



## ARTÍCULO DE REVISIÓN

## Caracteres mendelianos: un enfoque integrador para su impartición en cursos de Genética

*Mendel's traits: a comprehensive perspective for teaching in Genetics courses*

Arturo Elías-Llumbet<sup>1</sup>, Ivette Maria Menéndez-Perdomo<sup>2</sup>, Williams Ernesto Miranda-Delgado<sup>2</sup>,  
Angel Sánchez-Lamar<sup>1\*</sup>

1 Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba

2 Department of Biological Sciences, University of Calgary, Canada

\*Autor para correspondencia:  
[angel.sanchez@fbio.uh.cu](mailto:angel.sanchez@fbio.uh.cu)

### RESUMEN

Actualmente la Genética ha ocupado un papel central en la comprensión de los procesos biológicos, debido a que, de manera recurrente, los conocimientos genéticos auxilian a las demás ramas de la Biología en la explicación de los fenómenos que ellas estudian. Este hecho ha conllevado a la necesaria integración interdisciplinaria en la enseñanza de la Genética, con el fin de propiciar un enfoque sistémico en el estudio, la impartición y la comprensión de los procesos en que están involucrados los genes. Tradicionalmente, en la impartición del tema relacionado con la transmisión de los caracteres de las plantas de guisante investigados por Mendel, ha primado un enfoque historicista y reproductivo de los cruzamientos realizados por él, sin abordar aspectos morfo-fisiológicos, metabólicos y genético-moleculares, de esos caracteres. Este enfoque aún prevalece en determinados centros de educación superior. El presente artículo tiene como objetivo, fundamentar una propuesta más integradora y actual para la impartición del tema: "Leyes de Mendel". La misma, además de manejar el término "factores hereditarios" como entidades abstractas, en la explicación de los experimentos realizados por Mendel, considera también la caracterización molecular actual de estas entidades como "genes". Incluir la información antes mencionada en la enseñanza de los cursos de Genética sería una contribución significativa en la formación de especialistas y en el perfeccionamiento de la asignatura. Con tal fin, se recomienda una enseñanza más completa y actualizada de los caracteres estudiados por Mendel. Se proporcionan ejemplos concretos y se hace referencia a los conceptos genéticos que permiten lograr el enfoque propuesto en el desarrollo de conferencias, clases prácticas y seminarios. Hoy es factible la enseñanza de la Genética con la perspectiva del pensamiento sistémico, el arsenal de conocimiento acumulado por las Ciencias Biológicas así lo permite. La integración de contenidos de nivel de organismo y nivel molecular, en determinados temas de los programas de Genética, contribuirá a una representación más consistente del papel que juegan los genes como parte de la materia viva.

**Palabras clave:** caracteres mendelianos, enseñanza de la Genética, pensamiento sistémico, interdisciplinarietà, Genética Clásica, Genética Molecular, holismo, reduccionismo

Recibido: 2020-01-22

Aceptado: 2021-01-21

## ABSTRACT

*The evolution of teaching models towards approaches that are ever more integrative is still challenging. Nowadays, Genetics plays a central role in explaining the phenomena studied by the remaining branches of Biology. This fact leads to the necessary interdisciplinary integration in teaching Genetics, to promote a systemic approach in the study, teaching methods, and understanding of the processes in which genes are involved. The traits analyzed by Mendel in pea plants are traditionally taught with a historicist approach; even when the students have access to current scientific literature that comprises morpho-physiological, metabolic, and genetic-molecular studies about them. Including the aforementioned information in the teaching of Genetics courses would be a significant contribution in training specialists and perfecting the subject. The present article proposes to expand the analysis of Mendel's works to the molecular level, which requires that teachers break away with the existing oversimplified divisions that are generated as a collateral effect of the necessary fragmentation of knowledge when it is taught. That is why, it is advocated a more comprehensive and up-to-date teaching of Mendel's traits at university courses. In this sense, concrete examples are provided and Genetics topics are referred to offer feasible ways to achieve the proposal in terms of developing lectures, practical classes, integrating seminars, and term papers. Today it is necessary to focus teaching Genetics towards the perspective of systemic thinking. The arsenal of knowledge accumulated by the Biological Sciences thus allows it. The proposal of integrating contents from the organism and the molecular levels in certain Genetics topics will contribute to a more consistent representation of the role played by genes as part of living matter. If the genetic phenomenon is systemic in its objective existence, then teaching it should follow, consequently, a systemic approach.*

**Keywords:** *spala Mendelian traits, Genetics teaching, systemic thinking, interdisciplinarity, Classic Genetics, Molecular Genetics, Holism, Reductionism*

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la Genética ocupa un papel protagónico en la comprensión cabal de los procesos biológicos, en la solución de problemas de salud humana y en el desarrollo biotecnológico de la sociedad (Griffiths *et al.*, 2012). Esto condiciona la necesidad de ofrecer al estudiantado de Ciencias Biológicas una representación de los procesos genéticos lo más aproximada posible al nivel de conocimiento alcanzado en los aspectos esenciales de esta disciplina.

La integración entre los enfoques clásico y molecular de la Genética, constituye un recurso ineludible en la impartición de esta asignatura. Sin embargo, de manera tradicional la Genética se ha impartido con un enfoque histórico acorde con el desarrollo cronológico de esta ciencia, lo que ha conllevado al diseño de currículos de estudios en los que los conocimientos genéticos de nivel molecular se imparten después de vencer los conocimientos clásicos de la Genética mendeliana (nivel de organismo). En ocasiones, estos contenidos han conformado dos asignaturas independientes: Genética Clásica y Genética Molecular; donde la segunda se imparte como profundización de la primera (UAB, 2017a). Tal tendencia confronta la paradoja de que, en la actualidad, llegar a comprender los caracteres genéticos en el nivel de organismo, exige explicaciones de

nivel molecular. Por otra parte, no favorece en el estudiantado la formación de habilidades para ejercer el análisis genético, de manera consecuente, en diferentes niveles de organización de la materia viva; reforzando así el pensamiento asertivo en detrimento del integrativo.

Lo anterior deviene en una desventaja para el proceso de enseñanza-aprendizaje dentro de la disciplina Genética y, por ende, dentro de las Ciencias Biológicas. En la actualidad los docentes de estas ramas pueden explotar las conexiones entre asignaturas y disciplinas componentes de un currículo, en aras de desarrollar en el estudiantado un pensamiento más integrativo. Por esta razón, el presente artículo tiene como objetivo defender una perspectiva más integradora para el análisis de los trabajos de Mendel en la impartición de los cursos de Genética. Esto pudiera contribuir al fortalecimiento de nuevos modelos didácticos en una enseñanza de las Ciencias Biológicas acorde a las necesidades científicas actuales.

## DESARROLLO

### Un poco de historia

Desde el nacimiento de la Genética en 1900, luego de reconocerse la significación de las leyes postuladas por Mendel, la historia de esta ciencia, en similitud

con otras ramas del conocimiento, cuenta con numerosos descubrimientos que constituyeron hitos en el pensamiento científico universal. Los resultados obtenidos por Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty, sin lugar a dudas, constituyen un ejemplo esencial. En 1944 estos investigadores desarrollaron un experimento (Avery *et al.*, 1944) que les permitió proponer que el denominado “factor transformante” abordado por Frederick Griffith en 1928 (Griffith, 1928) era en realidad el ADN. Este fue un descubrimiento crucial para el conocimiento de las bases moleculares de la herencia y constituye el nacimiento de la Genética Molecular.

En 1952, mediante los experimentos de Alfred Hershey y Martha Chase (Hershey y Chase, 1952), se determinó el papel exclusivo del ADN en la herencia. Un año después James Watson y Francis Crick propusieron el modelo de la doble hélice para describir la estructura del ADN (Watson y Crick, 1953); basándose en los resultados de difracción de rayos X obtenidos por Rosalind Franklin y Maurice Wilkins (Wilkins *et al.*, 1953; Franklin y Gosling, 1953a, b y c). Sin lugar a dudas, el trabajo de Watson y Crick (1953) constituyó un hito en el desarrollo de la Genética, pues a partir de este momento la Genética Molecular transitó por un desarrollo paralelo al de la Genética Clásica, sin conexiones evidentes entre ambas ramas. Esto condicionó la didáctica de algunos modelos de enseñanza; lo cual también se vio influenciado por el nivel de desarrollo científico-técnico existente.

En la actualidad, pese a que se dispone de herramientas, métodos y modelos que han permitido comprender la base molecular de numerosos caracteres y, por ende, establecer la conexión entre manifestaciones a nivel de organismo y eventos estocásticos a nivel molecular, prevalece un enfoque compartimentado sobre los contenidos de la Genética. Esto contradice las necesidades contemporáneas del desarrollo científico, que plantean un enfoque más holístico e interdisciplinario como solución a la comprensión de los sistemas complejos (Capra, 1996).

### ¿Por qué fomentar un pensamiento integrador?

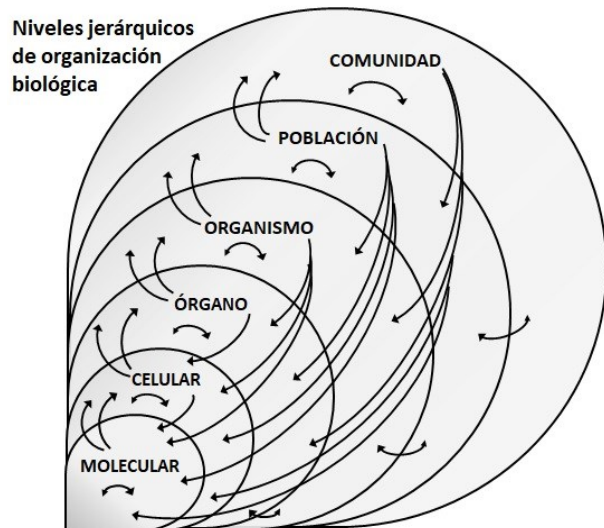
La Genética, como ciencia particular, se encarga de estudiar los genes y sus propiedades esenciales. Los genes, en el desempeño de su papel biológico, se caracterizan por poseer información codificada (secuencias de secuencias nucleotídicas), ser perpetuas, mutables y capaces de generar formas biológicas concretas (Ej.: proteínas) (Griffiths *et al.*, 2012).

Sin embargo, al estudiar la Genética, no puede obviarse el hecho de que los genes son parte de un todo sistémicamente superior: el organismo vivo. Por ello, la enseñanza de la Genética requiere de una perspectiva sistémica, es decir: la comprensión de los fenómenos genéticos como parte de una red de fenómenos biológicos interconectados e interdependientes (metabolismo, fisiología, morfología, desarrollo, evolución).

La integración de conocimientos genéticos debe tener en cuenta una característica clave de la estructura de los organismos vivos: su organización en múltiples niveles de complejidad (Morin, 1993). Toda manifestación de vida tiende a constituir estructuras multinivel de sistemas dentro de sistemas. Cada uno de ellos forma un todo con respecto a sus partes, siendo al mismo tiempo parte de un todo superior (Delgado, 2011). Las diversas rutas de interacciones metabólicas constituyen un sistema que está contenido en el sistema “célula”; la pluricelularidad conlleva a interacciones entre células que están contenidas dentro del sistema “tejido”; de igual forma, las interacciones entre tejidos de diversa funcionalidad conforman el sistema “órgano”, estos conforman el sistema “organismo” y, a su vez, la interacción entre estos últimos deriva en el sistema “población”. Esta característica organizacional de lo biológico, exige un enfoque multinivel en la enseñanza de la Genética: el papel desempeñado por los genes se concreta de manera diferente en cada uno de esos niveles. Por ejemplo, el hecho de que la información contenida en los genes debe ser perpetuable, se manifiesta a nivel molecular, en la duplicación del ADN; a nivel celular, en la distribución equitativa de los cromosomas durante la división mitótica o meiótica; y a nivel de organismo, en la reproducción. Cada uno de estos eventos biológicos anida dentro del otro, cada uno es un “todo” y, a la vez, una “parte” de un todo superior. La base de todo está en la forma en que ocurre la replicación del ADN.

Otra característica clave a tener en cuenta es que las conexiones entre los multiniveles de organización de la materia biológica son esencialmente “relaciones organizadoras”, de carácter dinamizador y, a la vez, estabilizador. Dichas relaciones se instauran de manera multilateral y multidireccional tanto dentro como entre niveles, conformando así una red de interconexiones (Fig. 1). Este enfoque se contrapone a la idea de que sólo exista subordinación lineal y unidireccional de los niveles inferiores a los superiores (Capra, 1996).

La superposición de niveles biológicos conlleva en sí el desenvolvimiento de la unidad entre dinámica y estabilidad del sistema, de lo cual emergen las nuevas propiedades del todo. Durante la evolución de la materia biológica las interacciones entre biomoléculas conllevaron a la polimerización. Esto representó una ganancia de estabilidad estructural y las relaciones organizadoras que se establecieron entre los diferentes polímeros, llevaron a organizaciones estructurales y funcionales más complejas que permitieron el surgimiento de las células como entidades autorreguladas consecuentemente vivas. Las complejas interacciones coloniales entre entes unicelulares independientes devinieron, en último término, en organismos pluricelulares en los que el incremento de su complejidad fue posible debido a la formación de los tejidos. Estos últimos se asocian e interactúan según la especialización funcional del tipo celular de cada uno, resultando en órganos y sistemas de órganos también funcionalmente especializados e interconectados. Por último, los organismos adoptaron conductas y surgieron las poblaciones y comunidades.



**Figura 1.** Esquema que representa la red de interconexiones multidireccionales y multilaterales que se establecen dentro y entre los diferentes niveles de organización biológica donde se estudian los procesos y fenómenos genéticos.

**Figure 1.** Diagram representing the network of multidirectional, multilateral interconnections established within and among the different organization levels of biological organization where genetic processes and phenomena are studied.

En el campo de los fenómenos genéticos, “la unidad entre estabilidad y variabilidad del sistema” radica en comprender la compleja red de eventos interconectados que están contenidos en el hecho de que, tanto desde el punto de vista estructural como funcional, la información genética es estable y variable a la vez. Su estabilidad y variabilidad depende no solo de las secuencias nucleotídicas contenidas en los genes sino también del ambiente al cual estos se exponen. De lo anterior, se deriva la necesidad de prestar atención al enfoque con que se imparte el tema de la relación gen-ambiente.

Si se asume al gen como “la parte” y al ambiente como “el contexto” del todo al cual pertenece, entonces el binomio gen-ambiente podrá ser analizado en cualquiera de los múltiples niveles en que se organiza la materia viva. Ello requiere que el concepto de ambiente no sea limitado a “ambiente externo”. Para un gen dado, ambiente es todo lo que le acompaña e interactúa con él, visto así, será factible interpretar eventos como la replicación, expresión y mutación de los genes o, las clásicamente denominadas “relaciones entre alelos” y “relaciones entre loci”, como eventos que derivan de los procesos de interacción entre genes y ambiente. Esta conjunción gen-ambiente es una condición necesaria para el cumplimiento del papel biológico de los genes y se expresa de manera específica en los distintos niveles de complejidad biológica. Este enfoque permite obtener importantes percepciones del fenómeno genético en estudio y contribuye a la formación de un pensamiento sistémico en el estudiantado.

La integración de los conocimientos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Genética es una observancia coherente con el hecho de ser los sistemas vivos totalidades integradas cuyas propiedades no pueden ser reducidas a las de sus partes componentes. Sus propiedades esenciales son características del conjunto, que emergen de las “relaciones organizadoras” que se establecen entre las partes contenidas en un sistema biológico específico (Capra, 1996).

Si se logra transmitir esta conceptualización dentro de las diferentes ramas de la Genética, será más fácil explicar por qué el “fenotipo” no está en el genotipo o por qué el gen no posee en sí mismo la “norma de reacción”, sino que ambas propiedades emergen de la manera específica en que se hayan propiciado las interacciones gen-ambiente.

### ¿Por qué los trabajos de Mendel?

Mendel presentó sus resultados sobre la herencia en 1865. Estos recibieron muy poca atención por parte de la comunidad científica (Birchler, 2015) y no fue hasta 1900 que los investigadores Hugo de Vries, Carl Correns y Erich von Tschermak, redescubrieron de forma independiente los principios enunciados por el monje austriaco. En 1985, Iris y Laurence Sandler propusieron una posible explicación para el hecho de que, durante 35 años, los descubrimientos de Mendel no fuesen atendidos con la debida importancia. Estos autores plantearon que la comunidad científica desde 1865 a 1900 era incapaz de comprender la significación del trabajo de Mendel porque no existía la concepción de la relación de la herencia con otras ciencias. Para los contemporáneos de Mendel la herencia incluía no solo las ideas que hoy se consideran dentro de la Genética sino también aquellas concernientes al desarrollo. En otras palabras, su concepto de herencia incluía lo que hoy se conoce como Genética y Embriología. Más pertinentemente, la herencia, para los científicos de entonces, era considerada simplemente como un momento particular del desarrollo y no como un proceso distinto que requiere un análisis especial (Russell, 2010). Además, cabe destacar que el objetivo original de los trabajos de Mendel fue entender las regularidades existentes en la aparición de formas híbridas en las progenies de algunas especies vegetales. Seguramente, para que luego los cultivadores pudiesen conseguir ejemplares de mayor estabilidad genética (Mendel, 1865).

En este contexto particular los resultados de Mendel cobran una significación mayor porque en ellos se plantean elementos que implican una ruptura con el paradigma científico existente. Por esta razón sus estudios constituyen un ejemplo excepcional de buena práctica científica. Él escogió el material de investigación adecuado (*Pisum sativum*) para el estudio del problema en cuestión, teniendo en cuenta aspectos económicos y morfo-fisiológicos, así como de optimización espacial y temporal. De esta forma estableció pautas que aún hoy se tienen en cuenta para la selección de un organismo modelo en estudios de Genética (Ej.: *Arabidopsis thaliana*). También diseñó cuidadosamente sus experimentos seleccionando caracteres - rasgos según Mendel- con dos alternativas fácilmente distinguibles; incluso cuando actualmente se sabe que algunos de ellos tienen una variación continua (Ej.: longitud del tallo).

En adición, estableció por primera vez el concepto de línea pura con el objetivo de tener la certeza de que los cambios observados en las progenies fuesen el resultado solo de los cruzamientos que él realizó artificialmente (Mendel, 1865).

Mendel colectó gran cantidad de datos y empleó el análisis matemático para demostrar que sus resultados eran consistentes con su hipótesis explicativa (Griffiths *et al.*, 2012). En 1936 el estadista y biólogo británico Ronald Fisher reconoció la significación de la contribución de Mendel al campo del análisis matemático experimental por ser el único que, en su tiempo, mostró gran preocupación por los datos (Reid & Ross, 2011). Nótese que en su momento histórico Mendel no disponía de los programas bioinformáticos que en el presente facilitan el procesamiento de un elevado número de datos. Además, no fue hasta principios del siglo XX que los trabajos de Francis Galton y Karl Pearson transformaron a la Estadística en una disciplina matemática rigurosa. El patrón que hoy se conoce como herencia autosómica también fue descubierto por Mendel y su genialidad estuvo en que no solamente lo descubrió, sino que analizándolo fue capaz de deducir la existencia de los genes -a los que denominó factores- y sus formas alternativas -variantes-, que desde 1902 por autoría de William Bateson se denominan alelos (Russell, 2010; Griffiths *et al.*, 2012).

Sin lugar a dudas el mayor aporte de Mendel al Método Científico empleado en Ciencias Biológicas es la generalidad de que un análisis genético comienza con al menos dos variantes. Continúa con el esclarecimiento de si las variaciones detectadas son heredables o no y culmina con discernir el número de genes involucrados y la forma y la proporción en la que estos pasan a través de las generaciones (Griffiths *et al.*, 2012). Esta comparación entre alternativas mutacionales de un mismo carácter se extiende a cualquier rama de la Genética, lo cual incluye, por supuesto, a la Genética Molecular.

Este tipo de análisis no solo se circunscribe a los fenómenos relacionados con la conducta de transmisión, sino también a la conducta de expresión de los genes. En tal sentido, la técnica de bloqueo de genes, también denominada inactivación génica o desactivación génica (del inglés: *gene knockout*), ha permitido respaldar conceptos como haplosuficiencia, así como esclarecer relaciones entre alelos y entre *loci* responsables de determinados caracteres.

También ha posibilitado establecer modelos *in vitro* de enfermedades congénitas, a partir de generar variantes y estudiar su comportamiento dentro de la reproducción sexual de los organismos analizados. He aquí un ejemplo que constituye un punto de contacto importante entre las metodologías empleadas en Genética Clásica y Genética Molecular.

Hoy existe una dicotomía entre algunos aspectos de la Genética que son analizados de manera diferente según el enfoque molecular o clásico. Tal es el caso del concepto de gen, el cual ha sido sometido a numerosas transformaciones y puntos de vista. Es evidente que sería pedagógicamente improductivo abordar en un programa de Genética todas las variantes conceptuales, debido a que muchas son específicas del contexto para el cual fueron emitidas. No obstante, el concepto de gen no debe limitarse a una tendencia molecular o clásica únicamente, sino que debe consistir en un concepto básico que permita identificar este elemento desde cualquier nivel de organización de la materia biológica. Una consecuencia de esta problemática se pone de relieve en el estudio de los caracteres mendelianos.

Durante mucho tiempo los resultados de Mendel solo podían emplearse para comprender la segregación de los alelos a los gametos y la transmisión independiente de algunos genes. En el presente, el empleo de diversas técnicas de Biología Molecular ha permitido profundizar en el estudio de aspectos genético-moleculares, metabólicos y morfo-fisiológicos de los caracteres mendelianos (Ellis *et al.*, 2011). Hoy se conocen las variaciones moleculares que resultan en los diferentes fenotipos de cuatro de los siete caracteres analizados por Mendel (Tabla 1).

Además, se tienen indicios sobre los posibles *loci* de los genes que intervienen en las alternativas fenotípicas de los tres caracteres restantes (Reid y Ross, 2011).

Estos hallazgos brindan otra conexión fascinante entre la Genética Mendeliana y la Genética Molecular. Sin embargo, en algunos programas de estudio de Genética existe una rigurosa división entre Genética Clásica y Genética Molecular, donde los análisis de Mendel quedan confinados en la primera, limitando así los puntos de conexión entre dos ramas de una misma ciencia. Este fenómeno no solo es característico de los programas de Genética de las universidades cubanas (UH, 2017). También se manifiesta en prestigiosas universidades como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2017), donde se abordan los caracteres mendelianos desde un punto de vista molecular -diferente al que se refiere en este artículo- en una asignatura de tipo optativa denominada Genética de Poblaciones. Otros ejemplos donde prevalece el enfoque historicista de los trabajos de Mendel en los programas de Genética son la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB, 2017b) y la de Navarra (UNAV, 2017) en España.

En contraste con los ejemplos planteados, en la Universidad de Sao Paulo, Brasil, existe una asignatura de corte fundamental denominada Enfoques Multidisciplinarios en Genética (USP, 2017). En ella se analizan problemas de Genética a través de diversas perspectivas relativas a los diferentes niveles de organización de los sistemas biológicos.

**Tabla 1.** Caracteres estudiados por Mendel y los *loci* implicados en su manifestación fenotípica. Modificada de Reid y Ross (2011).

**Table 1.** Traits studied by Mendel and the *loci* involved in phenotypic manifestation. Modified from Reid y Ross (2011).

Carácter	Locus/ <i>loci</i> implicado(s)	Alternativa dominante	Alternativa recesiva
Forma de la semilla seca	<i>R</i>	lisa	Rugosa
Longitud del tallo	<i>LE</i>	largo	Corto
Color de los cotiledones	<i>I</i>	amarillo	Verde
Color de la cubierta de la semilla y de la flor	<i>A</i> y <i>A2</i>	cubierta gris flor púrpura	cubierta blanca flor blanca
Color de la vaina inmadura	No establecido	verde	Amarilla
Forma de la vaina	No establecido	inflada	constreñida
Posición de las flores	No establecido	axial	terminal

Otro ejemplo positivo en cuanto a la integración entre Genética Clásica y Genética Molecular lo constituye la Universidad de Oviedo en España. En este caso existe una única asignatura, denominada Genética, en la cual se analizan e interrelacionan contenidos que parten del nivel molecular, pasando al nivel organismo y luego al de población (UNIOVI, 2017). No obstante, el análisis de las bases moleculares de los caracteres mendelianos, en específico, es un fenómeno pobremente diseminado.

Es evidente que los trabajos de Mendel tienen una total relevancia dentro del Método Científico y el análisis de estos desde diferentes perspectivas puede contribuir a la formación de un pensamiento integrativo y complejo en el estudiantado de Ciencias Biológicas.

### ¿Cómo podría actualizarse la didáctica en la impartición de los trabajos de Mendel?

La Didáctica, como rama de la Pedagogía, es una disciplina científica cuyo objeto de estudio es la concepción y el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje, teniendo en cuenta las condiciones del contexto escolar. Dicho contexto implica, entre otros factores, al momento histórico del desarrollo científico-técnico. Por tanto, la didáctica de cualquier ciencia debe preocuparse por evolucionar en concordancia con este desarrollo.

Si bien es cierto que en los trabajos de Mendel son evidentes la relevancia de la observación minuciosa y el empleo de la Estadística dentro del Método Científico, en la actualidad se cuenta con los conocimientos para ampliar el enfoque con que estos son abordados en los programas de estudio de Genética. Explicar la causa molecular de algunas de las alternativas descritas por Mendel en los caracteres por él analizados, fomentaría en el estudiantado la comprensión de que los fenómenos biológicos son el resultado de una compleja red de interrelaciones que se establecen dentro y entre cada uno de los niveles de organización de la materia biológica. Para ilustrar lo anterior se analizan a continuación dos de los caracteres mendelianos desde un punto de vista genético-molecular, metabólico y morfo-fisiológico.

El primero de : los genes involucrados en los trabajos de Mendel que se secuenció, fue el relacionado con la forma de la semilla seca. Tempranamente en 1903 se estableció que las semillas lisas y las rugosas diferían en la forma y la cantidad de gránulos de almidón

presentes en las células de almacenamiento de los cotiledones (Gregory, 1902). En 1982 Coxon y Davies constataron que las semillas rugosas poseen elevados niveles de glucosa, fructosa y sacarosa. Además, presentan altos porcentajes de lípidos y un reducido número de algunas proteínas de almacenamiento como la legúmina (Coxon y Davies, 1982).

Finalmente, en 1990 Bhattacharyya *et al.* demostraron que en dichas semillas se encontraba afectada la enzima SBE1 (del inglés: *starch-branching enzyme*), responsable de la biosíntesis de almidón. La clonación del gen *SBE1* arrojó que la causa de lo anterior es una inserción de un elemento transponible de 0,8 kb, que probablemente determina la pérdida de los últimos 61 aminoácidos, resultando así en una enzima no funcional (Bhattacharyya *et al.*, 1990). La ausencia de SBE1 conduce al aumento en los niveles de monosacáridos y disacáridos libres en el interior de las células de almacenamiento. Con ello, aumenta el número de grupos hidroxilo libres y, consecuentemente, la presión osmótica del citosol. Esto produce la entrada masiva de agua y el aumento del tamaño de la semilla; la cual, al deshidratarse, termina con una textura rugosa.

El cuarto carácter mendeliano cuyo gen fue secuenciado resultó estar relacionado con la coloración de las flores y de las cubiertas de las semillas. En 1990 Harker *et al.* confirmaron que la expresión de una enzima clave en la biosíntesis de flavonoides, la chalcona sintasa (CHS), estaba regulada por los genes *A* y *A2* (Harker *et al.*, 1990). En 2010 Hellens *et al.* reportaron que el gen *A* codifica para un factor de transcripción de tipo bHLH (del inglés: *basic helix-loop-helix*). Estos autores secuenciaron el ADNc correspondiente de una línea de flores blancas denominada Caméor. La secuencia reveló ocho nucleótidos adicionales en el intrón 6. Esto es consistente con una transición G-A que elimina el sitio donador de splicing de este intrón. Consecuentemente, el spliceosoma identifica el próximo GT disponible. Los ocho nucleótidos adicionales resultan en un corrimiento del marco abierto de lectura (MAL) y una parada prematura durante la síntesis del polipéptido (Hellens *et al.*, 2010).

Lo anterior deviene en un factor de transcripción no funcional que impide la expresión de los genes que codifican para la CHS. Esta enzima cataliza la adición al p-cumaroil-CoA de tres moléculas de malonil-CoA, dando lugar a las chalconas; que son precursoras de las antocianinas.

Estos flavonoides son los mayores responsables de la variedad de colores observados en las plantas (Griffing, 2015). De ahí que en ausencia de la CHS no se produzca acumulación de estos pigmentos en los pétalos de las flores y las cubiertas de las semillas, lo cual determina la obtención de ejemplares con flores blancas y cubiertas claras o transparentes.

Como se puede apreciar, ambos ejemplos corresponden a fenómenos macro, forma de la semilla y color de las flores, que se explican a partir de conceptos moleculares como elemento transponible, splicing alternativo, MAL, entre otros. Por otra parte, las diferentes funciones de las proteínas codificadas, así como la variedad de mutaciones en los genes responsables de las alternativas fenotípicas de los caracteres mendelianos, añaden riqueza al universo teórico que pudiera explotarse al combinar los contenidos impartidos en ambas asignaturas de Genética. Además, las técnicas experimentales y metodologías empleadas por los científicos en la actualidad para dilucidar las bases moleculares de los fenotipos estudiados por Mendel, también pudiesen servir como ejemplos concretos de cómo se construye la ciencia contemporánea (identificación de genes, secuenciación, determinación de enzimas claves en determinadas rutas metabólicas, etc.). De ahí que el enfoque empleado para abordar la Genética Mendeliana pueda extenderse al contexto molecular, lo cual favorecería la interdisciplinariedad y con ello la formación de un pensamiento más integral en las nuevas generaciones de científicos.

### ¿A qué contribuiría la propuesta que se hace en este artículo?

La anacrónica tensión existente entre la comprensión de los fenómenos biológicos a partir del estudio de las partes o del todo, ha devenido en el desarrollo de dos tipos de pensamiento. Aquel que enfatiza sobre las partes se conoce como asertivo, mecanicista o reduccionista; mientras que aquel que enfatiza sobre el todo recibe los nombres de pensamiento integrativo, sistémico u holístico (Capra, 1996).

Entre ambas percepciones se establece un falso problema de "exclusión mutua" semejante al planteado por Mikulinsky sobre internalismo y externalismo (Mikulinsky, 1989). Esto se debe a que el entendimiento correcto de la Biología no reside en una de las dos perspectivas por sí sola. La solución alternativa plantea un equilibrio dinámico entre elementos asertivos e integrativos (Tabla 2), o sea, no enfatizar desproporcionadamente en unos en detrimento de los otros.

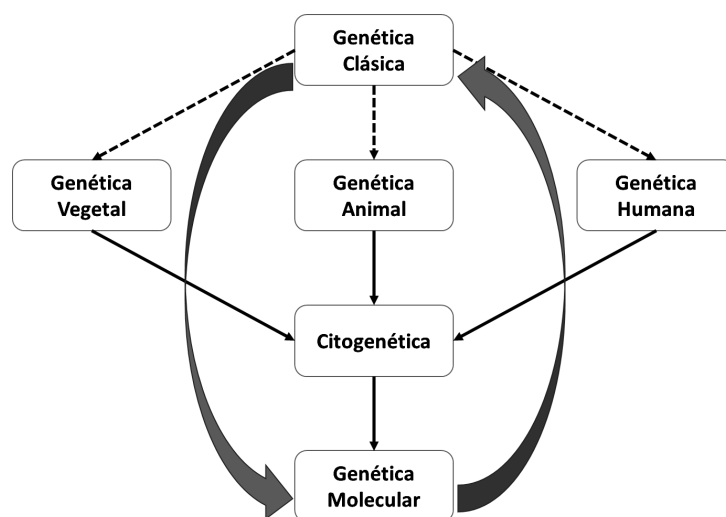
**Tabla 2.** Relación de habilidades cognitivas atribuidas al pensamiento asertivo y al integrativo. Modificado de Capra (1996)

**Table 2.** Relation of cognitive skills attributed to assertive and integrative thinking. Modified from Capra (1996).

Pensamiento	
Asertivo	Integrativo
Racional	Intuitivo
Analítico	Sintético
Reduccionista	Holístico
Lineal	No lineal

La didáctica de las ciencias en la cultura occidental ha evolucionado, precisamente, enfatizando en tendencias asertivas a costa de las integrativas (Capra, 1996). El surgimiento y desarrollo de diferentes ramas investigativas dentro de la Genética también estuvo permeado por dicha tendencia. Las leyes de Mendel, concebidas inicialmente como una regularidad de la transmisión de caracteres en las plantas, transitaron por un proceso de generalización hacia otros organismos vivos, durante los dos primeros decenios del siglo XX (Salcedo *et al.*, 2002; Rassetto, 2018). En consecuencia, la Genética Clásica profundizó, con enfoque asertivo, en explicar aspectos genéticos de microorganismos, animales, plantas y humanos. Sin embargo, el devenir de los conocimientos alcanzados en cada una de esas ramas conflujo en la necesidad (integrativa) de abordar la explicación de los procesos genéticos desde las perspectivas celular y molecular (Fig. 2) (Valencia-Arias *et al.*, 2019).

La propuesta planteada en este artículo va encaminada a contribuir al establecimiento del equilibrio entre pensamiento asertivo e integrativo en los programas de estudio de Ciencias Biológicas, específicamente dentro de la disciplina Genética. Ejemplos como el de Mendel y sus genes pueden ser explotados en este sentido, dada su potencialidad de integración no solo con otras ramas de la disciplina sino también con el Metabolismo, la Fisiología y la Metodología de la Investigación. Esto pudiese ser de gran utilidad para el desarrollo docente-educativo en el ámbito académico de la Biología en general (Quintanilla *et al.*, 2010; Núñez y Bermúdez, 2019; Alvis-Puentes *et al.*, 2019).



**Figura 2.** Esquema que muestra de manera general la diversificación (flechas discontinuas) surgida a partir de la Genética Clásica, la profundización (flechas continuas) de diversas ramas hasta la Genética Molecular y la consecuente interrelación (flechas grandes) que existe entre ambas genéticas.

**Figure 2.** Diagram generally showing the diversification (broken arrows) that arose from Classical Genetics, the deepening (solid arrows) of different branches into Molecular Genetics and the subsequent interrelation (large arrows) existing between both Genetics.

### ¿Para quiénes será útil esta propuesta: educandos o educadores?

Resulta indiscutible la necesidad metodológica de fragmentar el conocimiento en diferentes asignaturas; ya sea porque las Ciencias Biológicas presentan un elevado número de disciplinas componentes o porque se auxilia de otras ciencias naturales como la Física y la Química, así como de ciencias aplicadas como la Matemática. Esto deviene en un problema arcaico en el proceso de enseñanza-aprendizaje: la formación de un pensamiento también fragmentado en los profesionales de esta rama.

Es cierto que, en la actualidad, dado el vertiginoso aumento en la producción de conocimientos, una solución factible ha sido la especialización temprana de los profesionales de las ciencias. A esto se suma, en el caso de las Ciencias Biológicas, la gran diversidad de disciplinas existentes y la complejidad que cada una encierra. Además, a diferencia de otras ciencias, aún con el desarrollo científico-técnico que posee la humanidad en el presente, la Biología debe valerse de la simplificación de los procesos *in vivo* dado el elevadísimo número de variables involucradas en estos. No obstante, no se debe olvidar que todo científico en su labor se encuentra siempre en la línea divisoria entre lo conocido y lo desconocido.

Esto condiciona que, durante la interpretación de resultados experimentales, el investigador cuyo pensamiento científico sea más integral tenga una mayor posibilidad de concluir con certeza sobre lo observado.

Nótese que no se está criticando la simplificación de los métodos y modelos de estudio en el laboratorio, pues se sabe que esto constituye una necesidad. Lo que se plantea aquí es que, el hecho de desarrollar experimentos reduccionistas, no debe propiciar también un enfoque científico reduccionista. El pensamiento complejo es algo que puede y debe fomentarse desde la formación del profesional de Ciencias Biológicas.

Este artículo propone extender el análisis de los resultados de Mendel, desde un punto de vista molecular, a los programas de Genética de este tipo. Las ventajas de esto en el desarrollo científico actual resultan intangibles a corto plazo e incluso puede que a largo plazo también. Sin embargo, resultaría apropiado dotar al estudiantado de Ciencias Biológicas de una visión relativista en cuanto a las relaciones alélicas, las mutaciones, el metabolismo, etc., y más allá de esto sobre cualquier proceso que de manifestarse a nivel macro tenga su origen a nivel molecular o celular. De esta forma no se estarían limitando sus potencialidades como futuros científicos.

En adición, cabría esperar un aumento en la motivación del estudiantado, con lo cual se facilitaría el proceso de enseñanza-aprendizaje. Esto sobre la base, por ejemplo, de lo interesante que resultaría para un biólogo entender la causa molecular de determinado fenotipo; así como para un bioquímico hacer corresponder una mutación a determinada patología. Ambos puntos de vista, aunque parten desde sentidos opuestos, integran la complejidad multinivel de lo biológico y tenerlos en cuenta haría más factible cualquier propuesta docente relacionada.

Por otro lado, la propuesta que se defiende en este artículo también favorece a los docentes de la Genética. La integración de contenidos entre las diferentes asignaturas y/o disciplinas permite optimizar el tiempo que se dedica a planificar e impartir estos. Un contenido precedente sobre determinado tema sirve de punto de partida para profundizar en este e introducir un nuevo enfoque. De esta forma, se logra que el estudiante se encuentre más familiarizado con el contenido que recibirá y esto contribuye a acelerar su proceso cognitivo (Sanz y González, 2016).

## CONCLUSIONES

La didáctica de las Ciencias Biológicas no escapa a la complejidad de los sistemas vivos. En tal sentido, la evolución de los modelos de enseñanza hacia enfoques cada vez más integrativos constituye una apuesta coherente en el mapa teórico actual. La Genética Molecular reveló, en términos de estructuras biológicas concretas, lo mismo que Mendel descubrió en términos de caracteres biológicos transmisibles: los genes. Por esta razón, el presente artículo propone integrar el análisis de los trabajos de Mendel y la base molecular de las alternativas estudiadas por él. Ello requiere que los docentes rompan con las divisiones esquemáticas existentes al impartir el contenido relativo a los caracteres mendelianos. De esta forma, las nuevas generaciones de científicos podrán adquirir una visión relativista sobre las manifestaciones de diversos fenómenos genéticos en los diferentes niveles de organización de la materia biológica. Así, se evitaría la simplificación de pensamiento que se genera como efecto colateral de la necesaria fragmentación del conocimiento durante su impartición. Si lo genético en su existencia objetiva es sistémico, entonces la impartición de lo genético debe ser, consecuentemente, con enfoque sistémico.

## AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Nibaldo Negrín Márquez por su ayuda crucial con la traducción del manuscrito.

## LITERATURA CITADA

- Alvis-Puentes, J. F., E. Aldana-Bermúdez y S. J. Caicedo-Zambrano (2019). Los ambientes de aprendizaje reales como estrategia pedagógica para el desarrollo de competencias matemáticas en estudiantes de básica secundaria. *Rev. Investig. Desarro. Innov.* 10 (1), 135-147. doi: 10.19053/20278306.v10.n1.2019.10018.
- Avery, O.T., C.M. Macleod y M. McCarty, (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing Transformation of Pneumococcal Types. Induction of Transformation by a Deoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III. *Journal of Experimental Medicine* 79, 137-158.
- Bhattacharyya, M.K., A.M. Smith, T.H.N. Ellis, C. Hedley, et al. (1990). The wrinkled-seed character of pea described by Mendel is caused by a transposon-like insertion in a gene encoding Starch-Branching Enzyme. *Cell* 60, 115-122.
- Birchler, J.A. (2015). Mendel, Mechanism, Models, Marketing and More. *Cell* 163, 9-11.
- Capra, F. (1996). La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos (Traducción de la edición original: *The Web of Life*. Anchor Books, Nueva York, 1996). EDITORIAL ANAGRAMA, S.A. Pedro de la Creu, 58, 08034, Barcelona.
- Coxon, D.T. y D.R. Davies (1982). The effect of the ra and rb loci on the lipid content of the seed of *Pisum sativum*. *Theor. Appl. Genet.* 64, 47-50.
- Delgado, C.J. (2011). Hacia un nuevo saber. La bioética en la revolución contemporánea del saber. Publicaciones Acuario. Centro Félix Varela. La Habana.
- Ellis, T.H.N., J.M.I. Hofer, G.M. Timmerman-Vaughan, C.J. Coyne, et al. (2011). Mendel, 150 years on. *Trends in Plant Sciences* 16, 590-596.
- Franklin, R.E. y R.G. Gosling (1953a). The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. I. The Influence of Water Content. *Acta Cryst.* 6, 673-677.
- Franklin, R.E. y R.G. Gosling (1953b). The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. II. The Cylindrically Symmetrical Patter-son Function. *Acta Cryst.* 6, 678-685.
- Franklin, R.E. y R.G. Gosling, (1953c). Molecular configuration in Sodium Thymonucleate. *Nature* 171(4356): 740-741.
- Gregory, R.P. (1902). The seed characters of *Pisum sativum*. *Biometrika* 1, 226-228.
- Griffing, L. (2015). Biochemistry and Metabolism, in *Plant Physiology and Development (Sixth Edition)*, by Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M. & Murphy, A. Sinauer Associates, Inc. Los Angeles, California. p169.
- Griffith, F. (1928). The significance of Pneumococcal types. *Journ. of Hyg.* 27(2): 113-157.
- Griffiths, A.J.F., S.R. Wessler, S.B. Carroll y J. Doebley (2012) *An Introduction to Genetic Analysis (Tenth Edition)*. 41 Madison Avenue New York, NY 10010. Freeman and Company's New York.
- Harker, C.L., T.H.N. Ellis y E.S. Coen (1990). Identification and Genetic Regulation of the Chalcone Synthase Multigene Family in Pea. *The Plant Cell* 2, 185-194.
- Hellens, R.P., C. Moreau, K. Lin-Wang, K.E. Schwinn, et al. (2010). Identification of Mendel's White Flower Character. *PLoS ONE* 5 (10): e13230. doi:10.1371/journal.pone.0013230.

