UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias

DOI: https://doi.org/10.14483/23464712.24128

GÓNDOLA
ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS

Reflexión Documentada

¿CÓMO Y CUÁNTAS VECES SE DESCUBRIERON LAS ACUAPORINAS? UNA PERSPECTIVA HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICA PARA LA ENSEÑANZA DISCIPLINAR Y METACIENTÍFICA EN EL PROFESORADO

HOW AND HOW MANY TIMES WERE AQUAPORINS DISCOVERED? A HISTORICAL-EPISTEMOLOGICAL PERSPECTIVE FOR DISCIPLINARY AND METASCIENTIFIC TEACHING IN TEACHER EDUCATION

COMO E QUANTAS VEZES AS AQUAPORINAS FORAM DESCOBERTAS? UMA PERSPECTIVA HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICA PARA O ENSINO DISCIPLINAR E METACIENTÍFICO NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES

Eduardo E. Lozano*, Agustín Adúriz-Bravo**

Lozano, E., Adúriz-Bravo, A. (2026). ¿Cómo y cuántas veces se descubrieron las acuaporinas? Una perspectiva histórico-epistemológica para la enseñanza disciplinar y metacientífica en el profesorado. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias, 21(2)*, *e-24128* https://doi.org/10.14483/23464712.24128

Resumen

El artículo ofrece un análisis histórico-epistemológico (AHE) del modelo de "poros de agua" en las células, sustentado en la revisión de fuentes primarias. Los AHE permiten examinar la dinámica de producción de los modelos científicos, describiendo su estructura, las tensiones y los ajustes teórico-empíricos de su desarrollo. Asimismo, aportan información sobre los contextos históricos y los marcos de pensamiento que influyeron en el surgimiento, legitimación y consolidación de tales modelos como referentes explicativos en la ciencia. El análisis de las distintas etapas en la elaboración del modelo de "poros de agua" —desde los "poros pensados" por Traube y Overton a fines del siglo XIX hasta los "poros identificados y purificados" por Benga y Agre en el denominado "doble descubrimiento de las acuaporinas" en la segunda mitad del siglo XX— permite discutir el carácter modelizador-abductivo de la actividad científica y, al mismo tiempo, ofrece oportunidades para abordar la dimensión social e institucional de la ciencia, considerando las condiciones políticas, económicas y culturales de producción, así como los valores implicados. Luego, se desarrollan las implicancias que este AHE tiene para la enseñanza, en particular, en la construcción de narrativas didácticas de casos históricos y en la formulación de ideas clave disciplinares y metacientíficas. Por último, se presenta el diseño de una

* Doctor en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales con orientación en Biología. Centro de Estudios e Investigación en Educación (CEIE), Universidad Nacional de Río Negro. Argentina. elozano@unrn.edu.ar - ORCID https://orcid.org/0000-0002-4897-6673.

** Doctor en Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, CeFIEC-Instituto de Investigaciones en Didáctica de las Ciencias Naturales y la Matemática. Argentina. aadurizbravo@cefiec.fcen.uba - ORCID https://orcid.org/0000-0002-8200-777X

Recibido: Septiembre 30 de 2025, aceptado: Mayo 13 de 2026

unidad didáctica basada en la modelización que articula los ejes disciplinar y metacientífico desde la perspectiva de la naturaleza de la ciencia en la formación del profesorado.

Palabras Clave: naturaleza de la ciencia; “descubrimiento” científico; modelo abductivo; formación del profesorado en biología

Abstract

This article offers a historical-epistemological analysis (HEA) of the model of "water pores" in cells, based on a review of primary sources. HEAs allow us to examine the dynamics of the production of scientific models, describing their structure, tensions, and theoretical and empirical adjustments during their development. They also provide information on the historical contexts and frameworks of thought that influenced the emergence, legitimization, and consolidation of those models as explanatory references in science. The analysis of the different stages in the development of the "water pore" model —from the "conceived pores" by Traube and Overton at the end of the 19th century to the "pores identified and purified" by Benga and Agre in the so-called "double discovery of aquaporins" in the second half of the 20th century— allows us to discuss the modeling-abductive nature of scientific activity and, at the same time, offers opportunities to address the social and institutional dimensions of science, considering the political, economic and cultural conditions of production, as well as the values involved. The implications of the HEA for teaching are then developed, particularly in the construction of didactical narratives of historical cases and in the formulation of key disciplinary and metascientific ideas. Finally, the design of a model-based teaching unit is presented, which articulates the disciplinary and metascientific axes from the perspective of the nature of science in teacher education.

Keywords: nature of science; scientific “discovery”; abductive model; biology teacher education

Resumo

Este artigo oferece uma análise histórico-epistemológica (AHE) do modelo do "poro aquoso" em células, com base em uma revisão de fontes primárias. As AHE permitem examinar a dinâmica da produção de modelos científicos, descrevendo sua estrutura, tensões e ajustes teóricos e empíricos ao longo de seu desenvolvimento. Elas também fornecem informações sobre os contextos históricos e as estruturas de pensamento que influenciaram o surgimento, legitimação e consolidação dos modelos como referências explicativas na ciência. A análise das diferentes etapas do desenvolvimento do modelo do "poro aquoso" —desde os "poros concebidos" de Traube e Overton no final do século XIX até os "poros identificados e purificados" de Benga e Agre na chamada "dupla descoberta das aquaporinas" na segunda metade do século XX— permite discutir a natureza modeladora e abdutiva da atividade científica e, ao mesmo tempo, oferece oportunidades para abordar as dimensões sociais e institucionais da ciência, considerando as condições políticas, econômicas e culturais de produção, bem como os valores envolvidos. Em seguida, são desenvolvidas as implicações da AHE para o ensino, particularmente na construção de narrativas didáticas de casos históricos e na formulação de ideias disciplinares e metacientíficas fundamentais. Por fim, é apresentado o desenho de uma unidade de

ensino baseada em modelos, que articula os eixos disciplinar e metacientífico sob a perspectiva da natureza da ciência na formação de professores.

Palavras-Chave: natureza da ciência; "descoberta" científica; modelo abdutivo; formação de professores em biologia

1. Introducción

El análisis histórico epistemológico (AHE) de los modelos biológicos a enseñar (Matthews, 2017; Adúriz-Bravo, 2010) constituye un aspecto central dentro de la línea de investigación orientada al diseño e implementación de unidades didácticas que integran las formaciones disciplinar y metacientífica (Lozano et al., 2021b). Los AHE realizados por nuestro grupo sobre el modelo de membrana celular (Lozano, Bahamonde, Adúriz-Bravo, 2016), de presión arterial (Lozano et al., 2018; Lozano et al., 2021a), de origen de la célula eucariota (Álvarez Soria, 2025), de placenta (Vistarop, 2023), de fenómenos electrostáticos (Orlandini, Lozano, Adúriz-Bravo, 2025b), entre otros, han permitido recuperar la complejidad implicada en sus elaboraciones, ampliar concepciones epistemológicas, y proporcionar insumos para contextualizar la enseñanza disciplinar y metacientífica desde la perspectiva de la "naturaleza de la ciencia" (NOS, por sus siglas en inglés) (Lederman et al., 2002; Adúriz-Bravo, 2005; Lozano et al., 2021b).

Si los modelos normalizados en los textos universitarios representan la "foto" final de los procesos de elaboración en un período de consensos, los AHE permiten elaborar una narrativa animada sobre su desarrollo, discusiones y controversias, y sobre los valores implicados en la actividad científica. De esta manera, en el diseño de unidades didácticas para enseñar biología desde una perspectiva de modelización, los AHE son coherentes con el proceso de construcción de representaciones que los estudiantes deben realizar para explicar de manera consistente los fenómenos y, además, ofrecen episodios significativos para contextualizar la modelización y pensar también en la propia actividad científica, ya que el pensamiento teórico se extiende hacia la comprensión de la naturaleza epistémica de la relación entre los modelos científicos y el mundo. Desde estas coordenadas, se pone énfasis en una concepción modelístico-abductiva de la naturaleza de la ciencia.

Tal como proponen Sans Pinillos y Adúriz-Bravo (2022), la abducción se presenta como una estrategia inferencial clave para comprender cómo se construyen las explicaciones científicas, superando las limitaciones de la inducción y la deducción. Esta perspectiva permite cuestionar la visión del "descubrimiento" científico centrada exclusivamente en la observación y la experimentación, y resignificar estas prácticas como herramientas para enfrentar la incertidumbre y resolver problemas en contextos reales. En este marco, el trabajo se orienta a responder las siguientes preguntas: ¿cómo puede analizarse, desde una perspectiva histórico-epistemológica, la evolución del modelo de "poros de agua" en las células, en función de su potencial para la enseñanza?, ¿qué características presenta este proceso desde una perspectiva modelístico-abductiva?, y ¿qué implicancias tiene su reconstrucción para la enseñanza disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado de ciencias/biología?

En este trabajo se presentan:

- Un análisis histórico-epistemológico (AHE) sobre el modelo de "poros de agua" o "acuaporinas" (AQP) elaborado a partir de fuentes primarias, en una versión que incluye reflexiones metacientíficas introductorias a diferentes campos estructurantes de la NOS. Tal modelo es apto para ser utilizado como material con estudiantes de profesorado. El análisis se basa en la revisión de fuentes primarias seleccionadas según criterios histórico-epistemológicos, priorizando aquellos trabajos que introducen formulaciones teóricas relevantes sobre el modelo, presentan evidencias experimentales que tensionan o

reformulan dichas conceptualizaciones, y han sido reconocidos en la literatura especializada como hitos en su evolución.

- Implicancias del AHE, tanto para el desarrollo de ideas clave disciplinares vinculadas al modelo de acuaporina, como para la formación de ideas metacientíficas relacionadas con el carácter abductivo de la actividad científica y con los contextos y valores presentes en la historia de la evolución de dicho modelo.

- Los aportes del AHE para la construcción de dos narrativas didácticas de casos históricos (Sans Pinillos y Adúriz-Bravo, 2022) vinculadas con las investigaciones de Gheorghe Benga (Benga et al., 1986) y de Peter Agre (Preston et al., 1992), examinadas con herramientas de la naturaleza de la ciencia que sostienen el carácter abductivo de la actividad científica.

- Un plano general para el diseño de una unidad didáctica (UD) que integra la formación disciplinar y metacientífica, con una descripción y comentarios sobre las actividades centrales propuestas en la implementación de estudios preliminares.

2. Un AHE de la evolución del modelo de acuaporinas desde una visión modelístico-abductiva de la ciencia

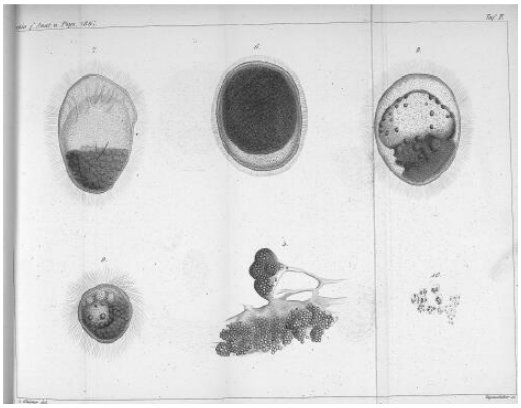
2.1. Los poros de agua pensados en los inicios de la teoría celular

La historia del modelo de células con "poros de agua" está estrechamente ligada al desarrollo de la teoría celular y a la formulación del concepto de membrana como límite universal de las células. Desde el consenso alcanzado en 1839, tras los encuentros entre Schleiden y Schwann en el Instituto Anatómico de la Universidad de Berlín, la célula comenzó a consolidarse como la unidad mínima de vida, retomando y ampliando la idea esbozada por Dutrochet en 1824 (Albarracín Teulón, 1983). Este proceso, aunque progresivo y no exento de controversias, transformó la célula en una entidad *paradigmática* que permitió redefinir los problemas de campos como la fisiología, la farmacología y la toxicología, así como los métodos para abordarlos (Kuhn, 2006). En otras palabras, las explicaciones sobre cómo ingresan y egresan el agua, los fármacos, las toxinas y otras sustancias de interés dejaron de buscarse en las fibras de Gleeson o en los glóbulos de Oken (Albarracín Teulón, 1983) y pasaron a situarse en el dominio de las células, particularmente en la naturaleza de sus límites.

Transcurrieron más de cuarenta años hasta que se afianzó el modelo de una membrana celular de naturaleza lipídica, distinta de la pared celular vegetal y aplicable a todos los tipos celulares. Fue en ese interregno que el químico prusiano Moritz Traube, desarrolló una línea experimental orientada a explorar las propiedades de ese límite celular. En consonancia con las ideas de Shultz (Albarracín Teulón, 1983), quien sostenía que la membrana no debía entenderse como una estructura químicamente distinta del protoplasma, Traube elaboró membranas artificiales a partir de compuestos como el ferrocianuro de potasio y el sulfato de cobre. Estas membranas, concebidas como filtros selectivos o tamices moleculares, actuaban como barreras semipermeables capaces de reproducir reacciones osmóticas similares a las observadas en células biológicas, al ser expuestas a soluciones de distinta concentración (Figura 1). En su obra "Experimente zur Theorie der Zellenbildung und Endosmose" (Traube, 1867), propuso una primera conceptualización del límite celular como una estructura porosa, semejante a un tamiz, que regulaba los intercambios con el medio. Incluso anticipó ejemplos, tal como el elevado transporte de agua en los riñones, que sólo podían explicarse mediante poros, y que serían retomados décadas más tarde como evidencias clave para el desarrollo del modelo de acuaporinas.

Figura 1.

Formación de células artificiales mediante membranas semipermeables.

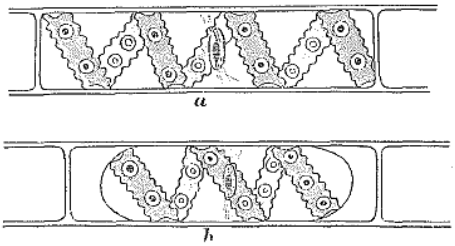


Nota. En *"Experimente zur Theorie der Zellenbildung und Endosmose. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin"* (p. 128) por M. Traube, 1867.

Ya hacia fines del siglo XIX, estas discusiones se reconfiguraron a partir de la aceptación progresiva del modelo de membrana como una estructura molecular homogénea de naturaleza lipídica. Esta visión, ilustrada por analogías como la de las pompas de jabón de Quincke (Ling, 2007; Lozano, Bahamonde, Adúriz-Bravo, 2016), cobró fuerza en el trabajo de Ernest Overton, quien, en 1897, publicó "Über die osmotischen Eigenschaften der Zelle in ihrer Bedeutung für die Toxikologie und Pharmakologie (Overton, 1897), una serie de estudios en los que destacó el papel de las sustancias solubles en lípidos en el transporte a través de la membrana (Figura 2). Overton desarrolló técnicas innovadoras para evaluar qué tipos de moléculas podían atravesar más fácilmente el límite de la célula y, como la explicación basada exclusivamente en la solubilidad lipídica resultaba insuficiente para dar cuenta de los volúmenes de agua efectivamente transportados, en las conclusiones de sus trabajos ya se encuentra implícitamente postulada la idea de "poros de agua" en la membrana (Benga, 2009)

Figura 2.

Dibujos que dan cuenta de los trabajos de Overton sobre la hidratación y deshidratación de células, en este caso de Spirogyra.



Nota. En *"Über die osmotischen Eigenschaften der lebenden Pflanzenund Tierzelle"* (P. 162) por E. Overton, 1897.

Así, podemos afirmar que el modelo de "poros de agua" en las células surgió en Alemania, y más en general en Europa central, a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX, como resultado de una actividad modelístico-abductiva. Su desarrollo implicó la producción teórica de analogías con "poros" y "tamices" para subsumir las evidencias disponibles acerca de lo que podía ingresar o salir de una célula. Estos avances se produjeron en laboratorios que, de manera progresiva, dejaron de concebir las "fibras" y los

"glóbulos" como unidades mínimas de los organismos, y comenzaron a trabajar con modelos celulares que podían o no incluir una membrana de naturaleza química distinta a la del protoplasma.

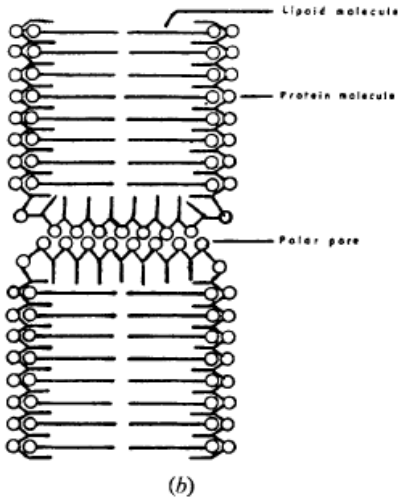
2.2. Los poros de agua pensados para una membrana lipídica y paucimolecular

A inicios del siglo XX, los poros de agua pensados para explicar los fenómenos sobre ósmosis celular se ubicaban en una membrana que ya era indiscutiblemente lipídica. Es de interés iluminar dos modelos de este período que aún no implicaban la consideración de una proteína específica para el transporte de agua y que, enfocándose en aspectos físico-químicos de la membrana, se hacían consistentes con los fenómenos osmóticos cuantificados en ese momento.

Uno de estos modelos fue el propuesto por Stein y Danielli (1956) en el marco del modelo paucimolecular de membrana formulado en 1935 por Davson y Danielli. Este modelo describe la membrana como una bicapa lipídica —basada en los trabajos de Gorter y Grendel de 1925—, embebida por proteínas en ambas caras, a modo de sándwich. El paso de agua se explicaba por la existencia de poros polares formados por el plegamiento de láminas polipeptídicas, cuyas cadenas laterales hidrofílicas generaban un canal acuoso que permitía no solo el pasaje de agua, sino también el de solutos polares (Figura 3).

Figura 3.

Modelo de Stein y Danielli: sección transversal esquemática de un "poro polar" conformado entre dos láminas polipeptídicas en la membrana.

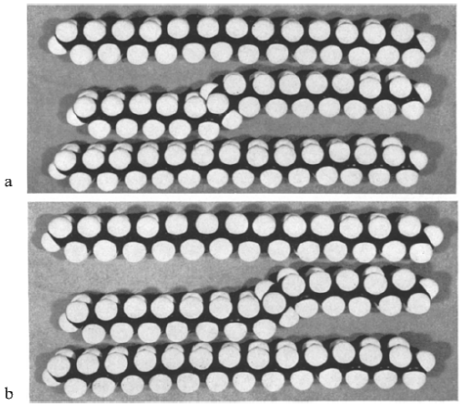


Nota. En *"*Structure and function in red cell permeability*"* (p. 249) por W. D. Stein y J. F. Danielli, 1956, *Discussions of the Faraday Society,* 52.

Por su parte, el modelo de "kink diffusion", o difusión por torceduras o bolsas en la membrana, constituyó otra propuesta teórica que, aunque contemporánea al modelo de bicapa lipídica con proteínas embebidas, no requería de estas para explicar el pasaje de agua. Fue propuesto por Hermann Träuble (1971), quien postuló que mínimas fluctuaciones térmicas inducen cambios conformacionales en las cadenas hidrocarbonadas de los lípidos, generando estructuras móviles denominadas "kinks". Estos "kinks" crean pequeños espacios libres en la fase hidrocarbonada de la membrana, lo que permite que moléculas de bajo peso molecular, como el agua, se desplacen a través de la bicapa al ocupar estos espacios y migrar junto con las torceduras. (Figura 4)

Figura 4.

Modelo de Träuble: mediante la combinación de dos dobleces se pueden formar torceduras o bolsas para el paso de agua u otras moléculas.



Nota. En "The Movement of Molecules Across Lipid Membranes: A Molecular Theory" (p. 195) por H. Träuble, 1971 *Journal of Membrane Biology 4* (1)

En la propuesta de Stein y Danielli (1956), se destaca la importancia de los ajustes progresivos y sincrónicos que pueden observarse en los procesos de modelización. Si la membrana lipídica estaba delimitada por láminas de polipéptidos, el carácter polar de esas láminas permitía suponer, de manera razonable, que la analogía con los poros podía mantenerse, siempre que ellas se plegaran de un modo que facilitara el transporte de agua. Por otra parte, en el desarrollo de la explicación lipocéntrica de Träuble, se hace evidente un modelo que ha "mapeado" selectivamente a la membrana (Giere, 1999), al no señalizar las proteínas y proponer una explicación que solo atiende a la naturaleza lipídica y sus propiedades. De este modo, la postulación de un límite poroso de la célula y los ajustes progresivos de ese modelo, junto a la elaboración de diferentes versiones alternativas, destacan un aspecto central de la naturaleza de la ciencia: su carácter teórico. Durante más de un siglo, hasta la identificación que llevaría a cabo Benga en 1986, la existencia de poros de agua en la membrana celular fue sostenida como una hipótesis teóricamente robusta, a pesar de no contar con validaciones empíricas más o menos directa. Este recorrido muestra que un modelo puede ser considerado científico por su coherencia explicativa y su capacidad para orientar nuevas investigaciones incluso antes de que se disponga de evidencias experimentales que lo corroboren.

2.3. Los poros buscados: Solomon, Gheorghe Benga y la primera identificación de las proteínas implicadas en el transporte de agua.

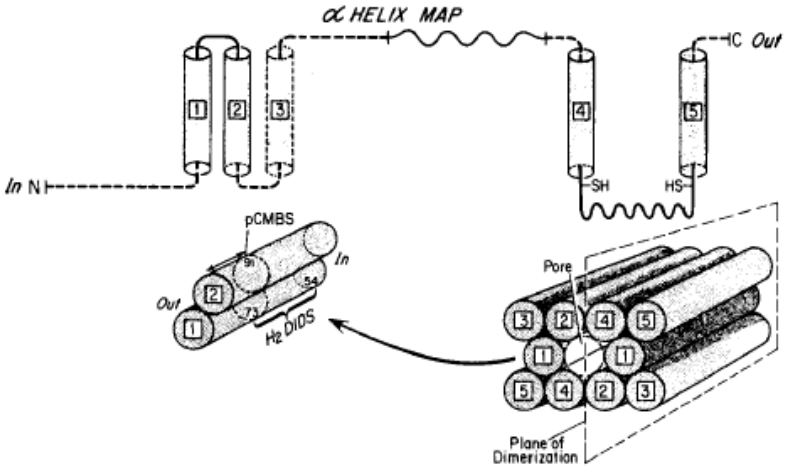
A mediados del siglo XX ya se habían propuesto modelos que calculaban la cantidad de poros de agua que debía tener una célula, basándose en que el coeficiente de permeabilidad osmótica era mayor que el de permeabilidad difusional general para una membrana bilipídica teóricamente sin poros (Sidel y Solomon, 1957). También se había avanzado en el cálculo del radio equivalente que debían tener, entendidos como poros de forma cilíndrica uniforme (Paganelli y Solomon, 1957). En los '70, y a partir del consenso que obtuvo el modelo de "mosaico fluido" propuesto por Singer y Nicholson (1972), la visión de los poros de agua comienza a orientarse definitivamente hacia la consideración de canales proteicos insertos en una membrana fluida y autoensamblante.

En la década de 1980, la investigación en biología celular y fisiología de membranas estaba avanzando rápidamente, gracias a las mejoras en las técnicas de radioisótopos y de microscopía electrónica. En Rumania, el investigador Gheorghe Benga y su equipo de la Universidad Babeş-Bolyai de Cluj-Napoca estaban desarrollando, a fines de los años 70, una línea de investigación sobre los cambios en la

permeabilidad de la membrana de los glóbulos rojos en pacientes epilépticos (Benga y Morariu, 1977). Los datos obtenidos en estas investigaciones se interpretaban a la luz del modelo teórico de "poros de agua" en las células, una línea conceptual que ya orientaba el trabajo de Benga desde el inicio de sus estudios sobre desequilibrios hídricos (Benga, 2003). Este marco retomaba los desarrollos teóricos formulados a comienzos del siglo XX y encontraba respaldo en avances más recientes, como los presentados por Solomon en "The aqueous pore in the red cell membrane: Band 3 as a channel for anions, cations, nonelectrolytes, and water" (Solomon et al., 1983), donde se ofrecían las primeras evidencias que sugerían la existencia de proteínas responsables del transporte de agua a través de la membrana celular y se presentaban los primeros modelos gráficos. (Figura 5)

Figura 5.

Modelo helicoidal en U sugerido por Solomon y colegas para la proteína del canal acuoso en la membrana de los glóbulos rojos



Nota. En ""The Aqueous Pore in the Red Cell Membrane: Band 3 as a Channel for Anions, Cations, Nonelectrolytes, and Water" (p. 118) por A. K. Solomon, B. Chasan, J. A. Dix, F. Lukacovic, 1983. *Annals of the New York Academy of Sciences* Vol. 414,

A medida que avanzaban en el estudio de los glóbulos rojos, y en un contexto político que restringía la integración en redes internacionales de colaboración científica, Benga y su equipo consideraron que ya era técnicamente posible identificar las proteínas que facilitaban el transporte de agua en las células. Utilizaron trazadores para marcar con mercurio radiactivo una molécula que, sabían, hacía impermeables a los glóbulos rojos. En ella cultivaron eritrocitos y, siguiendo la hipótesis de que dicha molécula se uniría a proteínas involucradas en el transporte de agua, realizaron electroforesis y lograron identificar bandas proteicas radiactivas. Finalmente, en agosto de 1986, publicaron en el European Journal of Cell Biology el artículo "Water permeability in human erythrocytes: Identification of membrane proteins involved in water transport", el primero en identificar las proteínas responsables del transporte de agua en las células.

2.4. Los poros "descubiertos": Peter Agre y el aislamiento y la purificación de las AQP

A fines de los años 80, y en un contexto de avances significativos en biología molecular y bioquímica de proteínas en EEUU y Europa occidental —impulsado por la disponibilidad de técnicas como la clonación de ARNm y el uso de anticuerpos específicos— Peter Agre, de la Escuela de Medicina de la Universidad Johns Hopkins en Baltimore, Maryland, desarrollaba métodos de aislamiento y purificación de diferentes tipos de antígenos del sistema Rh. En un estudio de producción de anticuerpos para Rh en conejos,

encontró una respuesta inmunológica significativa frente a unas proteínas de bajo peso molecular, que inicialmente atribuyó a productos de degradación de dichos antígenos. Sin embargo, tras identificarlas no solo en glóbulos rojos sino en múltiples tejidos, especialmente en células del riñón, descartó esa hipótesis. Desconcertado, consultó con colegas, quienes le sugirieron que podría tratarse de proteínas de membrana implicadas en el transporte de agua. A partir de esta nueva línea, sintetizó ARNm a partir de la secuencia de aminoácidos y lo introdujo en óvulos impermeables de rana del género Xenopus, los cuales, tras un tiempo, se volvieron permeables y se lisaron en medios hipotónicos (Agre, 2003). Estos resultados dieron lugar a la publicación, en abril de 1992, del artículo "Appearance of water channels in Xenopus oocytes expressing red cell CHIP28 protein" en *Science* (Preston et al., 1992). En reconocimiento a esta investigación, Peter Agre recibió el Premio Nobel en el año 2003.

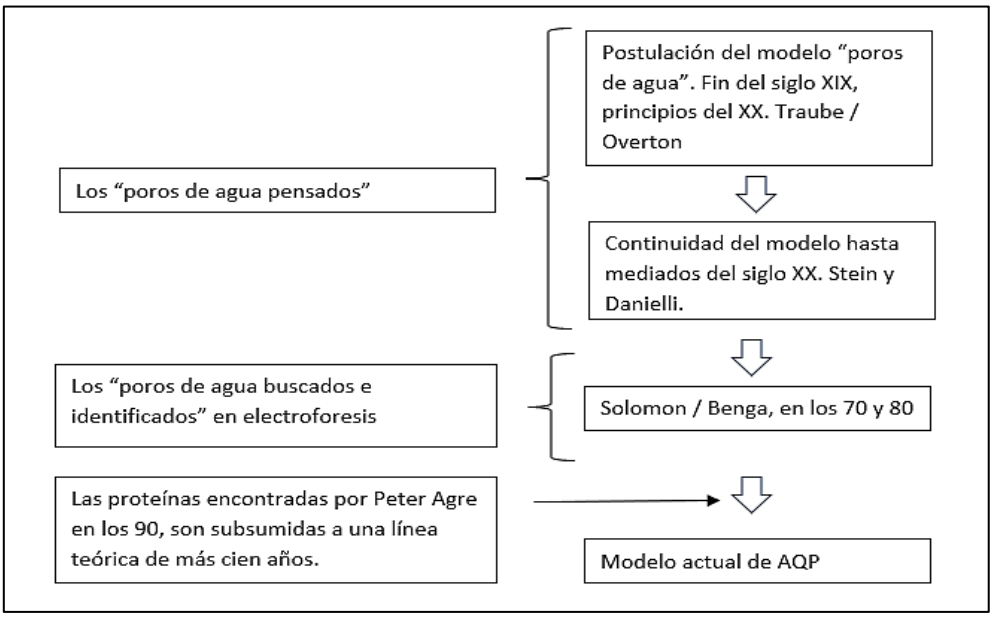
El trabajo de Peter Agre aparece en varios manuales de biología universitaria como el que condujo al "descubrimiento" de las acuaporinas (Campbell & Reece, 2007). Esta misma caracterización, presente en numerosos artículos académicos y de divulgación, refuerza una visión del "descubrimiento" científico marcada por el empirismo y el protagonismo del experimento. En palabras del propio Agre:

> […] antes de nuestro descubrimiento muchos fisiólogos pensaban que la difusión a través de la bicapa fosfolipídica era suficiente para que el agua entrara y saliera de todas las células. Otros decían que esto no podía ser suficiente, especialmente en aquellas células con una permeabilidad al agua muy elevada o regulada; por ejemplo, las células que forman los túbulos de los riñones, que controlan la concentración de la orina. Muchos investigadores habían realizado observaciones que indicaban que la difusión a través de bicapa fosfolipídica no era el único mecanismo, pero había un gran escepticismo hasta que nuestro experimento con los huevos de rana terminó con la controversia. (Agre, en Campbell & Reece, 2007, p. 93)

Sin embargo, tal enfoque tiende a invisibilizar una forma de producción científica de carácter modelístico–abductiva, cuya relevancia emerge al reconstruir la historia del modelo (Figura 6).

Figura 6.

El "descubrimiento" de Agre desde una visión de la ciencia como actividad modelístico-abductiva



Nota. Elaborado por los autores.

Una lectura actualizada de la NOS nos sugiere que los supuestos "residuos" de proteínas Rh encontrados por Agre en sus estudios solo adquirieron valor como modelo cuando los bioquímicos a

quienes consultó infirieron, por abducción, que podían corresponderse razonablemente con los "poros de agua" concebidos desde fines del siglo XIX.

2.5 Los valores también forman parte de la historia del modelo de AQP

Philip Kuchel, un discípulo de Gheorghe Benga, publicó en 2006 la reseña: "The story of the discovery of aquaporins: Convergent evolution of ideas –But who got there first?". En esa intervención, Kuchel pone en contexto el trabajo llevado a cabo por Benga y, si bien reconoce que el trabajo de Peter Agre es plenamente merecedor del Premio Nobel en 2003, considera que es "curiosa y descuidada" la prácticamente nula mención que de sus investigaciones se lleva a cabo en la producción científica del estadounidense. Destaca que, detrás del "telón de acero" de la Rumania comunista, Benga fue director de un nuevo departamento de Biología Celular en las décadas de 1970 y 1980 y que, si bien era consciente de estar desarrollando ciencia de primer nivel, las pregunta eran si lo sabía el resto del mundo o si quería saberlo: "Lo curioso de este escenario es que Gheorghe Benga estaba "buscando el transportador de agua", mientras que Peter Agre no…" (Kuchel, 2006, p. 4, la traducción es nuestra).

En el discurso que brindó Peter Agre en 2003 al recibir el premio Nobel, incluyó dos menciones a Gheorghe Benga. En la primera solo lo reconoce en el grupo de los investigadores que "sugirieron" los poros de agua y, en la segunda, menciona los trabajos con mercuriales isotópicos: "Los mercuriales isotópicos marcaron varias proteínas de membrana: el intercambiador de aniones (banda 3) de Solomon y un grupo de varias proteínas (banda 4.5) de Benga. Sin embargo, ninguna de las proteínas fue aislada, reconstituida y demostrada que transportaba agua" (Agre, 2003, p. 185, la traducción es nuestra).

La publicación de Kuchel muestra que la ciencia no solo produce conocimientos, sino que también se construye a partir de valores que determinan qué trabajos se reconocen, cómo circulan y qué se legitima como conocimiento válido (Echeverría, 1998). Las disputas en torno a la prioridad, la autoría y el reconocimiento revelan que la práctica científica está atravesada por dimensiones éticas y políticas, que inciden directamente en la distribución del prestigio y en el acceso a recursos. Más que un problema meramente experimental, este caso pone en discusión los criterios teóricos, metodológicos y contextuales que definieron la validación del trabajo de Benga, y cómo estos influyeron en que su aporte quedara invisibilizado en el proceso que condujo a Agre al Nobel. Así, la historia de las acuaporinas ilustra que los modelos científicos son productos colectivos y situados, en los que conocimiento y valores se entrelazan en la configuración de lo que se acepta como ciencia legítima.

Esta cuestión valórica de la ciencia es retomada tres años después por el propio Benga, en la presentación que personalmente hace al Comité del Nobel y publicada en Biomedical Reviews:

> Nuestros artículos fundamentales de 1986 pueden compararse con la primera detección de un niño en el útero mediante ecografía, ya que descubrimos uno de los componentes esenciales del "niño acuaporina" (un peso molecular de 35-60 kD para el componente glicosilado); también indicamos la manera de reconocerlo después del nacimiento (¡entre otros niños de su grupo!): colocando a los niños aislados en un entorno determinado y pidiéndoles que realizaran la misma tarea (léase: estudios de reconstitución en liposomas y medición de la permeabilidad al agua), como alinear atletas para una prueba de carrera. Esta era la única forma segura de saber que el niño era realmente el corredor más rápido y no solo uno que ayudaba (de diversas maneras) a otro niño a ser el corredor más rápido En retrospectiva, al plantear la pregunta crucial de cuándo se descubrió la primera proteína del canal de agua, la acuaporina 1, una respuesta justa y concisa sería: la primera proteína del canal de agua, ahora llamada acuaporina 1, fue identificada o "vista" in situ en la membrana de los glóbulos rojos humanos por Benga y colaboradores en 1986. Fue "vista" de nuevo cuando fue purificada por casualidad por Agre y colaboradores en 1988 y fue identificada de nuevo cuando su característica principal, la propiedad de transporte de agua, fue descubierta por Agre y colaboradores en 1992. (Benga, 2006, p. 10, la traducción es nuestra)

3. Implicancias del AHE para la enseñanza del modelo de transporte de agua por AQP y para el desarrollo de ideas metacientíficas desde la perspectiva NOS

Consideramos que el AHE se conformó como una plataforma consistente a partir de la cual se proponen ciertos hitos que están dotados de un significativo valor epistémico y sociocultural, en virtud de la descripción "fina" del proceso de "descubrimiento" de las AQP, acorde con la formación en NOS que se propone para el profesorado de ciencias (Sans Pinillos y Adúriz-Bravo, 2022):

a. Siglo XIX. La construcción de nuevos problemas respecto del transporte de agua y otras sustancias en las células, a partir de la consolidación de la teoría celular.
b. Finales del siglo XIX y principios del XX. La elaboración de modelos teóricos de "poros de agua" en sus diferentes versiones y según los modelos de límite celular adoptados, consistentes con las evidencias sobre la ósmosis celular.
c. Siglo XX. La consolidación del modelo de mosaico fluido y, bajo esa explicación, la búsqueda y la identificación de las proteínas encargadas del transporte de agua llevada a cabo por Solomon y Gheorghe Benga en los 80.
d. Finales de los 80 y década de los 90. El ingreso de Peter Agre a la historia de la evolución del modelo a partir de una inferencia abductiva que le permitió iluminar teóricamente el hallazgo de unas proteínas en sus investigaciones sobre Rh.
e. Las diferentes metodologías y técnicas llevadas a cabo por Benga y Agre en diferentes momentos históricos y condiciones sociopolíticas.
f. La divulgación masiva en el mundo académico del trabajo de Agre asimilado al "descubrimiento" de las AQP, en versiones descontextualizadas de la historia de la evolución del modelo.
g. La afinidad del propio Agre con esta perspectiva descontextualizada y despolitizada y, por tanto, fuertemente ahistórica.
h. El debate iniciado por Kuchel respecto de la no mención de los trabajos más relevantes de Benga en la producción de Agre, la posición explicitada por el propio Benga y la discusión sobre valores implicados en la actividad científica.

3.1 Aportes para la modelización disciplinar y metacientífica y la elaboración de ideas clave

El AHE ofrece episodios para contextualizar la modelización de la ósmosis celular en el trabajo con los estudiantes a partir de proponer, "a lo Traube y Overton", la deshidratación y rehidratación de diferentes tejidos (como hortalizas) y, a partir de allí, pensar y expresar gráficamente qué ajustes deberían hacer a un modelo elaborado previamente de bicapa lipídica con componentes hidrofóbicos –definido a nivel macromolecular– para explicar la velocidad con que ocurren los fenómenos y el elevado volumen de agua transportado. La idea clave disciplinar a elaborar en la modelización es que "el transporte de agua en las células se produce a través de unas proteínas de membrana denominadas acuaporinas, de manera pasiva y en función de los gradientes de concentración de solutos".

En lo referido al componente metacientífico, y al adoptar la perspectiva conocida como "enfoque de parecidos de familia", o "family ressemblance approach" (FRA) (Irzik y Nola, 2014), para organizar la enseñanza de NOS, las ideas clave metacientíficas que se consideran apropiadas y consistentes con el contenido del AHE se organizan en dos dimensiones:

Una primera dimensión vinculada a la consideración de la ciencia como "sistema epistémico-cognitivo":

a. La abducción podría definirse como un mecanismo inferencial mediante el cual se generan modelos y seleccionan hipótesis que puedan indicar líneas de actuación alternativas para explicar y dar sentido a fenómenos que desafían una comprensión directa y a situaciones sorprendentes o desconcertantes. Los

relatos sobre los "descubrimientos" de sesgo empírico y centrados solo en el valor de los experimentos obliteran la comprensión de la naturaleza modelístico-abductiva de la actividad científica, la que se advierte en la historia de la evolución de los modelos científicos.

Una segunda dimensión vinculada a la consideración de la ciencia como "sistema institucional y social":

b. La aceptación y el reconocimiento de un modelo científico no siguen necesariamente una trayectoria lineal, sino que dependen de factores como el contexto en que trabajan los investigadores, los recursos disponibles, sus redes de colaboración y su posición dentro de la comunidad científica internacional. De este modo, la actividad científica no se limita a la producción de conocimientos, sino que conlleva inevitablemente una dimensión axiológica: investigar, intervenir y transformar el mundo supone tomar decisiones atravesadas por criterios éticos, sociales y políticos.

4. Implicancias para la elaboración de dos narrativas didácticas sobre el "doble descubrimiento" de las AQP

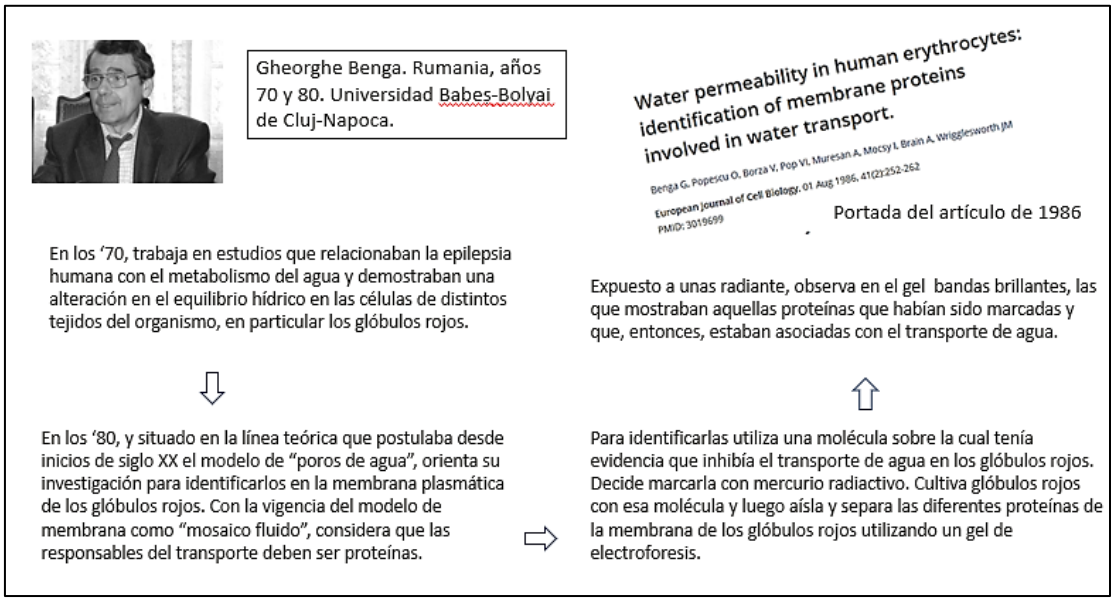
Por otra parte, el AHE ofrece insumos para que los docentes elaboren un guion y lleven a cabo una dramatización frente a sus estudiantes. En ella, dos docentes representan en primera persona a Gheorghe Benga y a Peter Agre: el primero narra el proceso que lo condujo a identificar proteínas implicadas en el transporte de agua, mientras que el segundo, sin hacer ninguna mención específica al trabajo de Benga, relata su aislamiento, purificación y expresión en células impermeables. En la dramatización, cada uno contextualiza el marco sociopolítico y cultural (se destacan aspectos políticos, económicos, deportivos, artísticos) en los que tuvieron lugar las investigaciones: la Rumania comunista de Nicolae Ceaușescu, en la que trabajó Benga, y los Estados Unidos de Bill Clinton, donde Agre investigaba en un entorno científico altamente competitivo, tecnológicamente avanzado y vinculado a prestigiosas redes internacionales. Lejos de tratarse de una reconstrucción anecdótica, la estrategia didáctica permite situar históricamente el conocimiento, revelar tensiones éticas y epistémicas, y abordar cómo distintos trayectos institucionales pueden influir en la visibilidad de un descubrimiento.

Esta intervención se fundamenta en una concepción de las formas teatrales como mediadoras del conocimiento, no solo desde su dimensión estética, sino también como forma de pensamiento crítico y emocional. Esta articulación permite dotar de contexto y de sentido estético a los conceptos científicos, habilitando comprensiones que superan lo puramente cognitivo. La dramatización, al incorporar elementos como el cuerpo, la metáfora y la acción, apela a una verdad que no es únicamente lógica, sino también emocional y situada. Esta verdad emocional, movilizada en el aula, actúa como un disparador de reflexión epistémica y permite a los estudiantes reconocer los saberes científicos como prácticas humanas, cargadas de conflicto, contexto y disputa (García y Parada, 2017)

Las narraciones de las dos investigaciones llevadas a cabo, referidas a las lógicas de "descubrimiento" implicadas en cada una, fueron sintetizadas en dos esquemas. Estos materiales, además de servir de apoyo a la comprensión de las particularidades de cada proceso, se utilizan en la UD como plataforma para que los estudiantes identifiquen y discutan las diferentes "formas de averiguar" de Benga y Agre (Adúriz-Bravo, 2015) puestas en juego en cada caso (Figuras 7 y 8).

Figura 7.

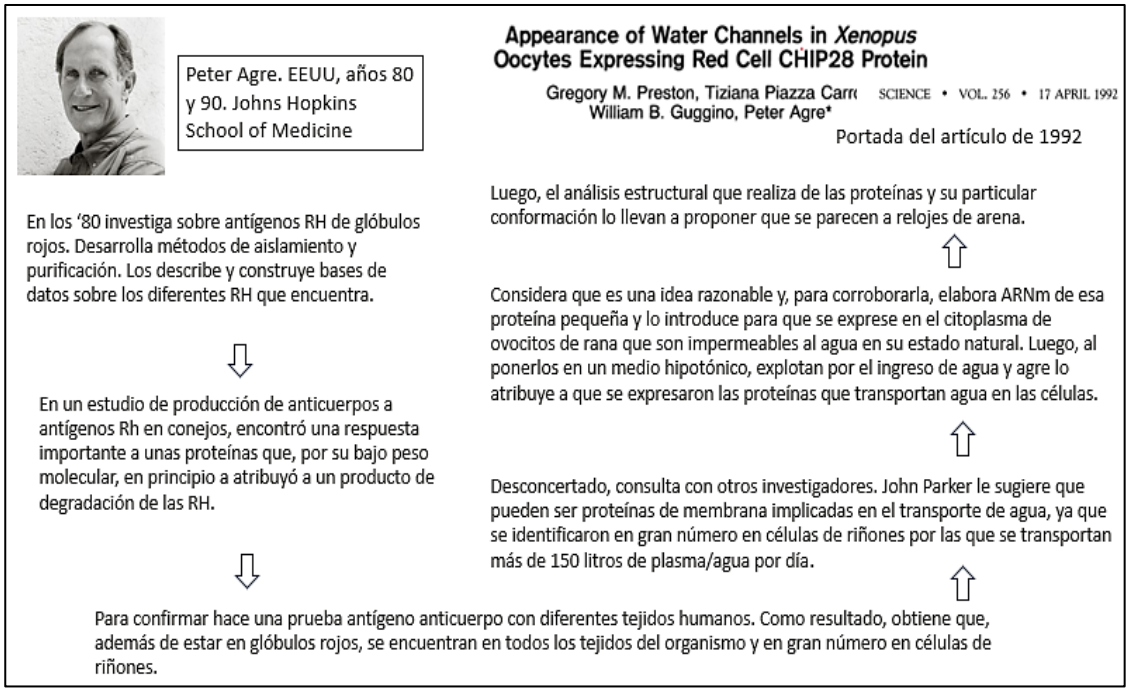
Recorrido esquemático de la investigación de Gheorghe Benga.



Nota. Elaborado por los autores

Figura 8.

Recorrido esquemático de la investigación de Peter Agre.



Nota. Elaborado por los autores

5. El diseño de una UD que integra la modelización disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado en torno al modelo de acuaporinas

Desde la perspectiva teórica del *modelo cognitivo de ciencia escolar* (Izquierdo-Aymerich et al., 1999; Izquierdo-Aymerich & Adúriz-Bravo, 2003; Adúriz-Bravo, 2012), el diseño de la unidad didáctica se propone según las orientaciones generales de la llamada *actividad científica escolar* (ACE) (Sanmartí, 2002), e implica la elaboración de actividades para el desarrollo de las diferentes etapas de la modelización, en la línea de trabajos que integran campos de la formación del profesorado: disciplinar, metacientífico (Lozano et al., 2016; Lozano et al., 2018; Lozano, Bahamonde & Adúriz-Bravo, 2020; Bahamonde et al., 2020; Lozano et al., 2021a; Lozano et al., 2021b; Álvarez Soria y Lozano, 2023) y didáctico (Lozano et al., 2024; Orlandini, Lozano & Adúriz-Bravo, 2024a, 2024b), a partir del diseño de actividades específicas orientadas a traccionar los campos ente sí.

De este modo, y desde la perspectiva de la *investigación basada en el diseño* (DBR) (Reigeluth, 1999) la unidad didáctica se configura como un posible "corredor conceptual" significativo para la enseñanza del modelo de acuaporinas y el desarrollo de ideas claves sobre la ciencia. El diseño elaborado se implementó de manera preliminar en dos cursos del primer año de la formación del profesorado en biología de una universidad pública argentina. El eje disciplinar, centrado en la modelización de las acuaporinas, se trabajó en la materia Introducción a la Biología, mientras que el eje metacientífico, orientado al análisis de las ideas clave previamente señaladas, se desarrolló en la materia Pensamiento y Actividad Científica.

Tabla 1.

La modelización de los poros de agua en el ámbito de la materia Introducción a la Biología

Modelización	Descripción y comentarios sobre las principales actividades diseñadas
Modelización inicial	a) Se recupera el modelo de membrana celular como una bicapa lipídica, fluida y autoensamblante, que los estudiantes elaboraron en las clases anteriores, en un proceso de modelización que los implicó en el análisis de un caso de fertilización in vitro mediante una inyección intracitoplasmática para explicar por qué, luego de la intervención, el límite del óvulo no sufre daños. La modelización implica la elaboración de análogos concretos, como pompas de jabón (Lozano, et al 2020). A partir de esto, se le ofrecen a cada grupo, cápsulas de Petri en las cuales hay rodajas de hortalizas (zucchinis, berenjenas, etc.) y se les pide que cuenten qué prácticas habituales en la cocina de sus hogares suelen llevarse a cabo con esos alimentos, previamente a cocinarlos. Se hacen menciones a la colocación de sal, para "desflemarlos", "quitar el amargor", etc. En ese momento, se les provee de sal entrefina que distribuyen sobre las rodajas y se les pregunta - ¿Que creen que va a ocurrir al cabo de un tiempo breve y por qué?
Modelización intermedia y estructuración del modelo	b) Se socializan y discuten las ideas y luego, ante la evidencia de la rápida aparición de una gran cantidad de gotas de agua sobre la superficie de las rodajas, se les pide que, utilizando un modelo gráfico de bicapa lipídica, expliquen ¿Cuál es el origen del agua? y, atendiendo, al carácter hidrofóbico que los ácidos grasos le confieren a la membrana de las células del parénquima de la hortaliza, ¿Cómo podrían explicar la salida tan rápida y en un volumen importante del interior de las células?
	c) Los modelos gráficos que realizan los estudiantes se comparten en una puesta en común. Aquellos que, por ejemplo, proponen que la sal rompe la membrana y eso hace que el agua del citoplasma salga rápidamente, son confrontados con experiencias de rehidratación de hortalizas, que serían imposibles con las membranas "rotas".

	d) En el trabajo de explicar, se ponen a discusión aquellas ideas elaboradas por algunos grupos de estudiantes que intervienen el modelo de bicapa lipídica con "puentecitos", "canales" que impidan el contacto del agua con los ácidos grasos. La continuidad de la modelización lleva a la estructuración del modelo de acuaporina y la comparación de las producciones que ellos llevaron a cabo con las versiones "eruditas" de los manuales de biología universitarios. En estos diferentes momentos de la modelización (a, b, c y d), también se reflexiona con los estudiantes respecto de, por ejemplo, la relación que se puede establecer entre la observación del fenómeno y las explicaciones que brindan. ¿Las explicaciones que ofrecen sobre la aparición de agua en la superficie de las rodajas son una "traducción directa" de lo que están observando? ¿Cómo describirían lo que ocurre en el pensamiento de quiénes están explicando? ¿Qué recursos utilizan para explicar?

Nota. Elaborado por los autores

Tabla 2.

El desarrollo de ideas clave metacientíficas en el ámbito de la materia Pensamiento y Actividad científica

Modelización	Descripción y comentarios sobre las principales actividades diseñadas
Modelización inicial	a) Se recupera el modelo de AQP elaborado y estructurado en las clases de Introducción a la biología y se les pide que expresen con un dibujo y comenten ¿Cuál piensan que fue la actividad científica más importante en la historia que permitió a la comunidad científica postular la idea de acuaporinas para dar cuenta del pasaje de agua a través de la membrana de las células? El dibujo y los comentarios deberían describir: - persona/s, - qué estaba/n haciendo, - en qué ambiente (espacio) trabajaba/n, - en qué año - en qué lugar del mundo lo situarían.
Modelización intermedia	b) Presentación de la dramatización "El doble descubrimiento de las acuaporinas", a cargo de dos docentes de la materia. Las narraciones, en primera persona, presentan primero a Peter Agre y luego, a modo de flashback, a Gheorghe Benga. Cada intervención se extiende unos veinte minutos y el contenido describe una breve historia personal del investigador, caracteriza el lugar y el contexto sociopolítico en el que vive, y luego narra el proceso que lo llevó a "descubrir" las acuaporinas. Cada uno finaliza su intervención con la frase: "Y así fue que, junto a mi equipo, "descubrimos" las acuaporinas". Luego, se genera un espacio de diálogo y discusión con los estudiantes sobre las historias narradas, que se explícita son verídicas, y se analiza y discute particularmente la situación de "doble descubrimiento" formulada.
	c) Se plantea a los estudiantes que la actividad científica, en general, implica el desarrollo de diferentes "maneras o formas de averiguar" sobre algo del mundo, que implican diferentes razonamientos, formas de pensar y acciones específicas. Luego de esta introducción, se les entrega a los estudiantes los esquemas de cada proceso investigativo elaborados a partir del AHE y se les pide que identifiquen diferentes acciones llevadas a cabo por Benga y Agre y que, a modo de etiquetas, le coloquen un nombre tentativo a cada apartado (Ej. aquí Peter Agre estaba "experimentando")
Estructuración de las ideas claves metacientíficas	d) A partir de las producciones de cada grupo, en una puesta en común se identifican, registran y ordenan las asignaciones de "modos de averiguar" que realizaron para los dos casos: Ej., (Aquí, Benga/Agre, está: "pensando", "explicando", "hipotetizando", "observando", "clasificando", "ordenando", "comparando", "preguntando a otros", "experimentando", etc.). A partir de esta plataforma de discusiones, los docentes adscriben las etiquetas a una visión sobre los "modos de averiguar" en el campo de la NOS (Adúriz-Bravo, 2015): modélico/abductivo, deductivo, analógico, clasificador/ordenador y se desarrollan teóricamente para resignificarlos en cada recorrido investigativo. Luego, los estudiantes vuelven sobre los esquemas y los intervienen con nuevas etiquetas y comentarios.
	e) Ahora, los estudiantes deben comparar –utilizando los esquemas intervenidos– los recorridos investigativos de Benga y Agre, e identificar semejanzas y diferencias. En una

	puesta en común se presentan y discuten los análisis llevados a cabo y los docentes enfatizan el carácter central que tiene la noción de modelo teórico en la actividad científica. Se desarrolla y desde allí se analiza el trabajo de Benga, en función de su adscripción a la línea teórica de Overton y Solomon, por lo cual su investigación es básicamente deductiva experimental. Se presenta una línea de tiempo y algunas de las diferentes versiones de "los poros de agua" pensados en la historia de la evolución del modelo (Para esto cuentan con el AHE como material de consulta). Por otra parte, se analiza el modo de ingresar de Agre a esa línea de investigación, a partir de una inferencia abductiva que da lugar a que las proteínas halladas en su laboratorio se iluminen teóricamente. Luego, se comparten textos sobre el carácter modélico/abductivo de la actividad científica y se rediscute la noción de "descubrimiento", esto es, ¿Qué es descubrir en la actividad científica? (Adúriz-Bravo, 2015)
	f) Luego de que los estudiantes leen fragmentos seleccionados del artículo de Kuchel (2006) y del discurso que Agre brindó al recibir el premio Nobel (Agre, 2003), se plantea a los estudiantes discutir sobre dos aspectos: a) Si es razonable negar que Benga identificó por primera vez las proteínas implicadas en el transporte de agua (esto implica volver a revisar la lógica modélico/deductiva de su experimento y sus conclusiones) y b) ¿Qué valores pueden identificar en la discusión que propone Kuchel (2006) sobre el escaso reconocimiento a los trabajos de Benga en las referencias de las publicaciones de Agre? Luego de una puesta en común, se orienta a la lectura de textos en los que Echeverría (1998) hace referencia a la cuestión axiológica en la actividad científica. En una puesta en común se elaboran ideas que refieren al carácter valórico/axiológico que es indisoluble del componente epistémico en la investigación científica.
Rediscusión de las ideas iniciales	g) A los estudiantes se les entregan los dibujos comentados que habían elaborado al inicio de las actividades del eje metacientífico, y se les pide que desarrollen una reflexión crítica, de manera escrita, sobre la visión que habían puesto en juego al momento de abrir las discusiones sobre el "descubrimiento" de las AQP, tensionando esa visión con las ideas desarrolladas en la UD.

Nota. Elaborado por los autores

6. Conclusiones

Consideramos que el análisis histórico-epistemológico (AHE) del modelo de acuaporinas se convierte en *epítome* para comprender que el denominado "descubrimiento científico" es un complejo proceso teórico de naturaleza evidencial, situado y condicionado históricamente. Desde los primeros ensayos de Traube y Overton hasta la identificación de Benga y la purificación de las AQP por parte de Agre, la evolución del modelo ilustra que la actividad científica se configura en un entramado de inferencias, ajustes y reelaboraciones que no pueden comprenderse bajo una visión lineal ni empirista del descubrimiento. Al identificar y analizar los modos de averiguar puesto en juego en cada una de las investigaciones, se dan posibilidades a los estudiantes para advertir que la inducción y la deducción resultan insuficientes para dar cuenta de la explicación científica, mientras que la abducción se presenta como una herramienta pragmática capaz de articular observación, experimentación e intervención en contextos de incertidumbre. La abducción se reconoce así como la forma de inferencia más adecuada para guiar la investigación ante lo desconocido mediante modelos teóricos, y como un recurso valioso para modelizar con fines educativos las "historias de descubrimiento" (Sans Pinillos & Adúriz-Bravo, 2022).

Asimismo, el caso también ofrece oportunidades para trabajar con futuros docentes la dimensión social e institucional de la ciencia, atendiendo a las condiciones políticas, económicas y culturales que influyen en el reconocimiento de los aportes. La escasa visibilidad internacional del trabajo de Benga, en el contexto de la Rumania comunista, y el posterior reconocimiento otorgado a Agre en Estados Unidos muestran cómo el prestigio y la circulación del conocimiento responden también a factores axiológicos, políticos y contextuales. Esta perspectiva resulta coherente con el enfoque de la naturaleza de la ciencia entendida como un sistema epistémico, social e institucional. Las narrativas construidas sobre los casos

de Benga y Agre se constituyen como plataformas robustas para sostener y complejizar diferentes modelos e ideas en los campos de formación disciplinar y metacientífica del profesorado.

Por su parte, el diseño de la UD basada en la modelización y los diferentes momentos por los cuales esta transcurre deviene en "corredor conceptual" para favorecer una formación docente que integra la modelización disciplinar con la reflexión epistemológica y axiológica, contribuyendo de este modo a la construcción de una visión de ciencia dinámica, compleja y situada, imprescindible para formar profesorado crítico y comprometido con una enseñanza reflexiva y contextualizada.

7. Contribución de autores

Autor 1: investigación, metodología, conceptualización, redacción, borrador original. Autor 2: conceptualización, revisión, edición.

8. Declaración de fuentes de financiación

Este estudio no recibió apoyo financiero de ninguna institución ni agencia de financiación.

9. Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la preparación de este trabajo, los autores no utilizaron herramientas de inteligencia artificial.

10. Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con la publicación de este artículo.

11. Referencias

Adúriz-Bravo, A. (2005). *Una introducción a la naturaleza de la ciencia. La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales*. Fondo Editorial Económico.

Adúriz-Bravo, A. (2010). Aproximaciones histórico - epistemológicas para la enseñanza de conceptos disciplinares. *EDUCyT,* 1(1). https://share.google/QGGSpKpSLPpbkRFUX

Adúriz-Bravo, A. (2012) Semantic view of scientific models for science education. *Science & Education*, 22(7), 1593-1611, 2012. https://link.springer.com/article/10.1007/s11191-011-9431-7

Adúriz-Bravo, A. (2015). Pensamiento "basado en modelos" en la enseñanza de las Ciencias Naturales. *Revista Del Instituto De Investigaciones En Educación*, 6, 20–31. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/59628

Agre, P. (2003) *Aquaporine wáter channels* Nobel Lecture. https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2003/agre/lecture/

Albarracín Teulón, A. (1983). *La teoría celular*. Alianza Editorial.

Álvarez Soria, J. (2025). *La modelización del origen de la célula eucariota. Integración disciplinar y metacientífica en la formación del profesorado en Biología*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/13446

Álvarez Soria , J., & Lozano, E. (2023). La modelización del origen de la célula eucariota en la formación del profesorado en biología. Aspectos vinculados a una visión gradualista. *Bio-grafía*. Número Extraordinario, 1191-1202 https://revistas.upn.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/18167

Campbell N. & Reece J. (2007) *Biología*. Editorial Médica Panamericana

Bahamonde, N., Cremer, C., Mut, P. & Lozano, E. (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*. 47, 145-161. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3480

Benga, Gh. & Morariu, V. V. (1977) Membrane defect affecting water permeability in human epilepsy. *Nature* 265, 636–638. https://www.nature.com/articles/265636a0

Benga, Gh., Popescu, O., Borza, V., Pop, V., Muresan, A., Mocsy, I., Brain, A., & Wrigglesworth, J. (1986) Water permeability of human erythrocytes. Identification of membrane proteins involved in water transport. *European Journal Cell Biology*, 41, 252–262. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3019699/

Benga, G. (2003) Birth of water channel proteins-the aquaporins. *Cell Biology International* 27(9), 701-709. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1065699503001719

Benga, G. (2006) Petition for the recognition of Gheorghe Benga, as a discoverer of the first water channel protein in the human red blood cell membrane, several years before. *Biomed Rev* 17, 9-11 https://journals.mu-varna.bg/index.php/bmr/article/view/77/77

Benga, G. (2009) Water Channel Proteins (Later Called Aquaporins) and Relatives: Past, Present, and Future. *Life*, 61(2), 112–133. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19165894/

Danielli, J. y Davson, H. (1935). A contribution to the theory of permeability of thin films. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, 5(4), 495–508. https://doi.org/10.1002/jcp.1030050406

Echeverría, J. (1998) *Filosofía de la ciencia*. Akal

García, J. y Parada, N. (2017) La razón sensible en la educación científica: las potencialidades del teatro para la enseñanza de las ciencias. *Zona Próxima* 26, 114-139, https://www.redalyc.org/journal/853/85352029008/html/

Giere, R. (1999) Del realismo constructivo al realismo perspectivo. *Enseñanza de las ciencias. Número Extra.* https://es.scribd.com/document/742980311/Del-Realismo-Constructivo-Al-Giere

Gorter, E., y Grendel, F. (1925). On bimolecular layers of lipoids on the chromocytes of the blood. *Journal of Experimental Medicine*, 41(4), 439–443. https://doi.org/10.1084/jem.41.4.439

Irzik, G., & Nola, R. (2010) A Family Resemblance Approach to the Nature of Science for Science Education. *Science & Education* 20(7), 591-607 https://doi.org/10.1007/s11191-010-9293-4

Izquierdo-Aymerich, M., Espinet, M., García, M., Pujol, M., & Sanmartí, N. (1999) Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, 79-92, Número extra).

Izquierdo-Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2003) Epistemological foundation of school science. *Science & Education*, 12, 27–43. https://doi.org/10.1023/A:1022698205904

Kuchel P. (2006) The story of the discovery of aquaporins: convergent evolution of ideas--but who got there first? *Cellular and molecular biology*, 30;52(7): 2-5. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17543213/

Kuhn, T. S. (2006) La estructura de las revoluciones científicas. (3° Ed.) Fondo de Cultura Económica. Original en inglés de 1962.

Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & 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. https://doi.org/10.1002/tea.10034

Lozano, E., Bahamonde, N. y Adúriz-Bravo (2016) Análisis histórico-epistemológico sobre los modelos de membrana celular para enseñar biología celular y naturaleza de la ciencia al profesorado. *Filosofia e História da Biologia*, 11(1), 49-68. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3411

Lozano, E., Aduriz-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*; 26, 1-15. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/5569

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. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3476

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. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/6742

Lozano, E., Cremer, M., Mut, P., 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), 78-90. https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/15690

Lozano, E., Bahamonde, N., Dillon, L., Cremer, C., Henríquez, A., Álvarez Soria, J., & 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), 1-17. https://doi.org/10.59524/2344-9225.v27.n2.44726

Ling, G. (2007) History of the membrane (pump) theory of the living cell from its beginning in mid-19th century to its disproof 45 years ago--though still taught worldwide today as established truth. *Physiol Chem Phys Med NMR*, 39(1), 1-67. http://www.physiologicalchemistryandphysics.com/pdf/PCP39-1_ling.pdf

Matthews, M. R. (2017). *La enseñanza de la ciencia: un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica.

Orlandini, M.L., Lozano, E. y Adúriz-Bravo, A. (2025a). Enseñar ciencias a través de procesos de modelización en el profesorado de Educación Infantil. En J. Cantó y F. Ostermann (Coords.), *Actas electrónicas del XII Congreso Internacional en Investigación en Didáctica de las Ciencias 2025. Enseñanza de las ciencias y pensamiento crítico: desafíos y necesidades de la sociedad democrática 2025.* (pp. 2331-2334). Editorial Revista Enseñanza de las Ciencias. https://congresoenseciencias.org/wp-content/uploads/2025/09/Libro_Actas_12CIIDC.pdf

Orlandini, M.L., Lozano, E. y Adúriz-Bravo, A. (2025b). Naturaleza de la ciencia en Unidades Didácticas integradoras en el profesorado de Educación Infantil. En J. Cantó y F. Ostermann (Coords.), *Actas electrónicas del XII Congreso Internacional en Investigación en Didáctica de las Ciencias 2025. Enseñanza de las ciencias y pensamiento crítico: desafíos y necesidades de la sociedad democrática 2025.* (pp. 910-913). Editorial Revista Enseñanza de las Ciencias. https://congresoenseciencias.org/wp-content/uploads/2025/09/Libro_Actas_12CIIDC.pdf

Overton, E. (1897) Ueber die osmotischen Eigenschaften der Zelle in ihrer Bedeutung für die Toxikologie und Pharmakologie *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 22(1), 189-209. https://ngzh.ch/wp-content/uploads/2024/07/41_46.pdf

Paganelli, C. y Solomon, A. (1957) The rate of exchange of tritiated water across the human red cell membrane. *The Journal of General Physiology*, 41(2) 259-277 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2194835/

Preston, G. M., Carroll, T. P., Guggino, W. B., & Agre, P. (1992). Appearance of water channels in Xenopus oocytes expressing red cell CHIP28 protein. *Science*, 256(5055), 385-387. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1373524/

Reigeluth, C. (1999) *Diseño de la instrucción: teorías y modelos: un nuevo paradigma de la teoría de la instrucción*. Santillana.

Sanmartí, N. (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*. Síntesis.

Sans Pinillos, A.; Adúriz-Bravo, A. (2022) Lectura epistemológica de la historia de la ciencia en los "descubrimientos": explicación y abducción en la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 15(2), 570-594. https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/816/632

Sidel V. y Solomon, A. (1957). Entrance of water into human red cells under an osmotic pressure gradient. *The Journal of General Physiology*. 41: 243-257. https://www.researchgate.net/publication/10090170_Entrance_of_water_into_human_red_cells_under_an_osmotic_gradient

Stein, W. y Danielli J. (1956) Structure and function in red cell permeability. *Discuss Faraday Soc.*, 21, 238–251. https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1956/df/df9562100238

Singer, S. J., y Nicolson, G. L. (1972). The fluid mosaic model of the structure of cell membranes. *Science*, 175(4023), 720–731. https://doi.org/10.1126/science.175.4023.720

Solomon, A., Chasan, B., Dix, J., Lukacovic, J., Toon, M. y Verkman, A. (1983) The aqueous pore in the red cell membrane: band 3 as a channel for anions, cations, nonelectrolytes, and water. *Ann. New York Acad. Sci.*, 414, 97–124, https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1983.tb31678.x.

Vistarop, V. (2023). Una perspectiva modelizadora para enseñar Histología en la carrera de Medicina Veterinaria. Trabajo Final de posgrado. Universidad Nacional de Río Negro. https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/11226

Traube, M. 1867. Experimente zur Theorie der Zellenbildung und Endosmose. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin*, 87-165. https://numerabilis.u-paris.fr/medica/bibliotheque-numerique/resultats/index.php?do=livre&cote=epo1182

Träuble, H (1971) Movement of Molecules Across Lipid Membranes: A Molecular Theory Membrane. *Journal Membrane Biology*. 4, 193-208. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02431971