, 115-130.
- Gilbert, J. K. (2010). The role of visual representations in the learning and teaching of science: An introduction. En *Asia-Pacific Forum on Science Learning & Teaching* (Vol. 11, No. 1).
- Gilbert, J. K., y Boulter, C. (1993). Models and modelling in science education. *Hatfield, UK: The Association for Science Education*.
- Gilbert, J. K., y Justi, R. (2016). Models of modelling. *Modelling-based teaching in science education*, 17-40.
- Gilbert, J. K., y Osborne, R. J. (1980). The use of models in science and science teaching. *European Journal of Science Education*, 2(1), 3-13.
- González Galli, L. M. (2011). *Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural*. Tesis. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- González Galli, L. M., y Meinardi, E. (2013). ¿Está en crisis el darwinismo?: los nuevos modelos de la biología evolutiva y sus implicaciones *didácticas*. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, (27), 219-234

- Gómez Galindo, A. A. (2006). *La construcción de un modelo de ser vivo en la escuela primaria: una visión escalar*. [Tesis de doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona].
- Gómez Galindo, A. A. (2014). Progresión del aprendizaje basado en modelos: la enseñanza del aprendizaje del sistema nervioso. *Bio-grafía*, 7(13), 101-107.
- Gómez Galindo, A. A. G., Puig, N. S., y Pujol, R. M. (2007). Fundamentación teórica y diseño de una unidad didáctica para la enseñanza del modelo ser vivo en la escuela primaria. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 325-340.
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge university press.
- Haeckel, E. H. P. A. (1878). *Historia de la creación de los seres orgánicos según las leyes naturales: conferencias científicas sobre la doctrina de la evolución en general y las de Darwin, Goethe y Lamarck en particular*. Casa editorial de Medina.
- Hagemann, R. (2007). The reception of the Schimper-Mereschkowsky endosymbiont hypothesis on the origin of plastids—between 1883 and 1960—many negative, but a few relevant positive reactions¹. *Managing Editor Volker Wissemann Justus-Liebig-Universität Gießen Institut für Allgemein Botanik und Pflanzenphysiologie AG Spezielle Botanik (Carl-Vogt-Haus)*, 12, 41-59.
- Hanson, N. R. (1977). *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*. Alianza Universidad.
- Harris, H. (2000) *The birth of the cell*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Izquierdo, M. (2000). Fundamentos epistemológicos. En F. J. y. C. Perales, P. (Ed.), *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias* (pp. 35-64). Madrid: Alcoy Marfil.

- Izquierdo, M. (2007). Enseñar Ciencias, una nueva ciencia. *Enseñanza de las ciencias sociales: revista de investigación*, 125-138.
- Izquierdo, M., Espinet, M., García, M. P., Pujol, R. M., y Sanmartí, N. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 45-59.
- Jara, N., Rubio, N., y González, J. C. (2012). Unidad didáctica sobre la estructura de la célula eucarionte animal, desde el modelo cognitivo de ciencia. *Revista de Educación en Biología*, 15(1).
- Johann, L. I., Rusk, F. K., Reiss, M. J., y Groß, J. (2022). Upper secondary students' thinking pathways in cell membrane biology—an evidence-based development and evaluation of learning activities using the Model of Educational Reconstruction. *Journal of Biological Education*, 58(1), 144-165.
- Karp, G. (2009) Biología celular y molecular. Conceptos y experimentos. (5º Ed.) México: Mc Graw Hill.
- Kemmis, S. y McTaggart, R. (1988). *Cómo planificar la investigación-acción*. Barcelona: Alertes.
- Knorr Cetina, K. (2005). La fabricación del conocimiento. Un ensayo sobre el carácter constructivista y contextual de la ciencia. Universidad Nacional de Quilmes.
- Koyré, A. (1982). Estudios de historia del pensamiento científico. Siglo XXI.
- Kozo-Polyansky, B. M. (2010). *Symbiogenesis: a new principle of evolution*. Harvard University Press.
- Kress, G. (2009). Multimodality: A social semiotic approach to contemporary communication. routledge.
- Kropotkin, P. (1989). *El apoyo mutuo*. Móstolet-Madrid: Madre Tierra.

- Kuhn, T. S. (2019). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de cultura económica.
- Kitcher, P. (1981). Explanatory unification. *Philosophy of Science*, 48 (4), 507-531.
- Lang, B. F. (2014). Mitochondria and the origin of eukaryotes. En *Endosymbiosis* (pp. 3-18). Springer, Vienna.
- Latour, B., y Woolgar, S. (1995). *La vida en el laboratorio. La construcción de los hechos científicos*. Madrid: Alianza Universidad.
- Lazcano A. (2002). El origen del nucleocitoplasma. Breve historia de una hipótesis cambiante. En Margulis, L. (Ed.), *Una revolución en la evolución* (pp. 182-183). Universitat de Valencia.
- Lazcano, A., y Peretó, J. (2017). On the origin of mitosing cells: A historical appraisal of Lynn Margulis endosymbiotic theory. *Journal of theoretical biology*, 434, 80-87.
- Lederman, N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. *Journal of research in science teaching*, 29(4), 331-359.
- Lederman, N. G. (2006). Reflections on the past. Anticipation of the future. *Asia-Pacific Forum on Science learning and teaching. Volume 7, Issue 1*
- Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., y Schwartz, R. S. (2002). Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of research in science teaching*, 39(6), 497-521.
- Lijnse, P. L. (1995). “Developmental research” as a way to an empirically based “didactical structure” of science. *Science Education*, 79(2), 189–199
- Löffelhardt, W. (Ed.). (2014). *Endosymbiosis*. SpringerVerlag Wien.

- López-Mota, Á. D., y Rodríguez-Pineda, D. P. (2013). Anclaje de los modelos y la modelización científica en estrategias didácticas. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 2008-2013.
- Lozano, E. E. (2016). *Diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica para la enseñanza de modelos de membrana celular en la formación biológica del profesorado, con aportes de ideas metacientíficas provenientes del eje naturaleza de la ciencia*. Reseña. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Comahue]. <https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/527>)
- Lozano, E. E. (2024). Discusiones didácticas y políticas sobre la enseñanza de las ciencias naturales en los primeros años de la universidad. Confluencia de saberes. *Revista de Educación y Psicología*. Universidad Nacional del Comahue (En prensa) <http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/11895>
- Lozano E. y Adúriz-Bravo A. (2024, octubre). El doble “descubrimiento” de las acuaporinas: La construcción de un caso para enseñar NOS al profesorado. *X Jornadas de Investigación Educativa y IX Jornadas de Práctica de la Enseñanza del Profesorado en Ciencias Biológicas de la FCEFYN, UNC - XV Jornadas Nacionales en Enseñanza de la Biología- X Congreso Internacional en Enseñanza de la Biología*. En prensa.
- Lozano, E. E., Adúriz-Bravo, A., y Bahamonde, N. (2020). Un Proceso de Modelización de la Membrana Celular en la Formación del Profesorado en Biología en la Universidad. *Ciência & Educação (Bauru)*, 26, e20027.
- Lozano, E., Bahamonde, N., y Adúriz-Bravo, A. (2016). Análisis histórico-epistemológico sobre los modelos de membrana celular para enseñar biología celular y naturaleza de la ciencia al profesorado. *filosofía e historia da biología*, 11(1), 49-68.

- Lozano, E., Bahamonde, N., Cremer C. y Mut, P. (2018). El desarrollo de una línea metacientífica para la enseñanza del modelo de presión arterial en la formación del profesorado en Biología. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 17(3), 564-580.
- Lozano, E. E., Bahamonde, N., Dillon, L., Cremer, C., Henriquez, M. A., Soria, J. Á., & Rodríguez, F. (2024). La educación alimentaria en la formación de profesorado: un diseño didáctico desde un enfoque complejo. *Revista de Educación en Biología*, 27(2).
- Lozano, E. E., García, G., y Bahamonde, N. (2016). La construcción de islotes interdisciplinarios de racionalidad para el tratamiento de problemas complejos en la formación del profesorado. En *XII Jornadas Nacionales y VII Congreso Internacional de Enseñanza de la Biología Volver a las fuentes: La resignificación de la enseñanza de la Biología en aulas reales*.
- Lozano, E., Mut, P., Cremer, C. y Bahamonde, N. (2021a). Integración disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado. La construcción de los hechos científicos. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 20 (1), 154-176.
- Lozano, E. E., Cremer, M. C., Mut, P. N., y Bahamonde, N. (2021b). Diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica que integra modelización biológica y metacientífica a partir de un hecho sociocientífico en la formación del profesorado. *Bio-grafía*, 14(27), 77-90.
- Lozano, E., y Zanon, V. (2014). Experiencias formativas en ideas metacientíficas en el contexto del Profesorado en Biología. La entrevista a un científico. *Revista de Educación en Biología*, 17(2), 95.
- Margulis, L. (1981). *Origin in the cell evolution: Life and its environment on the early Earth*. W.H. Freeman & Co Ltd.

- Margulis, L. (1970). Origin of eukaryotic cells: Evidence and Research Implications for a Theory of the Origin and Evolution of Microbial, Plant, and Animal Cells on the Precambrian Earth. Yale University.
- Margulis, L. (1967). On the origin of mitosing cells. *Journal of theoretical biology*, 14(3), 255-274.
- Margulis, L. (1971). Symbiosis and evolution. *Scientific American*, 225(2), 48-61.
- Margulis, L. (2002). *Una revolución en la evolución*. Universitat de València.
- Margulis, L. (2005). Hans Ris (1914-2004): Genophore, chromosomes and the bacterial origin of chloroplasts. *International Microbiology*, 8(2), 145-148.
- Margulis, L. y Chapman, M. J. (2009). Kingdoms and domains: an illustrated guide to the phyla of life on Earth. Academic Press.
- Margulis, L. y Olendzenski, L. (1996). Evolución ambiental: efectos del origen y evolución de la vida sobre el planeta Tierra. Alianza editorial.
- Margulis, L. y Sagan, D. (2003). *Captando genomas*. Editorial Kairós.
- Martin, W. F., y Müller, M. (Eds.). (2007). *Origin of mitochondria and hydrogenosomes*. New York, NY, USA: Springer.
- Martin, W. F., Garg, S., y Zimorski, V. (2015). Endosymbiotic theories for eukaryote origin. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1678), 20140330.
- Matthews, M. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: La aproximación actual. *Enseñanza de las ciencias*, 12(2), 255- 278.
- Matthews, M. R. (2017). La enseñanza de la ciencia: un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia. Fondo de Cultura Económica.
- McComas, W. F. (1998). The principal elements of the nature of science: Dispelling the myths. In *The nature of science in science education: Rationales and strategies* (pp. 53-70). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Merezkowsky, C. (1905). Über Natur und Ursprung der Chromatophoren im Pflanzenreiche. *Biol. Zentralbl* 25:593–604.
- Morgan, T. H. (1926). Genetics and the physiology of development. *The American Naturalist*, 60(671), 489-515.
- Nass, M. M., y Nass, S. (1963). Intramitochondrial fibers with DNA characteristics: I. Fixation and electron staining reactions. *The Journal of cell biology*, 19(3), 593-611.
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. En *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 5-22). Boston, MA: Springer US.
- Ospina Quintero, N. y Lozano, E. (2024, octubre). Lisosoma, ¿Un organelo no buscado? Reconstrucción de la historia para la enseñanza disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado. *X Jornadas de Investigación Educativa y IX Jornadas de Práctica de la Enseñanza del Profesorado en Ciencias Biológicas de la FCEFyN, UNC - XV Jornadas Nacionales en Enseñanza de la Biología- X Congreso Internacional en Enseñanza de la Biología*. En prensa.
- Portier, P. (1918). *Les symbiotes*. Masson.
- Pabon, T., Munoz, L., & Vallverdú, J. (2015). La controversia científica, un fundamento conceptual y metodológico en la formación inicial de docentes: una propuesta de enseñanza para la apropiación de habilidades argumentativas. *Educación química*, 26(3), 224-232.
- Paul Portier to Jules Richard, 2 February 1919, Archives du Musée Oceanographique de Monaco.
- Peresan, L., Coria, S. H., y Adúriz-Bravo, A. (2012). La imagen de célula: El caso de las fibras musculares representadas por alumnos universitarios. En *III Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales 26-28 de septiembre de 2012 La Plata*, 171

Argentina. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Departamento de Ciencias Exactas y Naturales.

Pérez, G. (2021). La regulación metacognitiva de los obstáculos epistemológicos en la construcción de modelos de biología evolutiva en la escuela media [Tesis de doctorado: Universidad de Buenos Aires]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n6792_Perez

Pérez, L. (2024). Sentidos otorgados por los estudiantes a una enseñanza basada en la modelización (DBM) en la formación básica del profesorado de nivel medio y superior en biología. Libro de actas del VIII Congreso Nacional y VI Internacional de Investigación Educativa. Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad Nacional del Comahue. En prensa.

Psillos, D. y Kariotoglou, P. (2016). *Theoretical issues related to designing and developing teaching-learning sequences*. Springer.

Rai, A. N., Bergman, B., y Rasmussen, U. (Eds.). (2002). *Cyanobacteria in symbiosis*. Kluwer Academic Pub.

Reigeluth, Ch. M. y Frick, T. W. (1999). Investigación formativa: una metodología para crear y mejorar teorías de diseño. En C. M. Reigeluth (Ed.). *Diseño de la instrucción. Teorías y modelos. Un nuevo paradigma de la teoría de la instrucción* (Parte II, 181- 100). Madrid: Aula XXI. Santillana.

Revel Chion, A. y Adúriz-Bravo, A. (2019). Modelización y argumentación en la enseñanza de las Ciencias Experimentales. *Didacticae. Revista de Investigación en Didácticas Específicas*, (5), 3-6.

Rinaudo, C. (1997). *Paradigmas en Investigación Educativa. Material del Seminario Metodología de la Investigación Educativa*. [Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Comahue].

- Rinaudo, M. C., y Donolo, D. (2010). Estudios de diseño. Una perspectiva prometedora en la investigación educativa. *Revista de Educación a Distancia (RED)*, (22).
- Ris, H., y Plaut, W. (1962). Ultrastructure of DNA-containing areas in the chloroplast of *Chlamydomonas*. *The Journal of cell biology*, 13(3), 383-391.
- Robertson, D. (1962). La membrana de la célula viva. En Villanueva, J. R (Ed.). *La célula viva*. (pp. 75-83). Selecciones de Scientific American. Madrid: Blume.
- Rodríguez Palmero, M. (2003). La célula vista por el alumnado. *Ciência y Educação*, 9(2), 229-246.
- Rodríguez Palmero, M. L. (1997). Revisión bibliográfica relativa a la enseñanza/aprendizaje de la estructura y del funcionamiento celular. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2(2), 123-149.
- Rodríguez Palmero, M. L., y Moreira, M. A. (1999). Modelos mentales de la estructura y el funcionamiento de la célula: dos estudios de casos. *Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 4, n.2*, pp. 121-160.
- Rodríguez Palmero, M. L., y Moreira, M. A. (2002). Modelos mentales vs esquemas de célula. *Investigações em ensino de ciências. Vol. 7, n.1*, pp. 77-103.
- Rodríguez Palmero, M. L., Marrero Acosta, J., y Moreira, M. A. (2001). La Teoría de los Modelos Mentales de Johnson-Laird y sus principios: una aplicación con modelos mentales de célula en estudiantes del Curso de Orientación Universitaria. *Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 6, n. 3*, pp. 243-268.
- Rodríguez, R. Y. A., Valencia-Cobo, J. A., Lozano, E. E., Nisperuza, E. F., 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), 1601-1601.
- Sapp, J. (1994). *Evolution by association: a history of symbiosis*. New York: Oxford University Press.
- Sapp, J. (2002). Paul Buchner (1886–1978) and hereditary symbiosis in insects. *International Microbiology*, 5(3), 145-150.
- Sapp, J. (2006). Two faces of the prokaryote concept. *International Microbiology*, 9(3), 163.
- Sapp, J. (2007). Mitochondria and their host: morphology to molecular phylogeny. En Martin W. F., y Muller Miklós (Eds). *Origin of mitochondria and hydrogenosomes* (pp. 57-83). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sapp, J. (2014) Demasiado fanática para la sociedad formal. Una breve historia de la teoría simbiótica. En Sagan D. (Ed.), *Lynn Margulis. Vida y legado de una científica rebelde* (pp. 79-96). Tusquets Editores.
- Sapp, J., Carrapiço, F., y Zolotonosov, M. (2002). Symbiogenesis: the hidden face of Constantin Merezhkowsky. *History and philosophy of the life sciences*, 413-440.
- Sagan D. (ed.). (2014). Lynn Margulis. Vida y legado de una científica rebelde. Tusquets Editores.
- Salgado, L., y Arcucci, A. (2016). *Teoría de la evolución. Notas desde el sur*. Editorial UNRN.
- Sampedro, J. (2002). *Deconstruyendo a Darwin*. Ed. Drakontos bolsillo.
- Sampieri, R. et al. (2010). *Metodología de la investigación*. Quinta Edición. McGraw-Hill: México.

- Sanmartí, N. (2000). El diseño de unidades didácticas. *Didáctica de las ciencias experimentales*, 1, 239-276.
- Sanmartí, N. (2002). Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria. Madrid: Síntesis Educación.
- Sanmartí, N. (2017). *10 ideas clave para evaluar y para aprender significativamente*. Editorial Graó.
- Schleiden, J., M. (1838). *Beitrage zur phytogenesis*.
- Suárez-Díaz, E., (2016). Molecular evolution in historical perspective. *Journal of Molecular Evolution* 83, 204-213.
- Steffe, L. P., Thompson, P. W y Von Glasersfeld (2000). Teaching experiment methodology: Underlying principles and essential elements. En A. E. Kelly y R. A. Lesh (Eds.) *Handbook of research design in Mathematics and Science Education* (256-306). Mahwah: Erlbaum.
- Tachezy, J., y Doležal, P. (2007). Iron–sulfur proteins and iron–sulfur cluster assembly in organisms with hydrogenosomes and mitosomes. En Martin W. F., y Muller Miklós (Eds). *Origin of mitochondria and hydrogenosomes* (pp. 105-133). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Taylor, F. J. R. (1974). II. Implications and extensions of the serial endosymbiosis theory of the origin of eukaryotes. *Taxon*, 23(2-3), 229-258.
- Taylor, F. J. R. (1976). Autogenous theories for the origin of eukaryotes. *Taxon*, 25(4), 377-390.
- Taylor, P. C. (2014). Contemporary qualitative research: Toward an integral research perspective. En *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (pp. 52-68). Routledge.
- Tinto, V. (2009, February). Taking student retention seriously: Rethinking the first year of university. En *ALTC FYE Curriculum Design Symposium* (Vol. 5).

- Vazques, A. y Mannassero Mas, M. (2015). Una taxonomía para facilitar la enseñanza explícita de la naturaleza de la ciencia y su integración en el desarrollo del currículo de ciencias. *Interacções*, 34, 312-349.
- Verhoeff, R. P. (2003). Towards systems thinking in cell biology education (Doctoral dissertation).
- Verhoeff, R. P., Waarlo, A. J., y Boersma, K. T. (2008). Systems modelling and the development of coherent understanding of cell biology. *International Journal of Science Education*, 30(4), 543-568.
- Vistarop, V. A., Pitte, V. S., Piacentini, S. M., y Lozano, E. (2023). Enseñanza de placenta desde una perspectiva modelizadora, en la materia Histología y Embriología de la carrera de Medicina Veterinaria, UNRN. *Vetec Revista Académica de Investigación, Docencia y Extensión de las Ciencias Veterinarias*, 4(3), 38-39.
- Vistarop, V. A., Pitte, V. S., y Lozano, E. E. (2024). Diseño de una Unidad Didáctica para la integración disciplinar y metacientífica en la enseñanza de la histología de la placenta en la carrera de Medicina Veterinaria. VIII Congreso Nacional y VI Nacional de Investigación Educativa “La investigación educativa en 30 años de democracia”. En prensa.
- Wallin, I. E. (1927). Symbiontism and the Origin of Species. Рипол Классик.
- West, A. P., y Shadel, G. S. (2017). Mitochondrial DNA in innate immune responses and inflammatory pathology. *Nature Reviews Immunology*, 17(6), 363-375.
- Woese, C. R., Kandler, O., y Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(12), 4576-4579.
- Wolf, P. G., y Karol, K. G. (2012). *Genomics of chloroplasts and mitochondria*. Springer Science+Business Media.

- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., y Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. *Science education*, 89(3), 357-377.
- Zhang, Q., Raoof, M., Chen, Y., Sumi, Y., Sursal, T., Junger, W., Brohi, K., Itagaki, K., Hauser, C. J. (2010). Circulating mitochondrial DAMPs cause inflammatory responses to injury. *Nature*, 464(7285), 104-107.