

Una propuesta didáctica para la enseñanza de la genética en la Educación Secundaria

Francisco Javier Íñiguez Porras¹ y Manel Puigcerver Oliván²

Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals i la Matemàtica. Universitat de Barcelona. España.
E-mail: ¹javier.iniguez@ub.edu ²mpuigcerver@ub.edu

[Recibido en junio de 2012, aceptado en marzo de 2013]

La enseñanza de genética es uno de los temas de la biología que resulta didácticamente más conflictivo, entre otras cosas porque el modelo tradicional de enseñanza aplicado a los mecanismos de transmisión de la herencia biológica dificulta un verdadero aprendizaje. En este trabajo presentamos las características de una propuesta didáctica fundamentada en los principios del constructivismo y los resultados que se obtuvieron al implementarla en el aula, en comparación con los obtenidos al aplicar el modelo tradicional. En definitiva, pretendemos determinar qué modelo permite al alumnado alcanzar un mayor y mejor conocimiento de la estructura del material genético y de los procesos de transmisión de la información hereditaria; los resultados obtenidos apuntan a una mayor eficacia del modelo innovador.

Palabras clave: enseñanza, genética, Educación Secundaria, modelos de enseñanza.

A methodological approach to the teaching of genetics

Teaching of genetics is one of the issues of biology didactically more contentious because, between other causes, the traditional model of education applied to the mechanisms of heredity transmission makes it difficult a real learning. In this study, we present the characteristics of a didactic approach based on the principles of constructivism and the results obtained when implemented it in the classroom, compared to the results obtained when traditional model was applied. All in all, we aim to determine which model allows students to achieve more and better knowledge of the structure of genetic material and the processes of transmission of hereditary information; our results suggest a greater effectiveness of the innovative model.

Keywords: teaching; genetics; Secondary Education; teaching models.

Introducción

Aunque ya queda lejos el nacimiento de la oveja clónica Dolly, son de constante actualidad las investigaciones y aplicaciones de la biotecnología y la ingeniería genética en medicina o agricultura. Frecuentemente aparecen en los medios de comunicación noticias relacionadas con la clonación, la terapia génica y la creación de organismos transgénicos. Ahora bien, ¿qué grado de conocimiento real tiene la población sobre estos temas? ¿Sabemos de qué hablamos cuando nos referimos a terapias génicas o se discute sobre los posibles efectos negativos de alimentos modificados genéticamente? ¿Qué grado de conocimiento real tiene la población en general y los estudiantes de Educación Secundaria en particular sobre la naturaleza y la ubicación del material hereditario y sobre los mecanismos de transmisión de la herencia biológica?

Estos conceptos forman parte de la enseñanza de la herencia biológica en Educación Secundaria Obligatoria. La genética es uno de los apartados de la biología más difícil de entender por el alumnado y de los que reúne más dificultad conceptual (Johnstone y Mahmoud, 1980; Smith, 1988); por otra parte, es uno de los temas que puede llegar a motivar al alumnado en mayor medida ya que éstos encuentran fácilmente aplicaciones en la vida real como, por ejemplo, la obtención de alimentos transgénicos o los test genéticos, entre muchos otros.

A nuestro juicio, son dos los obstáculos fundamentales en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la genética: aquello que el alumno ya sabe cuando llega al aula y el modelo tradicional de enseñanza de la genética.

Concepciones del alumnado sobre genética

Uno de los principales escollos en la docencia de la ciencia es la existencia de múltiples concepciones alternativas en el alumnado (Driver, Guesne y Tiberghien, 1985). La genética no es ajena a esta situación ya que han sido detectados diferentes esquemas conceptuales alternativos. Enumeramos a continuación algunos aspectos confusos y algunas de las principales concepciones de los alumnos, en algunos casos derivados de los libros de texto, tanto por el texto (Cho, Kahle y Nordland, 1985) como por los esquemas y dibujos (García Cruz, 1990), y que interfieren gravemente con los contenidos que se imparten en las aulas:

1. No todos los seres vivos están formados por células (Banet y Ayuso, 1995).
2. No todos los seres vivos tienen genes y cromosomas (Wood-Robinson, Lewis, Leach y Driver, 1998).
3. Existe la creencia de que algunos organismos pueden tener cromosomas, pero no genes, lo que evidencia la confusión y el desconocimiento de dichas estructuras. (Pashley, 1994; Lewis, Leach y Wood-Robinson, 2000).
4. La información hereditaria sólo se encuentra en las células sexuales (Hackling y Treagust, 1984; Banet y Ayuso, 2000).
5. Cada célula posee la información genética necesaria para su propia función (Hackling y Treagust, 1984).
6. Los cromosomas sexuales sólo se encuentran en los gametos (Longden, 1982; Radford y Bird-Stewart, 1982; Banet, 2000).
7. El ambiente puede influir en la aparición de un determinado carácter hasta el punto de considerar algunos alumnos que los factores ambientales tienen más influencia que los hereditarios. (Ramagoro y Wood-Robinson, 1995)
8. Los alumnos no identifican ni relacionan correctamente la estructura y la función de los cromosomas (Brown, 1990; Stewart, Hafner y Dale, 1990; Kibuka-Sebitosi, 2007).
9. No relacionan la estructura del material hereditario: genes, cromosomas y ADN (Íñiguez y Puigserver, 2001; Caballero, 2008).
10. La meiosis supone una importante dificultad durante el proceso de enseñanza-aprendizaje de la herencia biológica y los estudiantes no la relacionan con el proceso de formación de gametos ni con la resolución de problemas de genética (Stewart y Dale, 1989; Kindfield, 1994; Ibáñez y Martínez Aznar, 2005).
11. Existen dificultades en relacionar el material hereditario con la síntesis de proteínas y con la expresión de la información genética (Rotbain, Marbach-Ad y Stavy, 2006; Duncan y Reiser, 2007; Marbach-Ad, Rotbain y Stavy, 2008; Duncan, Rogat y Yardner, 2009).

Modelo tradicional de enseñanza de la genética y modelo constructivista

Aunque las propuestas que se formulan desde la didáctica de las ciencias van calando de manera progresiva en la actividad docente del profesorado, es cierto que persiste un modelo

tradicional de enseñanza de las ciencias, incluida la de la herencia biológica. Como afirman Duit y Treagust (2003):

“es difícil cambiar la visión de los profesores y la práctica docente en el aula” (p.684).

Esta puede ser la razón por la que, incluso en estudiantes universitarios de biología, medicina y otras ciencias de la salud, persistan concepciones erróneas en aspectos de genética que ya estudiaron en Secundaria e incluso durante su formación en la universidad (Infante-Malachias, Queiroz, Wellwe y Santos, 2010).

A partir de Jiménez Aleixandre (2000), hemos compilado algunas de las principales características de dicho modelo:

1. Se considera al estudiante como una página en blanco y por tanto no se tienen en cuenta los esquemas conceptuales previos.
2. El conocimiento se transmite fundamentalmente elaborado y por tanto los alumnos no tienen un papel activo en la construcción de significados.
3. No se elaboran estrategias didácticas dirigidas a la eliminación de las ideas previas o su adaptación a las concepciones científicamente correctas.
4. El libro de texto es el material curricular de apoyo fundamental del profesor.
5. Los contenidos que se trabajan son fundamentalmente conceptuales, recogidos en una “lista de conceptos” expuestos de una manera lineal preferentemente en forma de lección magistral.
6. Apenas hay incidencia de aspectos procedimentales o actitudinales en el proceso educativo, como podrían ser las aplicaciones de la biotecnología.

Ya hemos hecho referencia anteriormente a algunas publicaciones que muestran las concepciones del alumnado sobre la naturaleza del material hereditario y sus mecanismos de transmisión, así como de algunas propuestas didácticas para su implementación en el aula. Por otra parte, el currículum de Educación Secundaria Obligatoria establece unos contenidos de genética al que se ciñen las editoriales al elaborar sus textos. Sin embargo, los autores de dichos materiales educativos no suelen tener en consideración las propuestas que provienen de los ámbitos de investigación en didáctica de la biología y de la genética en particular.

Los contenidos que se presentan en los textos pueden agruparse en los siguientes bloques: i) Mecanismos de transmisión de la información hereditaria (leyes de Mendel) ii) Naturaleza del ADN iii) Estructura de los genes y cromosomas y su relación con el ADN y la célula iv) Diferentes tipos de herencia (ligada al sexo, etc.) v) Aplicaciones actuales de la genética. Aunque en líneas generales no ponemos en cuestión estos contenidos, consideramos que la secuenciación y el enfoque para su estudio suele ajustarse a una concepción tradicional del modelo tradicional de enseñanza de la genética, que es el que se encuentra presente de forma habitual en los materiales publicados por las editoriales y en buena parte del colectivo docente. En la tabla 1 mostramos las características fundamentales de este modelo tradicional de enseñanza de la genética, a partir de Banet y Ayuso (1995) y algunas de las características que identificamos en un modelo basado en principios constructivistas.

Tabla 1. Comparación entre las características del modelo tradicional y el modelo constructivista de enseñanza de la genética.

Principales características del modelo tradicional de enseñanza de la genética	Principales características del modelo constructivista de enseñanza de la genética
<p>1. Los puntos de vista de los estudiantes no son tomados en cuenta y por lo tanto no hay actividades de detección de sus ideas alternativas.</p> <p>2. El libro de texto es el principal material de apoyo curricular, siendo el profesor el actor fundamental.</p> <p>3. En general, los problemas de genética tienden a ser de tipo causa-efecto, conociéndose el patrón hereditario.</p> <p>4. Algunos de los organismos utilizados en los problemas son desconocidos por los estudiantes.</p> <p>5. Los programas de enseñanza suelen comenzar por el estudio de los experimentos y leyes de Mendel.</p> <p>6. No se hace suficiente énfasis en la estructura y localización de material hereditario.</p> <p>7. O bien no se estudia la meiosis, o bien no se relaciona con los problemas de genética y los procesos de transmisión de la información hereditaria.</p> <p>8. La genética humana no es un tema central, sino que se propone como un aspecto adicional o de ampliación.</p> <p>9. Cuando se plantean problemas relativos a la genética humana, éstos son diferentes a los descritos previamente en las leyes de Mendel (herencia ligada al sexo o la herencia de los grupos sanguíneos).</p>	<p>1. Exploración de ideas de los alumnos y posterior exposición y discusión en el aula.</p> <p>2. Propuesta, por parte del profesor, de actividades que pueden crear conflictos cognitivos y generar desacuerdo y descontento con las ideas expresadas por los estudiantes.</p> <p>3. Uso de modelos tridimensionales de células eucariotas, de la molécula de ADN, de la estructura de los cromosomas, de la mitosis y la meiosis (Pashley, 1994).</p> <p>4. Uso de ejemplos y referencias que sean significativas para los estudiantes, especialmente en lo que se refiere a la genética humana (Ayuso, 2000).</p> <p>5. Presentación de estudios de Mendel una vez que los estudiantes tienen el conocimiento suficiente acerca de los procesos hereditarios (Banet y Ayuso, 2000).</p> <p>6. Estudio de la mitosis y, especialmente, la meiosis como dos procesos integrados en la transmisión de la información hereditaria (Hackling y Treagust, 1984; Ayuso, Banet y Abellán, 1996).</p> <p>7. Integración de la resolución de problemas en el contexto educativo de la enseñanza de la genética, relacionándolo con la meiosis y planteándolo como proceso de investigación (Martínez e Ibáñez, 2005).</p> <p>8. Planteamientos didácticos que tengan en cuenta aspectos actitudinales, especialmente en asuntos relacionados con los tests genéticos o las aplicaciones de la biotecnología.</p>

Objetivos

La investigación que presentamos pretende alcanzar diferentes objetivos:

- Determinar si las ideas de nuestros alumnos de Educación Secundaria sobre la herencia biológica coincide con las concepciones de otros estudiantes y recogidas en estudios previos.
- Comprobar si el modelo tradicional de enseñanza de la genética descrito con anterioridad es capaz de transformar las ideas manifestadas por los alumnos.
- Determinar si un modelo de enseñanza de la herencia biológica, diseñado por nosotros y basado en los principios del constructivismo, que tiene en consideración las propuestas de las investigaciones en didáctica de la biología, permite transformar las concepciones iniciales del alumnado en otras científicamente correctas de manera más efectiva y potente que el modelo tradicional.
- Averiguar cuál de los dos modelos es capaz de obtener mayor retención varios meses después de la finalización de la docencia.

Metodología

Hipótesis de trabajo

Pretendemos verificar dos hipótesis:

Hipótesis 1: Una propuesta didáctica basada en el modelo tradicional de enseñanza de la genética en general y de los procesos de transmisión de la herencia en particular, no es capaz de permitir al alumnado aprender de manera significativa la estructura y localización del material hereditario y los mecanismos de la herencia biológica, mientras que una secuencia didáctica basada en los principios del modelo de enseñanza constructivista permitirá que los alumnos aprendan de manera significativa dichas estructuras y mecanismos.

Hipótesis 2: La nueva propuesta didáctica será capaz de conseguir en el alumnado una construcción de significados más completos, correctos y elaborados que en los estudiantes que han recibido la enseñanza de la genética basada en el modelo tradicional, reflejándose esta diferencia en índices de mejora superiores en el alumnado que ha recibido la docencia con el nuevo modelo de enseñanza de la herencia biológica.

Muestra objeto de estudio

El estudio que presentamos se llevó a cabo durante cuatro años en un instituto de Educación Secundaria en una pequeña localidad cercana a Barcelona (Lliçà d'Amunt) en nueve grupos de alumnos de cuarto curso de Educación Secundaria Obligatoria (15-16 años) que no habían estudiado genética previamente. En dicha población el porcentaje de personas extranjeras llegadas recientemente a nuestro país es bajo y por tanto la mayoría de alumnos son nacidos en Lliçà d'Amunt, perteneciendo en su mayor parte a estratos socio-económicos medios. Salvo 3 alumnos repetidores, el resto estudiaba cuarto de ESO por primera vez.

En cuatro grupos, la enseñanza de la genética se basó en el modelo de transmisión de conocimientos ya elaborados, siendo el libro de texto el material didáctico usado por el profesor (Control: n=58; 28 chicos y 30 chicas). En otros cinco grupos se utilizó una secuencia didáctica diseñada por nosotros y que describiremos ampliamente en el apartado siguiente (Experimental: n=87; 38 chicos y 49 chicas). La distribución del alumnado en los grupos correspondió a la dirección del centro y por tanto fue aleatoria; tanto las agrupaciones Control como las Experimentales recibieron los mismos contenidos conceptuales y el mismo número de horas de docencia, aunque la secuenciación y el tratamiento didáctico sobre dichos contenidos era diferente. Antes del inicio de la secuencia didáctica, se comprobó la homogeneidad de todos los grupos mediante pruebas estadísticas.

Fases de la investigación

1. *Diseño de la secuencia metodológica*

A partir de los trabajos de diferentes investigadores y de nuestra insatisfacción por el modelo de enseñanza tradicional, diseñamos una propuesta didáctica que toma como punto inicial de referencia el modelo de cambio conceptual (Posner, Strike, Hewson y Gertzog, 1982) y que tiene en cuenta las concepciones del alumnado. Pretendíamos que dicho modelo permitiese al alumnado reestructurar sus esquemas conceptuales sobre la estructura y función del material hereditario y que tuviera una perspectiva crítica sobre los avances de la biotecnología, así como de su aplicación en diversos campos de la biología y la medicina. La propuesta didáctica reúne las características que hemos indicado en la tabla 1. No obstante, queremos ampliar algunos aspectos y presentar algunas de las estrategias que se han implementado en el aula de los grupos experimentales (ver tabla 2).

Tabla 2. Estrategias metodológicas aplicadas utilizadas en los grupos Experimentales.

Estrategia metodológica	Permite al alumnado	Sugeridas por
Estructuración de la secuencia didáctica en tres etapas: iniciación, reestructuración de ideas y aplicación de nuevas ideas. Las actividades que se proponen son capaces de provocar conflictos cognitivos y generar insatisfacción con las ideas que han expuesto los estudiantes (ver anexo 3).	Manifiestar sus concepciones, enfrentarse a situaciones que pongan en cuestión sus ideas y ayudar a transformarlas en otras científicamente correctas.	Sánchez y Valcárcel, (1993). Posner et al., (1982).
Iniciación de la secuencia con la creación por parte del alumnado de un organismo fantástico que posea una serie de características que puedan presentar variabilidad (ver anexo 2).	Aplicar sobre esta creación los diferentes conceptos de genética que se trabajan a lo largo de la secuencia didáctica.	Priestland, (1982). Law y Lee, (2004).
Proposición de actividades de aplicación basados en referentes próximos al alumnado, como el organismo fantástico diseñado por ellos o bien caracteres presentes en la especie humana.	Sentirse protagonista del proceso de enseñanza-aprendizaje y aplicar los conceptos a referentes absolutamente próximos a ellos.	Law y Lee, (2004).
Formulación de problemas de genética referidos al organismo fantástico diseñado por los propios alumnos	Comprender los mecanismos de transmisión de la herencia biológica en contexto.	
Resolución de estos problemas como actividades de pequeña investigación, con la necesidad de plantear hipótesis y determinar el modelo de herencia, relacionándolos con la división meiótica.	Relacionar la meiosis con la transmisión de la información hereditaria	Martínez Aznar e Ibáñez, (2005).
Presentación de los estudios de Mendel una vez que los alumnos tienen suficiente conocimiento sobre los mecanismos de la herencia biológica.	Poder aplicar los conceptos y procesos implicados en la transmisión de la información hereditaria a situaciones y contextos próximos.	Ayuso, Banet y Abellán, (1996). Venville y Donovan, (2005).
Utilización durante toda la secuencia didáctica de diferentes modelos tridimensionales y bidimensionales creados por nosotros (ver anexo 4). Estos modelos se refieren a la estructura celular y del material hereditario (célula eucariota, molécula de ADN, cromosoma-gen-alelo), así como a los procesos de mitosis y meiosis, íntimamente ligados con la resolución de problemas de genética.	Poder visualizar a través de un modelo las estructuras y procesos relacionados con la transmisión de la información hereditaria.	Chinnici, Yue y Torres, (2004). Cordón, Juárez, Cascales y Manresa, (2005). Fernández, González y Moreno, (2003). Pashley, (1994). Rotbain et al., (2006). Van Driel y Verloop, (2002).
Introducción de aspectos actitudinales como los relacionados con la manipulación genética y la biotecnología, a partir de situaciones de contexto que puedan generar discusión.	Valorar de manera crítica la importancia de las investigaciones en genética y sus aplicaciones en la biotecnología	Dawson y Schibeci (2003)

2. Pre-test

Antes de iniciar la docencia, se distribuyó un cuestionario que contenía preguntas de respuesta múltiple, otras preguntas de respuesta abierta y finalmente cuestiones en las que se pedía al

alumnado que dibujase algunas estructuras del material hereditario (ver [anexo 1](#)). Un primer modelo de cuestionario fue sometido al juicio de tres profesores de biología de amplia experiencia en la enseñanza que realizaron algunas propuestas de modificación. En una segunda fase se pidió a personas ajenas a la enseñanza que completaran el test. A partir de las observaciones de estas dos primeras fases se construyó un cuestionario piloto que fue administrado a los alumnos que participaron durante el primer año de la investigación. Algunas de las preguntas del cuestionario piloto fueron eliminadas (y, consecuentemente, no fueron analizadas) y finalmente se confeccionó el instrumento definitivo que sería utilizado durante los tres años restantes de investigación.

3. Enseñanza propiamente dicha

En los grupos Control se llevó a cabo una enseñanza basada en el modelo tradicional y en los grupos Experimental la propuesta didáctica cuyas características metodológicas hemos indicado en la fase 1.

Los contenidos que se trabajaron durante la secuencia didáctica aparecen indicados en la tabla 3. Aunque dichos contenidos no podían diferir de manera substancial de los establecidos en los currícula oficiales, el tratamiento que se hizo de ellos estaba en concordancia con las propuestas de diferentes investigadores en didáctica de la genética. Si bien en el presente artículo nos referimos a contenidos básicamente conceptuales, a lo largo de la secuencia didáctica se han trabajado aspectos procedimentales (especialmente durante la resolución de los problemas) y también actitudinales (de manera transversal a partir de la presentación de situaciones de contexto y artículos de prensa).

Tabla 3. Contenidos objetos de estudio durante la secuencia didáctica.

<ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura celular de los seres vivos: Todos los seres vivos están formados por células y contienen información hereditaria. 2. Naturaleza del material hereditario. Cómo se organiza y se relacionan estructuras como el ADN, los genes y los cromosomas. 3. Localización de la información hereditaria. ¿Dónde podemos encontrar la información hereditaria? 4. Función del material hereditario. 5. Mecanismos de transmisión de la información hereditaria. Procesos de mitosis, meiosis y resolución de problemas. 6. Técnicas de manipulación del material hereditario.

3. Post-test I

Una vez finalizada la secuencia y sin aviso previo se distribuyó de nuevo el mismo cuestionario al alumnado, tanto de los grupos Control como de los grupos Experimentales.

4. Post-test II

Nueve meses después se vuelve a distribuir el cuestionario también sin aviso previo. Este post-test II permite evaluar el grado de retención de las nuevas ideas en el alumnado.

5. Análisis de los resultados

Las concepciones del alumnado han sido analizadas desde diferentes puntos de vista. Hemos elaborado redes sistémicas (Bliss, Monk y Ogborn, 1983) para estudiar los resultados de preguntas abiertas y aquéllas en las que se pide al alumno que realice un dibujo para localizar los genes y los cromosomas y también se han cuantificado las preguntas de respuesta múltiple. Por tanto, cada respuesta fue valorada en función de su corrección científica, de manera que el valor máximo que puede alcanzarse y que supone que las concepciones manifestadas son

todas correctas, es de 26. Por tanto, para cada alumno se obtuvo una cuantificación del cuestionario en el pretest, en el post-test I y en el post-test II. Las respuestas que se obtienen en cada una de las fases de la investigación nos dan una idea global del proceso de transformación de las concepciones del alumnado sobre la herencia biológica. Hemos denominado a este apartado *Conocimiento sobre la herencia biológica* y representa el total de los ítems que se presentaron a los estudiantes.

También hemos analizado por separado dos aspectos concretos del cuestionario desde una perspectiva más cualitativa: el primero hace referencia a la *Estructura y localización de los genes y los cromosomas* y el segundo a la *Presencia de cromosomas e información hereditaria en las células*. Se ha hecho énfasis en estos dos aspectos porque, a nuestro juicio, para llegar a comprender en su totalidad los procesos de transmisión de la información del material hereditario, la división celular y las técnicas de biotecnología e ingeniería genética, es necesario que los estudiantes conozcan cómo se organiza y localiza el material hereditario. Por esta razón, hemos conferido a estos aspectos una importancia mayor en nuestra investigación.

Los resultados obtenidos fueron tratados estadísticamente con el paquete estadístico SPSS. Se utilizó la prueba de la Kruskal-Wallis para determinar si existían diferencias significativas entre los diferentes grupos en estudio a partir de las respuestas obtenidas en el pre-test. Esta prueba estadística también permite saber si en el post-test hay diferencias significativas entre grupos Experimentales y Control. Para determinar si en una misma agrupación las ideas manifestadas en cada fase de la investigación diferían de las otras se utilizó la prueba de datos apareados de Wilcoxon. Es decir, pretendíamos determinar si en cada una de las agrupaciones que han recibido diferentes propuestas didácticas hay cambios estadísticamente significativos en las concepciones del alumnado debido al diferente modelo didáctico utilizado.

También hemos desarrollado un índice que hemos definido como índice de mejora (IM). Consiste en asignar a cada estudiante un índice entre 0 y 1 que se obtiene a partir de la expresión matemática: $IM = (Post-test - Pre-test) / 10 - Pretest$, donde post-test es el valor numérico del cuestionario tras la docencia y pre-test es el valor numérico del cuestionario antes de iniciar la secuencia didáctica. Por tanto, cuanto más cerca de 1 se encuentre el IM, mayor diferencia respecto de las ideas iniciales presenta el alumno y podemos decir que sus concepciones se acercan más a las científicamente correctas.

Resultados y discusión

Conocimiento sobre la herencia biológica

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, la distribución de los alumnos en los cuatro grupos Control y en los cinco grupos Experimentales fue al azar. Sin embargo, es posible que las concepciones de los alumnos de cada uno de los grupos no sean todas uniformes antes de iniciar la docencia, sino que existan diferencias entre ellas debidas a un nivel de conocimientos previos sobre la herencia diferente entre el alumnado.

A partir de los resultados obtenidos en el cuestionario en el pre-test ($\chi^2 = 21.131$; $p < 0.001$) se determinó que los cinco grupos Experimentales no eran homogéneos y, a efectos de análisis, se agruparon aquellos que no diferían significativamente entre sí, por lo que se constituyeron estas dos agrupaciones: Experimental 1 (E1) y Experimental 2 (E2). Los grupos Control tampoco eran en su conjunto homogéneos ($\chi^2 = 19.540$; $p < 0.001$) y, a efectos de análisis, se formaron dos nuevas agrupaciones llamadas Control 1 (C1) y Control 2 (C2). La creación de estas nuevas agrupaciones permite asegurar que los resultados que se obtengan sean estadísticamente válidos. Es decir, estas nuevas agrupaciones no responden a criterios de organización de los alumnos en el centro, sino al tratamiento estadístico que se ha dado a los

datos durante el análisis de los resultados. Por tanto, los análisis se realizarán sobre los datos obtenidos en estos grupos acabados de formar.

Cada alumno ha obtenido una cuantificación de las concepciones que manifestó en el cuestionario en cada una de las tres fases de la investigación, sobre un máximo de 26. Hemos establecido cinco intervalos correspondientes a valoraciones del cuestionario, que corresponden a concepciones con diferente grado de corrección científica: muy poco satisfactorias (Intervalo 1); poco satisfactorias (Intervalo 2); moderadamente satisfactorias (Intervalo 3); satisfactorias (Intervalo 4); muy satisfactorias (Intervalo 5). (ver tabla 4).

En la tabla 4 podemos observar que, en el pre-test, predominan valoraciones de los intervalos 1 y 2 en los grupos E1, E2 y C1. Después de la docencia (post-test I), la mayoría de estudiantes de los grupos Experimentales se encuadraban en los intervalos 4 y 5 (satisfactorias o muy satisfactorias), mientras que en los grupos Control, la mayoría de los alumnos se encontraban en los intervalos 3 y 4, correspondientes a concepciones con menor corrección científica. Si observamos lo que sucede en el post-test II, comprobamos que todos los grupos tienen porcentaje similar de valoraciones elevadas pertenecientes al intervalo 4, pero son los E1 y E2 los que presentan mayores valoraciones del intervalo 5 (muy satisfactorias) y menores valoraciones del intervalo 1 (muy poco satisfactorias), situación ésta considerada ideal.

También hemos analizado estadísticamente las diferencias existentes en cada una de las agrupaciones formadas y las hemos comparado antes y después de recibir la docencia; asimismo, hemos comparado el grado de retención observado.

Tabla 4. Resultados del cuestionario en cada una de las fases en estudio en los grupos Control y Experimental (en %).

	Fase de estudio	E1	E2	C1	C2
Valoración del cuestionario entre 0 y 5 (Intervalo 1)	Pre-test	51	59	35	0
	Post-test I	2	0	2	0
	Post-test II	6	5	20	11
Valoración del cuestionario entre 6 y 10 (Intervalo 2)	Pre-test	32	26.5	41	0
	Post-test I	11	17.5	28	18
	Post-test II	15	5	13	0
Valoración del cuestionario entre 11 y 15 (Intervalo 3)	Pre-test	9.5	6	22	73
	Post-test I	20	12	35	54
	Post-test II	30	38	33	44
Valoración del cuestionario entre 16 y 20 (Intervalo 4)	Pre-test	7.5	9	2	27
	Post-test I	26	50	30	18
	Post-test II	30	28.5	33	33
Valoración del cuestionario entre 21 y 26 (Intervalo 5)	Pre-test	0	0	0	0
	Post-test I	41	20.5	4	9
	Post-test II	18	24	0	11

En la tabla 5 se pueden observar las diferencias significativas en las cuatro agrupaciones cuando se comparan cada una de las fases de la investigación. En el post-test I, las dos agrupaciones experimentales muestran diferencias después de la docencia, lo que implica un cambio en las concepciones del alumnado. Sin embargo, sólo uno de los grupos Control ha modificado de manera significativa sus ideas (agrupación C1). Es especialmente revelador el grado de retención de las ideas varios meses después de finalizar la secuencia didáctica (post-test II). En este sentido, los dos grupos que han recibido la propuesta didáctica experimental presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a las manifestadas antes de comenzar el estudio de la genética. En los grupos Control se repite lo comentado anteriormente, es decir, que el modelo tradicional de enseñanza de la herencia ha tenido una cierta capacidad de cambiar las concepciones del alumnado pero en menor medida que el modelo innovador basado en los principios del constructivismo.

Tabla 5. Resultados del test de Wilcoxon cuando comparamos las valoraciones globales del cuestionario en las diferentes fases en estudio. Se muestra el estadístico Z, que se señala con un asterisco cuando los valores de significación p son menores que 0.01.

	Pre-test-Post-test I	Post-test I- Post-test II	Pre-test – Post-test II
C1	-5,513*	-2.294*	-2,36*
C2	-0,356	-0,677	-0,632
E1	-5,972*	-4,063*	-3,779*
E2	-5,445*	-0,835	-3,923*

Si analizamos con detalle las valoraciones que han obtenido los diferentes grupos en el conjunto del cuestionario, observamos que en el pre-test (Figura 1) la mayor parte del alumnado alcanzaba puntuaciones inferiores a 10, a excepción del grupo C2 que presentaba un porcentaje elevado de alumnos con valoraciones bastante positivas, lo que les situaba de entrada, en una posición conceptual mejor que el resto de estudiantes. Después de la docencia las valoraciones del alumnado mejoran, situándose gran parte de los estudiantes con puntuaciones mayores a 16 e incluso a 21 (Figura 2). Sin embargo, es en los grupos Experimentales donde se produce el mayor cambio respecto del pre-test, destacando un porcentaje relativamente elevado de alumnos con valoraciones superiores a 21. Cabe destacar especialmente la agrupación C2 que partía de niveles bastante elevados pero que tras la acción docente no logra alcanzar valores aún mayores; todo lo contrario, se mantienen en las concepciones iniciales en su gran mayoría.

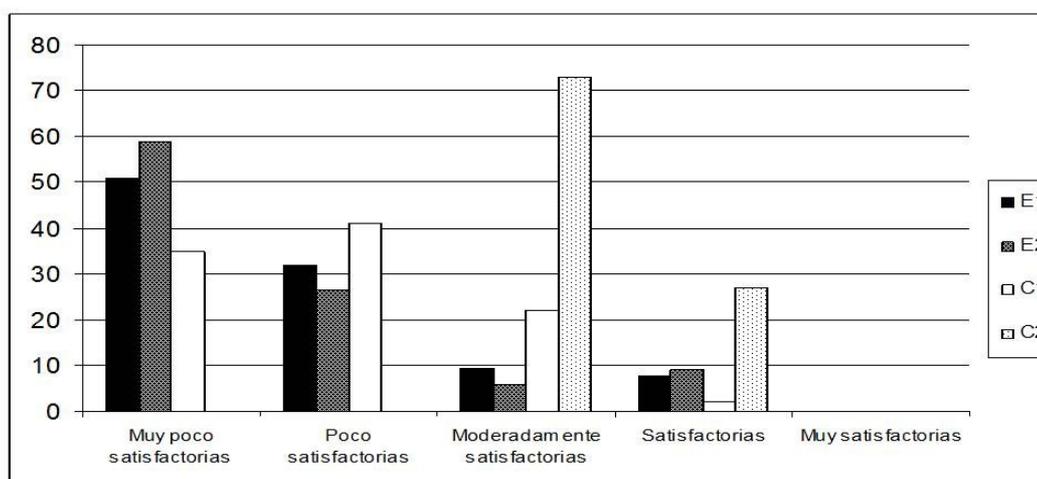


Figura 1. Valoraciones del cuestionario en el pre-test (en %).

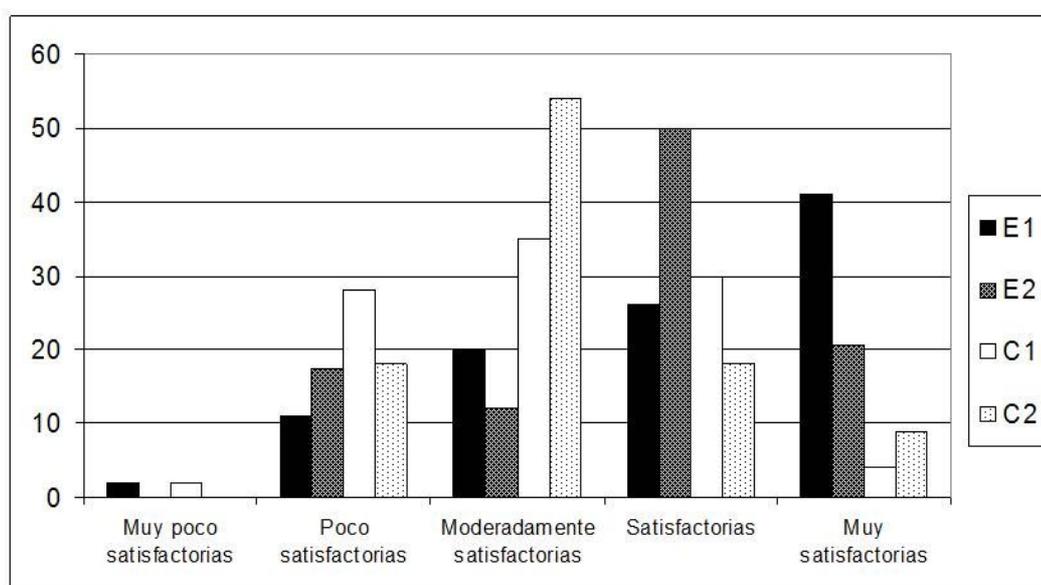


Figura 2. Valoraciones del cuestionario en el post-test I (en %).

El índice de mejora

El índice de mejora del cuestionario nos permite conocer hasta qué punto la intervención didáctica ha permitido que las concepciones del alumnado se acerquen a las consideradas como científicamente correctas. Pero además queremos saber si se producen diferencias entre los grupos Control y Experimental para calibrar la eficacia de uno respecto del otro.

En la figura 3 podemos observar la distribución de los índices de mejora en las diferentes agrupaciones en estudio.

Podemos comprobar que en los grupos Control apenas hay alumnos que hayan obtenido un índice de mejora superior a 0.75, mientras que en los grupos Experimentales el porcentaje es considerable, concretamente un 28.30% en E1 y un 23.52% en E2.

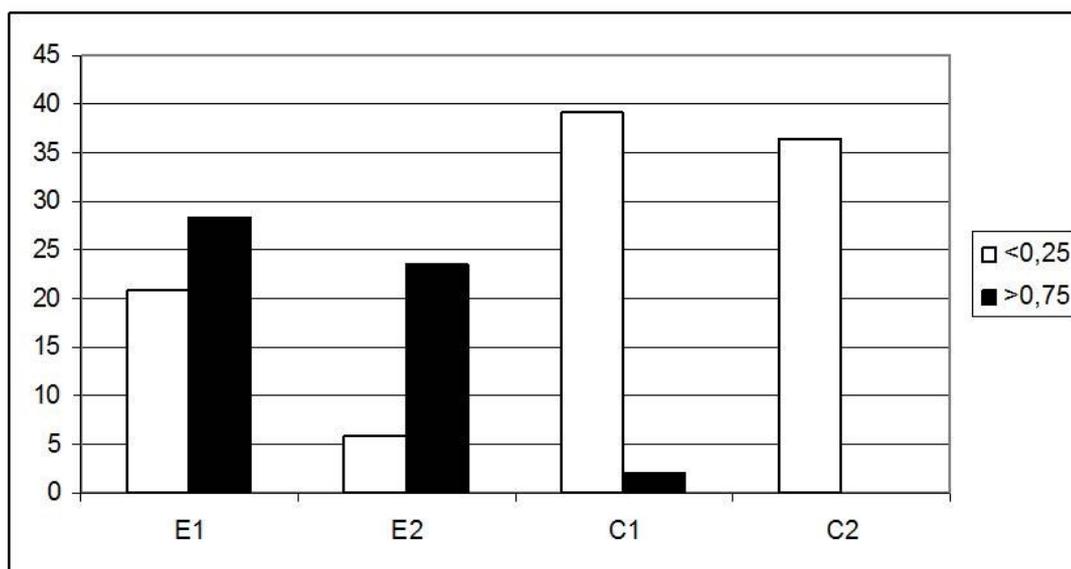


Figura 3. Distribución de los índices de mejora en las agrupaciones.

El porcentaje de alumnos de tratamiento Experimental con índice inferior a 0.25 es bastante menor que en los controles, destacando el grupo E2, donde sólo el 5.88% del alumnado tiene un índice tan bajo. Por el contrario, en los grupos Control una gran parte de los alumnos se encuentran en este intervalo, concretamente un 39.13% en C1 y un 36.36% en C2.

Estos datos nos confirman que, efectivamente, el tratamiento didáctico Experimental ha sido capaz de producir una mayor adaptación de las concepciones del alumnado a las científicamente correctas y provocar un cambio conceptual. En los grupos que han seguido un modelo tradicional de enseñanza de la genética, aun partiendo de niveles conceptuales altos y moderadamente correctos, como el grupo C2 que presentaba elevadas valoraciones del cuestionario, como puede comprobarse en la Figura 1, no se ha observado esta misma tendencia.

Estructura y localización de los genes y cromosomas

Para determinar las concepciones del alumnado en este apartado, utilizamos fundamentalmente preguntas de respuesta abierta, cuyas respuestas debían ser afirmaciones escritas en unos casos y dibujos o esquemas en otros. Las manifestaciones del alumnado en el pre-test, el post-test I y el post-test II fueron sistematizadas y posteriormente cuantificadas. Debido a la gran envergadura de este análisis, por razones de espacio, no pueden mostrarse en el presente trabajo en su totalidad, pero sí podemos comentar los aspectos más relevantes de los datos obtenidos.

Antes de iniciar la unidad didáctica, los alumnos han demostrado tener problemas para conocer cómo es la estructura de los cromosomas, dónde se encuentran y su relación con los genes y la molécula de ADN. Encontramos resultados similares a los hallados por Banet y Ayuso (1995) en el sentido de situar los cromosomas en el citoplasma celular aun representando gráficamente las células con un núcleo interfásico. Además, hay alumnos que ni tan sólo saben que los cromosomas se encuentran en las células. Los resultados obtenidos nos muestran también que no conocen el concepto de cromátida (Brown, 1990) y tampoco relacionan la estructura de la molécula de ADN con la estructura del cromosoma (Kindfield, 1991; Banet y Ayuso, 2000).

Después de la docencia, algunas de las dificultades encontradas en el pre-test han podido ser superadas, especialmente por los alumnos pertenecientes a los grupos Experimentales. Efectivamente, mientras que por término medio el 5.3% de los alumnos de grupos Control muestran un conocimiento correcto de la estructura del cromosoma, en los alumnos que han recibido el nuevo modelo, este valor se sitúa en el 38.2%. Es especialmente destacable que muchos de estos alumnos son capaces de representar cromosomas metafásicos en el citoplasma de una célula en división, lo que permite superar las dificultades de los alumnos en conocer la estructura de los cromosomas descritas por Banet y Ayuso (2000) y Smith y Kindfield (1999). Coincidimos con Lewis y Wood-Robinson (2000) en la necesidad de relacionar el conocimiento de la estructura y localización de los cromosomas con los procesos de división celular, mitosis y meiosis y con la resolución de los problemas de genética, ya que si el alumnado localiza correctamente los cromosomas y los relaciona con la división celular, puede afrontar con mayor éxito la resolución de problemas de genética y por extensión un mejor conocimiento de los mecanismos de la herencia biológica. Los resultados nos indican que son los alumnos de los grupos Experimentales los que han alcanzado en mayor grado dicho conocimiento. Como ya hemos indicado, algunos alumnos de grupos Control relacionan correctamente la molécula de ADN con la estructura cromosómica; sin embargo, únicamente encontramos alumnos de grupos Experimentales que puedan diferenciar cromátidas y cromosomas homólogos.

Por lo que hace referencia al conocimiento de los genes, hemos obtenido en el pre-test los mismos resultados que Banet y Ayuso (2000), Lewis y Wood-Robinson (2000) y Lewis y Kattmann (2004), es decir, confusión sobre dónde se encuentran los genes ya que muy pocos alumnos son capaces de relacionarlos con cromosomas y ADN. De hecho, únicamente el 13% del alumnado, sitúa los genes en los cromosomas, resultados éstos que son comparables a los encontrados por Lewis et al. (2000) que obtiene el 11%; Banet y Ayuso (1995) obtienen un 28%, mientras que Lewis y Wood-Robinson (2000) observan un 14.5%.

También hemos detectado que los estudiantes consideran las células sexuales las portadoras de los genes, al igual que Banet y Ayuso (2000); además, existe gran confusión, o incluso desconocimiento, de la relación entre gen y alelo (Radford y Bird-Stewart, 1982; Lewis et al., 2000).

Aunque Bahar, Johnstone y Sutcliffe (1999) han señalado la dificultad del alumnado en relacionar genes con cromosomas y ADN, hemos comprobado que el 7.9% de los alumnos que recibieron nuestra propuesta lo hacen, pero ninguno de los grupos Control. Si bien es un porcentaje pequeño, destacamos su importancia en el contexto general de la investigación, ya que se correlaciona con la tendencia general de obtención de esquemas conceptuales más correctos en los grupos Experimentales después del proceso de enseñanza-aprendizaje.

A partir de estos resultados, hemos cuantificado de manera conjunta las concepciones científicamente correctas (tabla 6). Podemos observar que, aunque en el pre-test todos los alumnos se encontraban en las mismas posiciones conceptuales, una vez finalizada la docencia los grupos Experimentales presentan un mayor porcentaje de alumnado que manifiesta unas concepciones más correctas científicamente. Destacamos especialmente los resultados del post-test II, que señalan un grado de retención superior en los grupos Experimentales que en los grupos Control.

Tabla 6. Porcentaje de alumnado con concepciones más correctas científicamente.

	Pre-test	Post-test I	Post-test II
Grupos Experimentales	0	38.2	20.6
Grupos Control	0	21.7	12.7

Presencia de cromosomas e información hereditaria en las células

Entre el alumnado existe la creencia de que no todas las células poseen cromosomas y de que no en todas ellas dichos cromosomas tiene una función. Las células sexuales suelen ser las portadoras fundamentales de cromosomas y donde se llevan a cabo las funciones propias. En el pre-test también encontramos la idea de que la información hereditaria se encuentra en las células sexuales y que los cromosomas sexuales únicamente se encuentran en los gametos; estos resultados son coincidentes con los de otros autores (Hackling y Treagust, 1985; Banet y Ayuso, 1995; Lewis y Wood-Robinson, 2000). Es decir, el alumnado desconoce que todas las células poseen información hereditaria y por tanto que en todas podemos encontrar los cromosomas, tanto autosómicos como sexuales. En la tabla 7 podemos observar las concepciones del alumnado sobre la presencia de información hereditaria en las células y de qué manera las ideas han cambiado en las diferentes fases de estudio en cada agrupación de estudiantes.

Podemos comprobar que después de la docencia, se produce un incremento de alumnos que conocen que todas las células poseen información hereditaria, aunque esta tendencia es considerablemente mayor en los grupos que han seguido la propuesta didáctica Experimental.

No podemos afirmar que el modelo tradicional sea incapaz de modificar las concepciones del alumnado en este sentido, pero sí que el modelo basado en los principios del constructivismo presenta una mayor capacidad de transformación. De hecho, en los grupos Experimentales hay significación estadística ($Z = -2.5$, $p = 0.012$) que no encontramos en los grupos Control. En las dos agrupaciones Experimentales se produce un incremento notable de alumnos que sitúan en todas las células tanto los cromosomas como los cromosomas sexuales. Aunque en los grupos Control también se produce este incremento, no es tan importante como en los grupos Experimentales, especialmente por los que hace referencia a la ubicación de los cromosomas sexuales, donde la diferencia es casi del 50%.

Tabla 7. Conocimiento del alumnado de la estructura del material hereditario (en %).

	Fase de estudio	E1	E2	C1	C2
Todas las células tienen información hereditaria	Pre-test	34.2	35.4	41.3	58.3
	Post-test I	83.8	58.8	72.3	63.6
	Post-test II	86.6	87.5	80	80
Todas las células tienen cromosomas	Pre-test	38.6	64.5	45.8	58.3
	Post-test I	93	100	89.6	66.7
	Post-test II	43.9	74.2	27.1	75
Todas las células tienen cromosomas sexuales	Pre-test	0	19.4	12.5	25
	Post-test I	61.4	64.5	31.3	33.3
	Post-test II	33.3	54.8	12.5	41.7
Sólo las células sexuales contienen información hereditaria	Pre-test	35.6	61.3	37.7	41.7
	Post-test I	10.3	38.2	17	36.4
	Post-test II	10	8.3	13.3	20
Los cromosomas realizan su función en todas las células	Pre-test	28.3	54.8	59.4	0
	Post-test I	85.7	77.4	86.9	90.9
	Post-test II	24	17	10	10
Todas las células contienen genes	Pre-test	45	55	54	100
	Post-test I	89	94	82	100
	Post-test II	25	22	11	10

Aunque en el post-test II se observa un descenso de las concepciones científicamente correctas, dicha disminución es menos acusada en las agrupaciones experimentales que en las agrupaciones Control. Nuestra propuesta didáctica ha conseguido que tanto después de la docencia como varios meses después, las ideas de un alto porcentaje del alumnado se ajusten a las científicamente correctas. Atribuimos esta situación al énfasis que se ha hecho en las actividades planteadas en la secuencia didáctica y a la utilización de modelos.

Implicaciones didácticas

Del impacto de nuestro modelo didáctico en el aula podemos extraer algunas implicaciones didácticas para la enseñanza de la genética en la Educación Secundaria:

1. Potenciar la utilización de modelos tridimensionales

Nos referimos a modelos que muestren la estructura de la célula eucariota; la estructura de los cromosomas y su relación con la molécula de ADN y los genes y los procesos de división celular. Concretamente, el modelo de cromosoma es capaz de dar a conocer la estructura y número de dichas partículas. También permite diferenciar entre cromátidas hermanas y

cromosomas homólogos. Por otra parte, este modelo también hace posible trabajar los conceptos de gen y alelo y las relaciones de dominancia y recesividad, así como los términos de homocigosis y heterocigosis, genotipo y fenotipo.

El uso de este modelo ha de estar ligado a la resolución de los problemas de genética, de manera que si el alumnado conoce la localización de los genes y los cromosomas correctamente y puede relacionar estas estructuras con la meiosis, podrá resolver con mayor facilidad los problemas de genética.

Los modelos de mitosis y meiosis son útiles si se trabajan en el mismo tema, ya que ambos procesos están muy ligados. Permite relacionar los diferentes momentos de las divisiones celulares con los términos de célula haploide y célula diploide y a continuación con cigoto y crecimiento del individuo. A partir de aquí se ha de dar a conocer al alumnado que todas las células contienen la misma información hereditaria.

2. Utilizar referentes cercanos al alumnado

El estudio de la genética a partir de especies vegetales o animales que son desconocidas por el alumnado y la aplicación de problemas de genética sobre ellos, no facilita el proceso de aprendizaje. Proponemos que se utilicen referentes cercanos al alumno, como pudieran ser animales domésticos y, especialmente, aspectos relacionados con la herencia humana.

Una propuesta más atrevida pero que nos ha dado resultados positivos es que los alumnos diseñen su propio organismo y le atribuyan características. A partir del organismo fantástico se pueden trabajar los diferentes conceptos de genética y se puede aplicar sobre él el modelo de cromosoma, además de permitir la aplicación de los problemas de genética sobre dicho organismo.

Consideramos que en el caso de los alumnos que recibieron la enseñanza a partir de nuestra secuencia didáctica, la utilización de este recurso ha sido un elemento importante de motivación en el alumnado y que ha permitido una transformación de las ideas detectadas en el pre-test.

3. No comencemos por Mendel

El estudio de las leyes de Mendel suele ser el inicio del tema dedicado a genética, tal como muestran la mayor parte de libros de texto y la práctica diaria de buena parte del profesorado de biología. Nosotros cuestionamos que lo primero que conozca el alumno de Educación Secundaria sobre la herencia sean los experimentos del padre de la genética.

Consideramos que los estudios de los experimentos de Mendel y de las leyes que se derivan deben ser estudiados cuando el alumnado ya tiene un conocimiento suficiente de los procesos de la herencia y la resolución de problemas de genética, pudiendo ser abordados como actividades de aplicación de nuevos conceptos.

4. Estudiar meiosis y mitosis

En nuestra opinión el estudio de la mitosis y de la meiosis debe llevarse a cabo en el mismo tema y de forma relacionada. En ambos casos es conveniente centrarse en su significado biológico y prescindir del detalle de sus fases.

La mitosis debe relacionarse con el proceso de crecimiento celular a partir de un cigoto y con el reparto del material hereditario entre las células hijas. De esta manera se facilita que el alumnado sea consciente de que todas las células del cuerpo provienen de una única y, por tanto, todas contienen la misma información, aunque en cada tipo celular se transcriban unos determinados genes.

El estudio de la meiosis debe centrarse en su papel como fuente de variabilidad y como proceso formador de las células sexuales haploides. Por tanto, ha de relacionarse necesariamente con la resolución de problemas.

Ambos procesos también deben conectarse con la estructura y localización de los cromosomas, ya que es durante la mitosis y la meiosis cuando los cromosomas se hacen visibles al microscopio óptico.

5. Un enfoque diferente de los problemas de genética

El alumnado no relaciona la resolución de los problemas de genética con los procesos de la meiosis ni la estructura de los cromosomas, genes o alelos.

Si queremos evitar falsos aprendizajes derivados de la aplicación mecánica de diversos algoritmos de cálculo, el proceso de aprendizaje de la resolución de problemas debe iniciarse a partir de modelos de herencia conocida y con caracteres cercanos a ellos. A continuación se deben plantear situaciones en las que no se conozca la relación de dominancia ni el patrón de herencia e introduciendo el uso de pedigríes, es decir, el tipo de problema efecto-causa.

La resolución de los problemas debe relacionarse con la meiosis y la formación de gametos haploides que contienen un único alelo. Para ayudar a su comprensión es conveniente utilizar el modelo de cromosoma y el de meiosis y proponer al alumnado que intente resolver el ejercicio mientras representa en el modelo que él ha construido la situación que se le ha planteado.

Los problemas de alelomorfismo múltiple y de herencia ligada al sexo deben ser planteados cuando el alumno ya ha adquirido un cierto grado de destreza en la resolución de problemas y como actividades de aplicación.

En definitiva, que el alumno conozca perfectamente la estructura y la localización del material hereditario es un paso imprescindible para una correcta comprensión de los mecanismos de transmisión de la herencia. Un mayor nivel de conocimiento de la genética puede permitir a los estudiantes alcanzar un grado de alfabetización científica suficiente para discriminar las informaciones de los medios de comunicación y capacitarlos para la toma de decisiones sobre aspectos relacionados con las aplicaciones de la genética moderna.

Conclusiones

Muchos de los trabajos publicados en el campo de la didáctica de la genética presentan dichas ideas y proponen estrategias para su transformación. Sin embargo, no existen muchas publicaciones que muestren cómo las ideas del alumnado se han modificado gracias a dichas propuestas en forma de acción docente en el aula, aunque podríamos destacar los estudios llevados a cabo por Ayuso (2000), Banet y Ayuso (2000), Ibáñez y Martínez Aznar (2005) y Rotbain et al. (2006). En este contexto, damos especial relevancia a nuestros hallazgos ya que pueden contribuir a una mejor comprensión de los procesos de aprendizaje de la genética, pudiendo concluir que:

1. Las concepciones del alumnado sobre la naturaleza del material hereditario detectadas en el pre-test coinciden en gran medida con las halladas por otros investigadores.
2. Las ideas del alumnado de los grupos Experimentales se han podido modificar en gran medida tras recibir la instrucción. Esto no está en contradicción con el hecho de que el modelo de enseñanza tradicional también ha sido eficaz en la transformación de algunas ideas del alumnado.

3. El conocimiento de la naturaleza, localización y mecanismos de transmisión de la información hereditaria en los grupos que recibieron nuestra propuesta didáctica es más profundo.
4. El modelo innovador de enseñanza de la genética al que se ha sometido el grupo Experimental ha permitido que las concepciones del alumnado sobre la naturaleza del material hereditario, su localización y estructura se modifiquen y se orienten hacia una mayor corrección científica, verificando así nuestra primera hipótesis.
5. Las agrupaciones Experimentales alcanzan valores más elevados del índice de mejora, confirmando así nuestra segunda hipótesis.

Referencias bibliográficas

- Ayuso, E. (2000). *La enseñanza de la Herencia Biológica y la Evolución de los seres vivos. Fundamentación, planificación y evaluación de una propuesta didáctica para la Educación Secundaria Obligatoria*. Tesis doctoral. Universidad de Murcia.
- Ayuso, E., Banet, E., y Abellán, T. (1996). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y el bachillerato: II. ¿Resolución de problemas o realización de ejercicios? *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (2), 127-142.
- Bahar, M., Johnstone, A.H., y Sutcliffe, R. (1999) Investigation of students' cognitive structure in elementary genetics through word association tests. *Journal of Biological Education*, 33 (3), 134-141.
- Banet, E. (2000). *La enseñanza y el aprendizaje del conocimiento biológico*. En Perales, F. y Cañal, P. *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (p. 449-478). Alcoy: Marfil.
- Banet, E., y Ayuso, E. (1995). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato: I. Contenidos de enseñanza y conocimientos de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 13 (2), 137-153.
- Banet, E., y Ayuso, E. (2000). Teaching Genetics at Secondary School: A Strategy for Teaching about the Location of Inheritance Information. *Science Education*, 84, 313-351.
- Bliss, J., Monk, M., y Ogbor, J. (1983). *Qualitative Data Analysis for Educational Research. A Guide for the Uses of Systemic Networks*. Londres:Croom Helm.
- Brown, C.R. (1990). Some misconceptions in meiosis shown by students responding to an advanced practical examination question in biology. *Journal of Biological Education*, 24 (3), 182-186.
- Caballero, M. (2008). Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Enseñanza de las Ciencias*, 26 (2), 227-243.
- Cho,H., Kahle, J.B., y Nordland, F.H. (1985). An investigation of high school Biology textbooks as sources of misconceptions and difficulties in genetics and some suggestions for teaching genetics. *Science Education*, 69 (5), 707-719.
- Chinnici, J. Yue, J., y Torres, K. (2004). Students as "Human Chromosomes" in Role-Playing Mítosis & Meiosis. *The American Biology Teacher*, 66 (1), 42-48.
- Cordon, R. Juárez, M.L., Cascales, A., y Manresa, A. (2005). Construcción de maquetas de ADN. *Alambique*, 45, 71-76.
- Dawson, W., y Schibeci, R. (2004). Western Australian high school students' attitudes toward biotechnology processes. *Journal of Biological Education*, 38(1), 7-12.

- Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. (1985). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid: MEC/ Morata.
- Duit, R., y Treagust, D.F. (2003). Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Duncan, R.G., y Reiser, B.J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 44 (7), 938-959.
- Duncan, R.G., Rogat, A.D., y Yarder, A. (2009). A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th-10th grades. *Journal of Research in Science Teaching*, 46 (6), 655-674.
- Fernández, J., González, B.M., y Moreno, T. (2003). Las analogías como modelo y como recurso en la enseñanza de las ciencias. *Alambique*, 35, 82-89.
- García Cruz, C.M. (1990). Algunos errores conceptuales sobre genética derivados de los libros de texto. *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (2), 197-198.
- Hackling, M.W., y Treagust, D. (1984). Research data necessary for meaningful review of grade ten high school genetics curricula. *Journal of Research in Science Teaching*, 21 (2), 197-209.
- Ibáñez, T., y Martínez Aznar, M. (2005). Solving problems in Genetic II: Conceptual restructuring. *International Journal of Science Education*, 27 (12), 1495-1519.
- Infante-Malachias, M.E., Queiroz, I., Weller, M., y Santos, S. (2010). Comprehension of basic genetic concepts by brazilian undergraduate students. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 9 (3), 657-668. En <http://www.saum.uvigo.es/reec>
- Íñiguez F.J., y Puigserver, M. (2001). ¿Qué opinan los alumnos sobre la ubicación de los cromosomas? *Enseñanza de las Ciencias*, núm. Extra, 31-32.
- Jiménez Aleixandre, M.P. (2000). Modelos didácticos. En F.J. Perales y P. Cañal, (eds.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pp.165-186). Alcoy: Marfil.
- Johnstone, A.H., y Mahmoud, N.A. (1980). Isolating topics of high perceived difficulty in school biology. *Journal of Biological Education*, 14 (2), 163-166.
- Kibuka-Sebitosi, E. (2007). Understanding genetics and inheritance in rural schools. *Journal of Biological Education*, 41 (2), 56-61.
- Kindfield, A. (1991). Confusing chromosome number and structure: a common student error. *Journal of Biological Education*, 25 (3), 193-200.
- Kindfield, A. (1994). Understanding a Basic Biological Process: Expert and Novice Models of Meiosis. *Science Education*, 78 (3), 255-283
- Law, N., y Lee, Y. (2004). Using an iconic modelling tool to support the learning of genetics concepts. *Journal of Biological Education*, 38 (3), 118-141.
- Lewis, J., Leach J., y Wood-Robinson, C. (2000). All in the genes? Young people's understanding of the nature of genes. *Journal of Biological Education*, 34 (2), 74-79.
- Lewis, J., y Kattmann, U. (2004). Traits, genes, particles and information: re-visiting students' understandings of genetics. *International Journal of Science Education*, 26 (2), 195-206.
- Lewis, J., y Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance: do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, 22 (2), 177-195.

- Longden, B. (1982). Genetics: are there inherent learning difficulties? *Journal of Biological Education*, 16 (2), 137-146.
- Marbach-Ad, G., Rotbain, Y., y Stavy, R. (2008). Using computer animation and illustration to improve High School students' achievement in Molecular Genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 45 (3), 273-292.
- Martínez Aznar, M., y T. Ibáñez (2005). Solving problems in genetics. *International Journal of Science Education*, 27 (1), 101-121.
- Pashley, M. (1994). A chromosome model. *Journal of Biological Education*, 28(3), 157-161.
- Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W., y Gertzog, W.A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Priestland, R.N. (1982). A method for demonstrating genetic principles using an imaginary organism. *Journal of Biological Education*, 16 (2), 141-143.
- Radford, A., y Bird-Stewart, J.A. (1982). Teaching genetics in schools. *Journal of Biological Education*, 16 (3), 177-180.
- Ramagoro, G., y Wood-Robinson, C. (1995). Botswana children's understanding of biological inheritance. *Journal of Biological Education*, 29 (1), 60-71.
- Rotbain, Y., Marbach-Ad, G., y Stavy, R. (2006). Effect of bead and illustrations models on High School students' achievement in Molecular Genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 43 (5), 500-529.
- Sánchez G., y Valcárcel, M.V. (1993). Diseño de unidades didácticas en el área de Ciencias Experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(1), pp. 33-44.
- Smith, M.U. (1988). Successful and unsuccessful problem solving in classical genetic pedigrees. *Journal of Research in Science Teaching*, 25 (6), 411-433.
- Smith, M., y Kindfield, A. (1999). Teaching Cell Division. *The American Biology Teacher*, 61 (5), 366-371.
- Stewart, J., y Dale, M. (1989). High School Students' Understanding of chromosome/gene behavior during meiosis. *Science Education*, 73 (4), 501-521.
- Stewart, J.; Hafner, R. y Dale, M. (1990). Students' alternative views of meiosis. *The American Biology Teacher*, 52 (4), 228-232.
- Van Driel, J.H., y N. Verloop (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International Journal of Science Education*, 24 (12), 1255-1272.
- Venville, G.J., y Donovan, J. (2005). Searching for clarity to teach the complexity of the gene concept. *Teaching Science*, 51 (3), 20-24.
- Wood-Robinson, C., Lewis, J., Leach, J., y Driver, R. (1998). Genética y formación científica: resultados de un proyecto de investigación y sus implicaciones sobre los programas escolares y la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (1), 43-61.

ANEXOS

Anexo 1

Instrumento de detección de concepciones del alumnado usado durante la investigación

1. Indica con una cruz los organismos del cuadro que creas que tienen células.

	Todos	Algunos	Ninguno	No lo sé
Plantas				
Animales				
Setas				

2. Indica con una cruz los organismos del cuadro que creas que tienen cromosomas.

	Todos	Algunos	Ninguno	No lo sé
Plantas				
Animales				
Setas				

3. ¿Qué células tienen ADN?
4. ¿Qué entiendes por información hereditaria?
5. Indica qué células contienen información hereditaria.
 - Espermatozoides
 - Células del cerebro
 - Células del corazón
 - Óvulos
 - Células musculares
 - Todas
6. ¿Qué función tienen los cromosomas?
7. ¿En qué células hacen su función los cromosomas?
 - Espermatozoides
 - Células del cerebro
 - Células del corazón
 - Óvulos
 - Células musculares
 - Todas
8. Indica qué células tienen cromosomas
 - Espermatozoides
 - Células del cerebro
 - Células del corazón
 - Óvulos
 - Células musculares
 - Todas
9. ¿Qué células tienen cromosomas sexuales?
 - Espermatozoides
 - Células del cerebro
 - Células del corazón
 - Óvulos
 - Células musculares
 - Todas
10. ¿En qué células hacen su función los cromosomas sexuales?
11. ¿Dónde se encuentran los cromosomas? Haz un dibujo o esquema que lo muestre.
12. ¿Qué son los genes?

13. ¿Qué células contienen genes?

- Espermatozoides
- Células del cerebro
- Células del corazón
- Óvulos
- Células musculares
- Todas

14. ¿Dónde se encuentran los genes? Haz un esquema o dibujo que lo muestre.

Anexo 2

Ejemplos de organismos fantásticos creados por el alumnado.

Anexo 3

Ejemplo de actividad utilizada durante la propuesta didáctica experimental.

Actividad inicial

Observa los dos modelos de cromosoma que el profesor acaba de mostrar. Responde a continuación a las siguientes preguntas:

1. El cromosoma está dividido en cinco porciones y en cada una de ellas hay escrita una cosa referida al organismo fantástico. ¿Qué crees que representan estas divisiones?
2. En los dos cromosomas aparece lo mismo. ¿Por qué?
3. Indica cuál es el origen de estos dos cromosomas.

Actividad de reestructuración de ideas

Hemos mostrado dos modelos de cromosoma con diferentes genes y cada gen con dos alelos (salvo uno que presenta tres). Intenta responder a las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué representan las letras que hemos ido utilizando en el modelo?
2. ¿Por qué de cada gen hay dos alelos?
3. Hay un tipo de células que sólo tienen un alelo de cada gen, ¿sabes cuáles son?
4. ¿Por qué sólo tienen un alelo?

Actividad de aplicación

A partir de la información que el profesor te suministra, construye los cromosomas con la información hereditaria que tendría tu organismo fantástico.

1. Indica en qué casos el organismo es homocigoto y en qué casos es heterocigoto.
2. Indica la relación de dominancia entre los alelos en cada caso.

Anexo 4

Imagen de modelo de cromosoma utilizado durante la secuencia didáctica.