



## MODELOS PARCIALES POSIBLES DE LA HERENCIA GENÉTICA EN ESTUDIANTES DE BACHILLERATO

*Possible Partial Models of genetic inheritance in high school students*

**Beatriz Eugenia García-Rivera** [beatriz.garcia@icat.unam.mx]

**Leticia Gallegos Cázares** [leticia.gallegos@icat.unam.mx]

**Fernando Flores Camacho** [fernando.flores@icat.unam.mx]

**Araceli Báez Islas** [araceli.islas@icat.unam.mx]

*Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Mexico City, México*

### Resumen

Este trabajo analiza los modelos mentales desde la perspectiva de los Modelos Parciales Posibles (MPP), que permiten conocer el funcionamiento de los procesos explicativos de los estudiantes para una determinada fenomenología. La muestra se conformó por 186 alumnos de bachillerato que cursaban la asignatura de Biología V, quienes resolvieron un cuestionario previamente validado. Los resultados evidenciaron tres modelos. Los MPPI y MPPII revelan concepciones sustancialistas y estáticas de los procesos genéticos, que llevan al alumno a generar explicaciones lejanas al conocimiento científico. Los alumnos con el MPPIII realizan inferencias más completas y cercanas al conocimiento científico, estableciendo relaciones entre los mecanismos de herencia y los procesos meióticos. Estos hallazgos permiten reconocer que todos los estudiantes de la muestra pueden construir explicaciones sobre la herencia genética y pone de manifiesto la importancia que hagan explícitos sus razonamientos para identificar los principales problemas de comprensión del tema.

**Palabras-Clave:** Modelos mentales; representaciones mentales; representaciones simbólicas; herencia genética; bachillerato.

### Abstract

This work analyzed the mental models from the perspective of the Possible Partial Models (PPM), which allow us to know the functioning of the students' explanatory processes for a certain phenomenology. The sample was made up of 186 high school students who took the subject of Biology V, who answered a previously validated questionnaire. The results evidenced three models. The MPPI and MPPII show substantial and static conceptions of genetic processes, which lead the student to generate explanations that are far from scientific knowledge. Students who exhibit the third model MPPIII, make more complete inferences closer to scientific knowledge, and show relationships between the mechanisms of inheritance and meiotic processes. These findings make it possible to recognize that all the students in the sample can, within a PPM, of constructing sound reasonings about genetic inheritance and highlight the importance of students explicit their reasoning to identify the main comprehension problems about this topic.

**Keywords:** Mental models; mental representations; symbolic representations; genetic heritage; high school.

## **INTRODUCCIÓN**

### **La importancia de los modelos en el aprendizaje de la genética**

En la actualidad, contar con un conocimiento básico de genética es fundamental para la alfabetización científica, pues está presente en los ámbitos científico, social, económico y ético. La genética ha dejado de ser un tema solamente académico y médico, para constituirse en un aspecto en el que la sociedad debe tomar decisiones informadas que impactan en su presente y futuro. Sin embargo, a pesar de su relevancia e incidencia en la vida cotidiana, numerosos estudios dan cuenta que este tema se ubica entre los más difíciles de comprender para los estudiantes de distintos niveles educativos. Por ejemplo, diversos trabajos documentan las ideas previas que alumnos de secundaria y bachillerato tienen al respecto (Albaladejo & Lucas, 1988; Bugallo-Rodríguez, 1995; Hackling & Treagust, 1984; Kinnear, 1983; Lewis, Leach, & Wood-Robinson, 2000b, 2000c; Lewis & Kattmann, 2004; Muela & Abril, 2014) y son concepciones que, en general, no son compatibles con conocimiento científico. Así, se ha reportado, por ejemplo, que hay alumnos que consideran que no todos los organismos vivos tienen información genética, otros que identifican la meiosis como el proceso de fertilización, entre muchas otras ideas previas.

Otras investigaciones reportan, además de ideas previas, problemas de comprensión en cuanto a procesos hereditarios y los niveles en los que estos ocurren. Un claro ejemplo es la meiosis, pues se ha encontrado que la mayoría de los estudiantes no vincula este proceso con la formación de gametos ni con los mecanismos de herencia, como dominancia y recesividad (Ibáñez & Martínez-Aznar, 2005; Lewis, Leach, & Wood-Robinson, 2000a; Stewart, 1982), por lo que, en forma mecánica y carente de significado, utilizan representaciones simbólicas como los cuadros de Punnett. De igual manera, son constantes los problemas de los estudiantes para transitar entre los niveles explicativos que el tema demanda (Flores-Camacho, Calderón-Canales, García-Rivera, Gallegos-Cázares & Báez-Islas, 2021; Estébanez, 2014; Legarralde, Gallarreta, Vilches, & Menconi, 2014; Venville & Donovan, 2005), pues utilizan al ADN como sinónimo de cromosoma, gen o alelo (Mills-Shaw, Van Horne, Zhang, & Boughman, 2008), además de que la mayoría no identifica la estructura y ubicación de esas entidades en las células (Caballero, 2008; Iñiguez, 2005; Lewis et al., 2000a; Lewis & Wood-Robinson, 2000). Otros de los problemas frecuentes es que no establecen relaciones entre el código genético, la síntesis de proteínas y la expresión génica (Duncan & Reiser, 2007; Duncan, Rogat, & Yarder, 2009; Marbach-Ad, Rotbain, & Stavy, 2008; Rotbain, Marbach-Ad, & Stavy, 2006), por lo que generan modelos explicativos a nivel macroscópico aun cuando se trata de procesos moleculares, situación que tiene relación con la concepción generalizada de que los genes “son los rasgos” o “portan los rasgos” (Thörne, Gericke, & Hagberg, 2013), sin que los vinculen dentro de sus modelos con los procesos o mecanismos genéticos (Southard, Wincw, Meddleton & Bolger, 2016). En trabajos que han diseñado y desarrollado intervenciones en aula con diferentes metodologías y enfoques (Banet & Ayuso, 2000; Iñiguez & Puigcerver, 2013; Sigüenza, 2000), también se reporta que los estudiantes enfrentan diversos problemas para comprender, representar y establecer conexiones entre los conceptos genéticos.

Ante este panorama, es evidente que una de las mayores complejidades a la que se enfrentan los estudiantes para aprender acerca de los procesos hereditarios es establecer relaciones entre los diferentes conceptos y procesos genéticos. Stewart, Cartier y Passmore (2005), mencionan que, para lograr una comprensión clara y completa de los procesos de herencia genética, los estudiantes deben realizar una conexión entre tres modelos conceptuales; el genético, referido a conocer los patrones de herencia y sus probabilidades de transmisión; el meiótico, concerniente a la formación de los gametos mediante meiosis; y el molecular, que implica conocer los mecanismos para la expresión génica. Sin embargo, que los estudiantes puedan realizar conexiones entre esos tres modelos, implicaría que, a su vez, construyan modelos representacionales que les permitan establecer, a través de inferencias, tales conexiones en términos explicativos.

En este sentido, coincidimos con Bahar, Johnstone y Hansell (1999), Jalmo y Sumandi (2018), así como Saka, Cerrah, Akdeniz y Ayas (2006) en que conocer los modelos mentales que los estudiantes generan es esencial para comprender cuáles son sus concepciones, qué tipos de representaciones construyen y cuáles son las relaciones conceptuales que establecen.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Si bien, los problemas de comprensión descritos por diferentes autores proporcionan un conjunto amplio de aspectos a considerar para la enseñanza de la genética, no dan cuenta de los procesos conceptuales que llevan a los alumnos a establecer esas ideas previas y a presentar las dificultades señaladas para integrar y representar los conceptos y procesos genéticos en sus explicaciones. Por ello, en las últimas décadas, algunas investigaciones se han enfocado en analizar los problemas conceptuales y representacionales de los estudiantes. Algunos de los enfoques de esas investigaciones son los de cambio conceptual, procesos de transformación representacional, de aprendizaje progresivo y de la formación de modelos, que buscan determinar los procesos cognitivo-conceptuales de los alumnos (Flores-Camacho et al., 2021; Amin, Smith, & Wiser, 2014; Prain & Tytler, 2012; Sigüenza, 2000), para comprender cómo es que estructuran sus explicaciones.

Cabe destacar que los procesos de representación y generación de modelos, por lo común son implícitos, es decir, no son construcciones intencionales de los sujetos, así que para inferirlos es necesario analizar sus representaciones externas, esto es, lo que argumentan y cómo lo argumentan, así como lo que describen mediante diversas formas de representación, como texto, dibujos y símbolos. Para la determinación de los modelos y las explicaciones que elaboran los alumnos, se empleará la metodología de análisis de los Modelos Parciales Posibles MPP (Flores-Camacho & Gallegos-Cázares, 1998; Gallegos-Cázares, Flores-Camacho, Calderón-Canales, Perrusquía-Máximo, & García-Rivera, 2014; Gallegos-Cázares, Flores-Camacho, Calderón-Canales, & Posada, 2017) que, dentro del campo de las investigaciones sobre los modelos conceptuales, son una herramienta analítica que ayuda a comprender los procesos de construcción representacional y conceptual de los alumnos.

Así, el problema en el que se centra este trabajo es determinar cuáles son los modelos con los que alumnos del bachillerato elaboran sus representaciones y explicaciones sobre los procesos hereditarios que estudiaron en sus clases de biología.

## **MARCO TEÓRICO**

### **La construcción de modelos**

Los modelos mentales son construcciones individuales e implícitas, en las cuales el sujeto articula sus representaciones para dar sentido a las explicaciones que genera sobre alguna fenomenología (Johnson-Laird, 1983), por lo que para él son útiles, coherentes y suficientes; sin embargo, estas construcciones son parciales ya que no integran la totalidad de los elementos que estarían implicados en el sistema que modeliza. Esto ocurre en todo tipo de representación y/o modelo, entre los que están, desde luego, los modelos científicos de los sujetos (investigadores, profesores y estudiantes). En este sentido, es posible considerar que las representaciones, incluidos los modelos generados por los sujetos – implícitos y explícitos – son estructuras que les permiten inferir propiedades o cualidades posibles y localmente coherentes de lo que representan.

En la enseñanza de las ciencias, actualmente existe amplia literatura acerca de la importancia que tienen los modelos históricos en la comunicación de la ciencia y en los procesos de aprendizaje (Coll & Lajium, 2011; Gericke & Hagberg, 2007; Gilbert, 1991; Gilbert, Boulter, & Elmer, 2000; Gilbert & Justi, 2016; Gutiérrez, 2005; Harrison & Treagust, 2000; Nersessian, 2013). Por ejemplo, hay trabajos enfocados en los procesos de instrucción, en los cuales se plantean las condiciones necesarias en las estrategias de enseñanza para que los alumnos, de forma intencional, organicen sus ideas en modelos explicativos y, conforme avanzan las clases, puedan ir reestructurándolos y acercándose al conocimiento científico (Gilbert & Justi, 2016, Rosária, 2006; Sensevy, Tiberghien, Sylvain, & Griggs, 2007; Svoboda & Passmore, 2013). Está también el trabajo que se ha hecho con las progresiones de aprendizaje, donde se busca analizar cómo se interconectan, robustecen y consolidan los conocimientos de un determinado dominio o tema que los alumnos desarrollan a lo largo de tiempo (Hadenfeldt, Neumann, Bernholt, Lui & Parchmann, 2016; Castro-Faix, Duncan, & Choi, 2021; Shea & Duncan, 2013; Todd, Romine, & Correa, 2019; Todd, Romine, Sadeghi, Cook Whitt, & Banerjee, 2022).

En otros enfoques, las investigaciones están orientadas a comprender los procesos de construcción bajo los cuales los alumnos generan sus ideas, conceptualizaciones y explicaciones, es decir; buscan establecer los procesos cognitivos y epistémicos sobre los que los sujetos elaboran sus nociones acerca de los procesos científicos (Flores-Camacho & Gallegos-Cázares, 1998; Clement & Brown, 2009; diSessa, 1993; Halloun, 2004), como es el caso, por ejemplo, de los procesos de construcción y transformación conceptual y representacional (Pozo & Flores, 2007), bajo el supuesto de que, cuando una persona expresa sus representaciones sobre un fenómeno, utiliza sus modelos mentales para explicar y hacer predicciones, los cuales pueden ser coincidentes o no con los modelos conceptuales científicos que se han desarrollado para explicar el fenómeno en cuestión.

Para el caso de la herencia genética, como puede notarse en párrafos precedentes, las ideas de los alumnos reportadas en la literatura evidencian que están basadas en modelos mentales alejados de los modelos conceptuales científicos. Además, se ha documentado que los alumnos pueden generar distintos modelos sobre una misma fenomenología, como lo reportan Martins y Osborn (1997) quienes identifican dos tipos de modelos sobre el gen que actúan como base de su pensamiento; en el primero se concibe a los genes como características definidas en un organismo o como objetos metafóricos, en el segundo los reconocen como partículas que constituyen secuencias de instrucciones en asociación uno a uno (un gen una característica). Dependiendo del modelo que tengan, los alumnos pueden construir inferencias más o menos limitadas sobre cómo los genes se transmiten y expresan. Venville y Treagust (1998) mencionan que han identificado dos modelos mentales básicos sobre los genes. En el primero, los genes son considerados cosas o elementos pasivos. En el segundo, son partículas activas, asociadas con el proceso de síntesis de proteínas. Jalmo y Suwandi (2018) mencionan que la mayoría de los modelos mentales que los estudiantes generan sobre genética son parciales y en ellos están presentes concepciones alternativas y conceptos erróneos, sin embargo, estos autores no presentan a detalle cómo están estructurados dichos modelos.

La trascendencia de la línea de análisis que se propone en este estudio radica, como señala Knuuttila (2011), en que los modelos se constituyen en herramientas epistémicas, es decir, se emplean como herramientas inferenciales que posibilitan, dadas las posibilidades cognitivas y conceptuales de cada sujeto, la elaboración de razonamiento subrogado para establecer explicaciones, predicciones y cualquier tipo de relaciones con sus conocimientos. Caracterizar los modelos de los estudiantes permitirá generar propuestas educativas que los retomen y los guíen en el proceso de reestructuración hacia modelos conceptuales que les ayuden a alcanzar la comprensión científica que se espera, de acuerdo con nivel educativo en el que se investigan. En este trabajo, como se ha mencionado, para caracterizar los modelos de los estudiantes, haremos uso de los Modelos Parciales Posibles (Flores-Camacho & Gallegos-Cázares, 1998) que han sido desarrollados como herramienta para su construcción y análisis.

### **Los Modelos Parciales Posibles**

Para lograr la caracterización de los modelos de los alumnos, han sido elaboradas distintas propuestas analíticas. Por ejemplo, diSessa (1993) propone caracterizar las construcciones conceptuales de los alumnos a partir de considerar que éstas no presentan estructuras coherentes, sino piezas independientes, con las que los sujetos construyen y usan modelos en cada contexto y situación, dando sentido a su fenomenología inmediata o a problemas específicos, generados por medio de esquemas que ha denominado primitivos fenomenológicos (p-prims). Clement y Brown (2009) utilizan las analogías para dar cuenta de la construcción, por parte de los alumnos, de modelos explicativos de los procesos. Por su parte, Halloun (2004) propone que los sujetos construyen secuencias de modelos subsidiarios que parten de sus ideas previas, para desarrollar paulatinamente los modelos básicos escolares.

En la propuesta de los Modelos Parciales Posibles (Flores-Camacho & Gallegos-Cázares, 1998), las representaciones y explicaciones sobre los procesos naturales que los alumnos elaboran son analizadas para determinar cuáles son los modelos que, en forma implícita, generan, y con los cuales construyen dichas explicaciones. Estos Modelos Parciales Posibles, basados en una aproximación epistemológica, están constituidos por dos conjuntos. Un primer conjunto, que constituye el núcleo o marco epistémico del modelo, esto es, los elementos con los que se fundamentan los razonamientos e inferencias, y un segundo conjunto, que constituye las aplicaciones o expresiones que son el resultado de esos razonamientos e inferencias.

Los elementos que constituyen el núcleo o marco epistémico del modelo son:

- Ideas Constrictoras (IC). Son las representaciones – por lo general concepciones abstractas – que los alumnos elaboran y que se convierten en la base de la que parten para interpretar y hacer inferencias sobre un determinado fenómeno natural. El sujeto las asume como verdad, en forma tácita, por lo que funcionan como un sistema axiomático que da sustento a sus argumentos; de ahí el término de constrictoras.
- Reglas de Correspondencia (RC). Son las relaciones específicas que los alumnos establecen para vincular factores conceptuales y observacionales. Esas relaciones pueden ser de diversa índole, por ejemplo, relaciones de orden, de causalidad, que determinan condiciones de aplicabilidad, analógicas, entre otras.

Así, cuando un sujeto se encuentra frente a una situación específica que se conecta o relaciona con el núcleo de ese modelo, ambos elementos (IC y RC) le permiten elaborar inferencias, que constituirán el conjunto de aplicaciones, cuyos elementos se denominan expresiones fenomenológicas *f*, esto es, lo que el sujeto predice y/o explica del fenómeno abordado. Como puede notarse, lo que es explícito del modelo son esas expresiones fenomenológicas *f*, es decir, lo que los sujetos externalizan – en forma verbal, escrita, gráfica, etc., – como su comprensión o explicación de un fenómeno.

Es de esta manera que, a partir de analizar la descripciones y explicaciones que externalizan los sujetos, se determina el núcleo (IC y RC) que, en conjunto con sus expresiones fenomenológicas, permite inferir los Modelos Parciales Posibles, con los que es viable comprender sus procesos de razonamiento y posibles inferencias. A estos modelos se les denomina parciales porque están referidos a ciertos tipos de fenómenos en contextos específicos, pero, a diferencia de las entidades parciales disjuntas que propone diSessa (1993, 2014), estos modelos presentan coherencia local. Se caracterizan como posibles en cuanto a que el sujeto tiene la posibilidad de hacer diversas inferencias de acuerdo con los IC y RC que relacione en cada situación particular, sin que por ello pierdan esa coherencia local que las hace explicaciones plausibles para el sujeto.

Un ejemplo que permite ilustrar cómo los MPP dan cuenta de las construcciones e inferencias de los alumnos, es el análisis hecho con las explicaciones que los niños de primaria dan acerca de la mezcla de colores (Gallegos-Cázares et al., 2014). En dicha investigación, a través de la aplicación de los MPP se identificó que los niños tienen la creencia de que el color es una sustancia, lo que corresponde a una idea constrictora, por ser el fundamento ontológico con el que conciben al color (IC). En cuanto a las relaciones que establecen (RC), se encontró que consideran que los colores se superponen, esto es la relación entre colores es de superposición, lo que constituye una regla de correspondencia (RC.1). Otra relación que establecen los niños entre los colores es una relación de “fuerza”, esto es, entre los colores hay relaciones de mayor que y de menor que (RC.2), relativas a qué color se superpone a otro. Este MPP sobre la comprensión de los procesos que ocurren con los colores permite comprender predicciones del tipo “si dos colores se mezclan o combinan, el color más “fuerte” (rojo o morado) quedará encima de otros”, que son expresadas por un número considerable de los niños que participaron en el estudio.

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

De acuerdo con el problema planteado, de determinar los modelos con los que alumnos del bachillerato elaboran sus representaciones y explicaciones sobre los procesos hereditarios, se establecen las siguientes preguntas.

1. ¿Cuál o cuáles son los modelos que desarrollan los estudiantes del bachillerato para comprender la herencia genética?
2. ¿Cuáles son las posibles inferencias – razonamientos y explicaciones – que los estudiantes generan a partir de esos modelos sobre la herencia genética?

## MÉTODO

Para abordar el problema planteado y responder las preguntas de investigación, el presente trabajo utiliza los Modelos Parciales Posibles para determinar los modelos de una muestra de alumnos de bachillerato después de haber estudiado el tema de genética en la escuela, con sus respectivos profesores. Los profesores aceptaron participar de manera voluntaria bajo la solicitud de que dieran su clase como usualmente lo hacen, con la única restricción de ajustarse a cubrir los temas de herencia genética del programa de la Escuela Nacional Preparatoria (ENP, 2017) con una organización temática específica y que se abordara en siete sesiones, con una duración de dos horas por sesión. Participaron dos profesoras y un profesor, cada uno con más de 20 años de experiencia docente. Al finalizar el abordaje de los temas, los profesores declararon que, en general, en las sesiones utilizaron en diferentes proporciones recursos como lecturas, imágenes, interactivos, animaciones, actividades experimentales, búsquedas de información y trabajo en equipo e individual.

### Muestra

Participaron 186 alumnos de entre 17 y 19 años quienes cursaban la asignatura de Biología V del último año de bachillerato en dos planteles, la ENP 7 y la ENP 5 pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La distribución de la muestra se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1** – Distribución de la muestra participante en el estudio.

		<b>Escuela Nacional Preparatoria 7</b>	
<b>G1</b>	<b>Alumnos</b>	Hombres	15
		Mujeres	45
		<b>Escuela Nacional Preparatoria 5</b>	
<b>G2</b>	<b>Alumnos</b>	Hombres	14
		Mujeres	46
<b>G3</b>	<b>Alumnos</b>	Hombres	16
		Mujeres	50

### Instrumento

Para identificar las representaciones de los estudiantes, se diseñó y aplicó un cuestionario de 13 preguntas, previamente validado, con una confiabilidad de Alpha de Cronbach de 0.88, que atendía las temáticas sobre herencia genética abordadas por los profesores en clase (para más detalles consultar Flores-Camacho, García-Rivera, Báez-Islas, & Gallegos-Cázares, 2017). El cuestionario empleado fue diseñado exprofeso para que los estudiantes expliciten sus representaciones, ya que las preguntas favorecen que, además de responder de manera escrita, utilicen diversos recursos, como dibujos, símbolos y esquemas, que permitan evidenciar sus modelos mentales. El cuestionario se aplicó una semana después de que los estudiantes concluyeron el abordaje del tema con su respectivo profesor(a), esto con el propósito de que no lo vieran como parte de su evaluación sumativa dentro de la asignatura.


### Método de análisis

La identificación de los CI y RC para la construcción de los MPP para el tema de herencia genética se realizó desde una perspectiva interpretativa, basada en la teoría fundamentada, en la que es posible aplicar una metodología para desarrollar o ampliar una teoría existente, derivada de datos recopilados de manera sistemática, en la que se requiere una continua interpretación entre el análisis y los datos (Strauss & Corbin, 2002). A continuación, se describe el proceso empleado.

Con las respuestas escritas, dibujos y esquemas del cuestionario resuelto por los estudiantes de los tres grupos, se identificaron sus representaciones sobre la forma en que conciben los procesos hereditarios. En una primera instancia, se realizó un análisis preliminar de las respuestas de los alumnos para todo el cuestionario, con lo que se encontró que tienen dificultad para establecer

relaciones entre las representaciones que corresponden a distintos modelos conceptuales, como el genético y el meiótico. Sin embargo, la explicitación más evidente y consistente de representaciones articuladas se apreció en las preguntas 1, 7 y 12 que, de manera distinta, demandaban al estudiante que describiera a detalle la forma en que concibe la información genética, y cómo ésta se expresa y hereda de generación en generación, por lo que con estos ítems se identificaron sus expresiones fenomenológicas (f's) y, a partir de estas, se aplicó el análisis reiterado, correspondiente a la teoría fundada con los que se constituyeron los modelos, esto implicó una evaluación cualitativa detallada de todas las representaciones (escritas y gráficas) exhibidas por cada alumno que permitió determinar sus expresiones fenomenológicas. En la tabla 2 se presenta el contexto planteado al inicio del cuestionario, así como las preguntas de los ítems 1, 7 y 12.

**Tabla 2** – Contexto planteado al inicio del cuestionario e ítems 1, 7 y 12.

<p><b>Contexto:</b>  <i>“Imagina el caso de una pareja formada por Alicia y Mauricio, ambos de 27 años. Están esperando el nacimiento de su primer bebé, por lo que tienen varias dudas y confusiones. Seguramente tú podrás ayudarlos a responderlas”.</i></p>
<p><b>Ítem 1.</b> ¿A qué se debe la expresión de determinadas características en el bebé?</p>
<p><b>Ítem 7.</b> Mauricio sabe que los lóbulos separados es una característica dominante, pero cree que el bebé que espera con Alicia puede nacer con los lóbulos unidos como él, porque la madre de Alicia también los tiene unidos.</p> <div style="text-align: center;">  <p>Alicia, lóbulos separados de la mejilla      Mauricio, lóbulos unidos a la mejilla      Madre de Alicia, lóbulos unidos a la mejilla</p> </div> <p>Dibuja cómo se presenta la información hereditaria para esta característica en: a) el óvulo, b) el espermatozoide, c) las células del bebé.</p>
<p><b>Ítem 12.</b> Esta pareja se pregunta por qué si la información genética de ambos no cambia con el tiempo, sus futuros hijos no serán idénticos a este bebé, e incluso podrían ser de diferente sexo. Describe a detalle por qué cada bebé es diferente, a pesar de tener los mismos padres.</p>

El siguiente paso consistió en organizar las f's de acuerdo con los aspectos temáticos que atendían. Después, se analizaron estos grupos de f's para identificar cuáles eran las reglas de correspondencia (RC) y las Ideas Constrictoras (IC) que se encontraban implícitas en ellas, determinadas con el análisis reiterado de acuerdo con la teoría fundada. Este proceso se llevó a cabo de manera consensuada por los autores.

Con los elementos IC, RC y f, identificados a partir de las respuestas de los alumnos, se formaron los MPP, los cuales se representan bajo la forma de arreglos ([IC, RC] → f). Esta representación indica que, cualquier expresión fenomenológica (f) es el resultado de la interacción de los elementos del núcleo del modelo, que el sujeto ha construido previamente y que utiliza de manera implícita, en este caso, alguna o algunas ideas constrictoras (IC) que relaciona con alguna o algunas reglas de correspondencia (RC).

Así, a partir del análisis cualitativo de sus descripciones, explicaciones, dibujos y esquemas, que constituyen sus expresiones fenomenológicas, se determina qué relaciones llevan a cabo para inferirlas y, con el conjunto de ellas, cuáles son las concepciones subyacentes en las que se basan para hacer estas afirmaciones. Cabe señalar que esas concepciones, que dan soporte a sus afirmaciones, no necesariamente son explícitas, pero son posibles de inferir, pues son las que dan coherencia a sus expresiones fenomenológicas, como se mostró en el ejemplo de los modelos de los niños sobre la mezcla de los colores.

## RESULTADOS

a) Construcción de los MPP: Con la metodología descrita, se categorizaron las expresiones fenomenológicas (f's) de los estudiantes y se determinaron sus IC y RC correspondientes. En la tabla 3 se presentan las cuatro f's identificadas, así como las tres RC y tres IC establecidas por los autores.

**Tabla 3** – Ideas Constrictoras, Reglas de Correspondencia y Expresiones fenomenológicas que configuran los MPP identificados en estudiantes del bachillerato sobre la herencia genética.

Ideas Constrictoras (IC)	Reglas de Correspondencia (RC)	Expresiones fenomenológicas (f)
<p>IC1. La información genética de las células sexuales es una entidad material idéntica a la que está presente en resto de las células del progenitor (es una sustancia que no cambia).</p> <p>IC2. La expresión de las características se regula por dominancia y recesividad (como único mecanismo).</p> <p>IC3. La información genética de las células sexuales es una entidad material con diferencias respecto a la que está presente en el resto de las células del progenitor (es una sustancia que se modifica).</p>	<p>RC1. La información genética de las células sexuales corresponde al fenotipo del progenitor.</p> <p>RC2. La información genética de las células sexuales corresponde al genotipo del progenitor.</p> <p>RC3. La información genética de las células sexuales es resultado de un proceso de recombinación o entrecruzamiento azaroso.</p> <p>RC4. La información genética de las células sexuales presenta reducción del número cromosómico con respecto a las células somáticas del progenitor.</p>	<p>f1. Al formarse un nuevo ser, los caracteres que expresa corresponden a las relaciones de dominancia y recesividad determinadas por los fenotipos de los progenitores.</p> <p>f2. Al formarse un nuevo ser, los caracteres que expresa corresponden a las relaciones de dominancia y recesividad determinadas por los genotipos de los progenitores.</p> <p>f3. Al formarse un nuevo ser, los caracteres que expresa corresponden al genotipo, dominante o recesivo, del gameto diploide que se forma por meiosis en la gametogénesis.</p> <p>f4. Al formarse un nuevo ser, los caracteres que expresa corresponden al genotipo, dominante o recesivo, del gameto haploide que resulta de la meiosis en la gametogénesis.</p>

Con estos datos, se identificaron cuatro arreglos, cada uno de los cuales, describe un determinado proceso inferencial, esto es, qué ideas constrictoras y regla(s) de correspondencia usan como Herramienta Epistémica para inferir determinada expresión f. En la tabla 4 se presentan los arreglos de cada herramienta, se indica su frecuencia total y por grupo, así como el porcentaje que cada uno tiene en la muestra.



**Tabla 4** – Frecuencia y porcentaje de los arreglos de los MPP en la muestra.

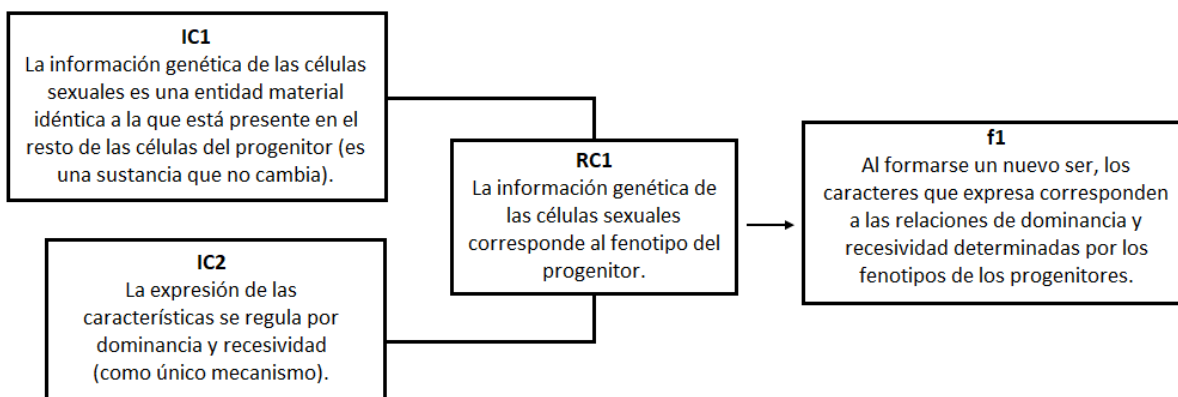
Arreglos identificados con las inferencias de los alumnos	Frecuencia por grupo			Frecuencia	%
	G1	G2	G3		
[IC1, IC2, RC1] → f1	21	18	7	46	25
[IC1, IC2, RC2] → f2	34	38	37	109	58
[IC2, IC3, RC2, RC3] → f3	3	2	12	17	9
[IC2, IC3, RC2, RC3, RC4] → f4	2	2	10	14	8
<b>Total</b>	60	60	66	186	100

Como puede apreciarse en la tabla 4, el arreglo 2 ([IC1, IC2, RC1] → f2) es el que tiene mayor frecuencia y ésta es similar en los tres grupos. El arreglo 1 ([IC1, IC2, RC1] → f1) le sigue en frecuencia y, aunque está presente en los tres grupos, es notorio su descenso en el G3. Los arreglos 3 ([IC2, IC3, RC2, RC3] → f3) y 4 ([IC2, IC3, RC2, RC3, RC4] → f4) también aparecieron en los tres grupos, pero su frecuencia fue muy baja en G1 y G2.

De esta manera, y puesto que los modelos están caracterizados por uno o dos elementos de IC y de RC, forman el conjunto necesario para inferir alguna f, por lo que es posible identificar tres MPP distintos en la muestra analizada.

**MPPI: Arreglo 1 [IC1, IC2, RC1], → f1**

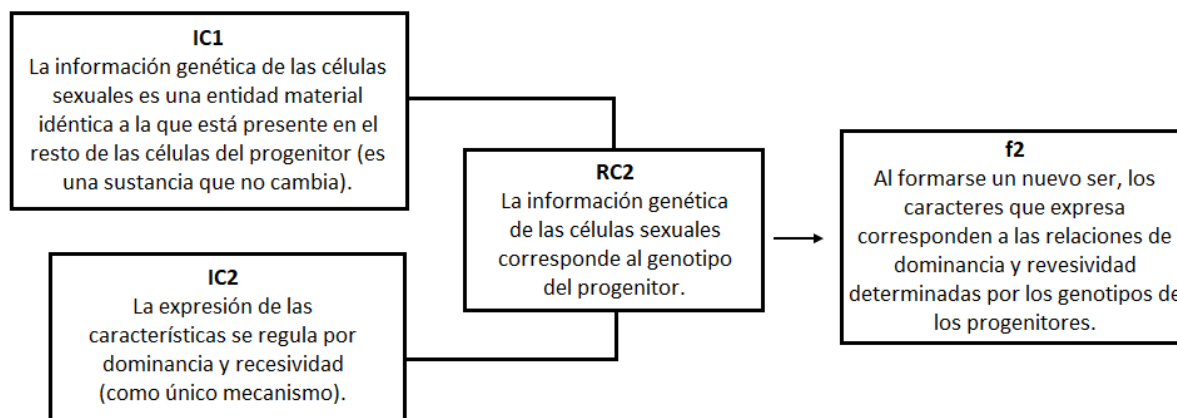
En MPPI (figura 1) está presente la Idea Constrictora que considera que cada gameto lleva la información genética del progenitor sin que ésta sea modificada durante la formación de la célula sexual (IC1), además de aquella que concibe que la expresión de las características ocurre por el mecanismo de dominancia-recesividad (IC2), junto con la Regla de Correspondencia que determina que la información genética que cada progenitor aporta en su gameto es la misma que ella/él expresa en su fenotipo, esto es, la relación que indica que la información genética se encuentra en el fenotipo (RC1), por lo que los caracteres heredados a la descendencia se expresarán de acuerdo con las relaciones de dominancia y recesividad a partir de la información fenotípica que aporte cada progenitor (f1). Este modelo lo presenta el 25% del total de la muestra.



**Figura 1** – Modelo Parcial Posible I, en el que están presentes IC1, IC2, RC1 y f1.

**MPPII: Arreglo 2 [IC1, IC2, RC2] → f2**

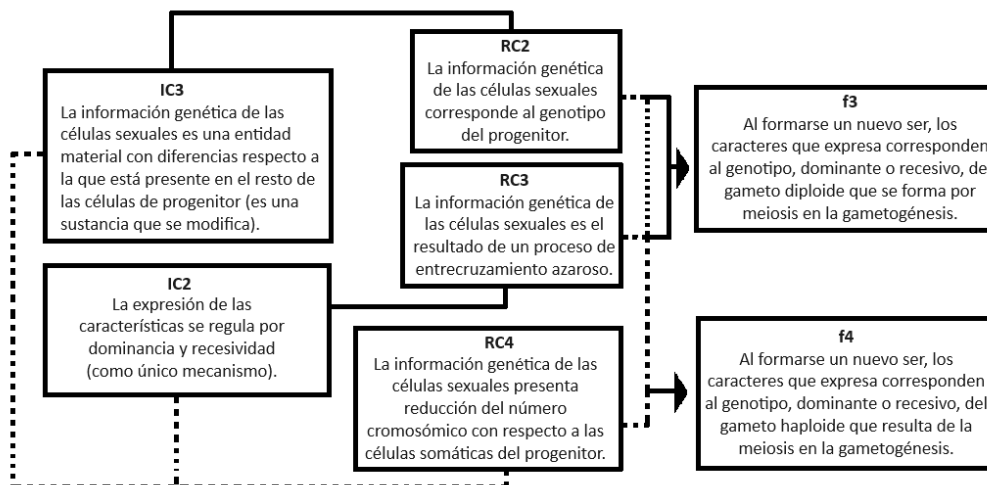
En MPPII (figura 2) también está presente la Idea Constrictora que considera que cada célula sexual lleva la misma información genética del progenitor, pues no se modificó durante la formación de la célula sexual (IC1), y aquella que concibe que la expresión de las características ocurre por el mecanismo de dominancia-recesividad (IC2), pero aquí interviene la Regla de Correspondencia que considera que la información genética que cada progenitor aporta en su célula sexual, corresponde a su genotipo (RC2); esta información se une y combina en la fecundación, por lo que la expresión de cada carácter o rasgo, dependerá de la relación de dominancia y recesividad que se establezca a partir de la información genotípica que aporte cada progenitor (f2). Este modelo lo presenta el 58% del total de la muestra.



**Figura 2** – Modelo Parcial Posible II, en el que están presentes IC1, IC2, RC2 y f2.

**MPPIII: Arreglo 3 [IC2, IC3, RC2, RC3] → f3 y Arreglo 4 [IC2, IC3, RC2, RC3, RC4] → f4**

En MPPIII (figura 3), está presente la Idea Constrictora que considera que cada célula sexual lleva, modificada, la información genética del progenitor (IC3), además de aquella en la que la expresión de las características ocurre, como en los casos anteriores, por el mecanismo de dominancia-recesividad (IC2). En este modelo intervienen dos posibles reglas de correspondencia. La Regla de Correspondencia que establece que la información genética que cada progenitor aporta en su gameto corresponde a su genotipo (RC2), y la que establece que dicha información fue modificada mediante el proceso de recombinación o entrecruzamiento cromosómico azaroso (RC3), lo cual ocurre en la meiosis de la gametogénesis (sin que esto implique reducción del número cromosómico) (f3); o bien, se mantienen IC3, IC2, RC2, RC3, pero se considera que hubo reducción cromosómica (RC4) como resultado de la meiosis durante la gametogénesis es una célula haploide (f4); por lo que la expresión de un carácter o rasgo depende de las relaciones de dominancia y recesividad definidas por los genotipos de los progenitores que participen en ese evento de fecundación. Este modelo se presenta en el 17% del total de alumnos.



**Figura 3** – Modelo Parcial Posible III (MMPIII), en el que están presentes IC3, IC2, RC3, RC4 y las f3 y f4.

Es de hacer notar que, a pesar de que en los tres modelos se considera que la variación fenotípica en la descendencia depende del mecanismo de dominancia y recesividad, el cual resulta esencial para todos los alumnos de la muestra, y constituye una Idea Constrictora presente en todos los estudiantes, no implica que se lleven a cabo las mismas inferencias. Los alumnos que presentan el MPPI o el MPPII, tienen una visión estática, pues para ellos la información genética (comprendida como cromosomas, genes, alelos o rasgos) no cambia durante la formación de los gametos y solo la dominancia-recesividad es la que determina la herencia; mientras que los alumnos a los que corresponde el MPPIII están más cercanos a los modelos conceptuales genético y meiótico (Stewart et al., 2005), al considerar que la variación genética ocurre en la formación de los gametos por la recombinación de la información genética, junto con el mecanismo de expresión por dominancia y recesividad.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los tres modelos encontrados, esquematizados en las figuras 1, 2 y 3, puede notarse cómo los alumnos articulan sus concepciones básicas (IC) con su comprensión de los procesos genéticos, a través de las reglas de correspondencia, y cómo con ellos razonan para dar lugar a sus explicaciones, sean escritas o gráficas. Estos resultados permiten responder la primera pregunta de investigación: ¿Cuál o cuáles son los modelos implícitos que desarrollan los estudiantes del bachillerato para comprender la herencia genética? Así, los tres MPP determinados, dan cuenta de tres ideas profundamente arraigadas en los estudiantes:

- Los procesos de herencia genética ocurren con entidades materiales de información fijas (IC1).
- La variación fenotípica en la descendencia depende, principalmente, del mecanismo de dominancia-recesividad (IC2).
- Los procesos de herencia genética ocurren con entidades materiales que presentan variaciones a través de los procesos hereditarios (IC3).

Para responder la segunda pregunta de investigación ¿Cuáles son las posibles inferencias – razonamientos y explicaciones – que los estudiantes generan a partir de esos modelos sobre la herencia genética? ejemplificaremos algunos casos, uno por cada modelo, de cómo éstos dan cuenta de los procesos explicativos e inferenciales que hacen los alumnos.

**Ejemplo MPPI, arreglo [IC1, IC2, RC1] → f1**

Alumno 148, del G1

Respuesta a Ítem 1. “A que hay características dominantes en una pareja, esto quiere decir que es más común que se presente por ejemplo que tengan ambos el cabello lacio”.

La respuesta al Ítem 7 se observa en la figura 4.

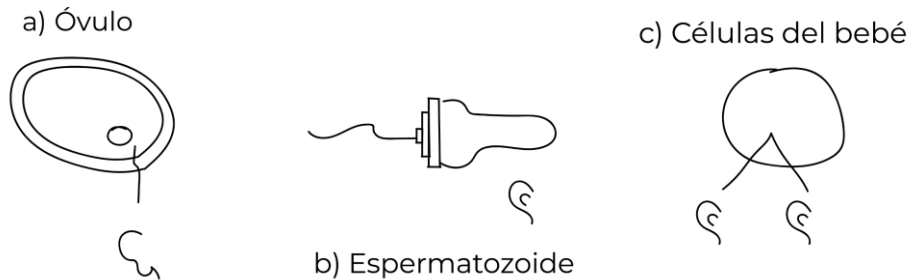


Figura 4 – Dibujos realizados por el alumno 148 del G1, donde representa, en diferentes células, la información genética correspondiente a la característica del lóbulo de la oreja. Nota: Para una mejor comprensión de las imágenes, los dibujos del alumno se volvieron a trazar, conservando en su totalidad la información y las figuras hechas por él.

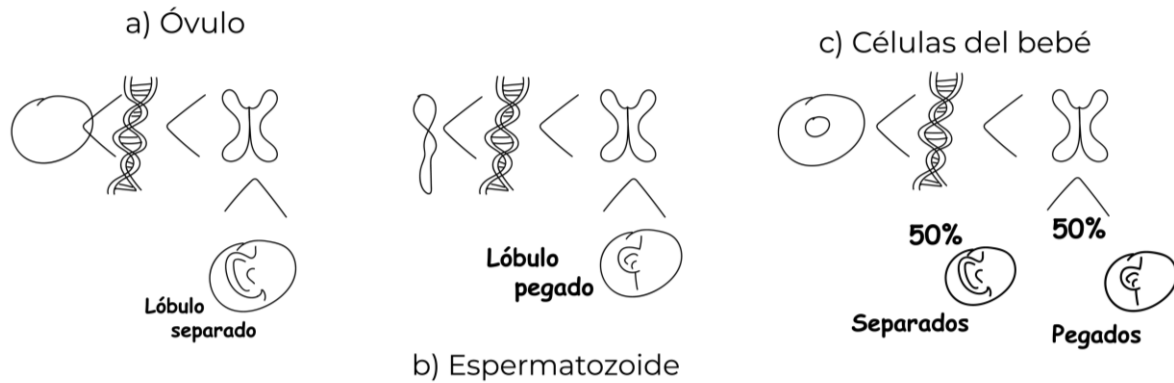
En las dos respuestas de este alumno, escrita y gráfica, puede observarse que la información genética la representa como un rasgo (característica perceptible) e indica que los progenitores, en su célula sexual, aportan el carácter; es decir, el fenotipo (RC1), sin señalar que se modifique en algún momento como resultado del proceso de formación de los gametos (IC1). El otro elemento que configura sus ideas constrictoras es que reconoce que la forma en que se determina la expresión es por dominancia (IC2) del fenotipo. Así, la inferencia f1 del alumno “tendrán el cabello lacio porque es la característica dominante de la pareja” o la inferencia f1 en el dibujo de que la característica del lóbulo de la oreja de ambos progenitores implicará que el descendiente tendrá esa misma característica, se deducen, en ambos casos, de las IC y RC de este modelo. Estas respuestas, son consistentes con otras respuestas del cuestionario dadas por el mismo alumno, lo que permite determinar que sus IC y RC ser localmente coherentes con los elementos implícitos en el modelo MPPI.

**Ejemplo MPPII, arreglo [IC1, IC2, RC2] → f2**

Alumno 108, G2

Respuesta a Ítem 1. “Lo que sucede es que ambos heredan información genética que está expresada en los cromosomas del bebé (genotipo) sin embargo entre ambos padres existen características, dominantes y recesivas. Las dominantes son las que se expresan en el fenotipo del bebé, como cabello, ojos y piel oscura, etc.”.

La respuesta al Ítem 7 se observa en la figura 5.



**Figura 5** – Dibujos realizados por el alumno 108 del G2, donde representa, en diferentes células, la información genética (una cadena de ADN, un cromosoma) que corresponde a la característica del lóbulo de la oreja. Nota: Para una mejor comprensión de las imágenes, los dibujos del alumno se volvieron a trazar, conservando en su totalidad la información y las figuras hechas por él.

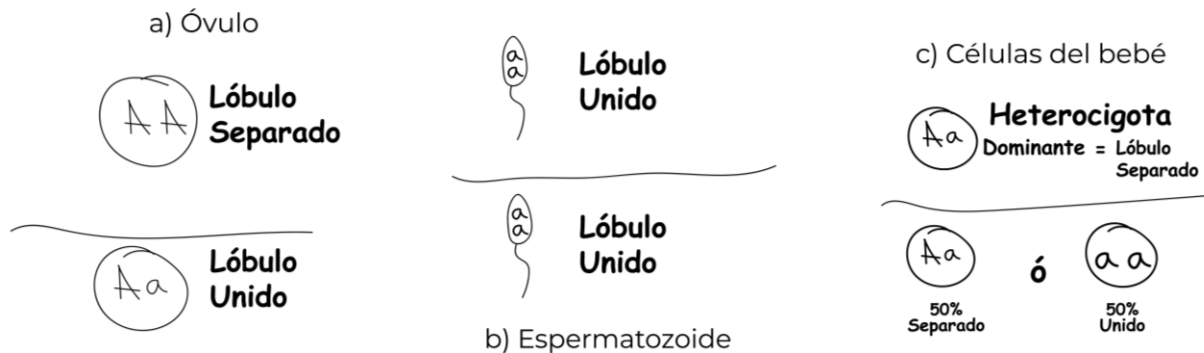
En este caso, tanto en su respuesta escrita como en el dibujo, el alumno identifica la información genética en términos del genotipo a nivel de ADN y cromosomas, sin que esto signifique que reconozca alguna posible modificación de la información genética heredada, pues en ambos gametos dibuja los cromosomas duplicados, los relaciona con el rasgo del progenitor y determina que la expresión estará definida por el mecanismo de dominancia – recesividad. Como puede notarse IC1 e IC2 están presentes, los que en coordinación con RC2 (al ubicar la interacción a nivel genotípico), para inferir el mecanismo de expresión de los genotipos de los padres (f2). Puede apreciarse que la inferencia f2, es producto de un razonamiento coherente, correspondiente a los elementos del modelo MPPII.

**Ejemplo MPPIII, [IC2, IC3, RC2, RC3] → f3**

Alumno 4, G3

Respuesta a Ítem 1. “Se debe a que en la división meiótica va a haber un entrecruzamiento entre cromosomas homólogos lo que va a causar que fragmentos de un cromosoma se combinen con los de otro; y al momento de la fecundación se van a unir estos gametos que van a contener distintos caracteres heredables”.

La respuesta al Ítem 7 se observa en la figura 6.



**Figura 6** – Dibujos realizados por el alumno 4 del G3, donde representa, en diferentes células, la información genética como alelos (letras A y a) que corresponde a la característica del lóbulo de la oreja. Nota: Para una mejor comprensión de las imágenes, los dibujos del alumno se volvieron a trazar, conservando en su totalidad la información y las figuras hechas por él.

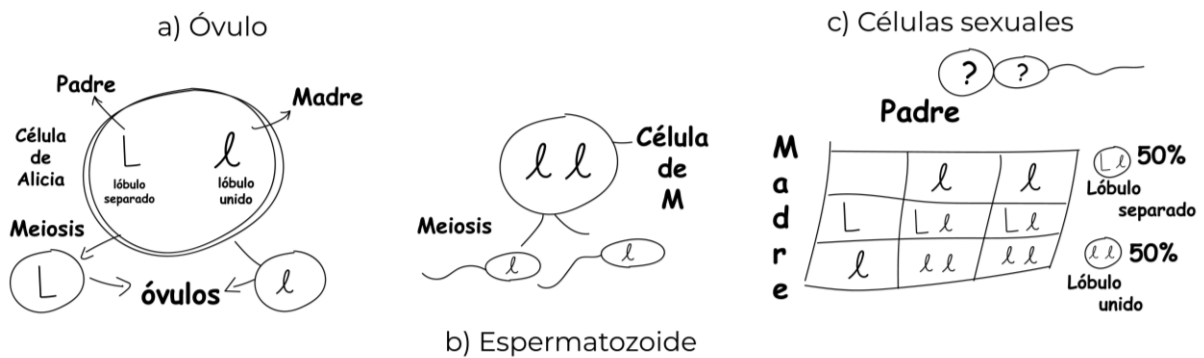
Para este caso, el alumno establece que ocurre una recombinación azarosa (RC3) de la información genética y la probabilidad de heredar determinados genes (IC3), que se expresarán de acuerdo con los patrones de dominancia y recesividad resultantes (IC2). Este alumno no concibe la reducción del número cromosómico, como puede observarse en los esquemas donde coloca alelos duplicados en las células sexuales (f3). Este modelo permite que el alumno establezca probabilidades de expresión para el fenotipo.

**Ejemplo arreglo [IC2, IC3, RC2, RC3, RC4] → f4**

Alumno 07, G3

Respuesta al Ítem 1. “Las células sexuales (óvulo y espermatozoide) se producen por meiosis, proceso en el cual la célula divide su material genético, es decir, el resultado de la meiosis son células 1n. Para formar el feto se junta un espermatozoide (1n) y un óvulo (1n), de esta forma, el feto es 2n, con la mitad de la información del padre y la otra de la madre. Además, el total de información del feto se forma del conjunto de caracteres heredados de ambos padres. Para cada carácter posee 2 alelos uno de cada padre, pero uno de estos dominará sobre otro evitando su expresión, o sea, se expresará el gen dominante”.

La respuesta al Ítem 7 se observa en la figura 7.



**Figura 7** – Dibujos realizados por el alumno 07 del G3, donde representa, en diferentes células y con las letras L y l, la información genética correspondiente con las características de lóbulo de la oreja. Nota: Para una mejor comprensión de las imágenes, los dibujos del alumno se volvieron a trazar, conservando en su totalidad la información y las figuras hechas por él.

Como podrá notarse de las respuestas de este alumno, se reconoce que hay un proceso, la meiosis, mediante el cual se forman los gametos. Esto implica la recombinación azarosa de la información genética (RC3) y la probabilidad de heredar determinados genes (IC3), que se expresarán de acuerdo con los patrones de dominancia y recesividad resultantes (IC2). Este alumno concibe también la reducción del número cromosómico (RC4), como puede observarse tanto en su respuesta escrita como en los esquemas, al señalar la meiosis y los gametos haploides que resultan (f4), mientras que se apoya en el cuadro de Punnett para determinar las probabilidades de los fenotipos, de acuerdo con las combinaciones de los genotipos (RC2). Como en los casos anteriores, el MPP para este caso permite dar cuenta de procesos de razonamiento coherentes del alumno para establecer sus explicaciones y, por tanto, la comprensión de cuáles de los elementos implícitos que ha construido le permiten interpretar y representarse los procesos hereditarios.

Un aspecto adicional que vale la pena señalar es que, si bien este trabajo no tiene como propósito determinar diferencias entre los grupos escolares, los resultados que se presentan en la tabla 5, muestran diferencias en la frecuencia con la que aparecen los modelos en cada grupo. Así, en G3 hay un porcentaje mayor de alumnos que utilizan el modelo MPPIII que, sin ser un modelo completo y correcto en todos sus componentes, es el que se aproxima más al modelo esperado escolarmente. De acuerdo con lo determinado por las descripciones de los docentes de cómo y con qué recursos llevaron

a cabo sus clases, en G3 fue donde el profesor promovió la utilización de más recursos de representación externa, mayor trabajo en equipo y seguimiento a las actividades de los alumnos; mientras que en G1 y G2, en los que las frecuencias de uso de los tres modelos tienen una distribución parecida, los recursos utilizados por ambos docentes se centraron, principalmente, en la resolución de problemas y lecturas sobre el tema. Desde luego que esta descripción queda solo señalada como destacable y requiere analizarse a profundidad, a través de una investigación desarrollada específicamente para establecer las posibles diferencias entre los modelos parciales posibles que presentan los alumnos cuando trabajan con dinámicas y organizaciones distintas, así como con diversos tipos, cantidades y calidades de representaciones externas.

**Tabla 5** – Porcentaje de MPP utilizado por los alumnos por grupo.

Modelos Parciales Posibles	Porcentaje por grupo			Porcentaje total
	G1	G2	G3	
MPPI	35	30	11	25
MPPII	57	63	56	58
MPPIII	8	7	33	17

## CONCLUSIONES

El contexto en el que se llevó a cabo esta investigación representa lo que ocurre de manera común en el bachillerato, con profesores que cuentan con experiencia y con un amplio dominio de la biología, que conocen de antemano cuáles son las principales dificultades de sus estudiantes para comprender los procesos hereditarios, que emplean distintas estrategias y recursos para abordar el tema, y que los organizan de forma tal que lo cubren y discuten a lo largo de varias sesiones. El resultado es que los alumnos logran solucionar problemas referidos a las probabilidades de herencia para ejemplos específicos, hablan de gametos como las entidades que aportan la información genética que se hereda, que ésta es la responsable de la transmisión y expresión de los rasgos, incluso describen o explican la meiosis como proceso por medio del cual se generan los gametos, pero lo hacen como resultado de un aprendizaje más memorístico que, como ya ha sido señalado por autores como Kiliç y Sağlam (2014), no alcanza la comprensión suficiente para transformar su modelo y generar explicaciones de los procesos o mecanismos genéticos. Por ello, cuando se indaga más allá de respuestas memorísticas o resolución de problemas de probabilidad, los alumnos construyen representaciones y modelos con elementos conceptuales y relacionales que no se basan en esta información conceptual de memoria o en la solución mecánica que aprendieron, sino en ideas previas o concepciones construidas previamente, que no cambiaron o se transformaron, y que para ellos son suficientes y válidas, por lo que las utilizan para dar coherencia a sus razonamientos, aunque estén alejadas del conocimiento que se espera logren, a partir del proceso de enseñanza que tuvieron durante sus clases.

No dejamos de lado las distintas contribuciones que han hecho autores como Bahar et al. (1999), Jalmo y Sumandi (2018), y Saka et al. (2006), dentro del campo de los modelos mentales de los alumnos y que, como también fue posible apreciar en lo aquí expuesto, evidencian que la complejidad del tema va más allá de la simple comprensión de términos, de análisis de los procesos de forma fragmentada, o de la resolución de ejercicios probabilísticos. Sin embargo, a través de la caracterización de los modelos parciales posibles, se buscó conocer, desde una perspectiva epistemológica y cognitiva, los procesos de construcción conceptual y representacional de los estudiantes de bachillerato, con el objetivo de hacer una aportación teórica que dé cuenta de los procesos epistémicos y cognitivos (Flores-Camacho & Gallegos-Cázares, 1998) sobre los que elaboran sus descripciones y explicaciones de la herencia genética, pues los núcleos de esos modelos son las herramientas epistémicas (Knuutila, 2011) en las que se basan para establecer explicaciones, predicciones y cualquier tipo de relaciones con sus conocimientos.

Bajo este contexto, los alumnos que exhibieron el modelo MPPIII, alcanzaron mayor comprensión del tema, pues logran establecer relaciones entre los aspectos de la teoría genética y sus niveles de representación (macro-micro). Con este modelo, los alumnos son capaces de establecer explicaciones e inferencias a partir de los procesos mendelianos y meióticos, lo que puede concebirse como un paso adelante en el intento de construir y vincular dos de los tres modelos científicos (genético, meiótico y molecular) que, de acuerdo con Stewart y colaboradores (2005), son los que los alumnos requieren consolidar para comprender de manera amplia el tema de herencia genética.

En los tres grupos, el MPPII tuvo frecuencias cercanas y altas, lo que significa que corresponde al modelo que tiene la mayoría de los alumnos de la muestra, modelo que refleja las limitaciones en su comprensión de los temas abordados en clase. Esto evidencia la insuficiencia de los diversos procesos de enseñanza cotidianos que ocurren en las escuelas, para que los alumnos superen los problemas de aprendizaje de la genética como se ha documentado ampliamente en la literatura (Aivelo & Uitto, 2021; Haskel-Ittah & Yarden, 2018; Jalmo & Suwandi, 2018; Yu-Chein, 2008). Aun así, este estudio muestra que esos problemas no solo están referidos a la comprensión de los conceptos, sino también en sus posibilidades de representar los procesos, principalmente, en el nivel micro y molecular, lo que se relaciona con la construcción de una visión determinista y estática del proceso hereditario (no hay cambios en la información genética que se hereda, esto es, pasa a la descendencia tal y como está en cada progenitor, como establece la IC.1), y que explica esta problemática, referida también por autores como Ibáñez y Martínez-Aznar (2005), Lewis et al. (2000a), Stewart (1982), entre otros.

Los alumnos con el modelo más limitado para hacer inferencias y explicaciones adecuadas a los procesos de la genética son los que utilizan MPPI, pero vale la pena destacar que está cercano a MPPII, por lo que, entre ambos modelos se encuentra el 83% de la muestra, lo que evidencia que para los alumnos es difícil superar la concepción estática de la información genética y concebirla como moléculas que interactúan y son partícipes en múltiples procesos. En estos dos modelos se encuentra la mayoría de las ideas previas y dificultades conceptuales que los alumnos tienen sobre la herencia genética, que han sido reportadas en diversos trabajos, como los de Argento (2013), Caballero (2008), Duncan y Reiser (2007), Lewis y Kattmann (2004), Mills-Shaw et al. (2008), Rotbain et al. (2006), Wood-Robinson (2000), por mencionar algunos.

Es necesario destacar que, incluso en G3, los alumnos no construyeron un modelo conceptual molecular (Stewart et al., 2005) y, como ha sido reportado por Flores-Camacho et al. (2021) y Estébanez (2014), presentan dificultades para establecer relaciones entre los tres modelos conceptuales (genético, meiótico y molecular), lo que significa que no solo hay que enriquecer los procesos en el aula con recursos representacionales diversos, sino que, también se requiere transformar las concepciones de los profesores, tanto en su comprensión de los conceptos implicados, para que los aborden y analicen con los alumnos a través de los procesos y mecanismos genéticos (Altunoğlu & Şeker, 2015), como en torno a la relevancia y los roles que pueden tener las representaciones externas en los procesos de aprendizaje y la importancia que tiene la explicitación de los modelos mentales por parte de los alumnos, para que estos puedan irse reestructurando a lo largo del proceso de aprendizaje, lo que implica la comprensión e interconexión clara de los mecanismos y procesos genéticos, como es el caso de la meiosis (en la que está incluida la teoría cromosómica de la herencia), las leyes de Mendel, la expresión génica y la síntesis de proteínas).

Como hemos señalado, consideramos que la caracterización de los Modelos Parciales Posibles sobre la herencia genética de alumnos de bachillerato que aquí se presentan es una aportación teórica sobre cuáles son los principales problemas de comprensión que tienen los estudiantes para abordar este tema, y ofrece la descripción de las herramientas epistémicas con que cuentan y que utilizan para establecer inferencias y explicaciones que indican sus niveles de comprensión de los procesos involucrados en la herencia genética, lo que, esperamos, servirá como guía para conocerlos y considerarlos para hacer propuestas que favorezcan y mejoren los procesos de enseñanza de la genética. En este sentido, y sin intención de ser prescriptivos ni agotar las posibilidades, los resultados encontrados en este trabajo dan pauta para establecer algunas recomendaciones importantes a considerar en el desarrollo de estrategias o alternativas que promuevan el desarrollo de nuevas herramientas epistémicas en los alumnos, que les permitan generar modelos con los que puedan predecir y explicar la herencia genética desde los mecanismos y procesos implicados en ella:

- Promover la resolución de tareas y problemas que den cuenta de cuál es la interpretación y comprensión real que alcanzan de los procesos y los mecanismos.



- Apoyar en la comprensión e interpretación de las distintas representaciones externas que se utilizan dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje, para conocer sus límites y posibilidades en los diferentes niveles de abstracción en que se emplean.
- Propiciar el desarrollo explícito de los tres modelos conceptuales en el abordaje del tema (genético, meiótico y molecular) y las conexiones entre ellos, que inicie con la revisión y comprensión del modelo meiótico (origen y formación de los gametos) para que sea la base a partir del cual se aborda y analiza el modelo genético o mendeliano, a los que posteriormente se integra el modelo molecular.
- Conectar con aspectos de la vida cotidiana o cercana al contexto del alumno, para los que puedan proponer explicaciones a partir de herramientas epistémicas que han generado
- Considerar las aportaciones y evidencias que describen la historia y desarrollo de ese campo de conocimiento, para que identifiquen los paralelismos y divergencias entre la construcción del conocimiento científico y en los sujetos.

Vale la pena apuntar que estos aspectos coinciden o pueden incorporarse sin problema a las propuestas de diferentes autores, tal es el caso de las progresiones de aprendizaje planteadas por Todd y colaboradores (Todd & Romine, 2016, 2017; Todd, Romine, & Correa-Menendez, 2019; Todd et al., 2022), en las que se recuperan los modelos genético, meiótico y molecular, destacando la importancia de abordarlos con los alumnos dentro de un dominio genético claramente explícito, que sea el marco a través del cual los constructos e ideas que se busca que los estudiantes desarrollen se puedan interconectar y relacionar a lo largo de los diferentes cursos que tienen; o bien al desarrollar estrategias basadas en los cuatro criterios que proponen Knippels, Waarlo y Boersma (2005), que justamente incidirían en las herramientas epistémicas de los alumnos y podrían propiciar la construcción de un modelo que les permita explicar los procesos y mecanismos de la herencia genética a nivel macroscópico, celular y/o molecular, soportado en una clara comprensión y distinción entre los niveles de organización, la conexión entre herencia y meiosis, así como el reconocimiento y diferenciación de la función de los procesos de mitosis y meiosis dentro del ciclo de vida.

Por último, solo resta señalar que cualquier estrategia o innovación que se lleve a cabo en el aula, requiere estar cimentada en una comprensión de los procesos epistemológicos y cognitivos de los alumnos, como es el caso de los Modelos Parciales Posibles, para implementar las condiciones y alternativas necesarias para apoyarlos en mejorar su aprendizaje.

## REFERENCIAS

- Aivelo, T., & Uitto A. (2021). Factors explaining students' attitudes towards learning genetics and belief in genetic determinism. *International Journal of Science Education*, 43(9), 1408-1425. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1917789>
- Albaladejo, C., & Lucas, A. (1988). Pupils' meanings for «mutation». *Journal of Biological Education*, 22(3), 215-219. <https://doi.org/10.1080/00219266.1988.9654986>
- Altunoğlu, B., & Şeker, M. (2015). The Understandings of Genetics Concepts and Learning Approach of Pre-Service Science Teachers. *Journal of Educational and Social Research*, 5(1 S1), 61. Recuperado de <https://www.richtmann.org/journal/index.php/jesr/article/view/6307>
- Amin, T., Smith, C., & Wiser, M. (2014). Student Conceptions and Conceptual Change: Three Overlapping Phases of Research. In N. Lederman & S. Abell (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp. 57-81), Nueva York, United States of America: Routledge.
- Argento, D. (2013). *Estudio exploratorio sobre preconcepciones en el área de Genética en alumnos de secundaria italianos y españoles*. (Tesis de maestría). Universidad Internacional de La Rioja. Madrid. España. Recuperado de [https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/1425/2013\\_01\\_30\\_TFM\\_ESTUDIO\\_DEL\\_TRABAJO.pdfhttps://reunir.unir.net](https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/1425/2013_01_30_TFM_ESTUDIO_DEL_TRABAJO.pdfhttps://reunir.unir.net)
- Bahar, M., Johnstone, A., & Hansell M. (1999). Revisiting learning difficulties in biology. *Journal of Biological Education*, 33(2), 84-86. <https://doi.org/10.1080/00219266.1999.9655648>

- Banet, E., & Ayuso E. (2000). Teaching Genetics at Secondary School: A Strategy for Teaching about the Location of Inheritance Information. *Science Education*, 84(3), 313-351. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200005\)84:3<313::AID-SCE2>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200005)84:3<313::AID-SCE2>3.0.CO;2-N)
- Bugallo, A. (1995). La didáctica de la genética: revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 13(3), 379-385. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4258>
- Caballero, M. (2008). Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 227-243. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3677>
- Castro-Faix, M., Duncan, R., & Choi, J. (2021). Data-driven refinements of a genetics learning progression. *Journal of Research in Science Teaching*, 58(1), 3–39. <https://doi.org/10.1002/tea.21631>
- Clement, J., & Brown, D. (2009). Using analogies and models in instruction to deal with students' preconceptions. In J. Clement (Ed.), *Creative model construction in scientist and students. The role of imagery, analogy and mental simulation* (pp. 139-155). Dordrecht, Netherlands: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6712-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6712-9_10)
- Coll, R., & Lajjum, D. (2011). Modeling and the future of science learning. In M. Khine & I. Saleh (Eds.), *Models and modeling. Cognitive tools for scientific enquiry* (pp. 3-22). Dordrecht, Netherlands: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0449-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0449-7_1)
- Contessa, G. (2007), Scientific representation, interpretation, and surrogate reasoning. *Philosophy of Science*, 74(1), 48-68. <https://doi.org/10.1086/519478>
- diSessa, A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- diSessa, A. (2014), The construction of causal schemes: learning mechanisms at the knowledge level. *Cognitive Science*, 38(5), 795-850. <https://doi.org/10.1111/cogs.12131>
- Duncan, R., & Reiser, B. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(7), 938-959. <https://doi.org/10.1002/tea.20186>
- Duncan, R., Rogat, A., & 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. <https://doi.org/10.1002/tea.20312>
- Escuela Nacional Preparatoria (ENP). (2017). *Programa de estudios de la asignatura de Biología V*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. Recuperado de <https://www.dgire.unam.mx/webdgire/planes-de-estudio-y-programas-operativos/plan-y-programas-indicativos-escuela-nacional-preparatoria/>
- Estébanez-Alonso, J. (2014). *Análisis de los conocimientos e ideas previas sobre genética de alumnos que comienzan 4º de ESO comparados con los alumnos de 1º de bachillerato*. (Tesis de maestría). Universidad Internacional de La Rioja. Madrid. España. Recuperado de <https://reunir.unir.net/handle/123456789/2648>
- Flores-Camacho F. & Gallegos-Cázares L. (1998). Partial Possible Models: An approach to interpret students' physical representation. *Science Education*, 82, 15-29. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199801\)82:1<15::AID-SCE2>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199801)82:1<15::AID-SCE2>3.0.CO;2-3)
- Flores-Camacho, F., García-Rivera, B. E., Báez-Islas, A., & Gallegos-Cázares, L. (2017). Diseño y Validación de un Instrumento para Analizar las Representaciones Externas de Estudiantes de Bachillerato sobre Genética. *Revista Iberoamericana De Evaluación Educativa*, 10(2). <https://doi.org/10.15366/riee2017.10.2.008>

- Flores-Camacho, F., Calderón-Canales, E., García-Rivera, B., Gallegos-Cázares, L., & Báez-Islas, A. (2021). Representational Trajectories in the Understanding of Mendelian Genetics. *Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(8), <https://doi.org/10.29333/ejmste/10998>
- Gericke, N., & Hagberg, M. (2007). Definition of historical models of gene function and their relation to students' understanding of genetics. *Science & Education*, 16, 849–881. <https://doi.org/10.1007/s11191-006-9064-4>
- Gallegos-Cázares, L., Flores-Camacho, F., Calderón-Canales, E., Perrusquía-Máximo, E. & García-Rivera, B. (2014). Children's models about colours in nahuatl-speaking communities. *Research in Science Education*, 44, 699-725. <https://doi.org/10.1007/s11165-014-9399-9>
- Gallegos-Cázares, L., Flores-Camacho, F., Calderón-Canales, E. & Posada, J. (2017). Representations over the earth's shape and the process of day and night from Nahua indigenous schoolchildren, *Infancia y Aprendizaje*, 40(2), 343-380. <https://doi.org/10.1080/02103702.2017.1292683>
- Gilbert, S. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(1), 73-79. <https://doi.org/10.1002/tea.3660280107>
- Gilbert, J., Boulter, C., & Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. In J. Gilbert & C. Boulter (Eds.), *Developing models in science education*, (pp. 3-17). Dordrecht, Netherlands: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0876-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0876-1_1)
- Gilbert, J., & Justi, R. (2016). Modelling-based teaching in science education. In J. Gilbert (Ed.), *Models and modeling in Science Education*, (pp. 41-56). Basel, Switzerland: Springer <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3>
- Gutiérrez, R. (2005). Polisemia actual del concepto "modelo mental": Consecuencias para la investigación didáctica, *Investigações em Ensino de Ciências*, 10(2), 209-226. Recuperado de <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/517>
- Hackling, M., & 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. <https://doi.org/10.1002/tea.3660210210>
- Hadenfeldt, J., Neumann, K., Bernholt, S., Liu, X., & Parchmann, I. (2016). Students' progression in understanding the matter concept. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(5), 683–708. <https://doi.org/10.1002/tea.21312>
- Halloun, I. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht, Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2140-2>
- Harrison, A., & Treagust, D. (2000). A typology of school science models, *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026. <https://doi.org/10.1080/095006900416884>
- Haskel-Ittah, M., & Yarden, A. (2018). Students' Conception of Genetic Phenomena and Its Effect on Their Ability to Understand the Underlying Mechanism. *CBE Life Sciences Education* 17(3), 1-9. <https://doi.org/10.1187/cbe.18-01-0014>
- Ibáñez, T., & Martínez, M. (2005). Solving problems in genetic II: Conceptual restructuring. *International Journal of Science Education*, 27(12), 1495-1519. <https://doi.org/10.1080/09500690500186584>
- Iñiguez, F. (2005). *La enseñanza de la genética, una propuesta didáctica para la educación secundaria obligatoria desde una perspectiva constructivista*. (Tesis de doctorado). Universidad de Barcelona. Barcelona. España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2445/41444>

- Iñiguez, F., & Puigcerver, M. (2013). Una propuesta didáctica para la enseñanza de la genética en la educación secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 10(3), 307-327. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10498/15441>
- Jalmo, T., & Suwandi, T. (2018). Biology education students' mental models on genetic concepts. *Journal of Baltic Science Education*, 17(3), 474-485. <https://doi.org/10.33225/jbse/18.17.474>
- Johnson-Laird, P. (1983). *Mental models*, Cambridge, Massachusetts, United States of America: Harvard University Press.
- Kiliç, D., & Sağlam, N. (2014). Students' understanding of genetics concepts: the effect of reasoning ability and learning approaches, *Journal of Biological Education*, 48(2), 63-70. <https://doi.org/10.1080/00219266.2013.837402>
- Kinnear, J. (1983). Identification of misconceptions in genetics and the use of computer simulations in their correction. In H. Helms & J. Novak (Eds.), *Proceedings of the International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics*, (pp. 84-92), Ithaca, New York, United States of America: Cornell University.
- Knippels, M., Waarlo A., & Boersma, K. (2005) Design criteria for learning and teaching genetics, *Journal of Biological Education*, 39(3), 108-112. <https://doi.org/10.1080/00219266.2005.9655976>
- Knuuttila, T. (2011). Modelling and representing: an artefactual approach to model-based representation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42(2), 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2010.11.034>
- Legarralde, T., Gallarreta, S., Vilches, A., & Menconi, F. (2014). Representaciones sobre el concepto de "gameta" en futuros profesores de Biología. El papel de los libros de texto. *Revista de Educación en Biología*, 17(1), 55-69. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/127441>
- Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000a), All in the genes? Young people's understanding of the nature of genes. *Journal of Biological Education*, 34(2), 74-79. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655689>
- Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000b). Chromosomes: The missing link. Young people's understanding of Mitosis, Meiosis, and Fertilization. *Journal of Biological Education*, 34(4), 89-199. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655717>
- Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000c). What's in a Cell? Young people's understanding of the Genetic relationship between Cells, within an individual. *Journal of Biological Education*, 34(3), 129-132. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655702>
- Lewis, J., & Kattmann, U. (2004). Traits, genes, particles and information: re-visiting students' understandings of genetics. *International Journal of Science Education*, 26(2), 195-206. <https://doi.org/10.1080/0950069032000072782>
- Lewis, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance: do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, 22(2), 177-195. <https://doi.org/10.1080/095006900289949>
- Marbach-Ad, G., Rotbain, Y., & Stavy, Ruth. (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. <https://doi.org/10.1002/tea.20222>
- Martins, I., & Ogborn, J. (1997). Metaphorical reasoning about genetics. *International Journal of Science Education*, 17(1), 47-63. <https://doi.org/10.1080/0950069970190104>

- Mills-Shaw, K., Van Horne, K., Zhang, H., & Boughman, J. (2008). Essay contest reveals misconceptions of high school students in genetics content. *Genetics*, 178(3), 1157-1168. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.084194>
- Muela, F., & Abril, A. (2014). Genetics and Cinema: Personal Misconceptions that Constitute obstacles to Learning. *International Journal of Science Education, Part B: Communication and Public Engagement*, 4(3), 260-280. <https://doi.org/10.1080/21548455.2013.817026>
- Nersessian, N. (2013). Mental modeling in conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research in Conceptual Change*, (pp. 395-411), New York, United States of America: Routledge. <https://doi:10.1007/s11191-010-9283-6>
- Pozo, J., & Flores, F. (2007), *Cambio conceptual y representacional en el aprendizaje y la enseñanza de la ciencia*, Madrid, España: Antonio Machado Libros
- Prain, V., & Tytler, R. (2012). Learning through constructing representations in science: a framework of representational construction affordances, *International Journal of Science Education*, 34(17), 2751-2773. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.626462>
- Rosária, J. (2006). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las ciencias*, 24(2), 173-184. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/ensenanza/article/view/75824>
- Rotbain, Y., Marbach-Ad, G., & 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. <https://doi.org/10.1002/tea.20144>
- Saka, A., Cerrah, L., Akdeniz, A., & Ayas, A. (2006). A Cross-age study of the understanding of three genetic concepts: How do they image the gene, DNA and chromosome? *Journal of Science Education and Technology*, 15(2), 192-202. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-9006-6>
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Sylvain, J., & Griggs, P. (2007). An Epistemological Approach to Modeling: Cases Studies and Implications for Science Teaching. *Science Education*, 92(3), 424-446. <https://doi.org/10.1002/sce.20268>
- Shea, N., & Duncan, R. (2013). From theory to data: The process of refining learning progressions. *Journal of the Learning Sciences*, 22(1), 7–32. <https://doi.org/10.1080/10508406.2012.691924>
- Sigüenza, A. (2000). Formación de modelos mentales en la resolución de problemas de genética. *Enseñanza de las ciencias*, 18(3), 439-450. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4030>
- Southard, K., Wince, T., Meddleton, S., & Bolger, M. S. (2016). Features of Knowledge Building in Biology: Understanding Undergraduate Students' Ideas about Molecular Mechanisms. *CBE Life Sciences Education*, 15(1), ar7. <https://doi.org/10.1187/cbe.15-05-0114>
- Stewart, J. (1982). Difficulties experienced by High School students when learning basic Mendelian Genetics. *The American Biology Teacher*, 44(2), 80-89. <https://doi.org/10.2307/4447413>
- Stewart, J., Cartier, J., & Passmore, C. (2005). Developing understanding through model-based inquiry. In S. Donovan & J. Bransford (Eds.), *How students learn: History, mathematics, and science in the classroom*, (pp. 515-565), Washington, DC, United States of America: The National Academies Press.
- Strauss, A., & Corbin, J. (2002). *Bases de la investigación cualitativa: técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundada*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Svoboda, J., & Passmore, C. (2013). The Strategies of Modeling on Biology Education. *Science Education*, 22, 119-142. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9425-5>



- Thörne, K., Gericke, N., & Hagberg, M. (2013). Linguistic challenges in Mendelian genetics: Teachers' talk in action. *Science Education*, 97(5), 695-722. <https://doi.org/10.1002/sce.21075>
- Todd, A., & Romine, W. L. (2016). Validation of the learning progression-based assessment of modern genetics in a college context. *International Journal of Science Education*, 38(10), 1673–1698. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1212425>
- Todd, A., & Romine, W. L. (2017). Empirical validation of a modern genetics progression web for college biology students. *International Journal of Science Education*, 39, 488–505. <https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1296207>
- Todd, A., Romine, W., & Correa-Menendez, J. (2019). Modeling the transition from a phenotypic to genotypic conceptualization of genetics in a university-level introductory biology context. *Research in Science Education*, 49(2), 569–589. <https://doi.org/10.1007/s11165-017-9626-2>
- Todd, A., Romine, W., Sadeghi, R., Cook Whitt, K., & Banerjee, T. (2022). How do high school students' genetics progression networks change due to genetics instruction and how do they stabilize years after instruction? *Journal of Research in Science Teaching*, 59(5), 779–807. <https://doi.org/10.1002/tea.21744>
- Venville, G., & Treagust, D. (1998). Exploring conceptual change in genetics using a multidimensional interpretive framework. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), 1031-1055. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199811\)35:9<1031::AID-TEA5>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199811)35:9<1031::AID-TEA5>3.0.CO;2-E)
- Venville, G., & Donovan, J. (2005). An Exploration of Young Children's Understandings of Genetics Concepts from Ontological and Epistemological Perspectives. *Science Education*, 89(4), 614-633. <https://doi.org/10.1002/sce.20061>
- Chu, Y. C. (2008). *Learning Difficulties in Genetics and the Development of Related Attitudes in Taiwanese Junior High Schools*. (Tesis de doctorado). University of Glasgow, Scotland. Reino Unido. Recuperada de: <https://theses.gla.ac.uk/168/>

**Recebido em:** 24.05.2023

**Aceito em:** 26.10.2023