



## Artículo Original / Original Article

### Extracción de ADN como estrategia didáctica para aprender sobre la célula en Educación Primaria y Secundaria

### DNA extraction as a didactic strategy to learn about the cell in primary and secondary education

Arana-Cuenca, A.; Curto Prieto, M.; Rodríguez Díez, E.; Ransanz Reyes, E.

Facultad de Educación, Universidad Internacional de La Rioja

Email correspondencia: [ainhoa.arana@unir.net](mailto:ainhoa.arana@unir.net)

**Cronograma editorial:** *Artículo recibido 18/09/2023 Aceptado: 07/11/2023 Publicado: 01/01/2024*

#### Para citar este artículo utilice la siguiente referencia:

Arana-Cuenca, A., Curto, M., Rodríguez, E., Ransanz, E. (2024). Extracción de ADN como estrategia didáctica para aprender sobre la célula en Educación Primaria y Secundaria. *EDUCA International Journal*, Vol. 4 (1) 36-60. <https://doi.org/10.55040/educa.v4i1.79>

**Contribución específica de los autores:** Todos los autores han aportado su contribución para la redacción del artículo.

**Financiación:** No existió financiación para este proyecto.

**Consentimiento informado participantes del estudio:** Dada la naturaleza del estudio se optó por un Consentimiento pasivo en la introducción del cuestionario online.

**Conflicto de interés:** Los autores no señalan ningún conflicto de interés.



## Resumen

La sociedad actual está ampliamente influenciada por los grandes adelantos científicos y tecnológicos que se han desarrollado desde el siglo pasado. Esto implica que la ciudadanía se enfrenta diariamente a situaciones problemáticas que requieren la puesta en marcha de competencias científicas, estableciendo la importancia del desarrollo de la alfabetización científica, que permite la reflexión, el razonamiento y el establecimiento de conexiones para resolverlas de manera satisfactoria. En este sentido, los trabajos de tipo práctico suponen una herramienta óptima en las aulas, puesto que sitúan al alumnado en el centro del proceso de enseñanza-aprendizaje, buscando soluciones a hechos que forman parte de su vida cotidiana mediante la observación y la manipulación, transformándolos en hechos científicos escolares y adquiriendo así nuevos conocimientos. Por todo ello, en este trabajo se analiza una experiencia práctica: la extracción de ADN. A tal efecto, se presenta la estructura de ADN, se analizan los pasos que suelen llevarse a cabo en cualquier proceso de extracción de esta macromolécula y se diseña una propuesta para Educación Primaria y otra para Educación Secundaria Obligatoria en las que los estudiantes extraen ADN de material cotidiano y adquieren conocimientos sobre su estructura siguiendo el método científico. Como resultados, ambas propuestas han sido validadas a través de un juicio de expertos destacando que son innovadoras y atractivas para los alumnos. Como conclusión se recomienda implementar las propuestas, así como tener en cuenta el tiempo necesario para su desarrollo y la importancia del número de alumnos presentes en el aula.

**Palabras clave:** ADN, célula, competencia científica, trabajos prácticos, educación primaria, Educación Secundaria.

## Abstract

Today's society is widely influenced by the great scientific and technological advances that have been developed since the last century. This implies that citizens face in their daily problematic situations that require the implementation of scientific skills, establishing the importance of the development of scientific literacy, which allows reflection, reasoning and the establishment of connections to solve them satisfactorily. In this sense, practical work is an optimal tool in the classroom, since they place students at the center of the teaching-learning process, seeking solutions to facts that are part of their daily lives through observation and manipulation, transforming them into school scientific facts and thus acquiring new knowledge. Therefore, this work analyzes a practical experience: DNA extraction. To this end, the structure of DNA is presented, the steps that are usually carried out in any process of extraction of this macromolecule are analyzed and a proposal is designed for Primary Education and another for Compulsory Secondary Education in which students extract DNA from everyday material and acquire knowledge about its structure following the scientific method. As results, both proposals have been validated through an expert judgment, highlighting that they are innovative and attractive to students. In conclusion, it is recommended to implement the proposals as well as to take into account the time needed for their development and the importance of the number of students present in the classroom.

**Keywords:** DNA, cell, scientific competence, practical work, primary education, secondary education



## 1. Introducción

Los diseños de instrucción en los que la práctica apoya la adquisición de los conocimientos teóricos permiten desarrollar de forma plena las competencias en los discentes, aumentando, a su vez, el interés, la motivación y la posibilidad de transferir el conocimiento a contextos distintos del aula por parte de los alumnos (Ford, 2015). La experimentación en el campo de las ciencias es un elemento imprescindible como catalizadora de destrezas como el razonamiento hipotético deductivo, el análisis crítico o la argumentación. Transformar las aulas en laboratorios en los que se puedan abordar problemas científicos reales que puedan combinar la disonancia cognitiva, la operatividad de las secuencias pedagógicas y la significatividad del proceso de enseñanza-aprendizaje es requisito imprescindible, como apunta la Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación (LOMLOE) en su artículo único respecto a la modificación de los principios pedagógicos de las etapas de Primaria, Secundaria y Bachillerato.

Las ciencias constituyen una vía destacada para el desarrollo de habilidades cognitivas y no cognitivas requeridas por la sociedad y la economía actuales, gracias a su riqueza semántica y la interdisciplinariedad de sus marcos conceptuales maneja una amplia modalidad de conocimientos y una presencia de situaciones de aprendizaje relacionadas con la interdependencia positiva asociadas a su naturaleza investigadora (López et al., 2019).

Son muchos los estudios internacionales, entre los que se encuentran el Programa para la Evaluación Internacional de los Alumnos o el Estudio Internacional de Tendencias en Matemáticas y Ciencias (OCDE, 2018; TIMSS, 2019), que ponen en evidencia la necesidad de dar una respuesta a las bajas puntuaciones que en España se registran, frente a las medias del resto de países de la Unión Europea, respecto a las variables relacionadas con el rendimiento en ciencias, las concepciones epistémicas y las vocaciones STEAM (acrónimo en inglés de *Science, Technology, Engineering, Art y Mathematics*). Sobre todo, en la etapa de la Educación Secundaria, los resultados arrojan un factor diferencial en los itinerarios vocacionales del alumnado que les alejan de elecciones científicas y que, además, incide en la brecha que en materia de género se observa en la elección de las asignaturas STEAM, lo que da como resultado una estereotipación de las vocaciones del género femenino. Creemos que es importante intervenir y aplicar los recursos necesarios para prevenir dicho distanciamiento, pero no solo en el segundo ciclo de Educación Secundaria Obligatoria, tal y como apuntan



estudios como los de Mosterio y Porto (2017) o López et al. (2019), sino también en el tramo de Educación Primaria, dada la escasa oferta de actividades científicas que ofrece la escuela frente a la gran curiosidad científica que presenta el alumnado (Valero y Coca, 2021).

Una apuesta por el diseño metodológico que produzca situaciones de aprendizaje variadas en un aula de STEAM podría conducir a una variedad de caminos de pensamiento, a una mejor percepción de la autoeficacia y a una mayor diversificación de las opciones de estrategias en la resolución de problemas (Christensen et al. 2014; Vivien et al., 2017). En este sentido, un estudiante con una actitud de aprendizaje positiva en biología investigará meticulosamente un problema del mundo real mediante la aplicación del método científico, sin dejar de lado los aspectos matemáticos o tecnológicos del problema, pero, para ello, el docente debe involucrar a los estudiantes en actividades de resolución de problemas y ayudarles a mejorar su comprensión de cómo se puede aplicar el conocimiento STEAM al diseño e implementación de sus soluciones conceptuales (Varelas et al., 2022).

Respecto a los motivos que pueden estar asociados a la elección vocacional en materia STEAM, los resultados extraídos por investigaciones recientes (Anwar et al., 2022; Chiang, et al., 2022) muestran la diversidad de variables que influyen en la elección del futuro profesional (familiares, sociales, económicas y políticas, entre otras). Con relación al proceso de enseñanza aprendizaje los factores que influyen positivamente en la vinculación de los alumnos a las disciplinas científicas dependen en gran medida de la formación y la motivación del profesorado (Kurup et al., 2019) y, con una alta correlación, las competencias docentes a la hora de reducir la dificultad de la comprensión de la materia y el acercamiento de los contenidos a la realidad cotidiana (Muñoz-Campos et al., 2020). Por otro lado, las habilidades relacionadas con la cooperación, la creatividad o las referidas al ámbito científico tecnológico superan los límites de las diferentes disciplinas, por lo que se hace necesario un diseño de instrucción que rebase estos límites con la finalidad de favorecer la formación de estudiantes que se adapten a los cambios constantes de la sociedad en la que viven (Eronen et al., 2019).

Por todo lo anteriormente mencionado, se cree necesario el diseño de propuestas pedagógicas, experiencias de aprendizaje y materiales didácticos que favorezcan la comprensión de los contenidos curriculares y los acerquen a la realidad cotidiana del alumnado. Por este motivo, la propuesta que se presenta en el presente artículo puede hacer que el tema de la estructura del ADN y su extracción a partir de materiales cotidianos se convierta en una



práctica educativa de utilidad para los docentes y de gran interés para los discentes, haciendo que el proceso de enseñanza-aprendizaje incluya pequeñas investigaciones en las que el protagonismo de los alumnos está relacionado con la búsqueda de respuestas guiados por el método científico a partir del planteamiento y resolución de problemas bajo la supervisión del docente (Esteban et al., 2019). Las situaciones de aprendizaje que parten de metodologías operativas y participativas despiertan el interés de los estudiantes, comprometiéndoles en las tareas a desarrollar (Johnson y Malinowski, 2001), permiten que aprendan de los conflictos cognitivos que presentan las situaciones problemáticas a resolver, ofrecen la posibilidad de involucrarse en la tarea y de encontrar una utilidad práctica con resultados palpables (Anwar et al., 2022) incluso se ha reportado que la implementación de proyectos basados en el método científico mejora el aprendizaje y genera emociones positivas en el estudiantado de Educación Primaria (Arana-Cuenca, et al., 2023).

## **2. Fundamentación teórica**

### **2.1 Estructura del ADN**

El ácido desoxirribonucleico es un tipo de ácido nucleico que contiene la información genética de los organismos vivos conocidos y de algunos virus, y es responsable de su transmisión hereditaria.

En cuanto a las características fisicoquímicas de la molécula de ADN, está constituida por dos polímeros unidos entre sí por enlaces de puentes de hidrógeno y enrollados en lo que se conoce con el nombre de doble hélice. Cada polímero está formado por subunidades denominadas nucleótidos, que se enlazan covalentemente formando las cadenas y codificando la información genética. Cada nucleótido está compuesto por un compuesto de fósforo (fosfato), un azúcar de 5 carbonos simples (desoxirribosa) y una base nitrogenada (adenina, timina, citosina o guanina). La Adenina se aparea con la Timina mediante dos puentes de hidrógeno, y la Citocina con Guanina mediante tres.

Los genes son las secuencias de ADN que constituyen la unidad fundamental, física y funcional de la herencia. Su información se utiliza para que tengan lugar los procesos de transcripción (generar ARN) y transcripción (generar proteínas). En el interior de las células, el ADN se organiza en estructuras denominadas cromosomas que se duplican antes de que la célula se divida durante el ciclo celular.



A lo largo del siglo XIX, se realizaron diferentes investigaciones que pretendían establecer la importancia del núcleo de la célula. Fue en el año 1882, cuando Fleming observó la cromatina dentro del núcleo celular y cómo los cromosomas se dividían durante el proceso de mitosis (O'Connor y Miko, 2008).

El médico suizo Friedrich Miescher aisló por primera vez el ADN en el año 1869, caracterizando químicamente el precipitado de una sustancia desconocida que aparecía en el pus de vendas quirúrgicas desechadas cuando analizaba la composición química de las mismas (Miescher, 1869). Esta sustancia fue denominada nucleína por haber sido extraída de núcleos celulares. No fue hasta 1930 cuando Levene y Kossel determinaron que la nucleína se trataba de un ácido desoxirribonucleico constituido por cuatro bases nitrogenadas, desoxirribosa y un grupo fosfato. Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty extrajeron el principio transformante en 1944 y comprobaron que estaba constituido por ADN mediante análisis químicos, enzimáticos y serológicos (Avery et. Al, 1944).

El papel del ADN en la heredabilidad fue confirmado en 1952 gracias a los experimentos con isótopos radiactivos llevados a cabo por Alfred Hershey y Martha Chase. En ellos, pudieron comprobar como el bacteriófago T2 transmitía su información genética en su ADN y no en su proteína. A la hora de infectar a una bacteria, el fago se une a la membrana externa de la bacteria a través de su cubierta proteica e inyecta su material hereditario, que es multiplicado por el sistema genético de la bacteria (Hershey y Chase, 1952).

Los experimentos realizados por Chargaff en 1940 permitieron establecer las proporciones de las bases nitrogenadas del ADN, y junto con los datos obtenidos mediante difracción de rayos X realizados por Rosalind Franklin, James Watson y Francis Crick, se pudo establecer en el año 1953 el modelo de la doble hélice del ADN (Figura 1) para su representación tridimensional (Watson y Crick, 1953; Franklin y Gosling, 1953). En la actualidad, es conocido que gracias a los experimentos de Rosalind Franklin, Watson y Crick pudieron llegar a sus conclusiones sobre la estructura en doble hélice del ADN sin consentimiento por su parte, siendo una de los casos más famosos de discriminación negativa hacia las mujeres.

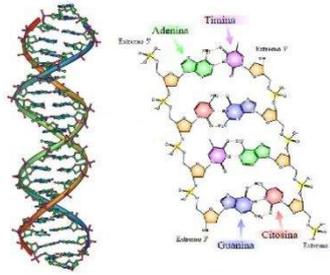


Figura 1. Estructura de ADN (Licencia Creative Commons)

La mayoría de las células poseen estas macromoléculas en su interior, pero dependiendo del tipo de célula que se trabaje podremos encontrarlo en el citoplasma (células procariontas) o en el núcleo (células eucariotas; Figura 2). En cualquier caso, será importante conocer qué tipo de célula se está trabajando y cómo se puede lisis para liberar el ADN de su interior ya que, no será lo mismo trabajar con células animales que con células vegetales o fúngicas que poseen una pared celular que la protege de la lisis osmótica. Asimismo, no será posible extraer ADN de glóbulos rojos al carecer de dichos orgánulos como producto de la diferenciación celular en la médula ósea (Marcos-Merino et al, 2019).

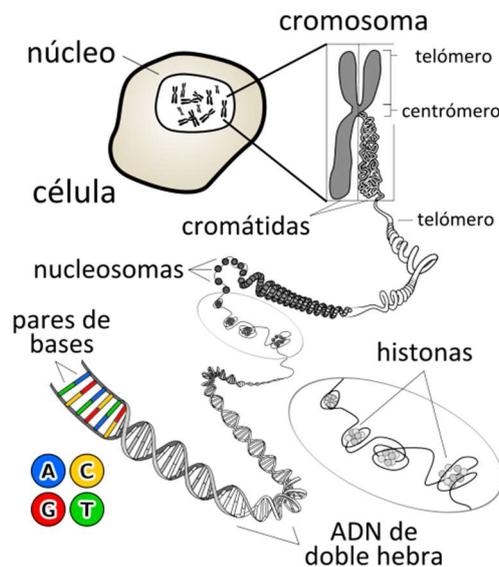


Figura 2. ADN en células eucariotas (Licencia Creative Commons)

Por lo tanto, para poder realizar una extracción de ADN efectiva y entender en qué consiste la tecnología, es importante conocer cuáles son los pasos que se utilizan en su protocolo y la función de cada uno de ellos.

## 2.2 Pasos en la extracción del ADN



La extracción y purificación de ADN representa la etapa inicial de casi todas las técnicas moleculares que se utilizan en los laboratorios. Para obtener un ADN libre de impurezas e inhibidores, características fundamentales para el éxito en la obtención de datos genéticos confiables, se debe comprender primero para qué se realizan los pasos establecidos en el aislamiento de ADN, tanto de muestras de procarionta como eucariota. Esta información, nos parece fundamental para que los alumnos puedan conectar la experiencia práctica con los conceptos biológicos y así obtener un aprendizaje significativo.

La extracción de las moléculas de ADN, es decir, su aislamiento y purificación, está basada en las características fisicoquímicas de la molécula. A modo de resumen y para comprender, es importante mencionar ciertos aspectos. Como se ha comentado anteriormente, el ADN se encuentra en el interior de las células por lo que será fundamental la lisis de las mismas, por lo tanto, es importante conocer si poseen pared celular, de qué tipo y cómo se puede disolver la membrana plasmática y, en caso de ser una célula eucariota, la membrana nuclear (Marcos-Merino et al., 2019). Por otra parte, el ADN tiene una carga neta negativa (gracias a los grupos fosfato) y esto hace que sea una molécula altamente polar. Estas cargas negativas tienden a repelerse, razón por la que el ADN puede disolverse en soluciones acuosas, quedando la molécula rodeada por una capa hidratante. Cuando se añade etanol, esta capa se rompe y los grupos fosfato quedan expuestos. De esta forma se favorece la unión con cationes como el  $\text{Na}^+$ , reduciendo las fuerzas de repulsión entre las dos cadenas de nucleótidos y permiten que el ADN precipite (Sambrook et al., 1989). Además, la carga negativa del ADN puede favorecer que se una a matrices inorgánicas con carga positiva (Sambrook et al., 1989), esto es el principio que emplean muchos kits de extracción de ADN, aunque también se puede realizar una extracción de manera tradicional. Los pasos, junto con su explicación, de un protocolo típico, serían los siguientes:

### 2.2.1 Recolección de las muestras

Las muestras de las cuales podemos extraer ADN pueden ser de origen vírico, procarionta o eucariota: animal, vegetal o fúngico. Nos vamos a centrar en los dos tipos celulares más estudiados en la etapa de Educación Primaria: célula vegetal y animal.

*Origen vegetal:* podemos recolectar muestras de tomate, hojas, cebolla... En el caso de hojas, se recomienda que sean jóvenes, así contienen más células por unidad de peso y menos



polisacáridos y polifenoles que dificultan la extracción. Si la muestra no se va a usar inmediatamente, debe congelarse en nitrógeno líquido.

*Origen animal:* Podemos emplear diversos tejidos, donde siempre hay que cortarlo en trozos pequeños (aproximadamente 0.5 x 0.5 cm o menores) para facilitar su homogeneización posterior. Estas muestras pueden ser deshidratadas con etanol al 70% (aunque esta opción puede degradar el ADN o incluir contaminantes), congeladas con nitrógeno líquido o mezcladas con una solución de lisis que tenga sales de guanidina o  $\beta$ -mercaptoetanol que inhiben las enzimas que degradan el ADN conocidas como: DNasas y RNasas.

### 2.2.2 Homogeneización del tejido

Puede ser mecánica o química. Este proceso consiste en romper las uniones entre las células para facilitar la interacción con las soluciones de lisis que ayudan a liberar el material genético.

#### *Homogeneización mecánica.*

Para la homogeneización mecánica se pueden utilizar diferentes procedimientos:

**Nitrógeno líquido:** para ello se emplea un mortero de porcelana y se macera la muestra con nitrógeno líquido, hasta obtener un polvo muy fino. Este procedimiento se utiliza porque el nitrógeno líquido congela inmediatamente las muestras y no se forman cristales que puedan romper las estructuras celulares e inicie el proceso de degradación. Un ejemplo serían los lisosomas, orgánulos celulares que contienen enzimas digestivas como las DNasas y RNasas anteriormente mencionadas.

**Homogeneizadores:** la muestra se disgrega mediante fricción con la pared del tubo que contiene la muestra. Se puede realizar manualmente o con ayuda de dispositivos electrónicos (homogeneizadoras). Se debe añadir un poco del buffer de lisis antes para que se desnaturalicen las proteínas y el ADN se mantenga estable. Es importante realizar todo esto sobre hielo para evitar roturas en el ADN. Este método, en general, se recomienda para muestras pequeñas y tejidos blandos. No es recomendable utilizar este método con tejidos congelados, porque las células del interior del tejido se descongelan antes de entrar en contacto con la solución de lisis y el ADN se fragmenta por acción de las DNasas. Para este último caso, mejor una disgregación previa con nitrógeno líquido.



### *Homogeneización química.*

La muestra se mantiene en soluciones con detergentes, agentes caotrópicos y proteasas, a altas temperaturas, para romper las uniones entre las células o que incluso perforar la membrana celular. La disgregación química es recomendable para muestras pequeñas, bacterias, de tejidos frescos o sangre. Si tenemos tejidos fibrosos, previamente debemos cortarlo en fragmentos más pequeños para favorecer su disgregación.

#### 2.2.3 Lisis celular

El objetivo con este paso es el de liberar los ácidos nucleicos (ADN), para ello, se deben destruir (o modificar) las interacciones entre las moléculas que forman la membrana plasmática y nuclear (y en el caso de las células de origen vegetal, la pared celular también). Para ello, se emplean soluciones básicas, detergentes o agentes caotrópicos que permiten disolver dichas membranas, junto con inhibidores que inactiven las enzimas que degradan el ADN. Es por ello que muchas soluciones de lisis contienen también EDTA, que forma un complejo con los iones de  $Mg^{2+}$  e impide el funcionamiento de las DNAsas (Sambrook et al., 1989). En el caso de tener centrífuga, se puede emplear para separar del ADN los componentes celulares no solubles como el material fibroso y proteínas que permanecen en solución.

#### 2.2.4 Separación de proteínas y lípidos

Como se ha comentado previamente, los grupos fosfato del ADN tienen una fuerte tendencia hidrofílica, y esto es lo que se va a emplear para separarlos en medios acuosos. Por otro lado, las proteínas y los lípidos se van a separar empleando solventes orgánicos (Sambrook et al., 1989). Algunos ejemplos de solventes orgánicos empleados en los laboratorios serían el fenol, el cloroformo y el alcohol isoamílico (Stulnig y Amberger, 1994). Para que se pueda aislar el ADN, el cual está disuelto en la fase acuosa, debemos, si es posible, centrifugar la muestra y eliminar los reactivos orgánicos, es decir, quedarnos con la fase acuosa.

#### 2.2.5 Precipitación del ADN

Una vez se han eliminado los lípidos y las proteínas, se recupera el ADN. Para hacer esto, añadimos etanol y soluciones que tengan una elevada concentración de iones sodio o amonio, que se unirán a los grupos fosfato. Lo que está ocurriendo, es una disminución de las



fuerzas repulsivas entre las cadenas, para que el ADN pueda plegarse sobre sí mismo y que así sea insoluble y precipite (Marcos-Merino et al, 2019). Si a esto añadimos un paso de centrifugación, el ADN quedaría en el fondo del tubo y el etanol sería eliminado. Para conseguir eliminar los restos, se pueden hacer varios lavados con etanol 70% y posteriormente dejar que la muestra se evapore. Así tendríamos el ADN limpio en el fondo del tubo.

### 2.2.6 Redisolución del ADN

Una vez tenemos el ADN sin etanol, para hidratarlo de nuevo, hay varias opciones. Si empleamos agua, el pH debe ser de 7, así evitamos una hidrólisis ácida. También podemos emplear una solución amortiguadora y así almacenar la muestra (puede ser Tris-HCl a 10mM y EDTA a 0'1M, pH 8). Para evitar fragmentar el ADN, la redisolución no debe de ser agresiva, una buena forma de hacerlo sería con calor (55°C) y agitación suave durante 1 o 2h.

Este protocolo de extracción de ADN se puede simplificar para su utilización en las aulas escolares, siempre y cuando se tenga en cuenta que el ácido nucleico obtenido no podría ser utilizado para posteriores estudios genéticos como ocurre en los laboratorios científicos. Así, la utilización del detergente sirve para ayudar en la disolución de las membranas y la inhibición de las DNAsas anteriormente mencionadas. Por su parte, la adición de sal permite una lisis osmótica y tener la concentración de  $\text{Na}^+$  adecuada para la posterior precipitación del ADN cuando se añade el alcohol (Marcos-Merino et al., 2019).

El objetivo de la presente investigación es validar el diseño de experiencias didácticas basadas en la extracción de ADN, para alumnos de Educación Primaria y Educación Secundaria, donde se aplique el método científico, con la finalidad de que los discentes mejoren su conocimiento sobre la célula, así como su competencia científica.

## 3. Metodología

A continuación, se presentan dos propuestas didácticas para trabajar contenidos de Ciencias Naturales en el aula de Educación Primaria y Educación Secundaria bajo la nueva legislación española, la Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, conocida como LOMLOE. Ambas propuestas, tienen un protocolo de extracción de ADN similar, donde se utilizan reactivos fácilmente accesibles como son sal común, detergente, zumo de piña y alcohol 96°,

con la intención de que pueda llevarse a cabo en cualquier contexto educativo. En ambos casos, se obtiene una cantidad de ADN con suficiente calidad como para ser observables a simple vista, tal y como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Madeja de ADN resultado de una correcta extracción (Elaboración propia)

Es importante resaltar, que el diseño de las intervenciones está realizado con material que permita su implementación en cualquier centro educativo, independientemente de que posea un laboratorio escolar. No obstante, si se cuenta con dicho espacio, sería una oportunidad para introducir al alumnado en el conocimiento del material de laboratorio básico como pipetas Erlenmeyer, probetas, vasos de precipitados, etc. Así mismo, proponemos la posibilidad de utilizar vasos de vidrio en lugar de plásticos para minimizar el impacto ecológico

### 3.1 Propuesta de intervención para alumnos de Educación Primaria

La secuencia didáctica se ha diseñado para su implementación en el Tercer Ciclo de Educación Primaria y se ha desarrollado en base a los lineamientos descritos en el Real Decreto 157/2022, de 1 de marzo. Dependiendo de la Comunidad Autónoma donde se realice la propuesta, habrá que hacer ligeras modificaciones según la legislación educativa correspondiente. Todos los detalles están disponibles en: [Propuesta de intervención ADN Educación Primaria.](#)

Se propone su implementación en el Área de Conocimiento de Medio Natural, Social y Cultural, probablemente dividido en Ciencias Naturales. Atendiendo a la propuesta realizada por Fay et al. (2007), se elige el Nivel 1 de indagación, donde se proporciona el problema y el procedimiento al estudiante y este interpreta los datos para proponer soluciones viables.



Así, a partir de la pregunta ¿Podemos ver nuestro ADN? se pretende generar interés en el alumnado utilizando una metodología activa donde se desarrolle el espíritu crítico y reflexivo. La actividad se desarrolla en un total de 3 sesiones, de 50 minutos cada una, donde se abordarán Saberes Básicos correspondientes a La Iniciación en la actividad científica, La vida en nuestro planeta y Materia, fuerza y energía. Trabajando, con ello, tres de las competencias específicas del área mencionada.

En la primera sesión, se plantea la pregunta y se realiza una lluvia de ideas para detectar los conocimientos previos de los estudiantes. En equipos cooperativos, se les solicita que respondan tres cuestiones iniciales: qué es el ADN, dibujar una célula eucariota animal, indicando cada una de sus partes y marcando dónde se encuentra el ADN y si queremos ver el ADN, proponer qué se debería hacer.

En la segunda sesión, se facilita el protocolo de extracción de ADN, cuyos resultados se pueden observar en la Figura 4.

1. Rellena un vaso de plástico con 50 ml de agua. Si no lo puedes medir, rellena aproximadamente un tercio de su volumen. Añade 15 g de sal; si no lo puedes pesar, equivale a 1 cucharada sopera o 3 cucharilla de café. Remuévelo bien con la cucharilla.
2. Toma un buen sorbo del agua con sal y haz con él un enjuague bucal durante, al menos, 1 minuto ¡Tú puedes!
3. Escúpelo en un vaso limpio.
4. Añade una gota del detergente líquido y remuévelo. Es muy importante que no lo hagas con la cucharilla, si no moviendo el vaso en círculos para que no se formen burbujas.
5. En otro vaso limpio, añade tanto alcohol 96° como volumen tengas de la solución con el detergente.
6. Añade el alcohol que has medido al vaso anterior, echándolo con mucho cuidado por las paredes porque recuerda que es importante que no se formen burbujas.
7. ¿Ves que se forman dos fases? Observa atentamente entre ellas ¿Se forman unos hilos blancos? ¡Ahí lo tienes! Si quieres, puedes enrollarlo con un palillo para que lo veas mejor.

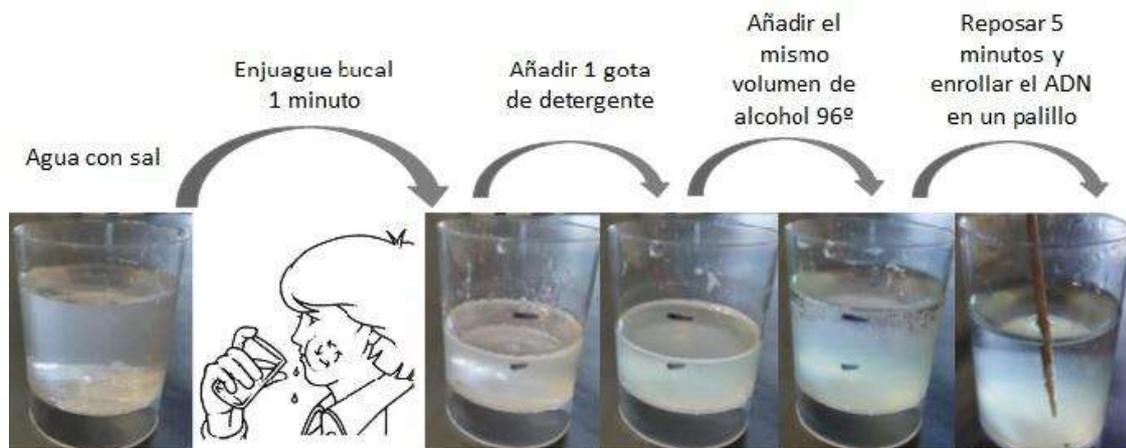


Figura 4. Pasos de la extracción de ADN propuesta para Educación Primaria (Elaboración propia)

En la tercera sesión, se plantean una serie de cuestiones como reflexión final que fomenten el espíritu crítico y reflexivo de los estudiantes como: describir, con vuestras propias palabras, cómo se ha realizado la extracción; indicar la función de cada reactivo, dibujar cómo creen que ha quedado la célula al finalizar cada paso o definir si consideran que hay alguna diferencia si la extracción se hubiera realizado con una célula vegetal.

Se propone una evaluación global, a través de una lista de cotejo para el trabajo experimental, una rúbrica para el trabajo por escrito y una auto, co y heteroevaluación de la participación en el trabajo en equipo, cuyos instrumentos están diseñados en la propuesta completa.

### 3.2 Propuesta de intervención para alumnos de Educación Secundaria

En este caso, se ha diseñado bajo los lineamientos del Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, para su implementación en la asignatura de Biología y Geología, en 4º grado de Educación Secundaria. Del mismo modo, sería necesario realizar las modificaciones correspondientes a los lineamientos específicos de la Comunidad Autónoma donde se realice la propuesta. La secuencia completa está disponible en: [Propuesta de intervención ADN Educación Secundaria](#).

Atendiendo a la clasificación realizada por Fay et al. (2007), se elige el Nivel 2 de indagación, donde al discente se le proporciona un problema para cuya resolución debe desarrollar el procedimiento, decidir qué datos recolectar e interpretar los datos para proponer



soluciones viables. Se partirá de dos preguntas clave que pretenden generar el interés en el estudiantado y, para cuya resolución, será necesario aplicar el Método Científico. Por ello, se trabajan saberes básicos correspondientes a Proyecto científico y Genética y evolución. Trabajando, con ello, tres de las competencias específicas descritas en la legislación en Biología y Geología. La duración total será de 5 sesiones de 50 minutos cada una que comenzará una vez que el profesor haya terminado de impartir los saberes básicos relativos a la estructura y función el ADN.

En la primera sesión, el docente realizará la pregunta ¿Se puede extraer el ADN? de modo que pueda conocer los conocimientos previos de los alumnos a través de una lluvia de ideas, donde se espera que algún estudiante conozca algún protocolo o procedimiento de extracción de ADN. A continuación, se lanza otra pregunta ¿Podríamos conocer el efecto de cada uno de los pasos que se utilizan en la extracción? Que será la base para la realización de la actividad aplicando el Método Científico. Se dividirá al alumnado en equipos cooperativos y se entregará, a cada uno, un protocolo de extracción de ADN vegetal con los siguientes pasos:

1. Prepara una solución de lisis que contenga: 50 ml de agua, 5 ml de detergente, 7 g de sal común (cloruro de sodio) y 5 ml de zumo de piña.
2. Coloca la solución de lisis en un mortero de cerámica y añade 5 g de cebolla. Machaca el material vegetal durante 3 minutos.
3. Cuela la solución machacada a través de un colador en un vaso limpio.
4. En otro vaso limpio, añade tanto alcohol 96° como volumen tengas de la solución obtenida.
5. Añade el alcohol que has medido al vaso anterior, echándolo con mucho cuidado por las paredes porque recuerda que es importante que no se formen burbujas.
6. ¿Ves que se forman dos fases? Observa atentamente entre ellas ¿Se forman unos hilos blancos? ¡Ahí lo tienes! Si quieres, puedes enrollarlo con un palillo para que lo veas mejor.

Cada equipo deberá formular una hipótesis y definir qué experimento pueden hacer para poder determinar el efecto de cada uno de los reactivos. Se espera que propongan hacer 5 extracciones diferentes: una completa que servirá como control positivo, una sin cebolla, como control negativo y, en las tres restantes, eliminar uno de los pasos (añadir la solución de lisis, picar la cebolla, añadir el alcohol). En este paso, es importante que, si no se han trabajado

anteriormente las variables dependientes e independientes de un experimento científico, se aclaren correctamente los términos y que se describa la importancia de establecer los controles positivos y negativos.

En la segunda sesión, realizarán la experimentación propuesta, cuyo hipotético resultado se presenta en la Figura 5.

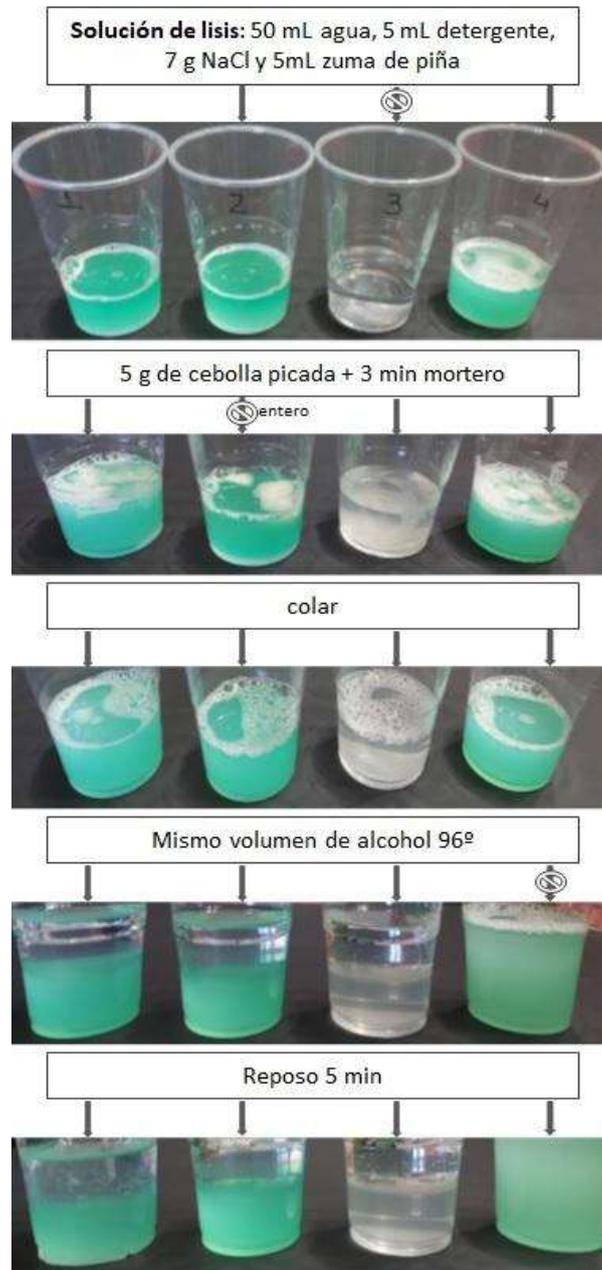


Figura 5. Pasos de la extracción de ADN propuesta para Educación Secundaria con su diseño experimental (Elaboración propia)



En la tercera sesión, se propone investigar cuál es la función de cada uno de los reactivos utilizados en la experimentación para que, en las sesiones cuatro y cinco, preparen un artículo científico que deberá contar con: título, resumen, palabras clave, marco teórico (que finalice con la formulación del objetivo de investigación), metodología, resultados, discusión, conclusiones y bibliografía. Si se considera adecuado, se puede entregar a los alumnos algunos ejemplos de artículos científicos.

Se propone una evaluación global, a través de una lista de cotejo para el trabajo experimental, una rúbrica para el trabajo por escrito y una auto, co y heteroevaluación de la participación en el trabajo en equipo, cuyos instrumentos están diseñados en la propuesta completa.

### **3.3 Validación de las propuestas**

Las propuestas diseñadas fueron validadas a través de un juicio de expertos ya que se ha definido que es un método útil para verificar la fiabilidad de una investigación (Robles y Rojas, 2015). La identificación de las personas que forman parte del juicio de expertos se realizó en base a los criterios de selección propuestos por Skjong y Wentworht (2000) por lo que se invitó a profesores en activo que dieran clases de ciencias, en cada ciclo formativo, a revisar la propuesta específica y dar su opinión, de forma individual, a través de un cuestionario ad-hoc. A través de 12 ítems, utilizando una escala tipo Likert de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo), se analizaron cuestiones referentes al diseño curricular de la propuesta y a la implementación de la misma. El análisis de fiabilidad del cuestionario, a través de la prueba de Alpha de Cronbach, arrojó una puntuación global de 0,949, por lo que se considera un instrumento adecuado (Nunnally, 1978). Con ello, se preparó un formulario de Google que fue enviado, junto con la propuesta didáctica, a cada experto solicitando, de forma voluntaria y anónima, su valoración.

Además, se incluyeron preguntas abiertas para que los expertos pudieran destacar aspectos positivos y analizar las principales dificultades que consideran importantes a la hora de su implementación.

## **4. Resultados**

Las propuestas didácticas diseñadas fueron evaluadas a través de un juicio de expertos. Específicamente, la propuesta para Educación Primaria fue evaluada por 8 docentes mientras

que el número de participantes para la propuesta de Educación Secundaria fue de 6. A través de la prueba de Shapiro-Wilk ( $N < 50, p < 0.05$ ) se comprobó que los resultados obtenidos no se ajustan al supuesto de normalidad por lo que se presentan los resultados de las frecuencias absolutas (Figura 6). En todos los ítems analizados, en Educación Primaria, la mediana alcanza un valor de 4 ó 5, lo que indica que los jueces consideran que la propuesta está bien diseñada y, se considera importante señalar que la mayoría de los docentes estarían interesados en implementarlo en su aula. En el caso de la propuesta de Educación Secundaria, la aceptación fue incluso mayor. En todos los ítems, la mediana fue de 5 a excepción de si los alumnos pudieran alcanzar los objetivos didácticos establecidos que fue de 4.

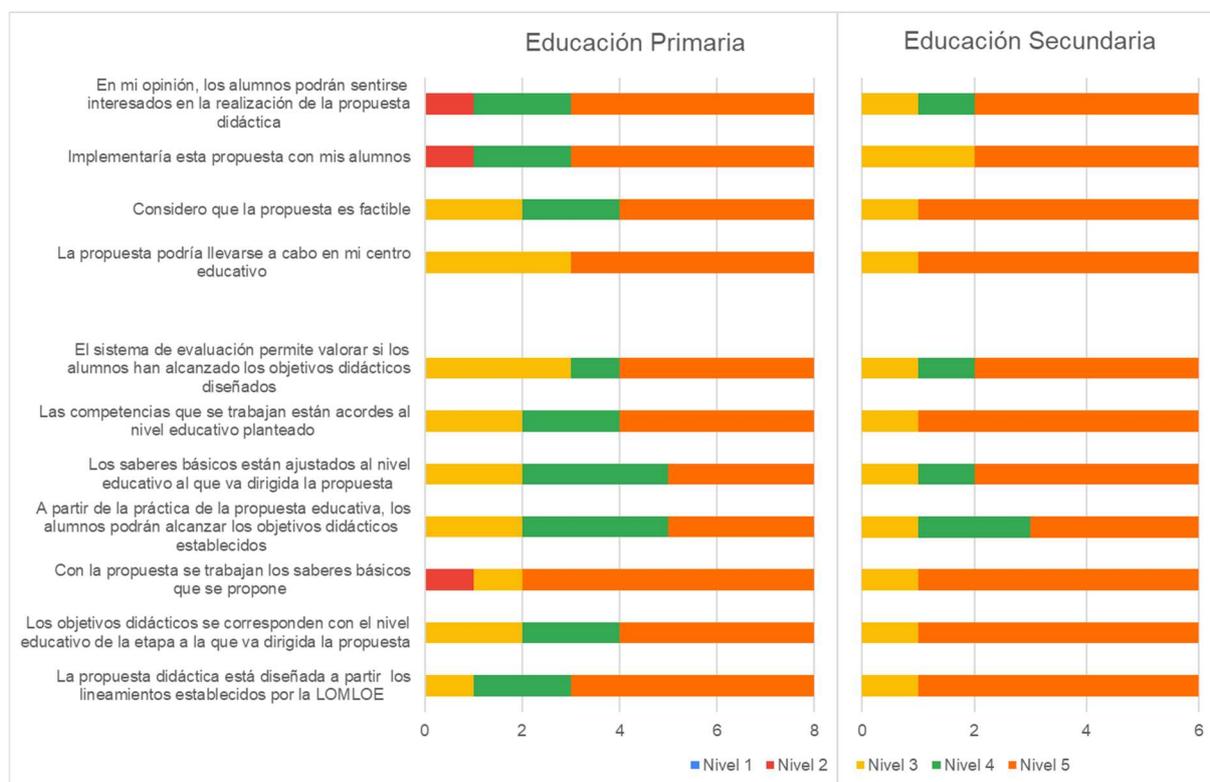


Figura 6. Frecuencias absolutas del análisis de viabilidad a través del juicio de expertos (Elaboración propia)

Respecto a los comentarios realizados por los expertos, para ambas etapas educativas, se incluyeron comentarios positivos en referencia al diseño, así como la innovación, destacando el carácter experimental del mismo (Tabla 1).

Así mismo, se incluyó un apartado que permitiera analizar las principales limitaciones a la hora de su implementación en el aula (Tabla 1). En ambas etapas educativas, se destacó que el número de sesiones puede ser difícil de asumir, ya que el currículo es bastante extenso y

que el elevado número de alumnos en el aula puede ser un impedimento importante a la hora de llevarse a cabo, por lo que se recomendaría un desdoblamiento, si fuera necesario.

Tabla 1. Principales aspectos positivos y limitaciones encontradas a las propuestas didácticas  
(Elaboración propia)

	<b>Aspectos positivos</b>	<b>Limitaciones en la implementación</b>
<b>Educación Primaria</b>	<i>Propuesta innovadora</i> <i>Aplicación del método científico</i> <i>Indagación experimental</i> <i>Actividad de orden superior positiva</i> <i>Propuesta sencilla</i>	<i>Número de sesiones difícil de asumir</i> <i>Alumnos con poca experiencia en laboratorio</i> <i>Espacio</i> <i>Falta de conocimientos previos</i> <i>Conseguir recursos</i> <i>Apoyo de los compañeros</i>
<b>Educación Secundaria</b>	<i>Propuesta atractiva</i> <i>Alumnos dispuestos a trabajar en laboratorio</i> <i>Orden y conexión con la normativa</i> <i>ABP bien planteado</i> <i>Roles cooperativos bien diseñados</i> <i>Fácil de seguir por el alumnado</i>	<i>Número de alumnos elevado</i> <i>Número de sesiones difícil de asumir</i> <i>Alumnos con poca experiencia en laboratorio</i> <i>Tiempo un poco justo</i> <i>Poco conocimiento en referenciación</i>

## 5. Discusión

La validación a través de un juicio de expertos se usa en múltiples ámbitos al presentar una serie de ventajas entre las que se pueden destacar la posibilidad de obtener información precisa del objeto de estudio, así como la calidad de las respuestas por parte de los jueces (Robles y Rojas, 2015). El número de expertos que se debe emplear depende del estudio y el tipo de investigación, al respecto, Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2008) manifiestan que diferentes autores sugieren que un rango de 2 hasta 20 expertos puede ser apropiado. Por ello, teniendo en cuenta que en el presente estudio han participado 8 expertos para Educación Primaria y 5 para Educación Secundaria) se considera que los resultados obtenidos son adecuados. Especialmente, en la propuesta diseñada para Educación Secundaria, donde se complementa la extracción de ADN con el empleo del método científico. Una explicación puede ser que los docentes están más acostumbrados a realizar este tipo de actividades al ser expertos en el área o que consideren que los alumnos están más capacitados para realizar las actividades propuestas.

El gran avance científico y tecnológico que ha tenido lugar desde el siglo pasado ha influido de manera muy marcada en la vida de las personas. Por este motivo, debe conseguirse



una adaptación en los sistemas educativos que sea coincidente con este avance (Esteve, 2003), promoviendo el desarrollo de la alfabetización científica y tecnológica, que debe incluir situaciones reales, que afecten a los miembros de la sociedad, en las que jueguen un papel fundamental tanto la ciencia como la tecnología (Sadler y Zeidler, 2009). De esta manera, se puede conseguir que toda la ciudadanía sea capaz de hacer frente a problemas reales relacionados con la ciencia, debido al desarrollo de la alfabetización científica (OCDE, 2018).

Aunque la extracción de ADN es una práctica habitual en las escuelas y museos, en los últimos años, se han analizado diferentes estrategias didácticas con la finalidad de mejorar en su diseño para transformar esta práctica tradicional en una experiencia donde el alumno desarrolle un papel activo. Este trabajo pretende aportar situaciones de aprendizaje, diseñadas bajo la nueva normativa educativa, que puedan favorecer el aprendizaje interdisciplinar y fomentar el pensamiento crítico de forma similar al estudio de Esteban et al (2019) quienes plantean una pequeña investigación a través de preguntas elaboradas por el docente; o el reporte de Susantini et al. (2017) quienes proponen que los alumnos diseñen un protocolo de extracción de ADN utilizando materiales caseros. De todas es conocido que hay una disminución generalizada de vocación científica entre los adolescentes cuya pérdida de interés comienza desde la Educación Primaria. Una de las posibles soluciones, como defiende Hernández y Neira (2022) es modificar el paradigma educativo del profesorado, proponiendo iniciativas como las presentes propuestas didácticas, que conectan el contenido con el mundo real y se trabaja en el desarrollo de habilidades de resolución de problemas.

Una aplicación correcta en el aula de propuestas STEAM ayuda a dotar al alumnado de las competencias necesarias para poder solventar este tipo de situaciones (Lapertosa et al., 2017). Por todo ello, el papel de los docentes de disciplinas científicas es fundamental para conseguir alcanzar esta meta, ya que se ha podido comprobar cómo los factores que influyen positivamente en la vinculación de los alumnos a las disciplinas científicas dependen en gran medida de la formación y la motivación del profesorado (Kurup et al., 2019).

El trabajo práctico en las clases de ciencias supone una mejora, consiguiendo que los estudiantes adquieran un aprendizaje significativo mediante el fomento de la capacidad crítica al plantear situaciones cercanas a su día a día, como es el hecho de que se tomen muestras de ellos mismos en las secuencias didácticas planteadas en el artículo. Por otro lado, este acercamiento de la ciencia en el alumnado puede ayudar a modificar las bajas puntuaciones



obtenidas en ciencias en estudios internacionales como PISA o TIMMS y a incrementar la tasa de matriculaciones en carreras de ámbito científico.

## 6. Conclusión

El diseño de las propuestas didácticas presentadas en esta investigación, tanto para Educación Primaria como para Educación Secundaria, han sido validadas a través de un juicio de expertos y, por lo tanto, se recomienda su implementación en aula con el fin de favorecer la comprensión de los contenidos curriculares referentes a la estructura de las células en el área de biología fomentando, a su vez, el método científico.

## 7. Limitaciones del estudio y líneas futuras de investigación

El juicio de expertos es una metodología que permite la validación de propuestas de manera que se propone una secuencia didáctica diseñada para su implementación en el aula. No obstante, el efecto que tenga en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la célula en la educación obligatoria solo se podrá cuantificar una vez que sea implementada en el aula y dependerá del contexto educativo, los alumnos participantes, así como el docente encargado de guiar el proceso. Las propuestas han sido diseñadas bajo la legislación española, no obstante, podrían implementarse en diferentes países realizando los ajustes necesarios según sus lineamientos educativos, ya que fomentar la competencia científica es un elemento educativo común.

De cara a futuras investigaciones, sería interesante analizar si el tipo de alumnado, el contexto educativo o el profesorado tienen efecto en la adquisición de conocimiento de la célula, aumento de la competencia científica o aumento de su interés hacia las ciencias. Este tipo de estudio se puede analizar a través de cuestionarios pretest-postest, de forma inmediata y a largo plazo. Este tipo de experiencia, pueden formar parte de un conjunto de estrategias dirigidas a fomentar la vocación científica del estudiantado.

## 8. Referencias bibliográficas

Anwar, S., Menekse, M., Guzey, S. y Bryan, L.A. (2022). The Effectiveness of an Integrated STEM Curriculum Unit on Middle School Students' Life Science Learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(7), 1204-1234. <https://doi.org/10.1002/tea.21756>



- Arana-Cuenca, A., Romero-García, C. Pérez Andrés, S. y Macilla García, E. (2023). Emociones y adquisición de conocimiento sobre la luz y los colores mediante un aprendizaje basado en proyectos en educación primaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 79-100. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5723>
- Avery, O.T., Macleod, C.M. y Mccarthy, M. (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of Pneumococcal Types: Induction of transformation by a desoxyribonucleic acid fraction isolated from Pneumococcus type III. *Journal of Experimental Medicine* 79, 137-159. <https://doi.org/10.1007/bf03401572>
- Chiang, F., Chang, C., Wang, S., Cai, R., y Li, L. (2022). The Effect of an Interdisciplinary STEM Course on Children's Attitudes of Learning and Engineering Design Skills. *International Journal of Technology and Design Education*, 32(1), 55-74. <https://doi.org/10.1007/s10798-020-09603-z>
- Christensen, R., Knezek, G. y Tyler-Wood, T. (2014). Student perceptions of Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) content and careers. *Computers in Human Behavior*, 34, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.01.046>
- Eronen, L., Kokko, S. y Sormunen, K. (2019). Escaping the subject-based class: A Finnish case study of developing transversal competencies in a transdisciplinary course. *The Curriculum Journal*, 30(3), 264–278. <https://doi.org/10.1080/09585176.2019.1568271>
- Escobar-Pérez, J., y Cuervo-Martínez, Á. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en medición*, 6(1), 27-36.
- Esteban, R., Marcos-Merino, J.M. y Gómez, J. (2019). Extracción de ADN con material cotidiano, diseño, implementación y validación de una intervención activa interdisciplinar. *Educación Química*, 30(1), 42-57. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.1.67658>
- Esteve J.M. (2003). *La tercera Revolución Educativa. La Educación en la Sociedad del Conocimiento*. Paidós. Barcelona. <https://doi.org/10.18172/con.546>
- Fay, M., Grove, N., Towns, M.H. y Bretz, S.L. (2007). A rubric to characterize inquiry in the undergraduate chemistry laboratory. *Chemistry Education Research and Practice*, 8(2), 212-219. <https://doi.org/10.1039/b6rp90031c>



- Ford, M.J. (2015). Educational implications of choosing “practice” to describe science in theNext Generation Science Standards. *Science Education*, 99(6), 1041–1048.  
<https://doi.org/10.1002/sce.21188>
- Franklin, R.E. y Gosling, R.G. (1953). Molecular configuration in Sodium Thymonucleate. *Nature*, 171, 740-741. <https://doi.org/10.1038/171740a0>
- Hernández, J. G., y Neira, R. H. (2022). Brecha en la vocación de los estudiantes por profesiones STEM y el mercado laboral europeo. *Revista Iberoamericana de Informática Educativa*, 35, 22-32.
- Hershey, A.D. y Chase, M. (1952). *Independent functions of viral protein and nucleic acid in growth of bacteriophage*. Department of Genetics, Carnegie Institution of Washington, Cold Spring Harbor, Long Island. <https://doi.org/10.1085/jgp.36.1.39>
- Johnson, M.C., y Malinowski, J.C. (2001). Navigating the active learning swamp. *Journal of College Science Teaching*, 31(3), 172-177.
- Kurup, P.M., Li, X., Powell, G., y Brown, M. (2019). Building future primary teachers' capacity in STEM: based on a platform of beliefs, understandings and intentions. *International Journal of STEM Education*, 6(10), 2-14. <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0164-5>
- Lapertosa, S., Burgos, A., Firman, A., Burghardt, M. y Romero, G. R. (2017). Una aproximación para despertar vocaciones STEM en el nivel medio. En *XII Congreso de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología TE&ET*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63371>
- Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación. Boletín Oficial del Estado, 340, de 30 de diciembre de 2020, 122868-122953.
- López, F., García, I. y Expósito, E. (2019). Rendimiento en ciencias, concepciones epistémicas y vocaciones STEM en las comunidades autónomas españolas. Evidencias desde PISA 2015, políticas y prácticas de mejora. *Revista Española de Pedagogía*, 77(272), 5-27. DOI: <https://doi.org/10.22550/rep77-1-2019-09>
- Marcos-Merino, J.M., Gallego, R.E. y Ochoa de Alda, J.G. (2019). Extracción de ADN con material cotidiano: desarrollo de una estrategia interdisciplinar a partir de sus fundamentos científicos. *Educación Química*, 30(1), 58-69. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.1.65732>



- Miescher, F. (1869) *Sobre la composición química de las células de pus*. Universidad Tubingén. Vol. 68 N°4. Berlín.
- Mosteiro García, M.J., y Porto Castro, A.M. (2017). Análisis de los estereotipos de género en alumnado de formación profesional: diferencias según sexo, edad y grado. *Revista de Investigación Educativa*, 35(1), 151-165. <https://doi.org/10.6018/rie.35.1.257191>
- Muñoz-Campos V, Franco-Mariscal A.J. y Blanco-López A. (2020) Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(3), 3201-23. [https://doi.org/10.25267/rev\\_eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2020.v17.i3.3201](https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201)
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory*, 2.ª ed. Nueva York: McGraw-Hill.
- OCDE (2018). PISA 2018 Results (Volume I): What Students Know and Can Do, PISA, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a9b5930a-en>
- O'Connor, C., y Miko, L. (2008). Developing the chromosome theory. *Nature education*, 1(1), 44.
- Real Decreto 157/2022, de 1 de marzo, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Primaria. Boletín Oficial del Estado, 52, de 02 de marzo de 2022.
- Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. Boletín Oficial del Estado, 76, de 30 de marzo de 2022.
- Robles, P. y Rojas, M.C. (2015). La validación por juicio de expertos: dos investigaciones cualitativas en Lingüística aplicadas. *Revista Nebrija de lingüística aplicada a la enseñanza de lenguas*, 18, 124-139.
- Sadler T.D. y Zeidler D.L. (2009). Scientific Literacy, PISA, and Socio-scientific. Discourse: Assessment for Progressive Aims of Science Education. *Journal of Research on Science Teaching* 46(8), 909-921. <https://doi.org/10.1002/tea.20327>
- Sambrook J., Fritsch, E.F. y Maniatis, T. (1989). *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, New York, EE.UU. <https://doi.org/10.1002/jobm.19840240107>



- Skjong, R. y Wentworth, B. (2000). Expert Judgement and risk perception. Offshore and Polar Engineering Conference, *ISOPE*, 6, 537-544, Stavanger, June 17-22.
- Susantini, E., Lisdiana, L., Isnawati, Tanzih Al Haq, A., y Trimulyono, G. (2017). Designing easy DNA extraction: Teaching creativity through laboratory practice. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 45(3), 216-225. <https://doi.org/10.1002/bmb.21030>
- Stulnig T. M. y Amberger, A. (1994). Exposing contaminating phenol in nucleic acid preparations. *BioTechniques* 16, 402-404.
- TIMMS. Estudio Internacional de Tendencias en Matemáticas y Ciencias. (2019).
- Varelas, M., Kotler, R. T., Natividad, H. D., Phillips, N. C., Tsachor, R. P., Woodard, R., Gutierrez, M., Melchor, M. A., y Rosario, M. (2022). Science Theatre Makes You Good at Science: Affordances of Embodied Performances in Urban Elementary Science Classrooms. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(4), 493-528. <https://doi.org/10.1002/tea.21735>
- Valero, J.A. y Coca, P. (2021). La percepción de las materias STEM en estudiantes de Primaria y Secundaria. *Sociología y Tecnociencia*, 11(1), 116-138 DOI: [https://doi.org/10.24197/st.extra\\_1.2021.116-138](https://doi.org/10.24197/st.extra_1.2021.116-138)
- Vivien, M., Chabalengula, M., y Mumba, F. (2017). Engineering design skills coverage in K-12 engineering program curriculum materials in the USA. *International Journal of Science Education* 39 (16), 2209–2225. <https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1367862>
- Watson, J.D. y Crick, F.H.C. (1953). Molecular structure of Nucleic Acids. *Nature* 171, 737-738. <https://doi.org/10.1038/171737a0>