

**Gen, Cromosoma y ADN. De la pregunta por la herencia a los conceptos  
fundamentales de la genética**

**ÓSCAR DAVID RÍOS RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES  
BOGOTÁ  
2025**

**Gen, Cromosoma y ADN. De la pregunta por la herencia a los conceptos  
fundamentales de la genética**

**ÓSCAR DAVID RÍOS RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado para optar por el título de:  
Magister en Docencia de las Ciencias Naturales**

**Asesores:  
Ingrid Vera Ospina  
Steiner Valencia Vargas**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
BOGOTÁ  
2025**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

**JURADO**

---

**JURADO**

**“Para todos los efectos, declaramos que el presente trabajo es original y de nuestra total autoría; en aquellos casos en los cuales hemos requerido del trabajo de otros autores o investigadores, hemos otorgado los respectivos créditos”**

## **Agradecimientos**

Este trabajo no habría sido posible sin el acompañamiento generoso, crítico y comprometido de quienes creyeron en esta búsqueda desde el inicio. A los profesores Ingrid Vera y Steiner Valencia, por apostar con sensibilidad y convicción a una propuesta que eligió el camino de la reflexión teórica. Gracias por abrir el espacio, por orientar con rigor y por confiar en la importancia de pensar los fundamentos de la genética con profundidad y cuidado.

A Diana, mi compañera de vida, gracias por tu presencia constante, por tu paciencia, por tu ternura en los días largos y por sostenerme cuando la energía flaqueaba. Este trabajo también es tuyo, en cada gesto de amor, cuidado, en cada palabra de aliento, en cada silencio compartido.

A mis padres, que con su apoyo incondicional me han enseñado la fuerza de la constancia. A mi sobrina Daniela, cuya curiosidad, alegría e inteligencia me inspiran día a día a seguir creyendo en la posibilidad de una educación más sensible y comprometida con la ciencia.

A la Universidad Pedagógica Nacional, mi casa de pensamiento, mi alma mater. Cada noche de desvelo, cada página escrita y corregida, cada duda y cada hallazgo llevan su sello. Este trabajo es también testimonio del compromiso formativo que aquí se cultiva: exigente, ético y transformador.

Y a mí mismo, por no rendirme. Por las veces que quise renunciar, y aun así volví. Por cada intento en medio del cansancio, por cada palabra escrita cuando el impulso parecía agotado. Porque seguir, a pesar de todo, también es una forma de creer.

A todos los que, de una u otra forma, estuvieron presentes en este trayecto: gracias. Esta tesis es también una forma de gratitud.

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	6
TABLA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABLAS .....	9
INTRODUCCIÓN .....	10
1. CONTEXTO PROBLEMÁTICO .....	13
1.1 De las políticas públicas y orientaciones curriculares.....	15
1.2 De las prácticas como educador .....	17
1.3 De la formación desde la Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales.....	23
1.4 Del problema.....	27
2. OBJETIVOS .....	30
2.1 Objetivo general.....	30
2.2 Objetivos específicos.....	30
3. JUSTIFICACIÓN.....	31
4. PROCEDER METODOLÓGICO .....	34
5. DISCUSIONES PRELIMINARES: ¿CÓMO SE COMPRENDE LA GENÉTICA COMO DISCIPLINA EXPERIMENTAL?.....	38
6. ¿QUÉ SUCEDIÓ ANTES?: LOS ANTECEDENTES DE LA GENÉTICA .....	52
6.1 La cuestión de la semejanza: los primeros antecedentes sobre los fenómenos hereditarios.....	55
6.2 De la semejanza a la base física de la herencia: los antecedentes que permitieron la consolidación de la genética.....	59
7. SOBRE LAS CONDICIONES TÉCNICAS Y TEÓRICAS .....	62
7.1 Condiciones técnicas y teóricas del concepto cromosoma .....	65
7.2 Condiciones técnicas y teóricas del concepto gen: .....	122
7.3 Condiciones técnicas y teóricas del concepto ADN.....	134

8.	PRODUCCIÓN DISCURSIVA .....	144
9.	Referencias bibliográficas.....	152
10.	ANEXOS .....	159
10.1	ANEXO A. Matriz de acercamiento a condiciones técnicas y teóricas de los conceptos de Cromosoma, Gen y ADN .....	159
10.2	Anexo B. Matriz de determinación de condiciones técnicas y teóricas para el concepto de Cromosoma.....	160
10.3	ANEXO C. Diagrama de intención del desarrollo de la propuesta monográfica.....	167

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Modelo de microscopio simple de A. van Leeuwenhoek.....	74
<b>Figura 2.</b> Diseño de microscopio compuesto de R. Hooke.....	75
<b>Figura 3.</b> Modelo de microscopio compuesto diseñado por Carl Zeiss en 1870.....	78
<b>Figura 4.</b> Máquinas de corte. a) Ilustración de máquina de corte usada por von Mohl hacia 1770. b) Máquina de corte cilíndrica diseñada por A. Cumming.....	81
<b>Figura 5.</b> Micrótopo diseñado y utilizado por W. His. (A) Vista frontal; (B) Vista lateral; (C) Nombre «His» grabado en el puntal. h) Porta cuchillas, g) Arco, m) Tornillo micrométrico, b) soporte de unión al bloque, k) vista lateral de h. ....	82
<b>Figura 6.</b> Micrótopo modelo Cambridge Rocker, comercializado desde 1885.....	83
<b>Figura 7.</b> Tipos de Micrótopos para corte en parafina. a) Micrótopo de rotación automatizado; b) Micrótopo de Rotación mecánico; c) Micrótopo de deslizamiento.....	83
<b>Figura 8.</b> Proceso de segmentación; ilustración por A, Schneider.....	96
<b>Figura 9.</b> Estadios de la partición del núcleo. Ilustraciones por E. Strasburger.....	98
<b>Figura 10.</b> Serie de ilustraciones de Walther Flemming sobre la división celular en larva de salamandra. Preparados con ácido cromoacético.....	100
<b>Figura 11.</b> Serie de ilustraciones por O. Hertwig. Penetración espermática; Fecundación; División del material nuclear, Primeras etapas de escisión.....	107
<b>Figura 12.</b> Ilustraciones de la fecundación de Hermann Fol. Entrada del espermatozoide y pérdida del flagelo; Migración y unión de los pronúcleos femenino y masculino; Fecundación. .....	109
<b>Figura 13.</b> Ilustraciones de las observaciones de T. Boveri que muestran la disminución cromosómica en las primeras etapas de la división celular en A. megalcephala. ....	114
<b>Figura 14.</b> Ilustraciones de las observaciones de T.Boveri. En etapas avanzadas del desarrollo, el número de cromosomas se conserva. ....	115

<b>Figura 15.</b> Desarrollo embrionario en los erizos de mar durante las primeras etapas después de la intervención experimental.....	116
<b>Figura 16.</b> Esquema del mapa genético del cromosoma 2 de <i>Drosophila melanogaster</i> .....	130
<b>Figura 17.</b> Esquema de enlace entre pares de bases nitrogenadas propuestos por Watson y Crick.....	139
<b>Figura 18.</b> Esquemas del proceso de desarrollo del modelo del ADN por F. Crick y J. Watson. ;(sup. izq.) Nucleótido, (centro) apareamiento de nucleótidos por bases iguales;(inf. izq.) Esquema doble hélice por apareamiento de bases iguales;(Der) Modelo del ADN .....	143

#### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales fijadores en estudios histológicos.....	86
---	----

## INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta en las páginas siguientes titulado *“Gen, Cromosoma y ADN. De la pregunta por la herencia a los conceptos fundamentales de la genética”* tiene su origen en un interés personal por comprender el desarrollo que la genética y la biología molecular han presentado en los últimos años. Este interés encontró en el transcurso de la Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales un espacio para la reflexión y sobre todo para la problematización sobre la forma en que es asumida la enseñanza de la genética en los espacios escolares, esto es, sobre las prácticas desarrolladas alrededor de su enseñanza. Pero serían los espacios formativos de Historia y Epistemología, los que decantaron el interés hacia la consideración de los aspectos históricos, epistemológicos, técnicos y teóricos como semillero de una condición para una práctica educativa propia que considere la importancia de estos para la comprensión que, sobre los conceptos del gen, del cromosoma y del ADN sus progresos no han sido inmediatos, lineales ni acumulativos.

Este interés depurado se transforma ahora en acción problematizadora, la determinación de un contexto de origen que se enmarca en las preguntas y cuestionamientos sobre las políticas públicas y orientaciones curriculares que en torno a la genética y sus conceptos estructurantes toman relevancia en el sentido de su importancia y disposición en el marco de su enseñanza y como condiciones de aprendizaje. También se desarrolla un espacio problematizador sobre las prácticas más habituales documentadas sobre la enseñanza de los aspectos centrales de la genética y que resultan también siendo prácticas propias que a menudo no son autocríticas.

En este sentido se exponen los aportes más relevantes que, en el desarrollo de la maestría, han favorecido la actitud crítica frente a la práctica educativa propia, y frente al interés por los aspectos históricos y epistemológicos que un cuerpo conceptual fundacional otorgaron al desarrollo de toda una disciplina científica. En conjunto, las preguntas y los aportes

culminan en el planteamiento del problema que establece la dirección y el enfoque de toda la propuesta monográfica, delimitándose desde la pregunta: ***¿Cuáles son las condiciones técnicas y teóricas que hicieron del cromosoma, el gen y el ADN conceptos estructurantes para la genética?***

A partir de esta pregunta central se estructura y organiza el trabajo, definiendo los criterios a abordar y las secciones a desarrollar, de esta manera se disponen 4 capítulos para llevarlo a cabo; el primer capítulo "*Discusiones preliminares: ¿cómo se comprende la genética como disciplina experimental?*" Aborda los aspectos que definen a la genética, en tanto que disciplina científica, como una disciplina derivada de la ciencia y específicamente de las características de la ciencia experimental. El siguiente capítulo, "*¿Qué sucedió antes?: los antecedentes de la genética*", aborda la discusión sobre los referentes y circunstancias históricas que permitieron disponer el escenario para que la genética emergiera como un campo autónomo en el seno de la biología, lo que en su desarrollo se define como los antecedentes. Resulta importante en esta discusión ilustrar cómo sobre problemas comunes en torno a la herencia, fueron abordados desde dos *epistemes* diferentes.

En el capítulo "Sobre las condiciones técnicas y teóricas" se lleva a cabo el desarrollo central del problema planteado para la realización del trabajo; en este se exponen y se detallan cómo los elementos técnicos y procedimentales constituyen la base del desarrollo teórico, en este caso de los conceptos estructurantes de una disciplina emergente desde diferentes campos de la biología. Así, se dedica un apartado a las condiciones técnicas y teóricas que constituyeron **al cromosoma** como la estructura fisiológica de la herencia. Un segundo apartado, que ilustra los momentos en los que **el gen** desde diferentes aplicaciones tanto técnicas como teóricas tiene lugar como una unidad física, material y de fuentes de cambio que permiten ampliar la comprensión de los fenómenos hereditarios. El tercer apartado, muestra, entonces cómo el concepto **del ADN** se constituye sobre la convergencia de diferentes formas

de proceder que van otorgando su materialidad y su modelización que sirve de fundamento para la explicación de otros fenómenos asociados a la biología molecular, por ejemplo.

Finalmente, en el capítulo dedicado a la *Producción discursiva*, se presentan las reflexiones alrededor del trabajo desarrollado y su importancia sobre la posibilidad de pensar los trabajos *historiográficos*<sup>1</sup> como elementos de disposición para una posición crítica frente al conocimiento y el conocimiento científico.

---

<sup>1</sup> El proceder historiográfico aquí adoptado se entiende como un ejercicio de memoria: una manera de volver la mirada hacia los orígenes de la genética para encontrar en ellos los acontecimientos que hicieron posible la configuración y posterior transformación de los conceptos de gen, de cromosoma y de ADN. Más que una reconstrucción exhaustiva, se trata de un recurso que permite entretener elementos de análisis en torno a las condiciones técnicas y teóricas que marcaron su consolidación, siempre desde la perspectiva de un docente de ciencias naturales que reconoce en la historia de las ciencias no solo un legado, sino también una oportunidad pedagógica. En este sentido, la mirada al pasado no se hace con los ojos del historiador, sino con los del profesor de biología que encuentra en la historia de los conceptos un camino para comprender el desarrollo del conocimiento científico.

## 1. CONTEXTO PROBLEMÁTICO

La genética es uno de los ámbitos que resultan discutibles en la enseñanza de la biología, por un lado, porque su complejidad conceptual deriva en la abstracción de muchas de sus explicaciones y, en consecuencia, termina por permear ciertas prácticas de enseñanza que reafirman una forma tradicional ajustada a resaltar un conjunto de términos y definiciones. Por otro lado, resulta en la asunción de la genética como un contenido que se debe abordar, más como un requisito establecido por la organización curricular que por una enseñanza asumida desde la indagación de los aspectos conceptuales, históricos y epistemológicos que pudieran dar sentido a prácticas cuyos objetivos se resistan a estar limitados únicamente al contexto escolar.

A partir de lo anterior, en este apartado se delimita el problema que orienta la discusión que se presenta a lo largo de este trabajo, desarrollando los ámbitos que se consideran relevantes con relación a cómo se constituye un conocimiento propio que sobre la indagación alrededor de las bases conceptuales de la genética puede pensarse una alternativa sobre su enseñanza. De esta manera resulta importante establecer las preguntas que, en sentido particular enriquecen el planteamiento del problema general, así, sobre las políticas y orientaciones curriculares vale la pena preguntar ¿Cómo están organizados los contenidos relacionados con la herencia biológica y la genética en las orientaciones curriculares y políticas públicas? ¿Cuál es la relación que se encuentra entre los conceptos de cromosoma, gen y ADN en estas disposiciones? A continuación, los interrogantes deberían estar dirigidos hacia cómo se desarrollan las prácticas pedagógicas, resultando pertinente preguntar ¿Cuáles son las prácticas relacionadas con la enseñanza de la herencia biológica y la genética y cómo estas acciones inciden en la enseñanza y en la conformación de ideas o aprendizajes relacionados con el marco de la genética?

Los cuestionamientos anteriores sirven de base al desarrollo de otros interrogantes que permiten complementar la intención de esta discusión, en este sentido, la de definir un saber propio alrededor de los fundamentos de la genética y su constitución como disciplina científica, así como la contribución que al respecto representa la formación académica como elemento a la base de la reflexión y la transformación de las prácticas y saberes. De esta manera, valdría la pena preguntar ¿Cuáles son las consideraciones conceptuales, epistémicas y epistemológicas en las que el cromosoma, el gen y el ADN puedan suponerse como estructurantes para la comprensión de la genética y los procesos hereditarios? Y finalmente ¿Cómo podría originarse una práctica desde la indagación, el cuestionamiento y la producción de un saber propio como posibilidad de transformar prácticas que hasta ahora se consideran como convencionales?

En esta sección, la discusión se aborda sobre el cuestionamiento de tres aspectos principales; Primero, desde los planteamientos y orientaciones curriculares demarcadas por las políticas públicas de educación en la enseñanza de las ciencias naturales, esto incluye principalmente los derechos básicos de aprendizaje y los estándares básicos de competencias. Segundo, desde las prácticas más frecuentes relacionadas con la enseñanza de la *herencia biológica*—englobada dentro de la genética—, esto se refiere al conjunto de prácticas sobre las que se desarrollan algunas propuestas, es decir, cuáles son las acciones al abordar un componente temático, las actividades que se desarrollan para indagar las concepciones de los estudiantes y para alcanzar la metas u objetivos de aprendizaje. Tercero, desde las consideraciones propias constituidas a partir de la formación académica que como educador ha permitido el cuestionamiento del saber disciplinar sobre el que se desarrolla una práctica educativa.

De esta manera, los aspectos mencionados son el sustrato para la reflexión en la que los aportes y alcances de la formación en los espacios de la Maestría en Docencia de las

Ciencias Naturales tiene lugar, esto es, que en tanto educador se reconoce una relación compleja con el conocimiento disciplinar, en la que el cuestionamiento y reflexión sobre las condiciones históricas, epistemológicas, conceptuales y curriculares debe ser constante, pues a partir de allí es posible la configuración de un saber propio que permita emplear acciones que puedan considerar una enseñanza en vía de transformación del contexto escolar. Finalmente, en este horizonte derivado de este tejido problemático, se ubica el norte de esta propuesta de disertación, es decir, el problema a abordar y los objetivos que se pretenden alcanzar en el desarrollo del presente trabajo.

### **1.1 De las políticas públicas y orientaciones curriculares**

A continuación, se presenta una revisión de las orientaciones curriculares relacionadas con la herencia biológica y la enseñanza de la genética; en los Estándares Básicos en Competencias de Ciencias Naturales (Ministerio de Educación Nacional, 2004) y los Derechos Básicos de Aprendizaje para Ciencias Naturales (DBA). De forma general, se puede afirmar que se encamina la enseñanza de estos contenidos en educación básica, desde sexto grado, cuando se define como objeto de aprendizaje la “explicación de la estructura de la célula y las funciones básicas de sus componentes” (MEN, 2004:18), y se puede inferir que de manera implícita se abordará en el estándar “comparo sistemas de división celular y argumento su importancia en la generación de nuevos organismos y tejidos” (MEN, 2004:18). Se podría destacar de lo anterior que se plantea la existencia de una relación entre la estructura (“célula y sus componentes”) y la función (reproducción), sin embargo, plantea al mismo tiempo la dificultad de comprender esta relación sin referirse a la importancia que tienen los cromosomas, los genes y el ADN en la reproducción celular.

Además, para grado octavo y noveno se orienta a profundizar sobre los conceptos en relación con la variabilidad y herencia genética, respectivamente. En grado octavo el DBA “Analiza la reproducción (asexual, sexual) de distintos grupos de seres vivos y su importancia

para la preservación de la vida en el Planeta.” (MEN, 2016: 29) Se relaciona con la importancia de la herencia resultado de la reproducción de los organismos, así como condición para la variabilidad de los seres vivos. Para grado noveno, el DBA correspondiente se orienta al estudio de los principios de la genética: “Comprende la forma en que los principios genéticos mendelianos y post-mendelianos explican la herencia y el mejoramiento de las especies existentes”. (MEN, 2016: 31).

Por su parte los estándares básicos (que orientan los contenidos para los grados octavo y noveno), explicitan el estudio de la estructura y función del ADN; “Reconozco la importancia del modelo de la doble hélice para la explicación del almacenamiento y transmisión del material hereditario” (MEN, 2004:20). Así como procesos biomoleculares como la duplicación, transcripción y traducción, en los que intervienen los ácidos nucleicos para la síntesis de proteínas — “Establezco relaciones entre los genes, las proteínas y las funciones celulares.” (MEN, 2004:20) —. Los estándares correspondientes a Ciencia, tecnología y sociedad se orientan hacia temáticas de interés actual como el análisis genético y la manipulación del genoma, que podrían orientar como método de enseñanza la discusión y el debate sobre situaciones relacionadas con estos aspectos. Lo anterior supone una dificultad en tanto que se requiere un vínculo con explicaciones derivadas de la química y su relación con las formas en que se transmiten las características, y estas solo se refieren en los estándares y derechos de aprendizaje como propios de la educación media. En este punto se está de acuerdo con la afirmación que presentan Ariza y Caicedo (2018), pues el objetivo que se plantea puede parecer inalcanzable, debido a que, lejos de promover la comprensión de un fundamento conceptual, termina en la transmisión de una información que no enlaza la experiencia cotidiana de los estudiantes.

Si bien los derechos básicos de aprendizaje y los estándares básicos de competencias presentan orientaciones generales sobre los contenidos del componente temático, no manifiestan de manera explícita la importancia de la enseñanza de estos contenidos, aparecen

como contenidos que se abordan en la medida de su complejidad o abstracción y no de su relación con procesos biológicos en los que necesariamente interactúan como la reproducción y la herencia, afirmando la idea que propone Orozco (2013) en la que la fragmentación del conocimiento traduce en que estos conceptos sean abordados de forma aislada, bajo un componente conceptual limitado a la herencia, o a los cromosomas o al ADN. Los fundamentos conceptuales de la genética se presentan más como un tema a abordar, entre una serie de contenidos que como un cuerpo de conocimiento derivado de una disciplina que contiene a su base sus propios problemas de indagación, fenómenos sobre los cuales desarrolla modelos de explicación y cuerpo teórico.

## **1.2 De las prácticas como educador**

A partir de la experiencia y la práctica docente en la educación escolar básica y media se han podido identificar algunas situaciones susceptibles de problematizar y que son objeto de discusión; en este aspecto la enseñanza de la genética y en particular de los conceptos gen, cromosoma y ADN corresponde con la presentación de un marco conceptual que se muestra terminado, los conceptos acaban en los límites de la definición, con cierta asunción ahistórica, en la que su temporalidad se ubica como la serie de eventos que llevaron a acoger un término o al descubrimiento de una estructura y su correspondiente función, esto es, carente de una reflexión sobre las condiciones técnicas y teóricas que hicieron posible la constitución y consolidación explicativa como objeto de estudio de una ciencia.

A este respecto podrían añadirse algunas situaciones que se reúnen en lo que se puede denominar una idea *transmisiva* sobre la enseñanza de la herencia como proceso biológico, Rossi (2008) destaca que, sobre este modelo, los contenidos relacionados se presentan de forma lineal y desprendidos de las relaciones conceptuales, así como de las posibilidades de la relación entre un fundamento conceptual y un contexto diferente al aula, esto ha derivado en

una enseñanza de tipo memorístico que obstaculiza una construcción propia de conocimiento por parte de los estudiantes.

En este sentido, Íñiguez & Puigcerver (2013), sostienen que, los contenidos trabajados tienen un fundamento conceptual fuertemente determinado, que se apilan en un listado de términos consecuencia de una exposición lineal a manera de clase magistral, que desconoce las ideas o conocimientos previos de los estudiantes sobre las relaciones que se puedan establecer a nivel conceptual o experiencial sobre lo que se comprende como herencia biológica, que según Abril, Mayoral & Muela (2004) son condicionantes para la enseñanza y el aprendizaje de la biología. Así, este modelo o idea transmisiva se puede sintetizar en dos dificultades, siguiendo a Rossi (2008) e Íñiguez & Puigcerver (2013), la primera es que la exposición de un marco conceptual no es suficiente para que los estudiantes puedan establecer relaciones entre los conceptos, ni su transferencia a contextos diferentes al escolar. La segunda, es que no se logra una modificación evidente de las ideas o concepciones sobre una temática cuando provienen de contextos diferentes, por ejemplo, el entorno familiar o los medios de comunicación, lo que dificulta, entonces, la posibilidad de construir un conocimiento significativo.

Por su parte, Gil (1994), advierte sobre una práctica que en muchas ocasiones se relaciona con la idea de enseñanza descrita en los párrafos anteriores; el uso de los libros de texto como principal material de apoyo y fuente de conocimiento que los educadores utilizan para abordar la herencia biológica en sus clases, desarrollando los contenidos en la secuencia en que se presentan en estos materiales publicados, por lo que, de acuerdo con Ayuso, G. y Banet, E. (1995) las inconsistencias en los contenidos del libro se trasladan al aula.

Otra de las situaciones posible de problematizar se relaciona con los esquemas que los estudiantes conforman previamente sobre los conceptos relacionados con la estructura del ADN, gen y cromosoma, y en general sobre el fundamento de la genética. Siguiendo a Posada (2000), sobre la enseñanza de las ciencias, los estudiantes tienen ideas sobre el tema de

estudio, pero estas ideas a menudo están fragmentadas, con estructuras poco delimitadas, frecuentemente intuitivas y que pueden ser erróneas. Para el caso del componente conceptual que corresponde a esta monografía; aparecen conceptos, que se relacionan o son estructurantes para el desarrollo del marco conceptual, que los estudiantes mencionan, (como cromosoma o gen) y como educador se asumen como comprendidos.

Con relación a lo anterior, existen numerosas publicaciones en las que se da cuenta de las principales ideas que los estudiantes de bachillerato mantienen sobre el fundamento conceptual de la genética y su relación con la herencia—que en la intención de este trabajo corresponde con los conceptos de ADN, gen y cromosoma—, estas investigaciones se han llevado a cabo a nivel internacional y obedecen a una tendencia en la que se orientan a la identificación de estas concepciones, intervención y diagnóstico del cambio en estas representaciones iniciales. Sin embargo, para el caso de la enseñanza de la herencia biológica en un marco general colombiano, las publicaciones son escasas y se orientan a la aplicación de estrategias de enseñanza principalmente sobre el ADN y principios genéticos.

Con lo anterior, se referencian algunas de las ideas más frecuentes en los estudiantes alrededor de los conceptos fundamentales sobre herencia biológica. Siguiendo la organización que Ayuso y Banet (2002) exponen sobre estas concepciones se presentan a continuación las que en la práctica como educador en la enseñanza en educación básica y media se han podido evidenciar y que resultan representativas para este trabajo.

Sobre la forma o los mecanismos en que la información y las características hereditarias son transmitidas de progenitores a descendientes, expresan los autores que, los estudiantes atribuyen a factores ambientales más que a factores hereditarios las causas de las características de los individuos. También sostienen que en las plantas no hay reproducción sexual y por lo tanto desconocen que en las plantas existen procesos meióticos. Así mismo, atribuyen un aporte desigual de la información hereditaria de los progenitores en la conformación de un individuo.

Sobre los cromosomas, o el modelo de cromosoma, se identifican dificultades en los estudiantes, principalmente conceptuales, en relación con la carencia de significados consistentes sobre gen, cromosoma, alelo, carácter, gameto o cigoto y esto deriva en que no se establezcan relaciones entre estos conceptos, por ejemplo, la relación Gen-ADN. En este esquema, al existir confusiones y poca comprensión de la mitosis y la meiosis, difícilmente se les atribuye a los cromosomas intervención en estos procesos, como estructuras en las que se conserva y se organiza la información genética. Sobre este aspecto se puede destacar que, cuando se refieren a mutaciones, por lo general los estudiantes, consideran el término en tres vías, una mutación es cualquier cambio evidente en un individuo, las mutaciones son perjudiciales o negativas para el organismo o tienen un sentido teleológico o que el propósito de la mutación es asegurar la supervivencia de un organismo.

Siguiendo con las situaciones problema identificadas desde la práctica como educador es también necesario llevar la mirada al trabajo o actividades prácticas, que, de acuerdo con Correa (2012) agrupan las salidas de campo, las prácticas de laboratorio, actividades con lápiz y papel (...) que en esencia son puntos de inflexión entre el concepto a nivel teórico y el concepto desde un nivel de aplicación o demostración. La importancia y necesidad del trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias (y de la biología, en particular) es innegable, sin embargo, la orientación de estas actividades a menudo refuerza la condición acabada de un concepto, en tanto que las actividades son complementarias a la definición de un término. Otras actividades se ubican en un sentido demostrativo a través de la construcción de modelos (de la estructura o la organización del ADN, por ejemplo) que se derivan en muchas ocasiones de representaciones dadas por el educador o extraídas de la lectura e interpretación que se hace desde los libros o de textos digitales.

Las prácticas de laboratorio también son un componente importante, por no decir fundamental, en la enseñanza de la biología, sin embargo, al asumirse una enseñanza tradicional, altamente conceptual, los laboratorios también derivan en actividades que consisten

en el seguimiento de una secuencia de pasos para alcanzar un resultado esperado, esto es, las prácticas de laboratorio, en este sentido, se suponen sobre una condición ilustrativa de un ámbito conceptual, por ejemplo, las prácticas convencionales sobre extracción de ADN a partir de material “vivo”; efectivamente demuestran la existencia de “algo”, pero no da cuenta de su importancia para los organismos, ni la relación de lo “que se ve” con lo “que se conoce”.

Algunos trabajos que, a nivel nacional, se relacionan con la enseñanza de la genética o su componente conceptual se describen a continuación con el fin de exponer las ideas centrales, observaciones y aportes que puedan resultar significativos para el desarrollo de la presente discusión. Las tesis presentadas por Moreno (2014) titulada *Desarrollar una estrategia didáctica constructivista a partir de los conceptos de gen y cromosoma que permitan una mejor comprensión de la herencia biológica en el grado noveno del seminario menor de la arquidiócesis de Medellín*. Por Mojica (2016), titulada *Propuesta didáctica para la enseñanza de la genética mendeliana centrada en el aprendizaje basado en problemas en grado noveno a través de un ambiente virtual de aprendizaje*, y por Burgos y Hernández (2016) titulada *¿Por qué los hijos se parecen a sus padres?: Una mirada desde la herencia biológica* han de servir como elementos de estudio para el ejercicio sugerido.

Los trabajos de Moreno (2014) y Mojica (2016) presentan propuestas de intervención escolar que manifiestan implícitamente la intención de abordar y *construir* los conceptos relacionados con los fundamentos conceptuales de genética y de la genética mendeliana, específicamente. A través de medios diferentes, en el primer caso, a través de un ambiente virtual, en el segundo, a través de un desarrollo didáctico de corte constructivista. También presentan como medios para alcanzarlos la indagación sobre los conceptos o construcciones que manifiestan los estudiantes, para luego evaluar el impacto de las actividades sobre estas ideas previas o preconcepciones.

Se debe resaltar que la elaboración de estas propuestas está sustentada sobre un componente disciplinar fuertemente determinado, es decir, en ambos casos se presentan los

conceptos que los estudiantes debieran construir una vez terminado, los marcos de discusión teórica se limitan a establecer cuáles son los conocimientos que se consideran necesarios para alcanzar su aprendizaje. Así, por ejemplo, se exponen que las leyes de Mendel son tres, a saber: de la uniformidad, de la segregación y la segregación independiente. Por otra parte, se limita a definir qué se entiende como alelo, cromosoma o gen, ilustrando de manera general cuáles fueron aquellos experimentos o trabajos representativos que permitieron la consolidación de dichos conceptos como se entienden actualmente.

En ambos casos se puede inferir que a pesar de la importancia que se le otorga a la enseñanza de la genética en el ámbito escolar y las preocupaciones derivadas de ésta, como la indagación por las formas de llevar su fundamento conceptual al contexto escolar y hacerlo parte del contexto cotidiano, permanecen algunas dificultades manifestadas en trabajos como los de Gil (1994) y Banet, E. y Ayuso, G. (1995); el uso de los libros de texto y las fuentes específicamente conceptuales pueden presentar imprecisiones que pueden ser trasladadas a las actividades y, a la vez, a los estudiantes.

En contraste, la tesis que presentan Burgos y Hernández (2016), manifiesta de manera sobresaliente la preocupación por comprender, de antemano, las condiciones en las cuales el conocimiento científico alrededor de la herencia tuvo lugar, a través de una reconstrucción histórica y epistemológica exponen cómo en la constitución de un campo científico como la genética convergen los dilemas, controversias y debates que pudieron dar origen a un campo conceptual. En su proceder metodológico reconocen la importancia de considerar la discontinuidad de la ciencia, pues su progreso no es lineal, ni mucho menos acumulativo. Posteriormente, es sobre este cuestionamiento histórico y epistemológico que la propuesta de intervención toma lugar, que tiene como intención más que la comparación de estructuras cognitivas con un cuerpo conceptual, caracterizar cuáles son las formas de representación y explicación que surgen en torno a los problemas relacionados con la herencia.

De lo anterior es posible insistir en la actividad constante y necesaria de cuestionarse sobre el saber propio que como educador se ha conformado, desde la práctica, por una parte y desde la formación propia, por otra. De esta manera también resulta otro ámbito para enriquecer el planteamiento problemático de esta sección la manera en que la formación académica contribuye como fuente de cuestionamientos.

### **1.3 De la formación desde la Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales**

A partir del propósito y los espacios académicos del programa en Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales (MDCN), se destaca un importante interés por reconocer la práctica del educador en ciencias como una actividad que no se limite a la pregunta por el qué enseñar y cómo enseñar los contenidos o temáticas de las disciplinas que conforman las ciencias naturales, sino que se constituye sobre un sentido de pensar-se como un educador que desenvuelve su práctica a manera de saber propio, se establece como un autocuestionamiento del saber pedagógico y disciplinar con el cual se relaciona y orienta a la constitución de un sentido de la práctica propia, que trascienda a la demanda de contenidos nuevos o actualizados en ciencias, y que a partir de la práctica misma estos contenidos constituyan también significado fuera del contexto escolar.

De esta manera, la MDCN provee la posibilidad de repensar el sentido de la práctica en tres aspectos elementales, la relación del educador y su práctica con el sentido epistemológico, esto es, asumir una posición frente al conocimiento y frente al conocimiento científico. La relación del educador con su fundamento disciplinar y la relación del educador con su saber pedagógico. Estos tres elementos, constituyen campos de confrontación del educador consigo mismo cuando se pretende transformar su práctica.

La interacción en los espacios académicos, en los que el ámbito epistemológico tiene relevancia, los ejercicios de lectura, escritura, discusión y reflexión han promovido preguntas sobre el conocimiento que no se manifestaban como relevantes en la práctica como educador;

preguntarse por eso que se denomina como conocimiento y las condiciones que lo posibilitan, derivan en hacerse consciente que el conocimiento se asume en el sentido en que Von Glasesrsfeld (1996) inicia su crítica a las posturas filosóficas tradicionales, y es que se supone la existencia de un mundo independiente y estructurado, conocerlo, entonces, significa descubrir cuál es esa estructura, es decir que el conocimiento es una representación correspondiente con la realidad, o dicho de otra forma, se asume el conocimiento a modo de verdad.

Esta idea se desconfigura cuando se discute sobre las condiciones que hacen posible el conocimiento, por ejemplo, las instancias que presenta Morin (1996) como las condiciones bioantropológicas y las condiciones socio-culturales que permiten que el conocimiento se constituya como una actividad plural y compartida en el seno de una estructura social. No se trata ya de verdades sino de sistemas explicativos que se comparten, se validan, se reestructuran, se refutan, se legitiman y se institucionalizan.

Sobre la ciencia y el conocimiento científico también se puede hacer referencia a una idea convencional que se mantiene entre los profesores de ciencias; una confianza particular sobre el conocimiento científico, sus productos y sus explicaciones que terminan por asumirse como verdades, una idea ampliamente difundida que pone a la ciencia sobre otros modos de conocer, por supuesto, no carece de fundamento, pues la ciencia se distancia, siguiendo a Ríos (2014) sobre Nagel (1981), en aspectos como, la sistematicidad de las explicaciones — sistemas explicativos que vinculan situaciones aparentemente distintas entre sí— que ofrecen exactitud y precisión, estos sistemas explicativos se expresan en un lenguaje específico que procura determinación y demostrabilidad, dando lugar a la posibilidad de abstracción y modelación lógica y matemática, estas características se vinculan en la práctica del método científico.

Estos aspectos sobre la ciencia rara vez son controvertidos, pues son ampliamente aceptados y funcionan dentro de la perspectiva del conocimiento científico. Cuando la pregunta

por la naturaleza del conocimiento científico se ubica en una perspectiva diferente, la noción positivista pierde fuerza ante perspectivas históricas, sociológicas, antropológicas o culturales, porque desdibuja ese carácter superior sobre otras formas de conocer y la ubica, en palabras de Elkana (1983) como una dimensión del entramado de significación que conforma la cultura, la ciencia entonces, en esta perspectiva se adecúa como un sistema cultural. En palabras de Fourez (1994):

Las ciencias son, al igual que el arte, la religión, la música, producciones culturales, mediante las que los humanos hacen una obra poética: Expresan lo que es el mundo en el que están insertos, describen su producción propia y comparten una representación del mundo. (en Ríos 2014, p. 36)

Con respecto a lo discutido sobre la idea de conocimiento y sobre la idea de ciencia y el conocimiento científico, los espacios académicos de la MDCN constituyen campos de conflicto que derivan en el abandono de las ideas convencionales del conocimiento y el conocimiento científico como manifestaciones de la verdad, en consecuencia, implica despojarse, como educador, de una posición privilegiada en que se considera como poseedor de conocimiento y que determina prácticas sobre un principio de carencia, es decir, al educador en tanto dueño del conocimiento, le corresponde transmitirlo a quienes carecen de éste. Transformar estas ideas debería generar el campo posible para pensar una práctica diferente, de reconocimiento de los otros, en sus formas de conocer, de acceder y construir este conocimiento, se apuesta por una práctica sobre la pluralidad, significa entender que la enseñanza no tiene una única direccionalidad, sino que se empieza a constituir como un complejo de relaciones en las que convergen dimensiones diferentes a las de la ciencia y el conocimiento.

Desde luego, resulta relevante discutir las contribuciones que el programa de MDCN hace a nivel disciplinar, la propuesta de acercarse a situaciones de estudio desde una perspectiva fenomenológica ha permitido poner en juicio el conocimiento propio, es decir, una confrontación entre lo que se cree saber y lo que se sabe, permite identificar cómo se

estructuran esquemas explicativos en torno a una situación y lleva a pensar las posibilidades y dificultades que frente a la apropiación de conocimiento se presenta en el aula de clase en la práctica pedagógica, dicho de otro modo, permite asumirse en la posición de quien aprende.

Los ejercicios de observación, argumentación, explicación y comunicación sobre situaciones específicas resultan en medios en los que la conformación y apropiación de un discurso, comparado, modificado y validado en comunidad representa la posibilidad de manifestar las formas en que se constituye el conocimiento disciplinar en sentido individual y colectivo. Para este trabajo puede representar un acercamiento a la herencia biológica como un problema de conocimiento en el aula.

En cuanto al saber pedagógico, se destaca un especial interés de realizar un llamado a los educadores en ciencias naturales sobre la necesidad de debatir sus propias prácticas, constituir las como fuente de conocimiento y de cuestionamiento del saber pedagógico propio, dar cuenta del alcance de sus actividades, de las necesidades que eventualmente surgen con sus estudiantes, de las formas en que se está o no constituyendo el conocimiento en el aula y cuáles son las posibilidades de que estas interacciones salgan del contexto escolar, esto significa:

[Valorar] el sentido que asigna a la enseñanza, la forma y comprensión sobre cómo enseña, la manera en que entiende la relación escuela-sociedad, el papel que da a las ideas de los estudiantes, los valores que privilegia en su práctica, las alternativas pedagógicas y didácticas que implementa en el aula, entre otros aspectos. (Vargas, M., Méndez O., et al. En Tarazona, L. 2020, p. 5)

Otra particularidad en relación con el saber pedagógico se constituye en la importancia de que el educador deje de asumirse como divulgador, orientador y evaluador de contenidos y su pertinencia para la enseñanza de las ciencias, sino que, en su ejercicio, se asuma como autor; autor de preguntas y autor de respuestas, esto es, asumirse como protagonista de su participación en relación con el conocimiento y con la valoración de su actividad como origen

de acciones transformadoras en estos mismos aspectos, cuyo objetivo no sea otro que tener un impacto de en su propia práctica como educador, en su fundamento epistemológico, histórico, pedagógico y didáctico.

De esta manera se han expuesto los aspectos más generales que dan origen a la realización del presente trabajo. Ahora, corresponde especificar el límite del problema que orientará la discusión en el que se expone, además, el tema de interés que, a partir de los cuestionamientos anteriores, aquí se pretende profundizar.

#### **1.4 Del problema**

Desde la consolidación de la genética como disciplina científica hacia el siglo XX hasta la actualidad, ha presentado un desarrollo innegable, no solo a nivel de su base conceptual y explicativa sino en el campo de aplicación de las disciplinas relacionadas con su fundamento, sin embargo, este desarrollo, se considera aquí, no hubiera sido posible sin la constitución de los conceptos de cromosoma, gen y ADN, que permitieron la delimitación de su campo de estudio. Por supuesto, el afianzamiento de estos conceptos no fue inmediato, ni mucho menos lineal; ni las preguntas, ni los problemas sobre los que las explicaciones tenían lugar, ni los desarrollos técnicos tenían como finalidad su *descubrimiento*, al contrario, se establecieron a partir de un complejo entramado de desarrollos técnicos, debates teóricos y reinterpretaciones epistemológicas que transformaron la comprensión de los fenómenos hereditarios.

El concepto *gen*, por ejemplo, que fuera acuñado por primera vez por Wilhem Johansen, aparece más como un término con la intención de disipar disparidades entre las nacientes explicaciones alrededor de la herencia<sup>2</sup> que, según Barahona (1994) surgían, de un lado, de la influencia Darwinista de la pangénesis, por otro lado, derivadas de los estudios citológicos del núcleo celular y los cromosomas; perspectivas que, en conjunto, buscaban darle sentido explicativo a lo que Mendel había indicado como *factores*: las Unidades fisiológicas de

---

<sup>2</sup> Esta situación se utiliza aquí como ejemplo. Se profundiza sobre este tema en los capítulos posteriores.

Spencer, las gémulas de Darwin, los grupos micelares de Nägeli, los Pangenés de Vries, los Plasomas de Weisner, el idioplasma de Hertwig o los Bióforos de Weissmann (Barahona, 1994) se consideraron como formas explicativas sobre la manera en la que las características son transmitidas de los progenitores a sus descendientes, suponiendo que para que esto ocurra se requiere de una base física, que hasta el momento no había sido descubierta por medios experimentales.

Otro ejemplo útil para ilustrar cómo las condiciones técnicas permiten la constitución conceptual de la genética estaría representado por los experimentos del equipo de Avery, MacLeod y McCarty que demostraron que el ADN desempeña un papel esencial en la transformación bacteriana. Este experimento no sólo sirvió de fundamento para establecer que este ácido nucleico es constitutivo de los cromosomas, sino que también significó un aspecto teórico para la solución del modelo de la molécula propuesto por J. Watson, F. Crick y M. Wilkins, cuya ordenación, a su vez, no podría haber sido propuesta sin los desarrollos técnicos de la cristalografía de rayos X realizados por R. Franklin y R. Gosling.

Epistemológicamente, con la consolidación de estos conceptos, la transformación de las formas de abordar y explicar los fenómenos biológicos y específicamente los fenómenos hereditarios es indiscutible; dejaron de ser considerados como categorías descriptivas para erigirse como instrumentos explicativos que permiten relacionar fenómenos entre diferentes niveles de organización biológica; desde lo molecular a lo orgánico. No obstante, esta transformación no pudo ser posible (como se ilustró con los ejemplos del gen y el ADN) sin el desarrollo de elementos técnicos y tecnológicos como la microscopía o las técnicas de secuenciación que, junto con la incorporación de modelos metodológicos, experimentales y argumentación teórica permitieran la integración de perspectivas estadísticas y fisicoquímicas con las perspectivas explicativas propias de la biología.

De esta manera, queda descrito el panorama en el que el desarrollo de las disciplinas científicas termina impactando los aspectos esenciales de la formación como educador en

ciencias naturales; poner como centro de cuestionamiento el saber disciplinar abre la posibilidad de comprender cómo este conocimiento tiene lugar, es decir, cuáles son los problemas a los que responde, se discute, se valida y se estructura en cuerpos explicativos conformados por los modelos y las teorías, no basta únicamente con comprender el significado conceptual si no se integra a este un sentido histórico y epistemológico. Se constituye de esta manera una actividad que modifica y constituye un saber propio sobre el que es posible desarrollar una práctica personal y así, posteriormente, generar criterios de valoración sobre qué es lo que se enseña, cómo incluir aspectos de interés que estén acordes con un contexto y que se mantengan vinculados a intereses y avances recientes en las disciplinas científicas y sus campos de aplicación.

Por tanto, se manifiesta una dimensión formativa clave que parte del interés por indagar cuáles fueron las condiciones técnicas y teóricas que permitieron a los conceptos cromosoma, gen y ADN cimentar el campo de estudio de la genética contemporánea. La realización de este trabajo servirá como ampliación de las perspectivas disciplinares que existen alrededor de un cuerpo conceptual desde una reflexión que integra elementos históricos y epistemológicos que puedan fundamentar otros trabajos y propuestas posteriores que tengan a su base la complejidad y problematización de la enseñanza de la genética. De esta manera, las inquietudes que a lo largo de esta sección se han expuesto se condensan en la pregunta problema:

**¿Cuáles son las condiciones técnicas y teóricas que hicieron del cromosoma, el gen y el ADN conceptos estructurantes para la genética?**

A partir de la pregunta se fijan los siguientes objetivos

## 2. OBJETIVOS

### a. Objetivo general

Profundizar en algunas condiciones técnicas y teóricas que hicieron del cromosoma, el gen y el ADN conceptos fundamentales de la genética.

### b. Objetivos específicos

- Caracterizar los elementos epistemológicos que constituyen a la genética como ciencia experimental
- Determinar los aspectos históricos y epistemológicos que hicieron de los problemas hereditarios un objeto de conocimiento para las ciencias.
- Delimitar las condiciones técnicas y teóricas que permitieron el desarrollo de los conceptos estructurantes de la genética.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Enmarcado dentro de los propósitos formativos del programa de Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, el presente trabajo procede del sentido de profundización teórica y pedagógica en torno a problemas derivados de las ciencias naturales y su enseñanza. En este sentido, este trabajo responde a la línea de profundización teórica o disciplinar, concretamente relacionado con los aportes brindados desde los espacios de Historia y Epistemología de las ciencias, en tanto que comprender los procesos de la actividad científica significa reconocer que a su base hay todo un contexto histórico que lo acompaña y es, en todo caso, un proceso dinámico de transformaciones y rupturas que han marcado el progreso de las ciencias.

Estas indagaciones por los componentes histórico, epistemológico, de desarrollo técnico y teórico constituyen fundamentos para adoptar una postura crítica frente a los propósitos y prácticas de las ciencias, lo que se traduce en comprender que, dentro de la práctica educativa, el maestro en ciencias que actúa sobre una disciplina cuya base conceptual no es fija, ni determinada, y mucho menos se limita a las definiciones alrededor de un campo de conocimiento. Por esta razón, se ha seleccionado elaborar una revisión histórica y epistemológica situada sobre la distinción de las condiciones técnicas y teóricas sobre los conceptos de gen, cromosoma y ADN, que permita, no solo enriquecer la comprensión de estos contenidos sino su devenir histórico que hizo de los problemas hereditarios — preguntas como ¿Por qué los hijos se parecen a sus padres? — un problema de conocimiento para la ciencia, que termina por constituirse como todo un campo de conocimiento, en este caso la genética.

En este sentido, el abordaje metodológico se plantea desde un corte monográfico, el cual está orientado a la revisión análisis y articulación del panorama histórico y epistemológico sobre las condiciones técnicas y teóricas que permitieron la constitución de los conceptos de cromosoma, de gen y de ADN. El desarrollo de una monografía responde a la naturaleza del

estudio planteado, que no se configura desde una problemática que exija, en términos empíricos, su abordaje desde el trabajo de campo o la intervención didáctica, sino que se trata de una reconstrucción conceptual que exige una aproximación rigurosa a las fuentes especializadas y a los debates que han formalizado estos conceptos en el marco de la biología y la genética.

Así, la monografía resulta el tipo de trabajo más adecuado en tanto que permite la profundización fundamentada, que no solo describe, sino que reinterpreta el acaecer de nociones científicas clave. El enfoque monográfico provee elementos de análisis crítico del contexto en el cual se dieron los avances o transformaciones técnicas, así como los problemas que se definieron a partir de nuevos postulados teóricos. De esta manera quedan sentados los elementos que se relacionan con los propósitos de la Maestría, al fomentar una perspectiva reflexiva sobre el conocimiento disciplinar como origen de una práctica educativa que considere la naturaleza del conocimiento científico en la dinámica propia de las ciencias y su relación con los criterios que pueden derivar en su enseñanza.

Además de su valor formativo y disciplinar, puede tomarse este trabajo como punto de partida para investigaciones futuras que tengan como objeto de desarrollo la articulación entre los saberes científicos y las prácticas de enseñanza. Al reconstruir críticamente los procesos históricos y teóricos que dieron lugar a la consolidación del gen, del cromosoma y del ADN como conceptos estructurantes de la genética, se abre la posibilidad de diseñar propuestas didácticas que incorporen estas dimensiones epistémicas en el aula. Asimismo, el análisis realizado puede servir de base para estudios que exploren cómo los contenidos escolares en genética reproducen —o bien distorsionan— las complejidades conceptuales de esta disciplina, o para investigaciones que indaguen en las concepciones docentes y estudiantiles sobre estos conceptos. En este sentido, el presente trabajo no se propone como una conclusión, sino como un aporte inicial a un campo de reflexión más amplio sobre la enseñanza de la genética y la construcción del conocimiento científico en contextos educativos.

A modo de cierre, la realización del trabajo se justifica por su coherencia con los principios formativos del programa académico y el curso de los espacios que lo conforman, permitiendo articular la profundización teórica con un interés crítico frente a la práctica educativa. Del mismo modo, su pertinencia radica en la intención de pensar al educador como problematizador de la disciplina sobre la cual ejerce su acción educativa. En este caso sobre los elementos que conforman el cuerpo conceptual de la genética, cuestionando los sentidos acabados y ahistóricos que derivan en la fragmentación de los contenidos y la transmisión de incorrecciones conceptuales. Finalmente, la elección de la monografía como modalidad de trabajo responde tanto a la naturaleza teórica del problema como a la intención de reconstruir y analizar críticamente el proceso de constitución de nociones fundamentales para la genética. De este modo, el trabajo no solo responde a una línea de formación disciplinar, sino que busca aportar elementos que sirvan de fundamento para investigaciones o propuestas de intervención posteriores.

#### 4. PROCEDER METODOLÓGICO

El trabajo de grado que aquí se expone, se enmarca dentro del carácter formativo de la Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales: la profundización disciplinar, que reconoce la importancia de generar un espacio de reflexión académica que permita al educador en ciencias construir una comprensión más rigurosa y crítica sobre los saberes que enseña, así como sobre las condiciones que históricamente han configurado su desarrollo. Acorde con este enfoque, y a partir de los intereses personales que han emergido desde el ejercicio docente y los desarrollos en los seminarios de la Maestría, así como de las discusiones sostenidas con los asesores del trabajo de grado, se decidió plantear una investigación de tipo monográfico. Debido a que se ajusta a la finalidad del trabajo de grado, orientado a discutir, desde una perspectiva histórica, la consolidación de los conceptos estructurantes de la genética; el cromosoma, el gen y el ADN. El formato monográfico permite organizar, analizar y discutir un conjunto de fuentes y referentes teóricos desde una perspectiva crítica, con el fin de profundizar en los fundamentos históricos, epistemológicos y conceptuales que han dado forma a la genética como disciplina científica.

Para la realización del presente trabajo se organizaron momentos de desarrollo que permitieron organizar la secuencia de las discusiones a presentar. Así, el primer momento constituye la delimitación de la problemática, en la que se realiza un esbozo conceptual sobre cuáles son los intereses, las preguntas, inquietudes, críticas y cuestionamientos que, desde los aspectos curriculares, de la práctica como educador y los espacios de los seminarios de la Maestría, convergen en la delimitación del problema, que va a dirigir el rumbo de la realización del trabajo.

Una vez delimitado el planteamiento fundamental y la correspondiente pregunta problema; *¿Cuáles son las condiciones técnicas y teóricas que hicieron del cromosoma, el gen y el ADN conceptos estructurantes para la genética?* Se da inicio a la documentación y

búsqueda de fuentes de información; en este momento se consultan diversas fuentes documentales, inicialmente secundarias que conducirían a las fuentes primarias de mayor relevancia en las que se desarrollan o se encuentra relación con la pregunta problema y el objetivo del trabajo.

La información recolectada es organizada en matrices o esquemas (ver Anexo B) con el fin de comenzar la delimitación de las condiciones técnicas y teóricas que se caracterizan para el desarrollo de la discusión monográfica. Estas matrices se constituyeron como resultado de las discusiones en los espacios de asesoría y seminario de trabajo de grado, que fueron reestructurándose conforme la intención del desarrollo del trabajo lo requería.

El siguiente momento constituyó la delimitación o caracterización de las condiciones técnicas y teóricas. Durante las sesiones de asesoría de trabajo de grado se construyeron esquemas o diagramas (Ver anexo A y C) que iban combinando los hallazgos en las matrices con el desarrollo histórico sobre las discusiones alrededor de los conceptos centrales del trabajo, se determinaron cuáles fueron los antecedentes que derivarían en las preguntas sobre la herencia como objeto de conocimiento. A partir de aquí se definen los elementos o eventos que constituyen los desarrollos teóricos, por una parte, y los desarrollos técnicos, de otra.

En cada una de estas categorías se definen los hitos históricos o eventos representativos que confirieron a las evidencias obtenidas el desarrollo y explicaciones sobre los fenómenos hereditarios, de la misma forma en que se iban configurando y transformando los conceptos del cromosoma, el gen y el ADN. Así las condiciones técnicas que se definen para el desarrollo del cromosoma como concepto estructurante para la genética se enumeran a continuación:

- *Los Avances en términos ópticos de los microscopios:* describe la optimización de los dispositivos de observación celular, especialmente las mejoras sobre los microscopios ópticos que permitieron alcanzar niveles de aumento y resolución superior. La segunda condición técnica

— *Técnicas de corte, fijación e inclusión:* describe cómo el desarrollo de técnicas de obtención de muestras de material vivo y los procedimientos a los que son sometidos contribuyen, a la identificación de estructuras optimizando las observaciones.

— *Desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas de coloración o tinción:* Describe aquellas técnicas y uso de componentes que facilitaron la obtención de imágenes de alto contraste, que permitieron diferenciar estructuras y composición a partir de la naturaleza de los componentes celulares.

De esta manera las condiciones teóricas que se definen para el desarrollo del cromosoma son

— *El desarrollo de la teoría celular* describe los elementos de orden teórico y explicativo que llevaron a fijar la atención en el núcleo celular

— *La fertilización o la unión de los núcleos en la formación del cigoto* refiere la relación entre la reproducción sexual y la conservación de los organismos generación tras generación.

— *Teoría cromosómica de la herencia por Sutton y Boveri* Muestra la relación del comportamiento de los cromosomas durante la división celular como elementos físicos de la herencia

— *Auge del mendelismo* que permite la relación de los postulados mendelianos con la teoría cromosómica

Las condiciones técnicas y teóricas que permitieron la consolidación del concepto de gen pueden organizarse en distintas etapas, correspondientes a sus principales avances y definiciones. En ese sentido, se reconocen las siguientes fases:

— *Consolidación experimental de la Drosophila;* A nivel técnico despliega los elementos de orden procedimental que constituyen a la mosca de la fruta como organismo modelo. A nivel teórico, las conclusiones permitieron constituir los primeros elementos conceptuales del gen como unidad hereditaria.

— *Desarrollo de los mapas cromosómicos:* Técnicamente se establece la construcción de modelos para la ubicación de los genes y teóricamente los elementos que consideran la posición de un gen un cromosoma.

— *Noción de mutación* Procedimientos que permiten la inferencia de cambios genéticos, a nivel teórico la fundamentación de la idea del gen como unidad estructural.

Por último, en la definición de las condiciones técnicas y teóricas del concepto ADN, se definen de acuerdo con la principal aplicación o técnica utilizada así

— Técnicas de microbiología y bioquímica que permitieron reconocer la composición material de los ácidos nucleicos, específicamente el ADN.

— La cristalografía de rayos X por su aporte a la modelización de la molécula del ADN.

— Técnicas de manipulación y lectura del ADN que se abordan en sentido descriptivo.

Mientras que las condiciones teóricas derivadas se agrupan en

— Reconceptualización del gen: Discusiones y desarrollos conceptuales que otorgaron la materialidad del gen

— ADN como sustancia caracterizable; El ADN tiene propiedades químicas que hacen posible su identificación

— Constitución de modelos que recogen los desarrollos técnicos y se reúnen en representaciones teóricas

Por último, se desarrolla la producción discursiva que se establece como el ejercicio reflexivo que recoge la importancia de la profundización teórica como aporte a una práctica propositiva y en este sentido, cómo los estudios históricos son fundamento para la comprensión de la forma en que se delimitan los objetos de estudio en las ciencias y cómo estos elementos permiten pensar y distinguir los objetos de enseñanza.

## 5. DISCUSIONES PRELIMINARES: ¿CÓMO SE COMPRENDE LA GENÉTICA COMO DISCIPLINA EXPERIMENTAL?

El cierre de la sección anterior incluye afirmaciones clave que es necesario precisar para orientar adecuadamente la discusión de los apartados siguientes, en particular aquellos que abordan eventos considerados germinales para la constitución de la genética. En primer lugar, la afirmación que —de manera tácita— lleva a considerar que la genética es una disciplina científica, y como tal, comparte también, de manera general los rasgos de la ciencia. En este sentido se esquematiza cómo la genética brinda explicaciones a preguntas concretas y sobre ellas cómo el experimento ha jugado un papel preponderante en su actividad, es decir, cómo se instala, en palabras de Kuhn (1996), en la *tradición experimental* de las ciencias modernas.

Una segunda afirmación, es que los problemas hereditarios se constituyen como fuentes de interés particular para el estudio de los fenómenos vivientes y que sobre estos hubo preguntas precursoras que derivaron en dichas inquietudes, lo que aquí se denomina como antecedentes, discusión que se da en el segundo capítulo, en el que se amplía y delimita lo que ha de comprenderse bajo este término.

En el tercer capítulo se pretende bosquejar lo que se comprende como condiciones técnicas y condiciones teóricas, discutiendo algunos rasgos epistemológicos que nutren su estatuto y cómo el desarrollo interpretativo de los fenómenos observados se relaciona con el diseño, uso y precisión de los instrumentos de observación que permite la formulación de explicaciones, postulados y teorías que terminan interactuando dentro de un campo de conocimiento. De esta manera, se orienta la discusión hacia las condiciones técnicas y teóricas que permitieron la consolidación del fundamento conceptual de la genética que, en este caso, se consideran los conceptos de cromosoma, de gen y de ADN.

Al discutir sobre el nacimiento y posterior consolidación de la ciencia moderna se pueden señalar al menos dos sentidos o perspectivas; la primera, *desde* la ciencia, es decir,

examinada desde “su propia naturaleza” o lo que es lo mismo, su producción intelectual, métodos, producción técnica e interacciones entre los actores sociales en las que las teorías científicas tienen lugar, se construyen, se comunican, se transforman, se refutan o se legitiman. La segunda, desde su exterior o una mirada hacia la ciencia, que la distingue como un entramado compuesto por las relaciones sociales, políticas, e institucionales que sirvieron de ambiente para que ciertas maneras de proceder, estandarizar, comunicar e institucionalizar, permitieran, como bien refiere Fourez (1994), establecer una cultura científica.

Estructuralmente, la ciencia moderna puede considerarse como el resultado de un complejo cúmulo de transformaciones y rupturas en las formas de acercarse y dar cuenta de los fenómenos de la naturaleza, esto es, en la estructura de su conocimiento; el cambio de un método inductivo por uno deductivo (y en todo caso, hipotético-deductivo), por ejemplo. Sin embargo, su transformación tiene una importante base metodológica, a través de la que adquiere su estatuto, no solo por la forma de producción intelectual de sus postulados, sino por el papel que tiene el experimento como punto de origen de las observaciones que sobre un acontecimiento tienen lugar; Robert Blanché (1972) afirma que es esta actividad la que termina otorgando a las ciencias modernas su característica sistemática, pues con éste viene una profunda sacudida en la forma en la que se observa y se cuestiona la naturaleza. El autor de *El método experimental y la filosofía de la Física*, sostiene que el experimento provee a la ciencia de un carácter activo, en contraste con la acción pasiva de la observación clásica, debido a que lo que le es propio son las condiciones de manipulación y control; el experimento en este sentido no sólo es medio para poner a prueba hipótesis, se trata de una actividad creativa que permite el descubrimiento de nuevos fenómenos entre los cuales se pueden establecer relaciones causales; la experimentación permite la artificialización de la naturaleza, en palabras de Kuhn (1996), ya no es suficiente observarla, a modo de contemplación, sino que se vuelve ésta objeto de manipulación, y, dirá Bachelard, objeto de *construcción*.

Para Blanché (1972), las ciencias experimentales se caracterizan al menos por siete propiedades bosquejadas a continuación. La primera, es que los fenómenos se producen de manera controlada, es decir, que un fenómeno está sometido a condiciones establecidas en las que se delimitan las variables que hacen de la observación un suceso intervenido. La segunda, es que un experimento sólo es válido, o por lo menos aceptado, si es posible replicar las condiciones en la que este es llevado a cabo, es decir cumple con la condición de la reproducibilidad. Tercero, ningún experimento se da aleatoriamente, no se establece únicamente por la intención de observar un evento, sino que tiene su origen en el planteamiento de una relación específica entre variables, dicho de otro modo, el experimento se diseña y es llevado a cabo a partir de una hipótesis. La cuarta condición está relacionada con la manera en la que se controlan las variables, en el experimento se debe distinguir entre lo que se manipula y lo que se observa (variables independientes y dependientes), esto asegura que los cambios observados se atribuyen a las condiciones manipuladas.

Las siguientes condiciones están relacionadas con los elementos que convergen en el experimento como los instrumentos, los aparatos y la medición, así, la posibilidad de cuantificar los fenómenos observados a través de mediciones precisas y establecer entre ellas relaciones, principalmente, de tipo matemáticas constituyen la quinta característica de la ciencia experimental. En relación con la anterior, la tecnología desempeña también un papel importante, se dispone entonces el uso y, en muchos casos, la creación de aparatos o dispositivos de medición y observación que permitan su especificidad. El desarrollo de nuevas técnicas, la aplicación de las teorías disponibles al diseño de los aparatos que permiten el acceso a un fenómeno que no es posible a través de medios sensoriales exclusivamente, estaría englobando la sexta condición. Por último, el experimento no es una actividad acabada, sobre este hay correcciones, ajustes y dependiendo de cómo se van transformando los modelos teóricos, también son descartados a la luz de otras observaciones, el desarrollo de otros aparatos o las preguntas a las cuales ya no se ajusta un experimento.

Ahora bien, la naturaleza del experimento en lo que Blanché describe como ciencias experimentales, no puede pensarse sin las condiciones históricas en las que su desarrollo tuvo lugar, en este aspecto, el trabajo que Thomas Kuhn (1996) presenta en *La tradición matemática y la tradición experimental en el desarrollo de la física*, resulta bastante ilustrativo en este sentido. El autor presenta por lo menos dos momentos en los que pueden establecerse diferencias en el proceder experimental dentro de lo que denomina *tradiciones*, por una parte, corresponde a la ciencia clásica, por otra, a la ciencia moderna, podría incluirse aquí un tercer momento, que se podría suponer como un momento transicional entre lo clásico y lo moderno, a saber, las ciencias baconianas.

De manera esquemática, presenta el autor, que una de las principales características del *experimento* en el sentido clásico estaba principalmente dado por su naturaleza de ser pensado: “la construcción mental de situaciones experimentales posibles cuyos resultados pudieran preverse con seguridad a partir de la experiencia cotidiana”. (Kuhn, T. 1996: 49) En este sentido, un experimento, generalmente, estaba orientado a dar respuestas a interrogantes planteadas por la teoría prevaleciente; y cuando se realizaban tenían una cualidad principalmente demostrativa. Las ciencias baconianas ofrecen un aporte fundamental en la transformación de la tradición clásica, pues el experimento toma una connotación, de base, diferente a la tradición clásica, y es que experimentar, ahora permite observar a la naturaleza bajo condiciones que sin la intervención del hombre no serían posibles, la creación y el desarrollo de técnicas e instrumentos resultaron relevantes para la observación y el registro de los datos que, como bien indica el autor, permitieron de alguna manera la gestación de una historia natural en la que los resultados experimentales podrían ser, al menos, comunicados de una manera más sistemática. Sin embargo, el estatuto de las ciencias baconianas quedaría relegado al plano de las técnicas, del perfeccionamiento de los oficios, se consideraban, entonces, como un desarrollo artesanal.

Para que el desarrollo de las ciencias modernas tuviera lugar, no fueron menores los aportes de las ciencias baconianas (cuando se piensa sobre lo que Kuhn denomina la revolución científica), que si bien estuvieron relegadas al campo de las técnicas, fueron precisamente causas de índole política, geográfica, académica y económicas, las que permitieron incluir el desarrollo experimental dentro de las ciencias de orden teórico (o de tradición matemática), la sistematización y la matematización de los resultados experimentales dieron apertura a nuevos campos de conocimiento dentro de las ciencias, dice el autor, la frontera entre las disciplinas teóricas y experimentales se desplazó, por lo menos en la distinción entre la física teórica y la física experimental, mientras que en otras ciencias como la química y la biología, menos matematizadas, esta distinción parece difuminada, es más, parece que el carácter experimental es condición del carácter teórico.

Las ciencias modernas, siguiendo a Kuhn, comenzarían su gestación hacia el siglo XVII — con la irrupción de las *ciencias baconianas* en la tradición clásica —, y entre ellas comparten su origen con el programa de desarrollo de la física; junto con la anterior, la química y la biología consiguen su “independencia intelectual” casi hasta mediados del siglo XIX, pero fundamentalmente la estructura en la que su producción tiene lugar comparte los mismos rasgos. En este sentido, el ejercicio que se presenta a continuación trata de ilustrar las características que suponen a la genética una disciplina experimental, en la que en su afianzamiento también se puede considerar algunos eventos que esbozan este cambio de tradiciones, de la clásica a la experimental.

El trabajo de Mendel (especialmente en su redescubrimiento), se presenta aquí como el punto de ruptura entre las tradiciones clásica y experimental que empieza a constituir el campo de la genética como una disciplina científica; primero, porque se manifiesta como punto de partida para la confirmación de hipótesis y la consiguiente obtención sistemática de los resultados. Segundo, porque los experimentos de Mendel evidencian una cualidad específica de las ciencias experimentales, al respecto Blanché (1972) y Kuhn (1994) coinciden en que; en

tanto que experimento no constituye la observación directamente y natural de un suceso, sino que la observación deriva de condiciones que en la naturaleza no están dadas previamente, en otras palabras, es necesario intervenir (manipular) la naturaleza para dar cuenta de una *naturaleza no natural*.

Con lo anterior no se pretende decir que antes de los trabajos de Mendel no existiera la práctica experimental, por el contrario, son tan abundantes como las explicaciones sobre el parecido de los descendientes con sus progenitores y ancestros lejanos, lo que se pretende afirmar, es que la naturaleza del *experimento* antes de Mendel contenía a su base intenciones explicativas diferentes, en algunos casos más demostrativas, en otros, la búsqueda de confirmación de conclusiones a las que ya se había llegado por otros medios.

Hacia el siglo XVI (y hasta bien transcurrido el siglo XVIII), la pregunta por la semejanza entre descendientes y progenitores fue un resultado colateral de los intereses por la formación y organización de los seres vivos, sin embargo, como pregunta accesoria recibiría atención y búsqueda de explicaciones que, inicialmente, mostrarían una fuerte influencia del pensamiento clásico; desde las analogías hasta la intervención de las simientes y las teorías corpusculares se podrían ubicar dentro del marco de lo que Foucault señala como episteme del renacimiento (aspecto que se profundiza en párrafos posteriores). Se podría decir aquí que, los experimentos, si bien provenían de las observaciones de la naturaleza, las explicaciones derivadas constituían más bien una adecuación de los hechos a principios explicativos antes que una actividad práctica.

Por ejemplo, las primeras explicaciones sobre la generación de los seres estaban adecuadas sobre la idea de la alquimia y el arte, y siempre resultaban en la necesidad de elementos supra empíricos, bien sea el calor, la Voluntad divina, o la imaginación. De manera lógica, interpretando las palabras de Jacob (1999) cada ser que provenía de otro semejante era una combinación, entre infinitas posibles, en la que se organiza la materia; cada ser es un continuo y en este se refleja el orden del universo.

Por supuesto, estas primeras explicaciones, esta lógica a la que se refiere, corresponde con la visión del mundo que hubo hasta, por lo menos, el siglo XVI. Siguiendo a Foucault (1968), el mundo, hasta el renacimiento, se construía sobre la semejanza, el universo se explicaba dentro de un conjunto de representaciones en el que las cosas se corresponden como los signos a las palabras y las palabras a las cosas. Este, era pues, “el lenguaje de la naturaleza” que debía ser interpretado; restaba, entonces, encontrar el medio para desentrañar sus más ocultas, pero afines, conexiones.

En un universo concebido como un sistema lleno de correspondencia, las cosas eran a su vez signos, y las similitudes ofrecían el medio para interpretarlos, para dotarlos de sentido; dice Foucault (1968), en la semántica de la semejanza coexisten cuatro figuras que articulan su saber. La *convenientia*, que une a las cosas por similitud, en este caso por proximidad y comunicación de las propiedades, es una forma de semejanza ligada al espacio que asegura la continuidad de las cosas, el cuerpo formado por los elementos constitutivos del mundo: aire, fuego, agua y tierra; en los pulmones, el hígado, la sangre y los huesos, respectivamente. Por conveniencia, tienen lugar en este mundo, los monstruos de Paré o de Aldrovando, que, tratando de comprender la disposición de las cosas, terminan por aseverar cómo puede la naturaleza “cometer” y depurar errores, se permite un criterio de establecer el carácter de lo que es normal, continuo y consecuente con el orden natural.

Por *aemulatio* las cosas no están unidas por proximidad, sino que irónicamente, aunque juntas, se enfrentan por la distancia, a modo del reflejo en un espejo, esta figura concede al “como” su carácter explicativo, lo que sucede allá, se emula acá, exhibe el “así en la tierra como en el cielo”; las flores en una pradera son como las estrellas en el firmamento. Existe por emulación una conexión entre los astros y el hombre, cita Foucault (1968:29) a Paracelso (1559) “Pertenece al firmamento del hombre el ser “libre y poderoso”, “no obedecer orden alguno”, “no estar regido por ninguna de las otras criaturas””.

La tercera figura de esta semejanza es la *analogía*, dice Foucault, en esta reposan y se superponen la emulación y la conveniencia,

*Su poder es inmenso, pues las similitudes de las que trata no son las visibles y macizas de las cosas mismas; basta con que sean las semejanzas más sutiles de las relaciones. Así aligerada, puede ofrecer, a partir de un mismo punto, un número infinito de parentescos (1968:30).*

Las analogías juegan en doble sentido, por ejemplo, para indicar la pertenencia de una cosa a un lugar: las plantas corresponden a la tierra o los peces corresponden al mar, pero también para establecer semejanza entre dos cosas aparentemente diferentes, el ejemplo citado por Foucault (1968) y Jacob (1999), la analogía entre la planta y el animal; una planta es un animal de cabeza, con la boca bajo la tierra. O el ejemplo de la comparación entre el esqueleto de un ave y el del hombre que describe Pierre Belon; “la extremidad del alón que es como los dedos en nosotros” (1555: 37, en Foucault, 1968: 31).

La conveniencia, la emulación y la analogía en esta semántica del mundo permiten describir e inscribir las cosas en una naturaleza correspondida, la cuarta figura dinamiza y provee de movimiento las conexiones que hay entre los objetos que lo conforman, la *simpatía* es la Fuerza a través de la cual las cosas, en apariencia diferente, se unen entre sí, interactúan y se transforman. Ya no solamente define una relación, sino que la provoca. A través de las simpatías, por ejemplo, la materia inerte se transforma en materia viviente, la paja y el barro simpatizan con el calor y proveen de forma a las ratas de un granero. Pero, la simpatía tiene un límite, de lo contrario, todo por simpatía tendería a una relación uniforme en el universo que haría indistintas las cosas que lo conforman. La antipatía juega aquí, dice Foucault, como la hermana gemela de la simpatía, manteniendo la distinción de las cosas, pero no por esto es contraria, es decir, la antipatía no elimina la relación entre una cosa y otra, por el contrario, la redefine.

Respecto a lo anterior, se podría ilustrar con las explicaciones que sobre los primeros problemas sobre la herencia (el parecido de los hijos con los padres y la determinación del sexo), siguiendo de manera muy general, las ideas expuestas por Giordan et al. (1988) se abordaban al menos de dos maneras, por una parte, en un sentido corpuscular; en las simientes femenina y masculina se manifestaba un sistema de átomos o partículas que, por afinidad, se unirían manifestando características que pasarían de una generación a otra sin variación. Por otra parte, la idea de la existencia de una única simiente, la masculina. La determinación del sexo, por ejemplo, o la manifestación de características de la madre en los hijos estaba determinada por la ausencia de fuerza o *vigor* de la simiente masculina, es decir lo que se manifiesta es el negativo de esta *potencia*.

En este mundo, en esta *episteme*<sup>3</sup> renacentista, otro ejemplo lo ilustra Sturtevant ([1965] 2000), al describir las observaciones que hizo Aristóteles sobre algunas características físicas que podrían heredarse, aun cuando estas no estuvieran presentes —dice el autor mencionado— la barba o la aparición del pelo gris en un adulto. También dio cuenta que la pérdida de una parte corporal no se hereda, por lo que una primera conclusión fue: que el hecho de que una característica estuviera presente en los padres podría no manifestarse de forma exacta en su descendencia. Una segunda conclusión, fue que los caracteres no se heredan en sí mismos, sino que lo que se hereda es el potencial de producirlos; afirmación que actualmente parece más que evidente.

Con los dos ejemplos anteriores se puede esquematizar de manera general cómo la pregunta por la semejanza o los caracteres heredados, puede ubicarse dentro de lo que Kuhn (1996) denomina como la ciencia clásica; la observación no constituye necesariamente una intención por cuestionar la naturaleza, sino más bien aparece como una contemplación de esta,

---

<sup>3</sup> Por *episteme* entiende Foucault, “el conjunto de relaciones que pueden unir, en una época determinada, las prácticas discursivas que dan lugar a unas figuras epistemológicas, a unas ciencias, eventualmente, a unos sistemas formalizados (...)” ([1970] 2002:323)

y las explicaciones o conclusiones que de ella se extraen corresponden a un proceder propio de la episteme del momento histórico determinado, el carácter empírico se sustenta principalmente en dicha observación contemplativa y que los eventos se ajustan a dicha lógica antes que a escrutinio empírico.

Vale la pena, ahora, revisar otros ejemplos en los que el experimento desempeña un rol importante, sin embargo, no se constituye como proceder dentro de las ciencias experimentales como refiere Robert Blanché. En el caso del desarrollo de la genética, se puede tomar en cuenta el trabajo del grupo de *los hibridadores*; Muchos de los cruzamientos que realizó Kölreuter, afirma Sturtevant ([1965] 2000), estuvieron principalmente enfocados al estudio de la polinización y la formación de las semillas en las plantas, pero, como observaciones adicionales pudo notar que en el cruce de ciertas plantas el resultado (los híbridos) era una forma intermedia de los progenitores y en algunos casos solo presentaban características de uno de los dos. También describió, aunque de manera somera, que al cruzar híbridos aumentaba la variabilidad en la descendencia.

Darwin, en sus experimentos con algunas plantas y palomas, reconoció en sus resultados, al menos dos tipos de variaciones, a las que denominó como continuas y discontinuas, estas últimas, describió, que mostraban dominancia y que eran transmitidas a través de varias generaciones, una de sus conclusiones fue que los cruzamientos tienen efectos unificadores, manteniendo a las poblaciones uniformes y que la consanguinidad tiende a mantener distinguibles a los individuos de poblaciones diferentes. Coincide Sturtevant, que esta conclusión es compartida por la genética moderna, aunque los argumentos de base difieren de los ofrecidos por Darwin. En este caso los experimentos estarían principalmente enfocados (como la mayoría de los trabajos de los hibridadores) a establecer la estabilidad de las especies en el tiempo.

Otro ejemplo, citado por Sturtevant ([1965] 2000), es el trabajo realizado por Gärtner hacia 1839, en el que confirma lo que ya había descrito anteriormente Kölreuter, haciendo

énfasis en que la descendencia obtenida de los híbridos daba como resultado generalmente una mayor variabilidad. De manera novedosa describe que, a menudo, los híbridos obtenidos de especies diferentes dan como resultado una descendencia estéril. A nivel técnico, su trabajo añade la realización de retrocruzamientos, a fin de establecer cuántas generaciones eran necesarias para eliminar de la descendencia un carácter de uno de los padres. Gärtner, resulta siendo, a nivel técnico, una influencia fundamental para los experimentos realizados posteriormente por Mendel.

Los ejemplos descritos permiten dar cuenta de cómo el experimento toma una mayor importancia en la búsqueda de explicaciones, el desarrollo de nuevas técnicas, elección de materiales de estudio y la observación de eventos que no se presentan naturalmente sino que son controlados, estos podrían agruparse en lo que Kuhn denominaría la ciencia baconiana, en el sentido que, los experimentos ahora son realizados y solo en su realización tienen validez, a diferencia de los “experimentos pensados” que caracterizan a la ciencia clásica.

En contraste, aunque la relevancia del experimento se hace evidente, aún no alcanza el estatuto de ciencia experimental en el sentido que, o bien estos experimentos tienen una intención demostrativa de conclusiones ya expuestas a través del razonamiento lógico. Por ejemplo, el hecho de que el resultado del cruce entre dos parentales con caracteres diferenciados será un híbrido intermedio entre un padre y otro. Bien porque el experimento está fundamentalmente diseñado para responder a preguntas establecidas por la teoría predominante, como en el caso de las experiencias de Darwin y otros hibridadores, cuyas preocupaciones apuntaban a responder por la estabilidad de las especies, en otras palabras, dichos experimentos se sustentaban en la intención de dar respuestas concretas a la posibilidad de transformación de las poblaciones en el tiempo, o lo que es lo mismo su sentido evolutivo.

Aunque, si bien los experimentos de los hibridadores respondían a otras preocupaciones, ofrecerían una importante influencia a la constitución de lo que más adelante

se denominaría la genética mendeliana, al respecto, afirma Giordan et al. “Se trata de la especificación de los fenómenos de la segregación de los caracteres, la dominancia y, aunque el término no fuera utilizado con anterioridad a Mendel, de cierta forma el de recesividad” (1988, p. 114).

Con lo anterior, en un intento por bosquejar cómo la genética puede ser considerada una disciplina experimental, resulta útil exponer por qué el proceder de Mendel es, en efecto, una condición de la ruptura entre la tradición clásica y la tradición experimental. A continuación, se describen algunas de las características que están a la base del método experimental.

Para Robert Blanché, la formulación de hipótesis, la verificación empírica y la estructura lógica son rasgos primordiales para el desarrollo del conocimiento científico. El caso de Mendel es particularmente ilustrativo en este sentido; las hipótesis planteadas se originan en cuestionamientos puntuales por explicar los fenómenos de la herencia, lo que, como afirma Giordan et al. (1988), desmarca a Mendel de los trabajos realizados por otros hibridadores. Aunque el contexto de indagación de la época estaba saturado de intenciones por explicar fenómenos alrededor de la evolución, y los métodos en los estudios sobre los híbridos se orientaban, principalmente, en sentido utilitario (producir las mejores variedades de plantas para uso agrícola). Mendel, reconoce que los trabajos predecesores al suyo desconocían la posibilidad de proponer, en palabras del monje austriaco “una ley general aplicable a la formación y desarrollo de los híbridos” (Mendel, 1865)<sup>4</sup>, concretando su punto de partida con la pregunta “¿hay reglas generales para la transmisión de caracteres hereditarios?” (Velásquez, 2008, p. 26) Así, Mendel, inicia todo su trabajo experimental:

Es cierto que se requiere cierto coraje para emprender un trabajo de tal envergadura; sin embargo, éste parece ser el único camino correcto por el cual podemos llegar finalmente a la solución de una cuestión cuya importancia no puede

---

<sup>4</sup> Se trata de la traducción digital del documento original publicado en: ***Verhandlungen des Naturforschenden Vereines***, de Brno, 4 (1865), pp. 3-47.

subestimarse en relación con la historia de la evolución de las formas orgánicas.

(Mendel, 1865)

Metodológicamente, establece su experimento en cruces intraespecíficos, seleccionando rigurosamente los caracteres a observar en las variedades de *Pisum sativum*; 1) La diferencia entre las formas de la semilla madura, 2) la diferencia del color de la albúmina de la semilla (endosperma), 3) la diferencia del color de la cubierta de las semillas, 4) la diferencia entre las formas de las vainas maduras, 5) la diferencia en el color de las vainas inmaduras, 6) la diferencia de la posición de las flores, 7) la diferencia de la longitud del tallo. Técnicamente, diseña los procedimientos y elección de material que sugieren la obtención de los resultados, no solo de manera sistemática sino con la menor interferencia posible.

La formalización, aunque simple, dentro de un marco matemático y en este caso estadístico (el de las proporciones), permite consolidar los resultados en una modelización de los fenómenos hereditarios observados, por ejemplo, la designación con caracteres en mayúscula y minúscula para establecer las relaciones entre características dominantes y recesivas. Podría agregarse en esta misma categoría, la formulación de principios que se integran con la obtención y análisis de los resultados otorgados por la evidencia experimental. Así mismo, formula, desde su observación, afirmaciones sobre cómo ocurre la transmisión de las características de una generación a otra, relacionándolo con otros conceptos como la reproducción y la fecundación. Escribe Mendel al respecto:

(...) encontramos que en todos los casos se confirma que la progenie constante sólo puede formarse cuando las células de óvulos y el polen fecundante son de carácter similar, de modo que ambos están provistos del material para crear individuos completamente similares, como es el caso de la fecundación normal de especies puras. Por lo tanto, debemos considerar como cierto que también deben actuar factores exactamente similares en la producción de las formas constantes en las plantas híbridas. (...) parece lógica la conclusión de que en los ovarios de los híbridos se

forman tantos tipos de óvulos y en las anteras tantos tipos de células polínicas como formas de combinación constantes posibles, y que estas células óvulo y polínicas concuerdan en sus composiciones internas con las de las formas separadas. (Mendel, 1865)

Aunque al interior del desarrollo de la biología no es posible referirse a cambios revolucionarios, por lo menos en el sentido estricto de Kuhn, o de rupturas epistemológicas, en el sentido de Bachelard, los trabajos experimentales realizados por Gregor Mendel (y como se dijo en párrafos anteriores, en el redescubrimiento de estos) inauguran el carácter experimental de la genética, que, en adelante determinaría cualquier explicación sobre los fenómenos de la herencia y, especialmente, su base física, a partir del desarrollo metodológico, tecnológico y conceptual que, teniendo origen en otras disciplinas sirven de base observacional, procedimental y teórica para constituir un objeto de conocimiento delimitado.

## 6. ¿QUÉ SUCEDIÓ ANTES?: LOS ANTECEDENTES DE LA GENÉTICA

En los párrafos anteriores se ha discutido cuáles son las características que hacen de la genética una disciplina que tiene a su base la estructura de la ciencia moderna, específicamente, su carácter experimental, utilizando como medio para ilustrar algunos ejemplos que se dieron en el desarrollo por las preocupaciones en relación con los problemas hereditarios o la forma en que se transmiten las características de los progenitores a la descendencia.

Ahora bien, en esta sección se pretende abordar de manera esquemática los referentes o circunstancias que permitieron a esta disciplina establecerse dentro de la biología; a partir de preguntas específicas, con un cuerpo conceptual y explicativo delimitado<sup>5</sup>. En primer lugar, se establecen algunas aclaraciones sobre lo que se comprende en el texto como antecedente, tomando algunos aportes epistemológicos que permitan constituir una aproximación al respecto. Posteriormente, se describen aquellos momentos que fueron influyentes para el desarrollo de la genética.

La consolidación del conocimiento científico no es resultado de procesos lineales, secuenciales o acumulativos. Bachelard ([1948] 2000), por ejemplo, sostiene que el conocimiento científico se transforma en la medida que enfrenta nuevos problemas, de nacies preguntas que hagan necesario establecer y cuestionar el límite entre lo que se sabe y lo que debiera saberse. Los problemas científicos se formulan, no aparecen como dados y, en todo caso, todo conocimiento nuevo, es una respuesta a una nueva pregunta, dice el autor, este es el sentido del *espíritu científico*.

La noción que Gastón Bachelard introduce; los *obstáculos epistemológicos*, sirve aquí como un referente para detallar lo que se puede comprender como un antecedente. Según el autor, estos representan ideas, conceptos o explicaciones asumidas que, eventualmente, frente

---

<sup>5</sup> Las preguntas no se orientan hacia el desarrollo de una disciplina, sino que son las preguntas, las observaciones las que promueven el desarrollo de un campo conceptual diferente.

a nuevas preguntas resultan insuficientes y terminan por ralentizar el adelanto hacia un nuevo conocimiento. Se supone entonces, que la ciencia “avanza” conforme se superen estos obstáculos, es decir, a base de *rupturas epistemológicas*; un conjunto de nociones se dispone a la crítica, la transformación y en varios casos a la desestimación. Desde esta perspectiva, se podría considerar como antecedente el momento en que las nuevas preguntas, observaciones y posibilidades técnicas y teóricas conforman el estado entre el obstáculo epistemológico y su consiguiente ruptura.

Otro autor que coincide con los planteamientos de Bachelard que la ciencia no progresa ni linealmente ni por acumulación es Thomas Kuhn ([1962] 2004); el progreso científico se da por el cambio de paradigmas a través de las revoluciones científicas: en su obra representativa *La estructura de las revoluciones científicas* en la que desarrolla su planteamiento sobre los paradigmas científicos, sostiene que estos orientan el proceder de la ciencia normal, en ellos se integran las teorías, métodos y supuestos que son compartidos dentro de una comunidad científica. En este sentido, dice el autor, que los paradigmas no son estáticos, cambian y se reemplazan por otros, pero, solamente pueden cambiar como consecuencia de una *revolución científica*. A grandes rasgos, las revoluciones científicas pueden tener lugar si dentro de un periodo de *ciencia normal* empiezan a surgir *anomalías* (preguntas o problemas que no se ajustan al marco conceptual y experimental del paradigma actual) , y estas se hacen tan frecuentes y numerosas que ponen en duda el paradigma vigente, es decir, el paradigma entra en crisis y nuevas ideas, nuevas preguntas y nuevos problemas se plantean como alternativas a los modelos que son insuficientes en su base explicativa. Al respecto, afirma Kuhn

La ciencia normal no pretende encontrar novedades de hechos o de teorías, y cuando tiene éxito, no las encuentra (...) El descubrimiento comienza tomando conciencia de una anomalía, es decir, reconociendo que la naturaleza ha violado de algún modo las expectativas inducidas por el paradigma que gobierna la ciencia normal (...) La asimilación de un nuevo tipo de hecho exige un ajuste de la teoría que no se

limita a ser un añadido, y hasta que no se termina dicho ajuste, hasta que el científico no haya aprendido a ver la naturaleza de un modo distinto, el hecho nuevo no es en absoluto un hecho plenamente científico. (Kuhn, [1962] 2004, p. 102).

En esa “turbulencia”, tendrá lugar un nuevo paradigma que, de forma radical, reemplazará al paradigma anterior. Así pues, un paradigma que ha sido reemplazado es inconmensurable con el paradigma instalado. En la perspectiva de Kuhn, aquellas anomalías que empiezan a manifestarse como desestabilizadoras de un paradigma específico, que preceden a las revoluciones científicas, son los momentos, circunstancias o condiciones que aparecen como *antecedentes* a la disrupción paradigmática dentro del conocimiento científico. Continúa T. Kuhn al respecto:

La transición de un paradigma en crisis a uno nuevo del que pueda surgir una nueva tradición de ciencia normal dista de ser un proceso acumulativo logrado mediante la articulación o extensión del paradigma viejo. Más bien es una reconstrucción del campo a partir de nuevos fundamentos, reconstrucción que cambia algunas de las generalizaciones teóricas más elementales del campo, así como muchos de sus métodos y aplicaciones ejemplares. Durante el periodo de transición habrá un traslape considerable pero nunca total entre los problemas que se pueden resolver con el viejo y con el nuevo paradigma, pero habrá también una diferencia en los modos de solucionarlos. Una vez consumada la transición, la profesión habrá cambiado su visión del campo, sus métodos y sus objetivos. (Kuhn, [1962] 2004, p. 153)

Se podría citar, en este sentido, también el trabajo realizado por Michel Foucault ([1970] 2002) en su obra *La arqueología del saber*, en la que, de forma diferente a las fuentes mencionadas anteriormente, expone cómo la producción de un discurso toma lugar en un momento histórico determinado para explicar y representar el mundo, también coincide en su análisis de las formaciones discursivas la relación del saber y del saber científico dentro de lo que va a llamar el análisis de la *episteme*. El enfoque del estudio arqueológico va a permitir

considerar que el discurso científico está conformado por las relaciones entre las prácticas discursivas, la *epistemologización*, la científicidad y la formalización y que estas relaciones varían en el tiempo, constituyendo una historia de su transformación. De manera que una episteme dará lugar a otra posterior, en tanto que esas relaciones se reconfiguran, se abandonan o se rompan, dando lugar a nuevas producciones discursivas, parafraseando a Foucault, un cambio de episteme tiene lugar cuando las regularidades discursivas entre las ciencias dejan de serlo en una época dada. Son entonces estos cambios en esas relaciones las que se podrían considerar como antecedentes a las condiciones que activamente llevan a un cambio de la episteme de una época a otra.

Así pues, en relación con lo anterior se puede considerar los antecedentes como los elementos que sirven de punto de partida o base para construir, justificar y evaluar el conocimiento científico, es decir, como los conceptos, las ideas, los hechos y las metodologías en un contexto histórico precede al desarrollo y fundamentación de nuevas hipótesis y teorías científicas.

**a. La cuestión de la semejanza: los primeros antecedentes sobre los fenómenos hereditarios**

Hacia el siglo XVI se constituye un notable interés por la comprensión de los fenómenos de *lo viviente*, la crisis que ya se había empezado a manifestar desde el giro copernicano o el cambio de una mecánica aristotélica por una mecánica experimental y fundamentalmente matemática, terminarían por sacudir los cimientos filosóficos del aristotelismo dominante hasta entonces. Estos eventos traerían por lo menos dos consecuencias; una, que se redescubrieran fuentes anteriores a Aristóteles, que influenciarían abiertamente las explicaciones que, sobre lo viviente, se empezarían a constituir. Dos, un evidente rechazo al aristotelismo en tanto que erudismo, la búsqueda de explicaciones ahora exige que tenga su origen en el razonamiento, y principalmente en los hechos.

En lo correspondiente a *lo viviente*; la generación de los organismos es la principal (si no la única) controversia que podría considerarse como precursora de las inquietudes de lo que más adelante se ubicaría como fenómenos hereditarios, pues intrínsecamente allí comenzaría la búsqueda de explicaciones sobre una observación que es tan común como antigua, y es que existen particularidades compartidas por los miembros de un linaje que se transmiten de padres a hijos y, de acuerdo con López-Beltrán (2004), a la fijación de estas características se le ha asociado con la noción de transmisión hereditaria. Hasta ese entonces las preguntas por lo hereditario permanecieron relegadas, y en todo caso, las respuestas al respecto sólo constituían medios explicativos a una pregunta que se mantendría en el centro de toda discusión sobre *lo vivo*, por lo menos hasta bien entrado el siglo XVIII; ¿Cómo se forma y se organiza la totalidad del ser vivo?

Desde los monstruos de Ambroise Paré hasta las piedras renales de Montaigne, las aproximaciones al parecido con los padres y la determinación del sexo no eran necesariamente modelos explicativos, pero brindaban una imagen sobre el problema que se presentaban como pruebas a la generación de los seres. En el siglo XVI los seres provenían de otros semejantes, toda explicación al respecto terminaría por recurrir a la manifestación de una *Fuerza*; las cosas y los seres (que eran engendrados durante la cópula) eran productos alquímicos de una esencia ejecutora de toda organización de la materia en diversas formas, y en este sinfín de conjuntos de cualidades observables aparecen relaciones entre unas y otras que develan, al final, el orden constitutivo del mundo. En este sentido, las formas (y los seres) son semejantes, sin embargo, la semejanza no tiene aquí el mismo estatuto al que obtendría en el siglo siguiente, más bien, por semejanza se concibe como el conjunto de analogías que permiten develar la conexión entre los seres y los astros, entre los seres simples y los seres complejos, entre los que tienen alma y los que no, en otras palabras, son las similitudes las que permiten acceder a los enigmas de la naturaleza y su organización, y en esta última, la semejanza es también criterio de categorización o jerarquía, así, los animales son semejantes a las plantas,

pero estas no tienen el mismo estatus al no otorgarles un alma con la cualidad del alma del hombre, que aquí se dispone como el eslabón más alto de esta gradación claramente aristotélica.

El auge de la física durante la primera parte del siglo XVII, y el desarrollo de la química en la segunda mitad, termina desplazando de manera importante el pensamiento y las preguntas sobre los seres vivos, las explicaciones debían empezar a constituirse en el plano de los hechos, ya no se trata de develar los *misterios de la naturaleza*, sino de establecer las leyes que enlazan un evento con otro a través del análisis y la clasificación. Las nociones alquimistas y, hasta cierto punto, esotéricas que habían estado manifiestas desde el siglo anterior serían pronto puestas en duda. La irrupción Newtoniana de una física sustentada en las matemáticas y el cálculo no aceptaría que la naturaleza de los seres vivos estuviera sujeta, en palabras de Jacob (1999), a la intervención de voluntades divinas, el cosmos o el alma.

En el siglo XVII, robustamente representado por el mecanicismo, se abordan los fenómenos de *lo vivo* a partir de los cuerpos de conocimiento hasta ahora desarrollados (y disponibles), esto es, en sentido físico y químico. Se trata de establecer cuáles son los principios que unen el conjunto de órganos en una función, cuáles son las leyes mecánicas y químicas que deben ocurrir para que se lleven a cabo. Así pues, los seres vivos constituyen su semejanza a partir de principios físicos, leyes matemáticas que permiten el cálculo de las fuerzas a las cuales se ven vinculados, de un lado —para la naciente fisiología— por las fuerzas del movimiento y las de las transformaciones de las sustancias. Por otro lado —para la historia natural— el análisis de las formas, volúmenes y proporciones, son los criterios que unen o separan a unos de otros, la comparación es el principio de toda semejanza; “objetos de forma similar se someten a fuerzas similares”. Este nuevo estatuto que adquiere la semejanza rompe con lo que hasta principios de siglo se comprendía, la analogía se abandona y se somete a un principio de identidad, solamente lo que es explicable mediante el análisis de la

estructura visible permite establecer qué tan semejantes son unos seres a otros, la semejanza entonces no solo se sustenta en la comparación, sino que es principio de clasificación.

Para finales de siglo y buena parte del siglo XVIII quedaría bajo la perspectiva mecanicista una inquietud sobre la producción y la continuidad de los seres; ¿cómo era posible que de los animales y las plantas (hembras y machos) se originaran otros animales y otras plantas que compartían características con sus progenitores? Las respuestas a esta incógnita también echarían mano de lo que la mecánica y la química disponían; los corpúsculos, las partículas, las moléculas, las simientes, movimientos y la interacción de fuerzas pronto constituyeron formas de resolver un problema que interpretaba la organización de un nuevo ser tras la fecundación.

Preformacionistas y epigenetistas reavivaban fuentes clásicas y ofrecían un mosaico de explicaciones que más que tener una base empírica eran principalmente sistemas filosóficos, pues los desarrollos técnicos aún no permitían el acceso y la demostración de la existencia de dichos corpúsculos o moléculas, no porque fueran insuficientes, sino más bien porque, dice López-Beltrán (2004), las preocupaciones sobre los seres vivientes se mantenían en torno a su composición y organización, las preguntas sobre los fenómenos hereditarios resultaban emergentes y en todo caso accesorias, por lo que pese a haber existido las posibilidades técnicas, los escenarios conceptuales no permitirían tales perspectivas de observación y abordaje de las cuestiones sobre la base física de la herencia.

Sin embargo, los experimentos con las ranas de Réamur y Spallanzani podrían considerarse precursores de la búsqueda de las unidades fisiológicas responsables de la herencia, aunque de manera indirecta, pues en la exploración para comprender el papel que juegan las simientes femenina y masculina en la producción, constitución y organización de un nuevo ser, permiten deducir y plantear una forma observable y mensurable de que los huevos y el líquido seminal desempeñan un papel importante en la generación de los seres vivos, solo la

unión de estas simientes podrá producir un nuevo individuo y que este será semejante a sus semejantes.

Los posteriores desarrollos técnicos y teóricos que se dieron frente a las preocupaciones directas sobre la unidad y constitución de los seres vivos empezarían a establecer las primeras intenciones para dar cuenta de cómo se transmiten las características de una generación a otra, en otras palabras, el desarrollo de una explicación de la herencia fundamentada en observaciones.

**b. De la semejanza a la base física de la herencia: los antecedentes que permitieron la consolidación de la genética.**

La formulación de la teoría celular, en el siglo XIX, atribuida a Matthias Schleiden, Theodor Schwann y Rudolf Virchow, que de manera general expone en sus postulados que toda célula tiene su origen en otra célula, y que los organismos están conformados por células sentó las bases para llevar la atención de las preguntas por la herencia a estas unidades estructurales, es decir que la base física de la herencia podría tener lugar a nivel celular. Sin embargo, habrá que ampliar un poco la forma en que se pudieron constituir los postulados que sustentan la teoría celular.

Se podría atribuir también el carácter de antecedente, en un primer momento, a los experimentos de Mendel, pues, aunque su trabajo no fuera considerado de relevancia durante su época, porque eran otras preocupaciones las que impulsaban las teorías dominantes, si presentó novedades en términos procedimentales y técnicos que le permitieron la enunciación de principios de segregación y distribución independiente de los caracteres observados.

La teoría de la selección natural también tuvo una importante incidencia en las preguntas y formulaciones de explicaciones alrededor de los problemas hereditarios. Los postulados a los que llegarían, de manera independiente, Charles Darwin y Alfred Russell Wallace, establecían que las características que resultaban favorables en un entorno

determinado tendrían una base heredable y transmisible a las siguientes generaciones. Aunque por aquel entonces no se conocían los fundamentos genéticos, esta idea planteó la necesidad de ahondar la forma en la que se heredan los rasgos.

En este sentido el mismo Darwin se lanza a dar una explicación al respecto, una suerte de pangénesis, retomando los principios corpusculares propuestos por Hipócrates, propone su hipótesis de las *gémulas*, partículas que, según él transportaban y transmitían las características que se heredaban en cada generación. Aunque si bien, fue descartada posteriormente, tuvo una influencia bastante importante en una época en la que, sin una fuente de observación, las explicaciones retomaron varias fuentes clásicas para explicar los fenómenos hereditarios.

El desarrollo y perfeccionamiento tanto de las técnicas como de los aparatos e instrumentos de observación permitieron los progresos de campos como la citología, la observación de las estructuras celulares pronto reclamarían la atención sobre el núcleo celular, y específicamente en los cromosomas. Estructuras que, durante las divisiones celulares, manifestaban comportamientos que podrían relacionarse con las posibilidades de tener una base física que permita la explicación de la herencia. Nombres como Walter Flemming, Edouard Van Beneden y August Weismann realizaron observaciones experimentales que aproximaron a esta idea de que la base de la herencia serían los cromosomas.

La integración de los trabajos de Mendel (que fueron redescubiertos) hacia 1900 en las explicaciones de la biología y que sirvieron como fundacionales para lo que en adelante se llamaría genética; Hugo de Vries, Carl Correns y Erich von Tschermak, de manera independiente acogieron los postulados propuestos por Mendel para establecer de manera inicial aproximaciones a la base conceptual de la genética.

Las bases de la teoría cromosómica de la herencia, enunciada a partir de los trabajos experimentales de Walter Sutton y Theodor Boveri, sirvieron a su vez de antecedente al grupo de Thomas Hunt Morgan y el grupo de la *Drosophila* para aceptar, validar y consolidar la teoría

cromosómica. Adicionalmente, el trabajo de Morgan y compañía permitió demostrar el vínculo entre la herencia y el material celular; comprobando que los genes se localizan en los cromosomas.

## 7. SOBRE LAS CONDICIONES TÉCNICAS Y TEÓRICAS

Hasta ahora se ha discutido cómo la genética se constituye como una disciplina científica en la que su historia y su base procedimental y conceptual presenta las cualidades que la configuran como una ciencia experimental, exponiendo las situaciones y desarrollos que, teniendo lugar en otros intereses, orientados por otras preguntas, concretamente sobre la organización y estructura de los organismos, terminaron por abrirle a los problemas hereditarios todo un campo de indagación sobre el que constituirían los antecedentes de lo que actualmente es la genética dentro del cuerpo disciplinar de la biología.

En esta sección se discute los referentes clave que se consideran como principales en la consolidación del fundamento de la genética, en otras palabras, cuáles fueron aquellos recursos técnicos y teóricos que consolidaron al cromosoma, al gen y al ADN como los conceptos fundadores de esta disciplina. Así, resulta importante, primero, iniciar la discusión alrededor de lo que ha de entenderse por condiciones técnicas y teóricas, cuál es la relación entre estas y la relación con el desarrollo de las ciencias en general y de la genética y su campo conceptual en particular. Después, caracterizar las condiciones técnicas y teóricas que fueron afianzando el fundamento de los conceptos estructurantes de la genética.

A menudo, cuando se indaga por las posibilidades en las que el conocimiento científico tiene lugar suele dársele prioridad a la lógica de la formulación de las teorías y los conceptos que las conforman, afirmarían Ian Hacking (1983; en Martínez, 2005) “descuidando de manera sistemática el campo experimental” (p. 160), relegando su valor únicamente a la demostración y comprobación de una teoría, como si se tratara de un accesorio de la producción del conocimiento al interior de las ciencias. Sin embargo, esta idea de priorizar el aspecto teórico sobre el experimental olvida el hecho que, a partir del experimento y el desarrollo de

instrumentos, materiales y procedimientos se hace posible la existencia de las *entidades*<sup>6</sup>, a partir de las que puede producirse un desarrollo conceptual, pues, en principio, estas no pueden ser *observadas* directamente, su existencia no está dada si no han sido intervenidas, estas son realmente manipuladas; afirma Hacking “esto no se debe a que ponemos a prueba hipótesis (...) Más bien, es porque en principio las entidades no pueden ser “observadas” se manipulan regularmente para producir nuevos fenómenos y para investigar otros aspectos de la naturaleza” (1983: 279). En este sentido, un fenómeno, un objeto, en ciencias, no está dado de forma dependiente de la observación, a modo de descubrimiento, sino que a partir de la intervención de la naturaleza un elemento, hasta cierto punto hipotético, empieza a denotar su existencia. Solo en la medida de su manipulación, un objeto da cuenta de su realidad. Lo anterior expresa lo que Martínez (2005) sostiene como el *argumento de la ingeniería*, pues cuando se logra manipular una entidad que pueda utilizarse, además, para interferir otros aspectos de la naturaleza es posible dar cuenta de su existencia, afirma Hacking “La experimentación con un ente no nos obliga a creer que existe. Sólo la manipulación de un ente, para hacer experimentos en algo diferente, nos obliga a ello.” (1983: 292)

Por otra parte, Gastón Bachelard, también sirve aquí como referente para formar una idea sobre cómo las condiciones técnicas y teóricas posibilitan el conocimiento científico. De esta manera, el autor de *La formación del espíritu científico* sostiene que, en la ciencia moderna, no basta únicamente con observar los fenómenos, sino que es necesidad de esta, producirlos. Introduce la noción de la *fenomenotecnia*, indicando que la realidad científica es construida en los laboratorios, los fenómenos científicos se inscriben en “una técnica montada para hacer aparecer un fenómeno” (Bachelard, [1934] 1994, p. 14); el desarrollo de dispositivos técnicos hace posible que los fenómenos sean producidos, según esta idea ya no basta con

---

<sup>6</sup> Término utilizado por I. Hacking (1983) para referirse a los fenómenos u objetos a los que, en las ciencias, se les otorga su existencia por la susceptibilidad de intervenir y hacerlas funcionar en un contexto científico.

que los fenómenos se presenten de forma natural, son también, resultado de una construcción experimental.

El *noúmeno de Bachelard* también complementa esta idea en la que lo teórico y lo técnico son constituyentes del conocimiento científico. Entiende este autor como noúmeno aquello que no está dado, ni determinado a través únicamente de la experiencia, sino que debe ser técnica y conceptualmente construido, por tal razón no puede ser conocido en sí mismo, escapa a la percepción inmediata, este debe ser pensado y constituido a partir del desarrollo de instrumentos y conceptos que lo determinen.

Se permite aquí tomar como un ejemplo de noúmeno al gen, si bien no es observable directamente, si se puede determinar su acción experimentalmente. Inicialmente este concepto se constituía como una unidad hipotética de la herencia, pero el avance y desarrollos técnicos que originaron la microscopía electrónica o la secuenciación del ADN permitió que el gen estuviera, en ese contexto, asociado a secuencias específicas en el ADN, pero aun así, en ese ámbito, aparentemente “más material”, no es posible *ver* un gen, su existencia, la forma y su función son inferidos a partir de modelos, técnicas moleculares y análisis computacionales (en este punto también se relaciona con las entidades de Hacking). El gen, en este sentido no es observable directamente, es construido y modificado a través de medios técnicos.

Ahora bien, el gen, en tanto que noúmeno, es también susceptible de transformación según se desarrollen nuevas técnicas o modelos teóricos que a partir de estas permitan su comprensión, por ejemplo, el gen, ya no es solamente una secuencia de nucleótidos en una molécula, de acuerdo con la forma en que se han dado los modelos teóricos en la biología molecular, por ejemplo, se puede constituir como un sistema, el sistema gen.

De acuerdo con lo anterior, y siguiendo a Bachelard ([1934]1994), si es posible el noúmeno es porque hay una *noumenotecnía*, y en este sentido, interpretando al autor, podría describirse esta idea como el aparato técnico que no solo permite ver los fenómenos originalmente invisibles, esto es, los producidos, sino que hace posible pensar lo que no es

percibido directamente. En este sentido la noumenotecnia permite construir y trabajar con realidades que son posibles a través de modelos, relaciones o abstracciones.

De esta manera, los planteamientos de Hacking y Bachelard permiten ilustrar cómo el desarrollo de técnicas y la constitución de modelos teóricos son condiciones para el avance del conocimiento científico, pues la interacción entre unos y otros sustituye y determinan las formas en las que se interviene el mundo, ahora una realidad construida. Esta interacción es la que se pretende ilustrar en el desarrollo de este capítulo, en la que se amplía cómo las condiciones técnicas y teóricas permitieron la consolidación del cromosoma, el gen y el ADN como estructurantes para la genética.

#### **a. Condiciones técnicas y teóricas del concepto cromosoma**

La consolidación del cromosoma como concepto estructurante de la genética tiene a su base el solapamiento de por lo menos tres campos dentro del desarrollo de la biología, dado durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera parte del siglo XX; el desarrollo de la citología después de la formulación de la teoría celular de Matthias Schleiden y Theodor Schwann, la teoría evolutiva que se gestaba a partir de la obra publicada por Charles Darwin y el redescubrimiento de los trabajos de Gregor Mendel, que inauguraría lo que se conoce actualmente como genética mendeliana. Estas tres perspectivas de manera, inicialmente, independiente, abordaban los problemas de la herencia y la variación (Coleman, W. 1965; Vicedo, M. 1992). La discusión en esta sección estará orientada principalmente a dos de las perspectivas mencionadas, la citología y el redescubrimiento de los trabajos de Mendel, en tanto que es a partir de estos en los que el cromosoma cobra su mayor relevancia dentro de la consolidación de la genética como disciplina.

De esta manera, para comprender las condiciones técnicas y teóricas que otorgaron al cromosoma su estatus conceptual y experimental como entidad física responsable de la herencia, se presenta una revisión de algunos aspectos en el desarrollo de la citología. Por otra

parte, se ilustra la importancia y la influencia que tendría el auge del mendelismo para el afianzamiento de una teoría cromosómica de la herencia que respondiera a los hallazgos de patrones hereditarios observados por Mendel y los subsecuentes trabajos que pretendieron demostrar los principios allí planteados.

Pasada la mitad del siglo XIX, la biología asistiría a uno de los eventos más importantes dentro de su desarrollo y consolidación como ciencia de *lo vivo*. De manera simultánea, dos de los pilares de su naturaleza irrumpirían en el conocimiento científico de la época. En 1958, Alfred Russel Wallace y Charles Darwin, de un lado, presentaban los ensayos preliminares sobre su *teoría evolutiva*. Robert Virchow, de otro lado, publicaba su ya madura idea alrededor de sus observaciones sobre la célula, presentaba al mundo el potente enunciado que terminaría, irónicamente, por controvertir y completar los principios de la teoría celular; “Wherever a cell originates (...) in that place there must have been a cell before (omnis cellula e cellula), just as an animal can only originate from an animal and a plant from a plant”<sup>7</sup> (R. Virchow, 1860:54 en Coleman, 1965: 127).

Desde la enunciación de la teoría celular constituida por los planteamientos de Schleiden y Schwann, que termina por reedificar R. Virchow habría una modificación sustancial sobre los intereses en torno al estudio de la célula; podría decirse que la célula deja de ser la unidad de constitución y *organización* de los organismos y pasa a ser la unidad estructural, funcional y de continuidad de ellos. El problema que los distancia, está en torno al estatuto teórico de la célula, sostiene Albarracín (1982), que la dificultad se encuentra en la explicación sobre el origen de las células.

El encuentro entre Schleiden y Schwann en Berlín fue un evento influyente para el desarrollo de su teoría celular, en la comparación que, el segundo, hizo de sus preparaciones

---

<sup>7</sup> “Dondequiera que una célula tenga su origen (...) en ese lugar debe haber habido una célula antes (omnis cellula e cellula), así como un animal sólo puede originarse de un animal y una planta de una planta.

de cortes de tejidos animales con las de los cortes de Schleiden, pudo encontrar una importante similitud entre los núcleos de las células vegetales y los de las células animales. Registrando las observaciones sobre diversos tipos de tejidos concluyó que, “la presencia del núcleo era la regla y no la excepción” (Alzogaray, 2010, p. 40). A partir de las conclusiones a las que llegaron, permitieron el desarrollo de la teoría, que con frecuencia se le acredita en mayor medida a Schwann (Albarracín, 1982.; Giordan, 1988.) Ambos coinciden en que animales y plantas están constituidos por células; proponen un principio de unidad anatómica, y también, es en esta unidad donde recae el soporte de las actividades *plásticas* y *metabólicas*, es decir, proponen un principio de unidad funcional.

Sobre el problema mencionado anteriormente, el del origen celular, a menudo se cree que la teoría desarrollada por Schleiden y Schwann no lo considera, por el contrario (especialmente con Schwann) se desarrollan explicaciones a partir de las observaciones realizadas, por ejemplo, desde la descripción del núcleo celular otorgada por Robert Brown, estructura a la que Schleiden va a denominar como *citoblasto*. Cita Giordan (1988) a Schwann, “el origen de las células acaba de ser esclarecido por un descubrimiento importante del señor Schleiden (...) Su punto de partida es el núcleo de la célula de R. Brown, que el señor Schleiden denomina, por este motivo, “citoblasto””. (p. 20)

Schwann afirma, desde sus observaciones, que los núcleos celulares se originan, en el interior de una célula, y que luego, a partir de estos se forman nuevas células

Los citoblastos se forman libremente en el interior de las células, en una masa de globulillos mucosos: tan pronto han alcanzado su pleno desarrollo, aparece en su superficie una vesícula muy pequeña, transparente, la joven célula, que sobresale del citoblasto como un vidrio de reloj sobre este. (Schwann 1842 en Giordan 1989, p. 20)

Así las cosas, ya Schwann habría propuesto que una célula tiene su origen en una célula preexistente, sin embargo, la explicación sobre cómo se origina la nueva célula fue insuficiente, pues aún se encontraba en ella los vestigios de la idea de la generación

espontánea, y, además, consideraba, que la formación de los citoblastos precedía a la conformación del resto de la célula (citoblastema<sup>8</sup>). Para Schwann los citoblastos (de Schleiden) eran agregados de materiales (moléculas) que originaban los núcleos celulares, de manera análoga a la forma en la que se organizan los átomos en la estructura de un cristal. Cita Albarracín (1983, p. 62) a Schwann (1869)<sup>9</sup> en un texto descubierto por Marcel Florkin, que publica en 1960

La uniformidad de este desarrollo demostraba que es por doquier la misma fuerza la que reúne las moléculas en células y esta fuerza no podía ser otra que la de las moléculas o los átomos: el fenómeno fundamental de la vida debía, pues, tener su razón de ser en las propiedades de los átomos.

El origen celular de Schwann, de acuerdo con Albarracín (1983), se puede resumir como sigue;

- Nuevas células sólo tendrán origen donde la sustancia nutritiva (*liquor sanguinis*) tenga su alcance.
- Para que se formen nuevas células es necesario un citoblastema más concentrado que el que requiere una célula para su crecimiento.
- La formación de nuevas células, en los vegetales, ocurre al interior de estas. Mientras que, en los animales, ocurre fuera de las células ya existentes.
- El núcleo se forma a partir de un corpúsculo nuclear mediante la sedimentación de nuevas moléculas que, cuando ha alcanzado cierto estado de su desarrollo, se forma la célula en torno a este.

---

<sup>8</sup> Schwann denomina de esta manera a la sustancia que está presente al interior, o entre las células ya formadas en la que se han de formar nuevas células.

<sup>9</sup> Reedición de su obra publicada por primera vez en 1839.

- Mediante esta sedimentación repetida se va formando y condensando la membrana, el espacio entre el núcleo y la membrana se llena de líquido que va a conformar el contenido celular.
- Al concluir la formación celular, el núcleo se disuelve, o, en ocasiones, crece ocupando la mayor proporción de la cavidad celular, en todo caso, para ser reabsorbido.

Para cuando R. Virchow publica su célebre trabajo, se habían llevado a cabo avances a nivel técnico, especialmente en el desarrollo y mejora de microscopios con mejor aumento y resolución, que permitieron las explicaciones y descubrimientos sobre la división celular. En el intermedio de las teorías de Schwann y Virchow fueron trascendentales los sucesivos descubrimientos sobre la división celular que, siguiendo aquí nuevamente a Albarracín (1983) se pueden sintetizar de la manera en que se desarrolla en los párrafos a continuación.

La primera etapa de descubrimientos que hacia 1838, considera las observaciones sobre las divisiones celulares en protistas, trabajo que se retoma de las primeras observaciones de estos microorganismos durante los siglos XVII y XVIII antes que tuvieran el estatus orgánico y celular, particularmente. El trabajo de Morren sobre *Crucigenia quadrata* y posteriormente en *Closterium*, quien observó formas de división celular en estos protistas. Se suman aquí también las observaciones de Ehrenberg en sus infusorios<sup>10</sup>.

La segunda etapa, comprendida entre 1839 a 1843, constituida por las observaciones sobre algas filamentosas, que también sirvieron de material de observación de la división celular. Resaltan aquí los trabajos de Vaucher, Dumotries, Mohl y Meyen. La siguiente etapa, estuvo sustentada a partir de la observación de la *segmentación del huevo*, que supuso el problema de *si los blastómeros debían ser o no considerados como células*. Destacan aquí los trabajos de Baer en huevos de ranas, de von Siebold en nemátodos, Schwann sobre los

---

<sup>10</sup> Microorganismos acuáticos que tienen cilios o estructuras similares para moverse en el agua.

huevos de gallina, Barry en los huevos de coneja, Bagge en *Ascaris acuminata*, Kölliker que, aunque vio el proceso de segmentación no reconoció su naturaleza celular. En conjunto, estos trabajos fueron el fundamento necesario para dar y reconocer el estatus de célula a las resultantes de las sucesivas divisiones a partir del cigoto.

La última etapa constituye el paso definitivo para admitir que la división celular ocurre de forma general en todos los tipos de células, los trabajos de Dumortier, Meyen y Schleiden dieron cuenta que este proceso de división era la regla en la producción de nuevas células vegetales. En las células animales fueron particularmente importantes los trabajos de Remak sobre las células hemáticas del pollo. Reichert que describe e ilustra minuciosamente los estadios de la espermatogénesis en el tubo seminal de nemátodos, también ilustró lo que más adelante serían las divisiones meióticas.

De esta manera se describe el contexto material sobre el que Virchow terminaría por constituir su obra, su teoría celular. Retomando los argumentos<sup>11</sup> que Remak enunciaba para controvertir la teoría de Schwann, completa el punto de partida para enunciar los principales postulados de su teoría.

La vida, afirma Virchow, es esencialmente actividad celular, es la suma de las actividades que tienen en común; la célula es la unidad material de la vida. El organismo es, pues, la suma de la vida de sus células “activas entre sí, pero totalmente independientes” (Albarracín, 1983, p. 200). Las actividades celulares, según el autor de la entonces nueva teoría celular, son de tres tipos; *formación, nutrición y función*.

Ahora, sobre la formación celular, Virchow retoma la analogía (de Schwann) de que ocurre durante un proceso similar al de la cristalización, dando un vuelco al sentido de

---

<sup>11</sup> 1. Que en el reino vegetal está demostrado que las células jamás tienen su origen fuera de células preexistentes. 2. Que el origen extracelular de las células es tan improbable como la *generatio aequivoca* de los organismos. 3. Que entre las células de segmentación no existe sustancia intercelular en la que puedan surgir exógenamente nuevas células. 4. Que la membrana vitelina no participa en la formación de la célula del huevo. (Albarracín, 1983, p. 192)

correspondencia otorgado por Schwann, afirmando que, aunque podría tener cierta similitud, al menos la organización de las células con los átomos en un cristal, no son estos vivientes. Pues, aunque los cristales muestran un equilibrio estable, en las células esto es apenas ilusorio, se da más bien de forma inestable, y en todo caso, así como un cristal puede tener lugar, bajo condiciones idóneas, donde antes existiera o no otro cristal, con las células no es posible, es condición de lo viviente tener su origen únicamente donde haya habido vida previamente; “no existe la generación espontánea ni la formación celular *de novo*.” (Albarracín, 1983, p. 202).

Concluye Virchow, “lo mecánico y lo viviente no son idénticos, pero la vida no es más que un modo especial de lo mecánico, su forma más compleja, en la que las leyes mecánicas se cumplen en las condiciones más insólitas y proteiformes” (Virchow, 1855. En Albarracín, 1983, p. 203)

En este punto toma particular importancia los entusiasmados estudios alrededor de la composición y división de las células; la descripción del protoplasma y otras estructuras que la conforman, así como las observaciones que sugerían la división celular directa, pronto serían el foco de atención del estudio citológico. Sin embargo, uno de esos elementos celulares, originalmente descuidado, empezaría a tomar especial importancia como el elemento celular que podría ofrecer la evidencia necesaria para dar solución a los problemas de la herencia y brindar el argumento que sustenta la variación y el direccionamiento de la ontogenia: el *núcleo celular*.

Para el momento en que R. Virchow presenta su famoso enunciado, ya se habían constituido importantes análisis sobre la división celular y el desarrollo embrionario a partir de una serie de divisiones, por ejemplo, las observaciones de las repetidas irregularidades en la superficie de la blástula durante el desarrollo temprano del embrión de la rana que, hacia 1824 J.L. Prévost y J. B. Dumas notaron (Coleman, 1965), y que, luego, hacia la década de los 40's de ese mismo siglo se terminó confirmando que dichas irregularidades eran producto de la

división de un óvulo fecundado<sup>12</sup>. Albert Kölliker, reconoce que estas “masas” en división, representadas en la segmentación del cigoto, eran en realidad células en proceso de formación (Coleman, 1965), posteriormente, hacia 1852, Robert Remak propone la idea de que toda célula hija, durante la división, recibe parte de su *sustancia* (protoplasma) únicamente de la célula madre y que, en esta división, existía a la vez una división nuclear directa, que luego fue denominada como división “amitótica” (Moreno, 2024).

En cuanto al núcleo, en particular, su función no empezaría a ser dilucidada sino hasta la década de los setenta de los años 1800s producto de los avances técnicos en microscopía que se darían en aquel momento, como se tratará más adelante. Las primeras descripciones del núcleo celular se le atribuyen a Anton van Leeuwenhoek quien lo describe, a partir de las observaciones realizadas en los microscopios que él mismo diseñaba, como un *hueco* o *lumen* en las células de la sangre de salmón. Los estudios microscópicos sobre las orquídeas realizados por Robert Brown en 1831 le permitieron ofrecer una descripción más detallada, en la que exponía que en el interior de las células más externas de la flor aparecía un área opaca que denominó *areola* o *núcleo*, sin embargo, tampoco ofreció alguna sugerencia sobre su función. (Moreno, 2024)

El conocimiento que se constituyó sobre la célula y los correspondientes fundamentos teóricos estuvieron siempre vinculados al desarrollo técnico de instrumentos y procedimientos que permitieron la observación de las células, sus componentes y sus “comportamientos” en torno a la manifestación de las explicaciones sobre su estructura y la importancia del núcleo en la resolución de los problemas hereditarios. En este sentido, se reconocen tres condiciones técnicas que permitieron, primero, la consolidación de una teoría celular y posteriormente la consolidación de una teoría cromosómica a partir del estudio de la composición y organización del núcleo celular.

---

<sup>12</sup> Desarrollo del trabajo de C, von Siebold, M. Barry, H. Bagge y C. Bergman.

La primera condición está enmarcada dentro de los **Avances en términos ópticos de los microscopios** utilizados, el desarrollo de componentes y la integración de principios físicos que brindaron mejor enfoque y resolución, permitieron la observación de estructuras celulares que los microscopios más sencillos no podrían haber concedido. La segunda condición, está relacionada con las **Técnicas de corte, fijación e inclusión de muestras** de material “vivo”. Por último, la tercera condición el **Desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas de coloración o tinción** que ofrecerían detalle y diferenciación a los componentes de las muestras tisulares.

En relación con la primera condición, **Avances en términos ópticos de los microscopios**, se puede afirmar que desde su invención (atribuida convencionalmente a los hermanos Hansen) hasta la primera parte del siglo XIX, sus avances no fueron particularmente representativos en términos de su funcionamiento, el principio integrado consistió siempre en la combinación de lentes pulidos, cóncavos y convexos, que permitían la magnificación de los objetos observados, a partir de una fuente de luz natural. Por ejemplo, el diseño del microscopio simple de Leeuwenhoek (Figura 1.), constituido a partir de un lente convexo y un ocular, fijados a un soporte metálico, que bien podría ser de plata, bronce u oro, permitieron, en el mejor de sus diseños, un aumento de unas casi 300 veces la imagen. Este principio óptico del microscopio de Leeuwenhoek, modificado por Robert Hooke (figura 2), le fue suficiente para elaborar toda su obra a partir de sus observaciones realizadas en su tratado *Micrographia*.

(Sánchez, R. & Oliva N, 2015)

**Figura 1.**

Modelo de microscopio simple de A. van Leeuwenhoek.



*Nota. Adaptado de Model of Leeuwenhoek's microscope [fotografía], por Science Museum Group, 2025, (<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co119600/model-of-leeuwenhoeks-microscope>). CC BY-NC-SA 4.0*

**Figura 2.**

Diseño de microscopio compuesto de R. Hooke.



*Nota.* Adaptado de *Robert Hooke type microscope and accessory* [Fotografía], Science Museum Group, 2025, (<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8430/robert-hooke-type-microscope-and-accessory>). CC BY-NC-SA 4.0

En los años posteriores, se podría destacar una etapa de mejoras en los desarrollos en los microscopios que, estuvieron dados por progresos en la óptica, con el diseño de los microscopios compuestos, que ya incluirían una combinación de dos o más lentes, así como la posibilidad de múltiples objetivos y mecanismos que permitirían el enfoque al aumentar o reducir la distancia entre el objetivo y la muestra. Sin embargo, no fue sino hasta 1812 (Sánchez, R. & Oliva N, 2015), cuando hay otro importante avance en el aspecto óptico del microscopio. G. Amici mejora el pulido de los lentes y desarrolla los objetivos de inmersión e

integra una técnica de observación con inmersión en agua. Este mismo año, D. Brewster desarrolla técnicas de observación con inmersión en otros líquidos con índices mayores de refracción<sup>13</sup> (aceites principalmente). En 1820, son introducidos a los microscopios los objetivos compuestos por A. Chevalier que permitirían intercambiar la capacidad de aumento de las lentes sobre la muestra. Se demuestra la importancia que la luz polarizada tenía en el desarrollo del microscopio, cuando en 1828, W. Nicol inventa el primer polarizador<sup>14</sup> (Albarracín, A. 1983). En la década siguiente J.J. Lister (1830) perfecciona los objetivos compuestos y además se le atribuye la invención de los lentes apocromáticos<sup>15</sup>. En palabras menos complejas, lo anterior se traduce en la gestación de un microscopio que, ópticamente habría aumentado la potencia de magnificación considerablemente, llegando a alcanzar una capacidad de entre 900 y 1000 aumentos, permitiendo la observación de imágenes con mejor enfoque y resolución mediante la corrección de las aberraciones cromáticas que se presentaban en modelos anteriores (Sánchez, R. & Oliva N, 2015).

En este contexto de desarrollos técnicos de la microscopía se llevaron a término las observaciones que permitieron la identificación de la célula y su estatus teórico como unidad constitutiva de los organismos, dicho de otro modo, las observaciones que llevaron a la constitución de la teoría celular. También la identificación de organelos celulares y del núcleo celular como entidades contenidas en el protoplasma, sobre este último empieza entonces el creciente interés por encontrar su relación con la división y el afianzamiento de la teoría, en tanto que el origen celular no es posible sino a partir de una célula ya existente, es decir, el interés por encontrar la respuesta a la pregunta por la base física de la herencia. Podría

---

<sup>13</sup> Es la medida que permite la cuantificación de la reducción de la velocidad de la luz cuando pasa de un medio a otro de diferente naturaleza.

<sup>14</sup> Se trata de un filtro elaborado en un material que permite la conversión de un haz de luz en un haz bien definido, lo que se conoce como luz polarizada.

<sup>15</sup> Se conocen con este nombre a los lentes que permiten la corrección de la aberración cromática. Evento que ocurre cuando longitudes de onda de la luz diferentes tienen longitudes focales diferentes, lo que produce imágenes borrosas o con franjas de color en su contorno.

afirmarse aquí, siguiendo a Albarracín (1983), que, los componentes estructurales de la célula eran el núcleo y el protoplasma; “La célula, entonces, no sería más que un grumo de protoplasma en cuyo seno se insertan el núcleo y los elementos nucleolares” (p. 208).

Ya se habían ofrecido las evidencias a la generación de una célula de otra precedente y de alguna manera el núcleo celular estaría involucrado en dichos procesos y aunque ya se había descrito, aún no se habría podido llegar a la naturaleza de este elemento celular, se conocía el núcleo, pero no había acceso a este, las mejoras en los microscopios fueron relativamente pocas y principalmente fueron mecánicas, más que ópticas. No fue sino hasta 1886 (Coleman, 1965), que una nueva generación de microscopios tendría lugar, la asociación entre E. Abbe y C. Zeiss daría inicio al desarrollo de los máximos aumentos para los microscopios ópticos. Las primeras mejoras fueron sobre las técnicas de inmersión, logrando que los aumentos alcanzaran un rango de hasta 2000 veces, entre las mejoras siguientes estarían la invención de una lente apocromática mejorada hacia 1868, mejora que permitió la eliminación de la distorsión en los colores primarios y secundarios. La invención del condensador Abbe que sirve como fuente de iluminación a los microscopios. Estas mejoras sobre las lentes dieron paso a una generación de microscopios<sup>16</sup> que permitían, con el uso de técnicas de inmersión, aumentos de hasta entre 2500 y 3000 veces y un poder de resolución de  $\frac{1}{4}$  micras. Fue este el modelo que estaría en manos de reconocidos citólogos como E.B Wilson, L. Guignard, T. Boveri, entre otros, y con los que se realizarían las observaciones que abrirían paso a las formulaciones sobre la relación entre el núcleo celular, su composición y la herencia.

---

<sup>16</sup> Así como la fundación de la compañía Carl Zeiss AG, mayor fabricante de equipos ópticos.

**Figura 3.**

*Modelo de microscopio compuesto diseñado por Carl Zeiss en 1870.*



Nota. Adaptado de *Compound Microscope by Carl Zeiss, Jena, German, 1870-1888*

[Fotografía], Science Museum Group, 2025,

(<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8013/compound-microscope-by-carl-zeiss-jena-german-1870-1888>). CC BY-NC-SA 4.0

Las técnicas de inmersión estarían disponibles a partir de la década de los setenta del siglo XIX, que se harían frecuentes en observaciones a través de microscopios ópticos (utilizadas aún en la actualidad) (Coleman, 1965). Estas técnicas se describen, de forma general, como el uso de fluidos que sirven de medios para reducir la refracción de la luz, mejorar la iluminación, el aumento y resolución de una imagen. Los medios más utilizados son agua, glicerina y aceites. De acuerdo con el tipo de muestra a observar se usa uno de los tres tipos de medios de inmersión que se aplican sobre la superficie del lente del objetivo, sobre la superficie del cubreobjetos de la muestra y sobre la superficie del condensador de la lente frontal, lo que se conoce como Sistema de Inmersión Homogéneo (EVIDENT, 2025).

El tipo de muestra que se quiera observar determina el medio de inmersión que se debe utilizar, así, para la observación de muestras vivas se utiliza como medio el agua, en combinación con objetivos diseñados para este. Debido a que, generalmente, este tipo de muestras se cultivan y se disponen en soluciones salinas<sup>17</sup>, la luz de la fuente puede ser refractada dentro de los índices normales para el agua, evitando así las aberraciones que pueda causar el paso de la luz de un medio acuoso a uno oleoso (por ejemplo, las aberraciones esféricas) y se garantiza la obtención de imágenes con mayor contraste, iluminación y resolución.

El uso de la glicerina y aceites de inmersión, disponen de unos índices de refracción más altos que el agua (para la glicerina el índice es de 1,4695, mientras que, para los aceites pueden oscilar entre 1,480 y 1,740), y teóricamente permiten una mejora en la resolución y aumento de las imágenes, sin embargo, estos medios deben ser utilizados especialmente sobre muestras deshidratadas o incluidas en medios oleosos, por ejemplo, en parafinas (Megías M, Molist P, Pombal MA, 2024), pues como se menciona en el párrafo anterior, la

---

<sup>17</sup> Por ejemplo, solución salina tamponada con fosfato (PBS, Phosphate Buffered Saline); una mezcla de agua y sales de carácter isotónico, con un pH neutro que conserva las muestras sin que afecten la osmolaridad y tonicidad.

refracción de la luz a su paso de un medio a otro de diferente naturaleza acarrea aberraciones al momento de las observaciones de las muestras.

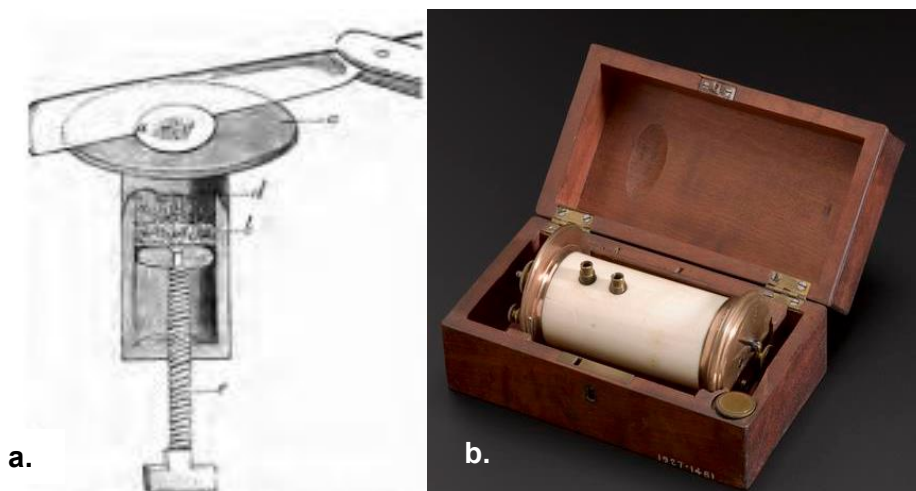
La segunda condición técnica, ***Técnicas de corte, fijación e inclusión***, describe los desarrollos simultáneos que, con el mejoramiento de los equipos ópticos, tuvieron lugar desde el siglo XVII y fueron perfeccionándose hacia la mitad del siglo XIX y las primeras décadas del siglo siguiente. El desarrollo de los microscopios de luz que ya se construían desde el siglo XVIII demandaron que las muestras a observar fueran lo suficientemente delgadas y precisas para que la luz pudiera atravesarlas y revelar imágenes más fiables de los detalles, de sus formas y estructuras. Estas necesidades de cortes cada vez más finos terminó desplazando a las cuchillas y hojas de afeitar utilizadas entonces, desembocando en el diseño de un instrumento que, aún en la actualidad (con posteriores mejoras, actualizaciones y automatizaciones) se sigue utilizando en microscopía, se trata del micrótopo. Un instrumento de corte de precisión que permite tomar incisiones seriadas de material incluido en parafina o plásticos (técnicas que se abordarán más adelante), permitiendo realizar cortes (en los modelos más actuales) de un grosor del orden de 0.5 a 3  $\mu\text{m}$  en tejidos incluidos en plásticos, de 4 a 10  $\mu\text{m}$  en muestras de parafina y de 8 a 15  $\mu\text{m}$  en muestras congeladas (McMillan, D. & Harris, R., 2018).

Los primeros mecanismos para obtener cortes finos, llamados máquinas de corte (cutting engine) se empezaron a construir en el siglo XVIII, entre los primeros destacan los diseños de von Mohl en 1770, un dispositivo que permitía la sujeción de una muestra sobre una plataforma con un tornillo que dejaba acercar o alejar la muestra a una cuchilla ubicada sobre esta para graduar el grosor del corte. (Méndez, A., Méndez, J.L. et al. 2010). Otro diseño de mecanismo de corte fue el de Alexander Cumming, un dispositivo cilíndrico con un espacio en el interior en el que se introducía la muestra y un tornillo la deslizaba hacia la parte superior, mientras que la cuchilla en el interior realizaba el corte. Este dispositivo suponía cortes

ajustables a  $1/500$ ,  $1/750$  y  $1/1000$  de pulgada, sin embargo, el dispositivo no alcanzaba, realmente, este grado de precisión (Science Museum Group, 2025).

#### Figura 4.

*Máquinas de corte. a) Ilustración de máquina de corte usada por von Mohl hacia 1770. b) Máquina de corte cilíndrica diseñada por A. Cumming.*



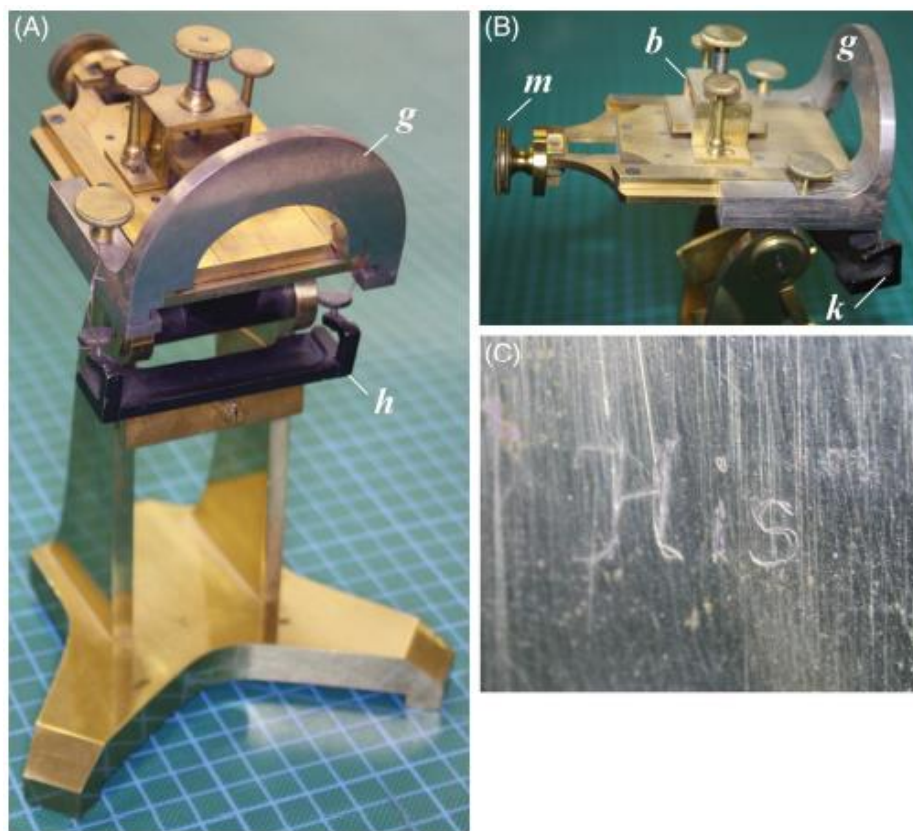
*Nota. a) Adaptado de El microtomo y el microscopio. historia de dos instrumentos básicos en los avances de la ciencia, por Méndez A., Méndez, J.L. et al. 2010, p. 812. b) Adaptado de Microtome, 1770 [Fotografía], Science Museum Group, 2025 (<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co1886/microtome-1770>). CC BY-NC-SA 4.0*

El primer micrótopo, como instrumento que permitiría cortes de precisión fue diseñado por J. E. Purkinje, hacia 1841, incluyendo una base y un mecanismo de deslizamiento para realizar los cortes de las muestras. Sobre este modelo se realizaron posteriores modificaciones que dieron lugar al micrótopo utilizado por Wilhem His en 1866 (Figura 5.) (Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., 2021) con el que pudo obtener cortes histológicos a partir de los cuales ilustró los estadios del desarrollo embrionario humano (Godoy-Guzmán, C., 2013). Para finales del

siglo XIX, los micrótomos ya se producían en masa, principalmente los modelos Cambridge-Rocker (Figura 6), que fuera diseñado por el hijo de Charles Darwin, Horace, y el modelo Minot.

**Figura 5.**

*Micrótopo diseñado y utilizado por W. His.* (A) Vista frontal; (B) Vista lateral; (C) Nombre «His» grabado en el puntal. h) Porta cuchillas, g) Arco, m) Tornillo micrométrico, b) soporte de unión al bloque, k) vista lateral de h.



*Nota.* Tomado de *The revolutionary developmental biology of Wilhelm His, Sr.*, por Richardson, M. Y Keuck, G., 2022, p. 1138.

**Figura 6.**

*Micrótopo modelo Cambridge Rocker, comercializado desde 1885.*



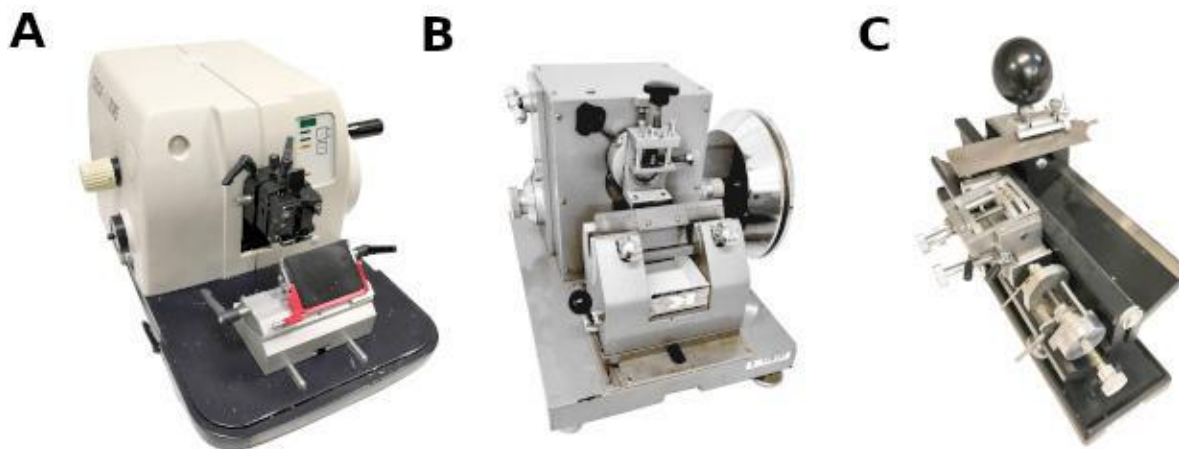
*Nota.* Adaptado de *Rocking microtome* [Fotografía], Science Museum Group, 2025

(<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co118011/rocking-microtome-england-1930-1950>) CC BY-NC-SA 4.0

En general, un micrótopo (Figura 7) está conformado por un bloque, generalmente metálico, un sujetador de muestras, un componente mecánico que permite el control del avance de la muestra dando el grosor del corte y las cuchillas que, de acuerdo con el tipo de la muestra pueden ser de acero, vidrio o diamante (McMillan, D. & Harris, R., 2018).

**Figura 7.**

Tipos de Micrótopos para corte en parafina. a) Micrótopo de rotación automatizado; b) Micrótopo de Rotación mecánico; c) Micrótopo de deslizamiento.



*Nota.* Adaptado de *Técnicas histológicas 4. CORTE* [Fotografía], 2025, por Megías M, Molist P, Pombal MA. (<https://mmegias.webs.uvigo.es/6-tecnicas/imagenes/tecnicas-microtomo-parafina.jpg>)

La obtención de cortes tisulares adecuados no sería posible sin el desarrollo de las técnicas de fijación e inclusión que se empiezan a emplear como solución a los problemas que representa la extracción de muestras frescas; primero, porque los tejidos son ópticamente densos, es decir, impiden el paso de la luz a través de sus estructuras, segundo, por lo general los tejidos son blandos o frágiles y al someterlos a cortes por medios manuales se podrían estropear, y tercero, relacionado con la naturaleza celular de los tejidos, una vez separados del organismo o si éste ha muerto, empiezan los procesos de autólisis, lo que termina afectando la integridad del tejido y las observaciones posteriores que se realizan sobre estos.

La preservación de las muestras requería medios que permitieran guardar su integridad sin alterar su composición y manteniendo las características más próximas a su estado vivo, sobre este problema comienzan a desarrollarse técnicas de fijación que, como se indicó, su finalidad es poder conservar una muestra en las mejores condiciones posibles. Los primeros intentos de conseguirlo se realizaron con el uso de *aguardientes de vino*, también conocidos como Holanda, debido a la región donde se comercializaban; se trata de un destilado de los vinos y que tiene una concentración alcohólica inferior al 70% en volumen, se data de su uso

hacia 1666 (Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., 2021). Otros intentos registrados incluyen el uso del ácido crómico alrededor de 1844 (al que se considera como el primer fijador), el uso del cloruro de mercurio en 1846 y el tetróxido de osmio en 1864, que fue difícilmente aceptado y entró en desuso por su costo, labilidad, su lenta penetración en las estructuras de los tejidos, solamente permitía fijar una pequeña muestra de tejido a la vez y además porque su uso traía consecuencias irritativas. Fue con la llegada del formaldehído que los métodos de fijación empezarían a tener los resultados esperados. Descubierta por A.M. Bútlarov en 1859, un ejemplo de serendipia cuando trataba de obtener metilenglicol, descrito e identificado por A.W. von Hofmann en 1868 y de uso generalizado como fijador ya en 1893, cuando se hizo popular por los exitosos trabajos de los médicos Ferdinand e Isaac Blum (Hijo y padre respectivamente) (Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., 2021).

Los procedimientos de fijación química se ampliarían de acuerdo con diferentes sustancias usadas como fijadoras, estas son soluciones acuosas cuyos componentes establecen puentes químicos entre sus moléculas y las de los tejidos, manteniéndolas en “su lugar”, evitando su degradación, aunque a pesar de su acción los tejidos se verán afectados en mayor o menor medida, presentando encogimientos o distensiones, y en todo caso los fijadores generan el endurecimiento del tejido (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025). Los fijadores, según su acción, se pueden agrupar en fijadores coagulantes, derivados o en combinación con alcohol y otros como el ácido acético, que provocan la extracción de agua del tejido, causan la desnaturalización de las proteínas de membrana y la coagulación de las proteínas citoplasmáticas haciéndolas insolubles. Otro grupo, son los *fijadores de reticulación* o de *establecimiento de enlaces cruzados* (*Crosslinking fixatives*) como el formaldehído o el glutaraldehído, que crean enlaces químicos estabilizadores dentro y entre las proteínas, dejándolas en un estado similar al de los tejidos vivos, sin que provoque su precipitación (McMillan, D. & Harris, R., 2018., Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025). En la Tabla 1, a continuación, se describen algunas de las propiedades de los fijadores más utilizados

Tabla 1.

*Principales fijadores en estudios histológicos.*

FIJADORES	MECANISMO DE ACCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>SIMPLES: (METANOL, ETANOL, ACETONA)</b>	Fijación por deshidratación. Coagulación de proteínas Extracción de lípidos de los tejidos No afecta carbohidratos	Buenos fijadores de muestras pequeñas Preservan glucógeno, pigmentos y proteínas Buenos conservantes	Producen endurecimiento y retracción de tejidos Carecen de efecto mordiente <sup>18</sup>
<b>ÁCIDO ACÉTICO</b>	Cambia el estado coloidal de las proteínas Se usa en concentraciones de entre 1 y 5 %	Ideal para ácidos nucleicos y nucleoproteínas Puede ser usado en combinación con otros fijadores (Bouin FAA; formaldehído, alcohol, ácido acético)	Causa destrucción de las mitocondrias Mala fijación de membranas y citoplasma.
<b>ÁCIDO PÍCRICO</b>	Coagulación de las proteínas	Buen preservante de las estructuras celulares. No produce retracciones tisulares. Preserva bien el glucógeno y los lípidos Buen efecto mordiente	Presenta alteraciones en la preservación cuando el tiempo de fijación no es óptimo.
<b>FORMALDEHÍDO</b>	Unión a grupos funcionales de las proteínas Inactivación de enzimas que causan degradación del tejido	Produce poca retracción Compatible con la mayoría de las tinciones Buena preservación de lípidos No reacciona con carbohidratos	Casi ninguna como fijador Efectos sobre la salud por su uso prolongado.
<b>GLUTARALDEHÍDO</b>	Polimerización; forma dímeros y trímeros Forma puentes entre las moléculas de los tejidos	Alta capacidad para conservar la estructura celular. Mayor capacidad de entrelazar los tejidos Utilizado para la observación ultraestructural de las células	Poca velocidad de penetración No recomendado para inclusiones en parafina

<sup>18</sup> *Modificación química de las estructuras celulares que permite la unión posterior de colorantes.*

<b>TETRÓXIDO DE OSMIO</b>	Forma puentes entre los enlaces insaturados de los ácidos grasos de las cadenas lipídicas de la membrana (las hace insolubles) Preserva y oscurece las membranas	Preserva muy bien las membranas celulares. Permite el estudio de grasas insaturadas Necesario para las impregnaciones argénticas (método de Golgi)	Poca penetración (de 0,5 a 1 mm) Hace frágiles las muestras de tejido
<b>MEZCLAS FIJADORAS</b>			
<b>LÍQUIDO DE BOUIN</b> <i>(Ac. Pícrico, Formaldehído y ácido acético)</i>	Procesamiento de tejidos para inclusión en parafina	Buen efecto mordiente Tras la fijación, las muestras se pueden conservar en etanol de 70°	
<b>SOLUCIÓN DE CLARKE</b> <i>(Etanol, ácido acético 3:1)</i>	Fijación por deshidratación Coagulación de las proteínas	Primeros fijadores utilizados en inclusión de parafinas	Combinadas de los fijadores que la componen
<b>CARNOY</b> <i>(Etanol 60%, cloroformo 30%, ácido acético 10%)</i>	Dstrucción de estructura terciaria de las proteínas Hace las proteínas insolubles Deshidratación de la muestra Lisa los eritrocitos	Buen fijador para el glucógeno, carbohidratos y proteínas fibrosas. Permite la observación de ácidos nucleicos.	No permite observación de la estructura del núcleo celular Produce retracciones
<b>MEZCLAS CON FORMALDEHÍDO</b>	Disuelto en soluciones tamponadas con osmolaridad similar a la del tejido	Complementa la acción fijadora Evita la afectación de la estructura celular causada por otros fijadores en combinación.	Depende de los fijadores en la mezcla.

*Nota.* Adaptado de McMillan, D. & Harris, R., 2018 y Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025

Los procedimientos de fijación química se pueden clasificar en dos, según indican Megías M, Molist P, Pombal MA. (2025), el primero, más apropiado para muestras de tejido, el segundo, utilizado para la fijación de órganos y organismos (animales) completos. Para la fijación de tejidos se emplea la fijación por inmersión, mediante este proceso se toman cortes relativamente delgados (entre 0,1 y 0,5 cm de grosor) y se sumergen en la solución fijadora durante un tiempo determinado (que depende de la velocidad de penetración y difusión de cada fijador), generalmente hasta un máximo de 24 horas, excepto el formaldehído en el que la muestra puede dejarse en inmersión hasta por una semana, manteniendo algunas precauciones<sup>19</sup> para asegurar una adecuada fijación. El segundo procedimiento para fijación es la perfusión, mediante esta técnica el fijador se introduce directamente a los tejidos y estructuras a través del sistema circulatorio, mediante el uso de una bomba peristáltica<sup>20</sup>, de forma que garantice que llegue a todas las células por la red de capilares. Esta técnica asegura una mejor fijación debido a que la solución ingresa y llega a una distancia muy cercana de las células de las estructuras o los tejidos perfundidos, esto hace que la velocidad de penetración del fijador no represente un inconveniente.

Las técnicas de fijación permiten la preservación de los tejidos y las características de las estructuras celulares, sin embargo, no otorgan la firmeza necesaria para realizar cortes lo suficientemente delgados y podrían deformarse al intentar cortarlos, la superación de este obstáculo se lleva a cabo mediante el uso de técnicas de inclusión, estas consisten en la impregnación de las muestras con una sustancia que les otorgue la dureza necesaria para poder ser cortadas por las cuchillas del micrótopo y obtener disecciones óptimas.

---

<sup>19</sup> 1. El volumen recomendado del fijador debe ser entre 10 a 20 veces superior al volumen de la muestra. 2. La osmolaridad entre el tejido y la solución fijadora deben guardar equilibrio. 3. El pH del fijador debe ser muy próximo al fisiológico. 4. Se recomienda acompañar la inmersión con un agitado suave para mejorar los tiempos de fijación.

<sup>20</sup> Inventada en 1855 por Rufus Porter y J.D. Bradley en Estados Unidos; funciona mediante un sistema de rodillos que ejercen y liberan presión sobre un tubo que transporta un fluido, desplazándolo suavemente, sin causar daños en el circuito de transporte.

Los primeros métodos utilizados tuvieron dos etapas, según exponen Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., (2021), la primera, la etapa de incrustación en la que se utilizaron materiales como goma arábica, mezclas de cera y aceite, mezclas de goma de mascar y cola de pescado, como también la celoidina, estas sustancias si bien endurecían la muestra, solamente la rodeaban, pero no penetraban en los tejidos. Fue hasta 1869 que se establecería la segunda etapa, de permeación, cuando T. A. Edwin Klebs, asistente de R, Virchow, desarrolló la técnica de inclusión en parafina, que no solo permite el endurecimiento de la muestra, sino que la infiltra, esta técnica es utilizada actualmente.

La técnica de inclusión en parafina requiere que las muestras hayan sido previamente fijadas, y que el agua contenida en los tejidos sea reemplazada por un solvente orgánico, debido a que el agua no es miscible en este medio, por lo tanto, la muestra se somete a un procedimiento previo de deshidratación y de líquido intermediario, antes del encastramiento en la parafina. La deshidratación es lenta y gradual, utilizando alcoholes (por lo general etanol) en concentración creciente desde el 50% o 70% hasta del 100%, así se asegura que el alcohol desplace el agua en los tejidos, y estos sufran la menor contracción posible. El tiempo de deshidratación no debe ser excesivo debido a que los alcoholes pueden endurecer la muestra y hacerla quebradiza. El uso de aditivos como el fenol ayuda a que estructuras como tendones, uñas y queratina se reblandezcan, es usado al 4%, cuando la muestra está en el etanol al 96%. (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025)

Luego que se ha deshidratado la muestra, se sumerge en un intermediario, que puede ser benceno, xileno, tolueno u óxido de propileno, estas sustancias son aclarantes y brindan translucidez a la muestra, al igual que los alcoholes el tiempo de sumersión no debe ser excesivo, pues también causa el endurecimiento y fragilidad de las muestras. Una vez la muestra ha sido deshidratada y haya pasado por el intermediario, está lista para la inclusión en parafina líquida que se ha calentado hasta licuarla, se hacen incubaciones sucesivas en parafina para asegurar su penetración en los tejidos, luego de asegurar la infiltración, la

muestra se pasa a un molde, se orienta en el sentido que se deseen hacer los cortes, se vierte parafina líquida sobre la muestra y se deja solidificar a temperatura ambiente o sobre una superficie fría, finalmente se extrae el bloque de parafina con la muestra del molde y se retalla, así, la muestra está lista para su corte al micrótopo (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025).

**El *Desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas de coloración o tinción*,** responde a la necesidad de mejorar la calidad de las observaciones al microscopio, pudiendo ofrecer la posibilidad de identificar y discriminar los componentes tisulares y celulares. Parte de la proliferación del uso de sustancias para colorear los tejidos vivos estuvo de la mano de la expansión de la industria textil durante el siglo XIX, época en la que la coloración de telas demandaba un nivel industrial, trayendo como consecuencia el desarrollo de diversos tintes y pigmentos (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025).

El uso, aplicación y formalización de colorantes durante el siglo XIX, según Giordan et al. (1988) constituyó un verdadero trabajo de tanteo, pues no se conocían realmente los mecanismos de acción de los colorantes sobre los tejidos; si esta coloración modificaba la estructura celular o si, una vez coloreados, las observaciones obtenidas eran fiables. Lo que sí se puede afirmar, es que la elección de los colorantes y su concentración para una observación óptima fue afinándose conforme se prestaba atención a descubrimientos más o menos importantes en las publicaciones científicas de aquel momento Giordan et al. (1988).

Entre los primeros colorantes usados, se puede mencionar el carmín, un pigmento rojo brillante extraído de la cochinilla mexicana que, se atribuye su introducción a Sir John Hill en 1770, a partir de allí se buscarían soluciones con este colorante que fueran más efectivas en la coloración, por ejemplo, la mezcla con alcohol, que utilizó J. von Gerlach, quien fuera ayudante de Köelliker, hacia 1851, posteriormente se prepararía en una solución con amoníaco hacia 1858 y con ácido pícrico hacia 1867 (Giordan et al., 1988., Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., 2021).

Siguiendo el contexto histórico que presentan Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., (2021), otro de los tintes de origen natural, muy utilizado en las tinciones histológicas es la hematoxilina, un compuesto de carácter básico que se obtiene del árbol *Haematoxylon campechianum*, el nombre se debe a su característico color similar al de la sangre. Su uso se llevó a cabo sobre tejidos animales hacia 1863 por el médico H. G. W. Waldeyer, quien era aprendiz de Henle, aunque su efectividad fue muy escasa, pues carecía de mordiente. En 1865 se utiliza una solución de hematoxilina con alumbre como mordiente, técnica que fue popularizada por Franz Böhmer. Posteriormente, en 1891, Paul Mayer, publicó una fórmula de hematoxilina en la que utilizaba un tipo de oxidante, provocando la conversión a hemateína azul (actualmente utilizada en la tinción con hematoxilina-eosina). La técnica de coloración por este método se consolida cuando A. Wissowsky, la combina con eosina, aunque se haría popular tiempo después de que fuera publicada en 1876, actualmente es una de las técnicas más usadas para la tinción histológica.

La integración progresiva de nuevos colorantes sintéticos se ve representada por el uso de los derivados de la anilina (fucsina, eosina) (Giordan et. al. 1988), entre las principales publicaciones que permitieron la difusión de estos colorantes se encuentra a Paul Ehrlich, médico alemán que clasificó los medios de coloración en acidófilos, neutrófilos y basófilos, lo que les otorgó un uso generalizado en el desarrollo de la histología. Fueron precisamente estos medios de coloración con el uso de anilinas lo que le permitió a Walther Flemming detallar componentes celulares nucleares a los que, por su naturaleza, afirmó estaban compuestos por cromatina<sup>21</sup> (Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., 2021).

Otras técnicas de tinción que, según Roma, S., Pérez, F., D'ottavio, A., (2021), se popularizan en este periodo (segunda mitad del siglo XIX y primera del siglo XX) son la tinción

---

<sup>21</sup> Término acuñado por el mencionado fisiólogo alemán para referirse a los cuerpos filiformes que observó en el núcleo celular debido a la particular forma de tinción que presentaban con el uso de anilinas. También se le atribuye la introducción del término mitosis.

de Golgi<sup>22</sup>, utilizada para la tinción de células nerviosas. Las tinciones triples de Ehrlich, popular hacia 1888; en 1889, la tinción de van Gieson, de Hemming en 1891, de Mallory en 1900 y de Pierre Masson en 1929. En general, estas técnicas consisten en el uso de colorantes ácidos y básicos que, junto a un mordiente, permiten teñir los componentes celulares debido a su naturaleza química, ofreciendo un mayor contraste, lo que se traduce en la diferenciación clara de los tejidos y entre las estructuras celulares.

Como se refirió en párrafos anteriores, la acción de los colorantes era desconocida, pues, entonces, había una seria divergencia entre químicos e histólogos, sin embargo, de manera general, el mecanismo de acción de un colorante se describe a continuación: se debe aclarar que estos se conforman por dos elementos principales; el cromógeno, que aporta el color a la muestra, y el auxocromo, que permite la unión a los componentes del tejido. La manera en que se une el auxocromo con el cromógeno influye en el tipo de coloración que adquiere el tejido. El auxocromo reacciona con componentes metálicos que funcionan como mordientes, o bien, con el tejido, debido a que este tiene grupos ionizables (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025), esta interacción está mediada por la naturaleza de la afinidad química entre los componentes del colorante y del tejido o los componentes celulares, así, un colorante ácido mostrará afinidad por los componentes básicos de la muestra y un colorante básico mostrará afinidad química por los elementos ácidos presentes en la muestra.

En este sentido, los colorantes básicos permitirán que elementos como el ADN, el ARN y ciertas matrices extracelulares manifiesten coloraciones específicas a la reacción con el colorante, algunos de estos colorantes son la tionina, safranina, azul de metileno o hematoxilina. Por otra parte, los colorantes ácidos permitirán la tinción de estructuras proteicas y el colágeno. La fucsina, verde rápido, naranja G y la eosina son ejemplos de colorantes

---

<sup>22</sup> Camillo Golgi, médico italiano, observó que, al sumergir tejido cerebral fijado con dicromato de potasio en una solución débil de nitrato de plata, las células nerviosas se tornan de color negro. Técnica que le sirvió a Santiago Ramón y Cajal para establecer su teoría neuronal.

ácidos. En ambos casos, tanto básicos como ácidos se unen por atracción eléctrica. Los colorantes neutros tienen componentes tanto ácidos como básicos y ambos pueden aportar color a la muestra, un ejemplo es el eosinato de azul de metileno (Megías M, Molist P, Pombal MA., 2025).

Los colorantes, en su mayoría, son utilizados en altas concentraciones debido a que la cantidad que se une a los tejidos es bastante reducida, razón por la cual los procedimientos de tinción pueden darse de dos maneras, la primera, la tinción progresiva, que consiste en el control del tiempo que la muestra está expuesta al colorante; entre más tiempo, mayor coloración. La segunda, tinción regresiva, en la que la muestra se somete a un exceso de tinción y luego se realiza una eliminación progresiva de colorante, normalmente se lleva a cabo con soluciones alcohólicas.

En síntesis, las condiciones desarrolladas hasta aquí describen el contexto técnico en el que la producción teórica alrededor de la célula y, posteriormente, sobre los cromosomas tuvo lugar. El desarrollo técnico de los microscopios, y especialmente de las técnicas de corte, fijación y tinción representó, por una parte, la reducción del tiempo para realizar las observaciones, pues antes de estas, la obtención y observación de una muestra de tejido adecuada podía tomar hasta 60 días para una serie de cortes (Giordan et al. 1988). Por otra parte, ya estaba dispuesto el soporte técnico para acceder al núcleo celular y empezar a dilucidar si allí hubiera respuestas en relación con los procesos hereditarios.

Ahora bien, en este punto es posible conocer los desarrollos teóricos que otorgaron al cromosoma su estatuto conceptual dentro de la genética como disciplina. A continuación, se discuten las condiciones teóricas que lo permitieron; en primer lugar, **el desarrollo de la teoría celular** que derivaría en la fijación de la atención sobre los elementos celulares correspondientes al núcleo celular y que terminaría por establecer la división celular como el medio a través del cual las células dan origen a otras células de similares características y funciones. La segunda condición teórica, deriva de las preocupaciones emergentes de la

anterior condición, **la fertilización o la unión de los núcleos en la formación del cigoto**, que permitiría la relación entre la reproducción sexual y la conservación de los organismos de una generación a otra. La tercera condición teórica se manifiesta en el desarrollo y la afirmación de la **teoría cromosómica de la herencia por Sutton y Boveri**, en la que el seguimiento al comportamiento de los cromosomas les otorgaría el estatuto de ser las estructuras celulares de la herencia. Finalmente, y aunque de manera totalmente independiente de los avances histológicos, aparecen los trabajos derivados del redescubrimiento de los escritos de Mendel, o lo que en esta discusión se denomina el **auge del mendelismo**, terminan por otorgar al cromosoma su importancia en la explicación de la transmisión hereditaria.

En lo concerniente a la primera condición teórica; **el desarrollo de la teoría celular**, es importante resaltar que para el momento en que R. Virchow enuncia su teoría celular, ya se habían realizado importantes observaciones sobre la división celular—como se discute en párrafos anteriores de esta sección— el periodo comprendido entre las teorías de Schleiden y Schwann y la teoría de Virchow estuvo lleno de observaciones que sostenían la idea de que una célula origina a otra a partir de su división. Para los años sesenta del siglo XIX se aceptaba ampliamente que las células se reproducen por división indirecta (o mitótica), y que tanto la célula como el núcleo se divide y multiplica. Además, estos hallazgos atraerían la atención sobre la relevancia del núcleo celular y sus elementos constituyentes en los eventos de la división celular. Sin embargo, la comprensión de este fenómeno requería de un conocimiento más elaborado, que solo sería posible con el desarrollo de las bases técnicas que se han descrito anteriormente, como se verá en los siguientes párrafos, se siguen las discusiones realizadas por William Coleman (1965), quien ilustra en su trabajo el desarrollo historiográfico de los hechos que permitieron establecer la importancia del núcleo celular en los eventos hereditarios.

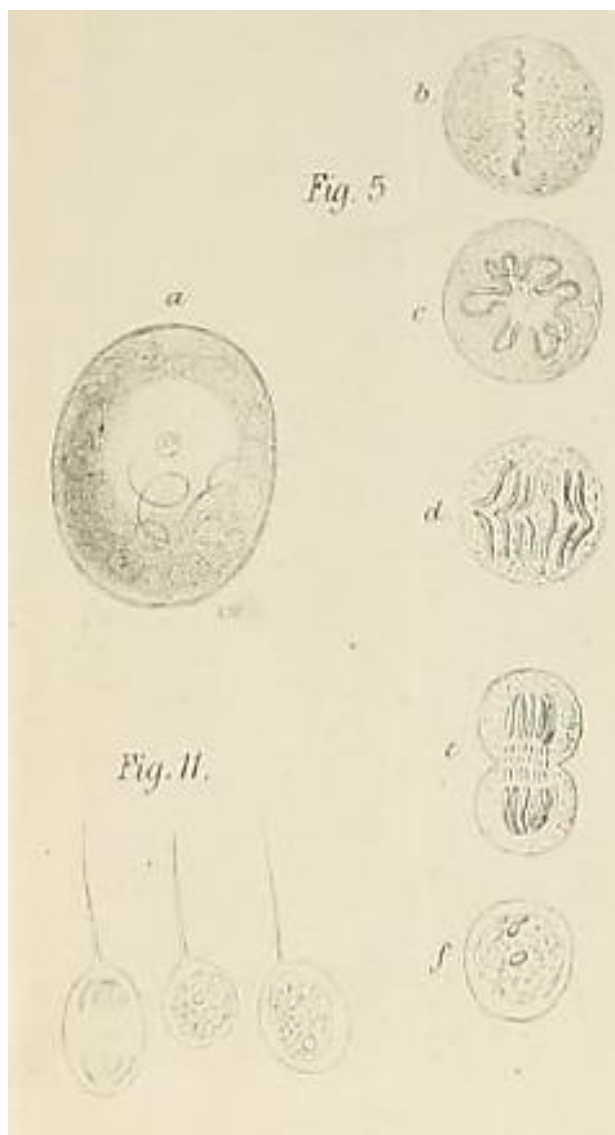
Las primeras observaciones sobre los componentes nucleares se realizaron sobre muestras fijadas, pero no coloreadas que, siguiendo a Coleman (1965), admitieron dos

sucesos; el reconocimiento de estructuras fibrilares en el núcleo que se describían como *puntos brillantes o puntos refractivos* y mostraban un comportamiento de aglomeración, alineación y división sin seguir un patrón o mecanismo claro, y que, simultáneamente, durante la división, el núcleo manifiesta un ciclo de desaparición-reaparición en las células descendientes. Uno de los primeros trabajos que darían cuenta de observaciones en relación con los componentes nucleares, fue el de C. Fromann en 1865, observando células de la médula espinal, epitelio y tejido conectivo, quien describe “verdaderas estructuras nucleares” que se distinguen como *granos, hilos y madejas* (Coleman, 1965). Entre los trabajos que ayudaron a generalizar la idea de que el núcleo celular desaparecía y reaparecía durante la división celular, fue el ilustrado por L. Auerbach en su obra de 1874, en la que detalla de manera notable este ciclo.

La confusión introducida por esta idea de la desaparición-reaparición del núcleo empieza a ser controvertida por los trabajos publicados por A. Schneider en 1873 (Figura 8 ), observando óvulos del gusano plano *Mesostomum ehrenbergii*, tomó muestras fijadas, pero no coloreadas y describió, aunque de manera equívoca, los eventos de la fecundación, observó que “el grano se transforma en hilos finos y rizados que se hacen visibles con la adición de ácido acético” (Schneider, 1873, en Coleman 1965: 131). De estos hilos, surgen fibras más densas, que se tornan color rosa y se orientan en el *plano ecuatorial* del óvulo, formando una figura regular de división. Schneider, describía entonces la etapa intermedia de la mitosis (la *metakinesis* de Flemming y la *metafase* de Strasburger). Finalmente, dos nuevos núcleos se forman en cada uno de los polos del óvulo y se produce una división de la célula entre estos.

**Figura 8.**

Proceso de segmentación; ilustración por A. Schneider.



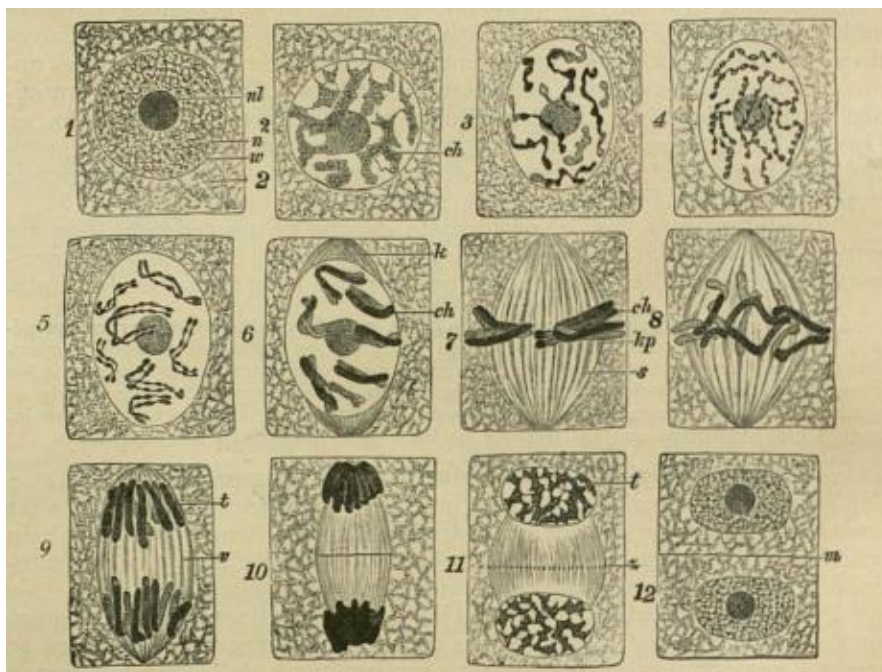
Nota. Tomado de *Untersuchungen über Plathelminshbhen*, por F.A. Schneider, 1873, p. 85.

Schneider reconoce la importancia de sus descubrimientos cuando sus observaciones le permiten afirmar que la división nuclear está determinada por etapas bien definidas, lo que lo llevó a convencerse de que el núcleo en ningún momento desaparece durante la vida normal de una célula, esto es, que la división del núcleo mantiene su continuidad, “la división nuclear era la *metamorfosis*, no la pérdida y recreación de un componente celular persistente” (Schneider, 1873 en Coleman, 1965:131). Aunque Schneider no extendió sus observaciones a otros organismos, había investigadores con intereses equivalentes estudiando fenómenos celulares similares. Los experimentos de Bütschli sobre el nematodo *Cucullanus*, moluscos y los infusorios, y las de van Beneden en células de conejo revelaron que este proceso ocurría en los principales grupos animales. En sus investigaciones también describieron el patrón general de la mitosis; la formación de hilos acromáticos; ubicados como conos unidos por sus bases de forma perpendicular al plano ecuatorial de la célula, la aparición en este plano de los ya familiares *bastones* fuertemente coloreados; y la división de la masa ecuatorial que produce los dos núcleos hijos (Coleman, 1965).

Por otra parte, en 1875, Eduard Strasburger, convencido de la división celular directa, reporta, con cierta reserva, la ocurrencia de la secuencia de estas mismas etapas en otras formas de vida, especialmente en varias especies de plantas, como dejan ver las ilustraciones de la figura 9. De acuerdo con Coleman (1965), habría descrito los pasos de la división celular, pero consideraba que el aspecto central de la mitosis era la repartición estrictamente cuantitativa de las masas nucleares, introduciendo lo que después sería considerado como un error mayúsculo, pues creía que estas masas, alineadas en el plano ecuatorial sufrían una división brusca y de forma transversal.

**Figura 9.**

*Estadios de la partición del núcleo. Ilustraciones por E. Strasburger.*



*Nota. Tomado de Tratado de Botánica, por E. Strasburger [Ilustración], 1923 [1875], p. 20.*

Los estudios que inicia Walter Flemming en 1878 empezarán a corregir estas inexactitudes, las masas nucleares que menciona Strasburger se refieren a los elementos del núcleo que reaccionaban fuertemente a las tinciones (usando en primer lugar carmín, luego hematoxilina y una vasta serie de tintes sintéticos derivados de la anilina, principalmente fucsina). Debido a la afinidad por las tinciones, Flemming introduce el término *cromatina*, refiriéndose, por supuesto, a estos cuerpos bien coloreados dentro del núcleo en 1879. Casi una década después y con los avances en la resolución sobre la observación del núcleo y sus constituyentes, se pudo determinar que estas masas, eran cuerpos que presentaban cierta individualidad; H.W.G Waldeyer, en 1888 introduce el término *cromosoma* (Coleman, 1965).

Si la descripción de cromosoma corresponde, según Coleman (1965), con los cuerpos que se encuentran en el núcleo celular, entonces las primeras observaciones ya se habrían realizado por C. von Nägeli en 1842, y desde entonces se habrían hecho reportes suficientes

acerca de estos cuerpos, figuras como C. B. Reichert, W. Hofmaister, J. Henle e incluso el mismo R. Virchow estarían relacionados con los hallazgos de estas estructuras. Sin embargo, los cromosomas permanecieron sin ser nombrados, totalmente incomprendidos y en general, habían atraído poca atención. No sería, sino hasta la publicación del trabajo de A. Kowalevsky en 1871, en la que enseña las imágenes de sus preparaciones en ácido crómico de los núcleos de células del anélido *Rhyncelmis*, en la que se observan grupos de cromosomas con regularidad. Estas observaciones serían confirmadas en las investigaciones de Strasburger (1875), de Bütschli (1876), van Beneden (entre 1880 y 1883) y, en las que de manera incontrovertible establecen la persistencia de estos elementos nucleares, formados, sin duda, por la sustancia que Richard Hertwig (hermano menor de Oscar Hertwig) describía en 1876 como informe y albuminoide; la cromatina.

Las investigaciones que W. Flemming llevó a cabo entre 1878 y 1882, demostraron las conclusiones definitivas sobre la distribución equitativa de las unidades hereditarias. Los estudios sobre las células epiteliales de *Salamandra maculosa*<sup>23</sup> le permitieron la descripción exacta de las transformaciones que mostraban los constituyentes nucleares —los cromosomas—en el paso de una generación a la siguiente (de una célula progenitora a las hijas) (Coleman, 1965). Pudo establecer el orden con que estos eventos ocurrían, desde la fase de “reposo” en la que la cromatina es difusa y apenas se colorea, de la que posteriormente surge una estructura fuertemente coloreada y en forma de tirabuzón (el *espirema*). Este, luego se ubica en el plano ecuatorial celular (metafase), que se divide (anafase) en un número frecuentemente característico de piezas, hasta que se produce la separación del núcleo madre en dos (el *dispirema*), donde, en cada uno se agrupa un conjunto de fragmentos nucleares, terminando así con la etapa de reposo de los núcleos hijos (Figura 10) (Walczak, C., Cai, S. &

---

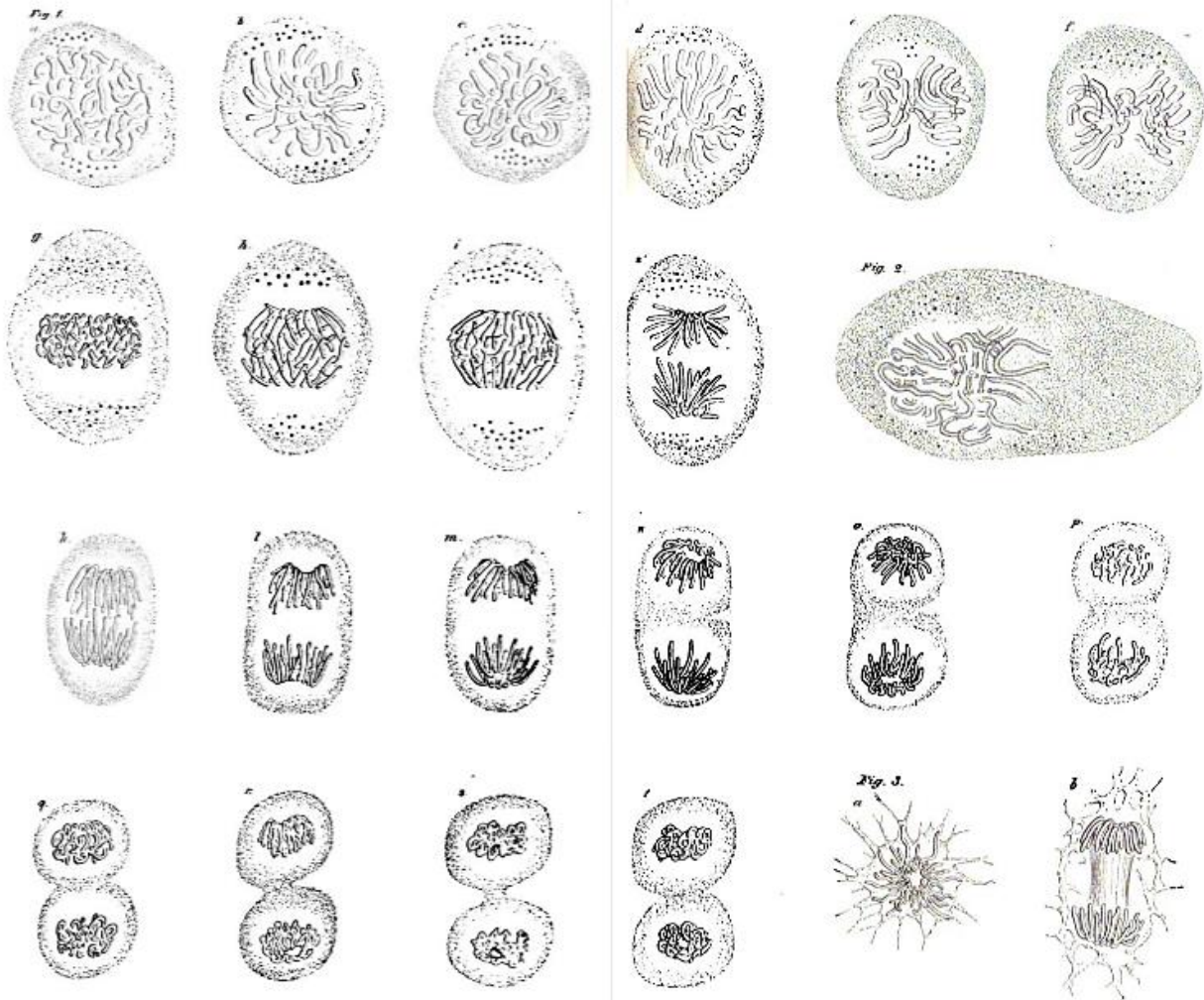
<sup>23</sup> Mostraron una gran ventaja por ser aplanadas, tener grandes núcleos (en comparación con el citoplasma) y ser ricas en cromatina y muy susceptibles a la fijación y la tinción.

Khodjakov, A., 2010). De esta manera, Flemming, no solo describía con detalle las etapas de la mitosis, sino que demostraba la continuidad del núcleo y sus constituyentes durante su división.

**Figura 10.**

*Serie de ilustraciones de Walther Flemming sobre la división celular en larva de salamandra.*

*Preparados con ácido cromoacético.*



*Nota. Tomado de ZELLSUBSTANZ, KERN UND ZELLTHEILUNG, por W. Flemming*

*[Ilustración], 1882, p. 445.*

Además, las contribuciones de Flemming a la comprensión del comportamiento de los cromosomas no solo estarían dados por la descripción de las etapas de la mitosis, sino que se constituirían cinco conclusiones definitivas. Interpretando los hechos expuestos por Coleman, (1965). A partir de sus observaciones pudo demostrar, primero, que los elementos nucleares en la célula madre que se alinean en el plano ecuatorial eran dobles, como si cada elemento de un par hubiera sido dividido longitudinalmente, lo que demostró siguiendo cuidadosamente el rumbo de cada uno de los elementos en su división en anafase. Que la repartición de estos elementos era exacta, pues un miembro de cada par se dirigía a uno de los núcleos de las células hijas, mientras que el otro miembro se dirigía al segundo núcleo. Que a causa de su origen similar y debido a la división longitudinal (¡y no transversal!) de un elemento progenitor, el par de elementos resultantes eran muy parecidos, si no exactamente iguales, así los núcleos de las células hijas poseerían un elemento de cada par. Que en las células del cuerpo de todos los vertebrados sólo podrían provenir de células y núcleos preexistentes y esto siempre por medio de división mitótica. Y que, finalmente, Strasburger en 1884, abandonara su escepticismo sobre la división celular indirecta y se añadiera a la evidencia mostrada por Flemming sobre la continuidad del núcleo y de su papel como portador de los elementos de la herencia.

Así quedaba demostrado que, normalmente, la forma de división nuclear es por medio de la mitosis, las células del cuerpo de un organismo y, específicamente, sus núcleos, están [genéticamente] relacionados. Sin embargo, un razonamiento simple, pero potente, pondría una gran inquietud sobre la mesa de discusiones; si se mira en retrospectiva, la cantidad de núcleos idénticos, los límites de su origen se van haciendo más estrechos, hasta llegar, finalmente, al estadio más temprano del desarrollo de un organismo; el óvulo fecundado. La primera célula en la historia biológica de un organismo que no es resultado de la división de un núcleo preexistente, entonces ¿cuál es el origen de ese núcleo? Algunos sospechaban que el cigoto o *núcleo de división* resultaba de la fusión de dos núcleos, a través de la fecundación, sin

embargo, sobre este evento había más incertidumbres que certezas. En este contexto, aunque la mitosis garantizaba la transmisión de la sustancia hereditaria entre las sucesivas generaciones de células dentro de un mismo organismo, aún no se comprendían los mecanismos que permitían su transferencia de una generación a otra en términos reproductivos.

Sobre este panorama se discute ahora la segunda condición teórica; **la fertilización o la unión de los núcleos en la formación del cigoto**. Las primeras explicaciones sobre la fecundación, afirma Coleman (1965) acudieron a la analogía de la interacción físico-química entre sustancias, idea que fuera planteada por J. von Liebig y extendida por Kölliker y T.L.W. Bischoff; que sin poder observar la penetración del espermatozoide en el óvulo, defendieron la idea de que la fecundación ocurría como resultado de la interacción química entre estos, y en consecuencia dependía básicamente de la agitación molecular inducida por su cercanía llevada a cabo por movimientos moleculares internos e indetectables.

Las primeras décadas del siglo XIX estarían influenciadas por discusiones que se habían dado ya en los dos siglos anteriores, aunque en este punto ya se conocían los elementos que interactuaban durante la fecundación, el líquido *fecundante* que proviene del macho y el óvulo que proviene de la hembra (Giordan et al., 1988). Observaciones que ya se habían llevado a cabo incluso en el siglo anterior, por ejemplo, las que Spallanzani (en los años 1780) había realizado, de las que pudo concluir que el líquido seminal debía mantener acceso directo al óvulo para consumar la fecundación, y que la restricción de este equivalía a que la fecundación no fuera lograda. Fue un ovista convencido, no atribuyó, sin embargo, el carácter fecundativo a los espermatozoides, sino al líquido en el que estos se encuentran. (Coleman, 1965).

J.L. Prévost y J. B. Dumas, realizaron, hacia, los años veinte del siglo XIX, experimentos similares, sino iguales, a los que ya Spallanzani había realizado, tomando los mismos hechos para la formulación de un nuevo modelo (Giordan et al., 1988). Poniendo de manifiesto que las

sustancias en contacto durante la fecundación ya no son elementos desconocidos, sino que bien es sabido que el líquido seminal se produce en los testículos del macho y el óvulo construido en el ovario de la hembra. Demostraron que los espermatozoides actuaban como agente activo durante la fecundación, y que el líquido seminal en el que se encuentran desempeña un papel pasivo o vehicular para los espermatozoides. Además, los aportes de sus investigaciones llevan a poner el interés sobre la naturaleza del óvulo, a partir de la segmentación que observan en los óvulos de rana después que han entrado en contacto con el líquido espermático. Evento que significó una fuerte influencia para el desarrollo de la teoría celular de Schwann. Así, suponen que esta división es el criterio para dar cuenta que la fecundación fue llevada a cabo con éxito, sugiriendo que la generación de un nuevo individuo tiene su origen en la unión del óvulo con el espermatozoide.

Los años siguientes a los estudios de Prévost y Dumas, dan cuenta de un aumento en los estudios que tenían como base técnica la fecundación artificial, por ejemplo, la confirmación de la segmentación del huevo en los peces que elaboraría Rusconi, en los huevos de rana por Bischoff, en los óvulos de conejo por Bischoff y Meissner, trabajos que se realizarían el periodo comprendido entre 1824 y 1837 (Giordan et al. 1988). Esta tendencia experimental consiguió que, en 1843, M. Barry registrara la presencia del espermatozoide en el interior del óvulo y se diera cuenta que la yema y no la capa vitelina iniciara su desarrollo. Pese a estas observaciones su trabajo no representó en el momento mucho interés, ni motivó gran discusión. George Newport (en 1851), prosiguió estos trabajos, y en una serie de destacadas monografías sobre la generación de tejidos y partes corporales en ranas, “demuestra” que la entrada del espermatozoide al óvulo es la condición. Aunque, tanto Barry como Newport, observaron que el espermatozoide se encontraba dentro del óvulo, no pudieron atestiguar la penetración del primero en el segundo, ni deducir cuál era el efecto del espermatozoide al interior del núcleo. Estos descubrimientos terminaron por convencer a Bischoff, hacia 1954 (quien defendía inicialmente la idea de la fecundación por la influencia del esperma sobre el

óvulo), de que el contacto entre el óvulo y el espermatozoide en la fecundación era indiscutible (Coleman, 1965).

En el desarrollo de la comprensión de la fecundación persistían varios obstáculos epistemológicos que, aunque no constituyen el eje central de la discusión que aquí se plantea, vale la pena mencionarlos. Uno de ellos se relaciona con el hecho de que en la comunidad científica a mediados del siglo XIX aún no se lograba consenso entre las teorías de la fecundación por estimulación o activación y las teorías de la fecundación por contacto. Por otra parte, aunque los estudios mantenían cierto acuerdo en la interacción de los óvulos y espermatozoides en la fecundación, las controversias se concentraban en torno al papel que cada uno de estos desempeñaba, quedaría en el ambiente la duda sobre si las ideas al respecto carecían de fundamento empírico suficiente o si, por el contrario, estas eran resistidas por las fuertes convicciones arraigadas del ovismo y preformacionismo, que aún permeaban algunos sectores científicos (Giordan et. al. 1988).

Un evento que empezaría a menguar disparidades estaría fundamentado en la idea de que, para completar el ciclo generacional entre las células, era necesario establecer el origen del óvulo y el espermatozoide en los tejidos de un organismo (Coleman, 1965). El estudio y comprensión de la mitosis demostró la continuidad del núcleo celular desde la primera célula, es decir, el óvulo fecundado hasta su forma final, lo que supuso, entonces, que la fecundación implicaba la unión del óvulo y el espermatozoide, derivados celulares de los organismos. A. von Kölliker, en 1841, precisamente, describió la derivación de los espermatozoides de los tejidos del órgano masculino en su tratado sobre la espermatogénesis que recoge las observaciones que realizó en una gran variedad de especies de crustáceos y otros invertebrados del Mar del Norte. De este tratado se pueden expresar, de manera condensada, sus aportes como sigue; que los espermatozoides son células individuales con una estructura específica, que derivan de otras células por división y estas células son la parte verdaderamente fecundadora del esperma (Coleman, 1965).

Un avance decisivo hacia la comprensión de la fecundación estuvo dado por los estudios realizados por Oscar Hertwig, de los que presentaría sus conclusiones hacia 1877. Influenciado en gran medida por los trabajos de L. Auerbach, que prestaban atención al núcleo celular, especialmente durante los eventos de la fecundación (Giordan et al., 1988). Las observaciones de este último fueron realizadas sobre muestras no coloreadas extraídas de los nemátodos *Ascaris nigrovenosa* y *Strongylus auricular*. Describió la secuencia de eventos que siempre ocurrían después de la fecundación; dentro del huevo siempre aparecían dos núcleos que se acercaban uno al otro y finalmente se fusionaban. El núcleo resultante disminuía su tamaño, luego se alargaba, tomando una forma de mancuerna, ancho hacia ambos extremos y unidos por una “cintura” angosta. En los extremos redondeados aparecían “rayos”, que parecían penetrar en el protoplasma. El núcleo luego desaparecía disolviéndose en el protoplasma. El antiguo núcleo, de pronto era invisible, la masa vitelina comenzaba a fragmentarse y, momentos después, aparecían dos nuevos núcleos, uno en cada una de las nuevas células o blastómeros (Auerbach, 1874). La descripción de Auerbach mostraba la idea de la desaparición-reaparición nuclear, no obstante, destaca un descubrimiento sustancial, la presencia de un segundo núcleo<sup>24</sup> en el óvulo fecundado al que atribuyó como una división del núcleo del óvulo y no estableció ninguna relación con la calidad celular del espermatozoide y su núcleo.

Hertwig en 1875 encuentra (entre las investigaciones que adelantaba sobre la fauna del Mar mediterráneo en la Riviera francesa) un organismo modelo excepcionalmente adecuado para realizar sus observaciones; el erizo de mar *Toxopneustes lividus* (Coleman, 1965). Organismo que ofreció muchas ventajas experimentales. Era relativamente fácil de encontrar, y al ser una especie dioica con madurez sexual prolongada durante gran parte del año, facilitaba la recolección continua de los óvulos y espermatozoides lo que hacía que la fertilización

---

<sup>24</sup> Etapa que ya había sido brevemente descrita por Bütschli y Schnieder.

artificial se llevara a cabo con cierta facilidad. En cuanto a los óvulos, eran células pequeñas que carecían de una membrana muy densa y una yema suavemente dividida, lo que hacía que se mantuvieran traslúcidas incluso a grandes magnificaciones. Por último, tanto los óvulos como los espermatozoides eran viables en agua de mar preparada en el laboratorio y mostraban una gran ventaja para su fijación y tinción.

Procedimentalmente, la fertilización en el laboratorio se llevaba a cabo agregando espermatozoides a una suspensión de agua de mar y óvulos en maduración, se dejaban siempre quince minutos antes de tomar las muestras (a veces entre cinco y diez minutos). Tiempo en el que Hertwig pudo detectar el conocido inicio de la división celular indirecta, observando previamente la condición binuclear dentro del óvulo.

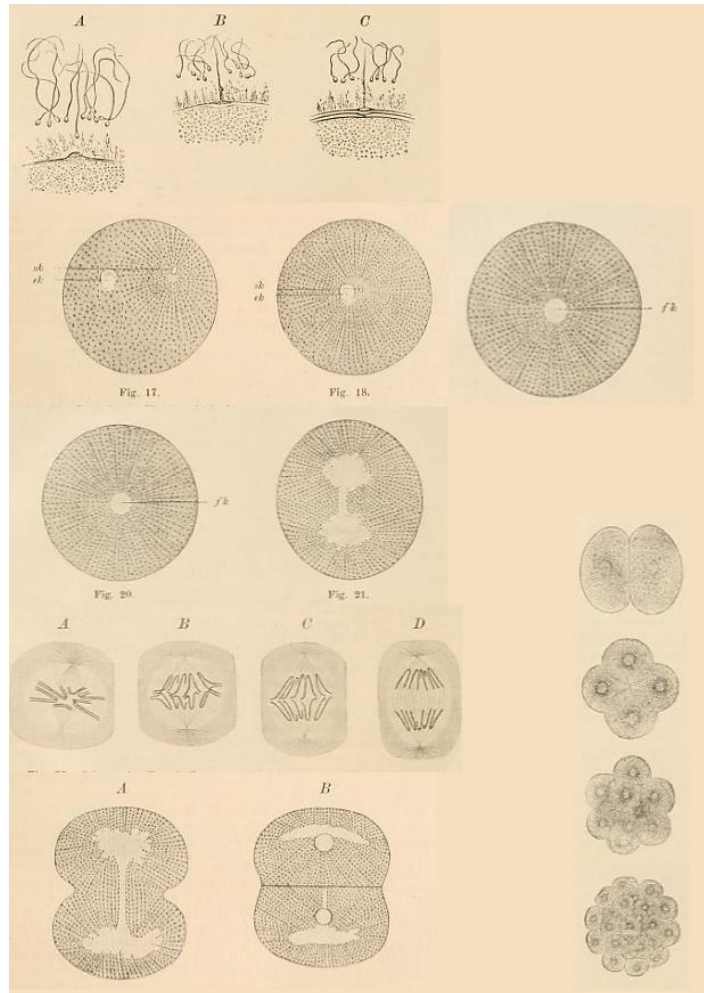
Las observaciones de Hertwig se registran de la siguiente forma

1) que unos minutos después de haber mezclado esperma con los huevos maduros, aparece la cabeza del espermatozoide en la capa cortical del vitelo, rodeada de una irradiación protoplasmática, y se transforma en un pequeño corpúsculo que llamaré núcleo espermático; 2) que unos minutos más tarde se observa la copulación del núcleo espermático; 3) que por lo común solo interviene en la fecundación un espermatozoide, mientras que en los huevos patológicos pueden penetrar varios. A partir de este momento, puedo formular esta idea: que la fecundación se basa en la fusión de dos núcleos celulares. (Hertwig, 1876 en Giordan et al. 1988, p. 82)

Las observaciones realizadas se describen como la migración de un núcleo hacia el otro hasta entrar en contacto (como muestra la figura 11), para fusionarse por completo, este, afirmaba Hertwig, es el momento de la fecundación; dos núcleos se unen para producir el nuevo núcleo de una nueva generación; "El núcleo simple presente en el óvulo inmediatamente antes de la segmentación, alrededor del cual se disponen en radios los gránulos vitelinos, se origina a partir de la cópula de dos núcleos." (Hertwig, 1876 en Giordan et al. 1988).

**Figura 11.**

*Serie de ilustraciones por O. Hertwig. Penetración espermática; Fecundación; División del material nuclear, Primeras etapas de escisión.*



*Nota.* Tomado y adaptado de LEHRBUCH DER ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DES MENSCHEN UND ÜEß WIRBELTUIERE, por Oscar Hertwig (1888), Pp. 32-34, 40-42.

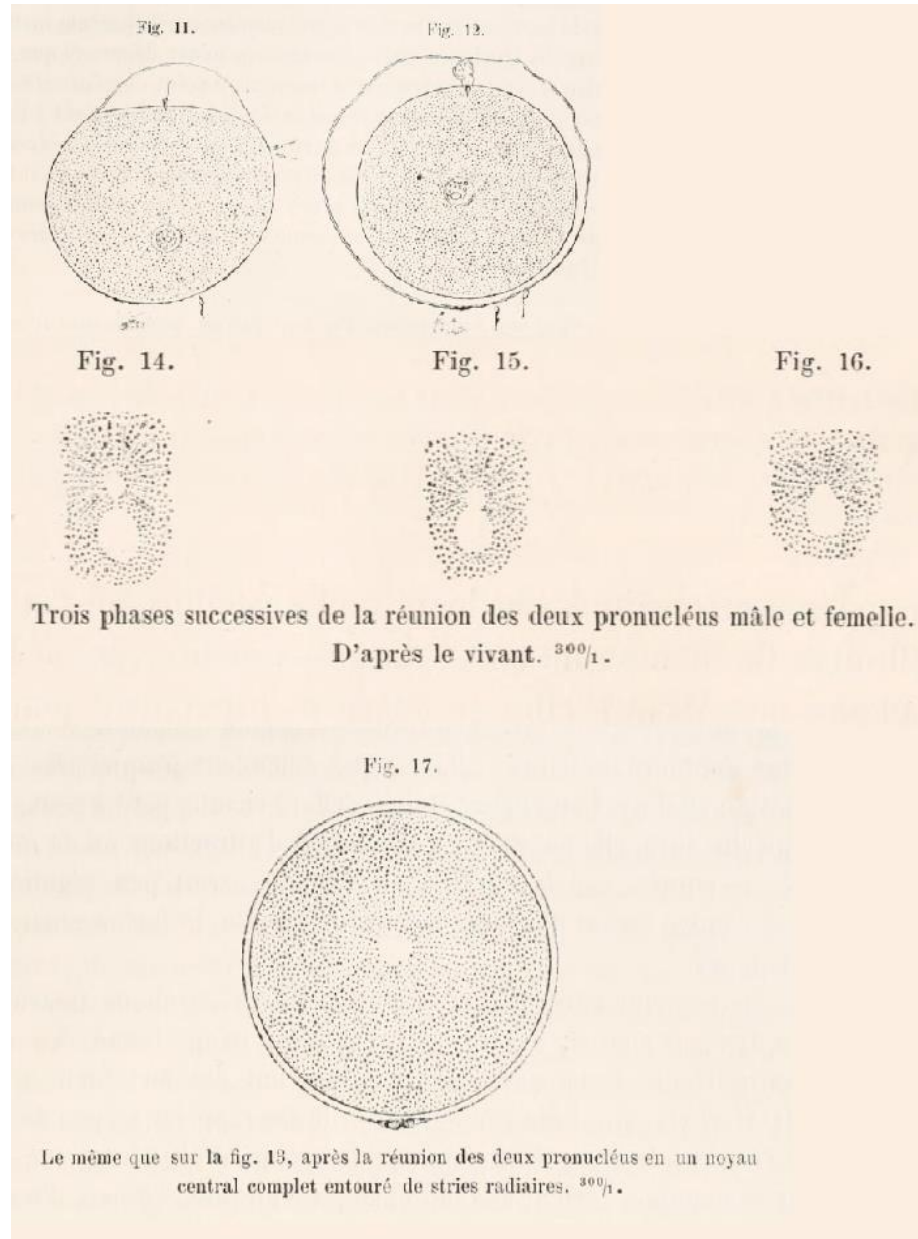
A meses de la publicación de los trabajos de Hertwig, surgieron nuevas observaciones que, paradójicamente, confirmaban sus postulados, incluso por algunos detractores que la habían puesto en duda. Entre ellos, E. van Beneden, que a pesar de su inicial rechazo a las ideas de Hertwig, termina confirmando que, en los mamíferos, el núcleo de segmentación deriva de la fusión de dos núcleos (Giordan, et al. 1988). Por su parte, Hermann Fol, en 1879, presenta, en sus propias palabras, “la prueba directa” de la penetración del espermatozoide en el óvulo. Según sus observaciones, cuando el espermatozoide atraviesa la membrana del óvulo, produce un punto brillante, que se puede rastrear hasta el centro del óvulo (Figura 12). Fol describe que el óvulo muestra afinidad por el primer espermatozoide que alcanza su superficie, presentando una ligera protuberancia (cono de fertilización). A continuación, la cola del espermatozoide se ralentiza, su cuerpo se elonga y se hace más difuso, finalmente es observado dentro del núcleo. Este pronúcleo masculino, cruza el vitelo para fusionarse con el pronúcleo femenino. De la fusión de estos dos pronúcleos resulta el núcleo del óvulo que iniciará la segmentación celular (Fol, 1879 en Coleman, 1965).

Las observaciones realizadas por Fol, van Beneden y quizás más de veinte figuras reconocidas, reforzaron las conclusiones a las que llegó Hertwig, en diferentes grupos biológicos animales. Los estudios de Strasburger y Gignard, no solo refuerzan, sino que amplían su teoría al demostrar que los eventos de la fecundación acontecen de modo idéntico en las plantas (Giordan et al. 1988).

Todo este entramado de observaciones, experimentos, discusiones, contradicciones y controversias permitieron la consolidación de una idea esencial para el desarrollo de la genética; que el núcleo celular es el portador del material hereditario. La evidencia de que la fusión de los pronúcleos femenino y masculino formaban un nuevo núcleo común implicaba que la continuidad entre generaciones no dependía de todo el agregado celular, sino que recaía específicamente en la composición nuclear.

**Figura 12.**

*Ilustraciones de la fecundación de Hermann Fol. Entrada del espermatozoide y pérdida del flagelo; Migración y unión de los pronúcleos femenino y masculino; Fecundación.*



*Nota.* Tomado y adaptado de Recherches sur la fécondation et le commencement de l'hénogénie chez divers animaux, por Hermann Fol (1879), Pp. 103, 106, 107.

En este contexto, no parece descabellado, entonces, que se llegara a considerar al núcleo como la unidad de transmisión hereditaria, idea que sin duda alguna derivó en investigaciones sobre su contenido interno. El núcleo ya no sería únicamente objeto de los estudios del desarrollo embrionario, sino de la información hereditaria en sentido estricto, la herencia, ya no dependía de sustancias quiméricas, difusas o vitalistas, sino que estaba en una entidad organizada y reproducible; el núcleo celular. Ahora la noción de cromosoma empezaba a constituirse como el soporte de la herencia.

El desarrollo de la **teoría cromosómica de la herencia por Sutton y Boveri** (aquí, la tercera condición teórica) pudo tener lugar por la convergencia de diferentes estudios y observaciones alrededor de la reproducción celular, el desarrollo embrionario y, ciertamente el interés por comprender los mecanismos de la herencia. La atención ahora estaría centrada en las estructuras internas del núcleo celular, los cromosomas. En este contexto, se hace énfasis en los trabajos de Theodor Boveri y Walter Sutton que fueron decisivos para comprender el comportamiento de los cromosomas durante las formas de división celular, y proponer la base física que sustentaría los principios propuestos por Mendel.

Por una parte, Theodor Boveri y su esposa Marcella O' Grady se vieron profundamente influenciados por el auge de las investigaciones en embriología, citología y, particularmente, por el redescubrimiento de las leyes de Mendel. Su interés se concentró en la interacción entre los cromosomas y el citoplasma con el fin de comprender su importancia para la fecundación, el desarrollo embrionario y la herencia. Distanciándose de los modelos experimentales tradicionales, diseñaron un sofisticado proceder metodológico que les permitió introducir delicadas desviaciones a los procesos de fecundación y división celular que pudieron comparar con observaciones en condiciones fisiológicas. Por la naturaleza de los experimentos de los esposos Boveri, a menudo se les ha reconocido como los primeros *ingenieros genéticos*. Sus

resultados también fueron destacados por la calidad observacional con la que fueron documentados<sup>25</sup> (Satzinger, 2008).

Los experimentos del matrimonio Boveri se realizaron con diferentes especies de erizos de mar y nemátodos del género *Ascaris* (*univalens* y *bivalens*)<sup>26</sup>. Los erizos de mar mostraban ventajas notables como organismos modelo: sus óvulos transparentes y pueden obtenerse en grandes cantidades —de miles a millones— lo que facilitaba la observación de la fecundación en condiciones normales y experimentales. Por su parte, los nemátodos tenían la ventaja de que sus células poseen uno y dos pares de cromosomas, respectivamente, lo que los hacía claramente visibles y distinguibles durante la división celular. No obstante, mostraban una limitación debido a que, durante la extracción de las células germinales del organismo fresco causaba reacciones alérgicas severas (Satzinger, 2008).

Establecer una relación entre los cromosomas y la herencia resultaba toda una dificultad para finales del siglo XIX, una idea que se antojaba incompatible, especialmente cuando genetistas como Wilhelm Johannsen descartaban los estudios citológicos por considerarlos inexactos, preferían, en ese sentido, la lógica del proceder mendeliano, los experimentos por hibridación y conteo de la progenie. Incluso entre citólogos habría controversias sobre la interpretación de esas pequeñas estructuras que solo se hacen visibles durante la división celular con ayuda de tinciones.

Pese al controversial escenario, T. Boveri, en 1885, emprende su desarrollo experimental, (a partir de 1896, junto a su esposa, Marcella). Sus primeras observaciones sobre la división celular siguen los trabajos de E. van Beneden. Con acceso a un microscopio de alta resolución pudo dar cuenta de los centrosomas (estructura que él mismo nombró) y del

---

<sup>25</sup> Boveri y su esposa tuvieron acceso al modelo de microscopio óptico Abbe - Zeiss que otorgó la mayor resolución y magnificación para su tiempo, el uso refinado de técnicas de corte, fijación y tinción además las excepcionales habilidades para el dibujo que mostraba el mismo Boveri.

<sup>26</sup> Erizos de mar de las especies *Parecentrotus lividus*, *Echinus microtuberculatus* y *Sphaerechunus granularis*. *Ascaris* (Actualmente *Parascharis univalens* y *Parascharis equorum*)

huso acromático, notó que ambos participaban durante la distribución cromosómica a las células hijas e identificó dos eventos independientes durante la división celular: La duplicación del centrosoma y la duplicación de los cromosomas (Moreno, 2024).

El trabajo experimental más complejo vendría con el intento de demostrar la relación entre los cromosomas y la herencia. Intentó extraer el núcleo de óvulos de rana y reemplazarlos con el núcleo de una especie de sapo, mediante el uso de una jeringuilla, esperando producir una célula viable, pero fracasó. Consideró que intervenir los núcleos de esta manera les provocaba mucho daño. Optó por transferir el núcleo de otra especie a un óvulo de erizo de mar enucleado, utilizando, hasta cierto punto, el proceso natural de fecundación (Satzinger, 2008).

La enucleación de los óvulos se conseguía por agitación, luego se fecundaban los fragmentos con espermatozoides de otra especie de erizo. Se sabía que estos fragmentos podían ser fecundados por espermatozoides de la misma especie, y que la única diferencia con el desarrollo normal era, que entre menor era el tamaño del óvulo enucleado, el tamaño de las larvas era menor. Boveri, entonces escoge dos especies de erizo de mar que mostraban claras diferencias morfológicas en el esqueleto calcificado de sus larvas y obtiene los resultados que había predicho; los óvulos enucleados se desarrollaban en larvas que mostraban las características del “padre”, mientras que de la fertilización controlada de óvulos completos con esperma de otra especie resultaban formas intermedias. Para muchos el experimento de Boveri es la prueba definitiva de que el núcleo celular y los cromosomas son los lugares donde se encuentra el material hereditario. Aunque el mismo Boveri, después de más de 25 años de experimentación, admite, que no podía estar seguro de que el material materno del óvulo enucleado se hubiera eliminado por completo (Satzinger, 2008).

Siguiendo los planteamientos de Weismann, que diferencia a las células somáticas de las células de la línea germinal<sup>27</sup>, Boveri observa en el desarrollo embrionario de *Ascaris megalocephala* que los cromosomas se transmiten inalterados dentro de las células de la línea germinal (figura 14), mientras que, en las primeras células somáticas estos se disgregan (figura 13). En 1899 publica los resultados de estas observaciones, incluyendo una elaborada representación visual, y sostiene que la fragmentación cromosómica es la prueba visual de la transmisión de los rasgos hereditarios en los cromosomas a las células somáticas (Baltzer, F., & Rudnick, D. (1967).

Hay otro problema por resolver ¿Existe una relación entre la morfología de los cromosomas y sus propiedades genéticas, como sugieren las leyes de Mendel? La solución vendría acompañada de un ingenioso diseño experimental realizado por los Boveri. Utilizando los erizos de mar, que tienen 36 cromosomas por célula, logran conseguir el desarrollo de las cuatro primeras células embrionarias (Giordan et al. 1988) y además consiguen por medio de la doble fecundación de los óvulos modificar la distribución de los cromosomas durante la división subsiguiente.

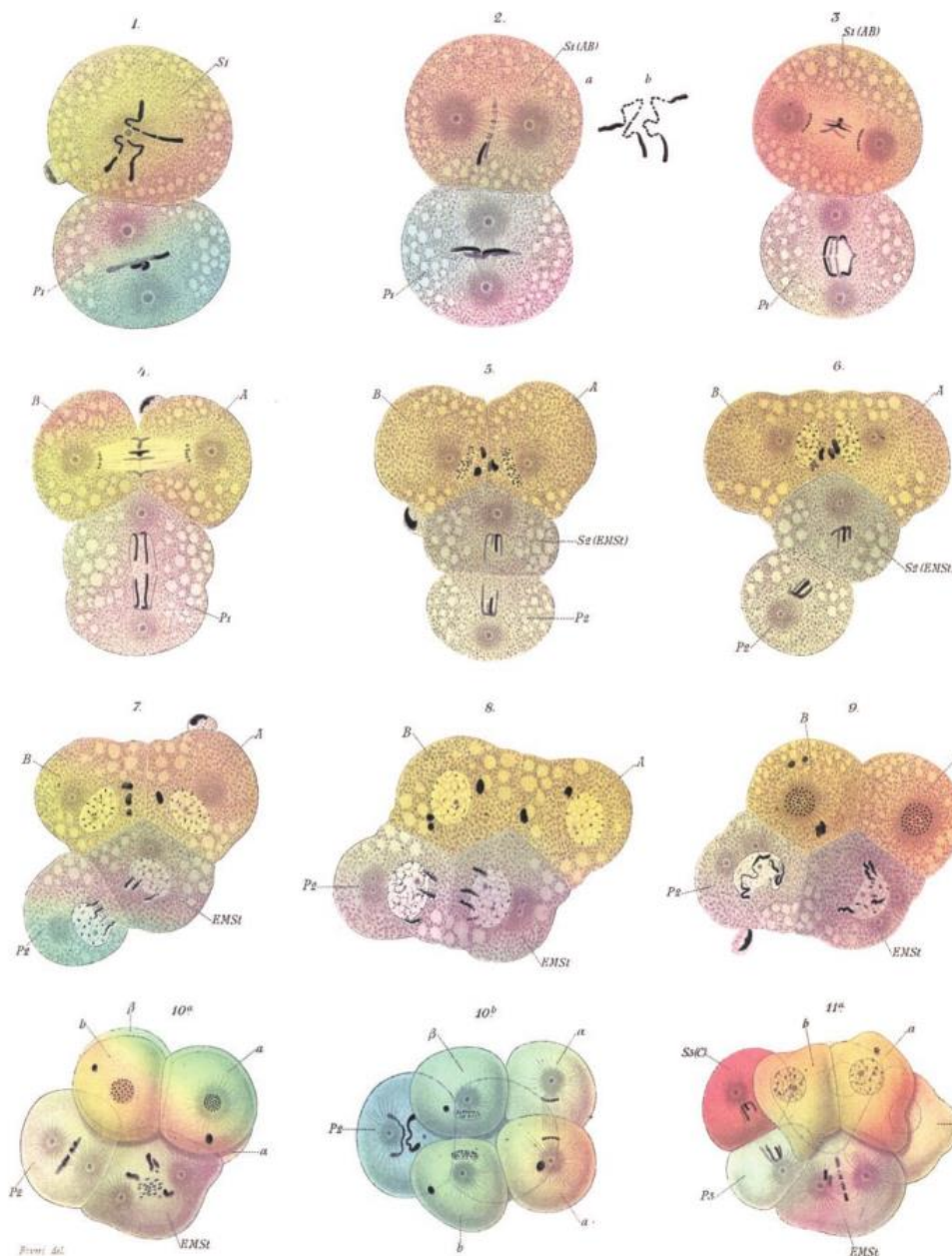
Cada óvulo fecundado iniciaba su desarrollo embrionario, como resultado, las células que no tenían el número normal de cromosomas derivaron en larvas que presentaban múltiples malformaciones (Figura 15). Finalmente, para inferir si cada cromosoma tenía alguna influencia en el desarrollo de las células, utilizaron un sistema de cálculo para determinar las posibles combinaciones de los 18 cromosomas (maternos y paternos) en las cuatro células posteriores a la primera división (Figura 15). En 1902, se publican los resultados en los que concluyeron, que cada cromosoma contenía una propiedad hereditaria específica para el organismo y que no era la cantidad total de cromatina lo que contaba (Satzinger, 2008)

---

<sup>27</sup> Afirmando que la totalidad de las características hereditarias se concentran en cada cromosoma.

**Figura 13.**

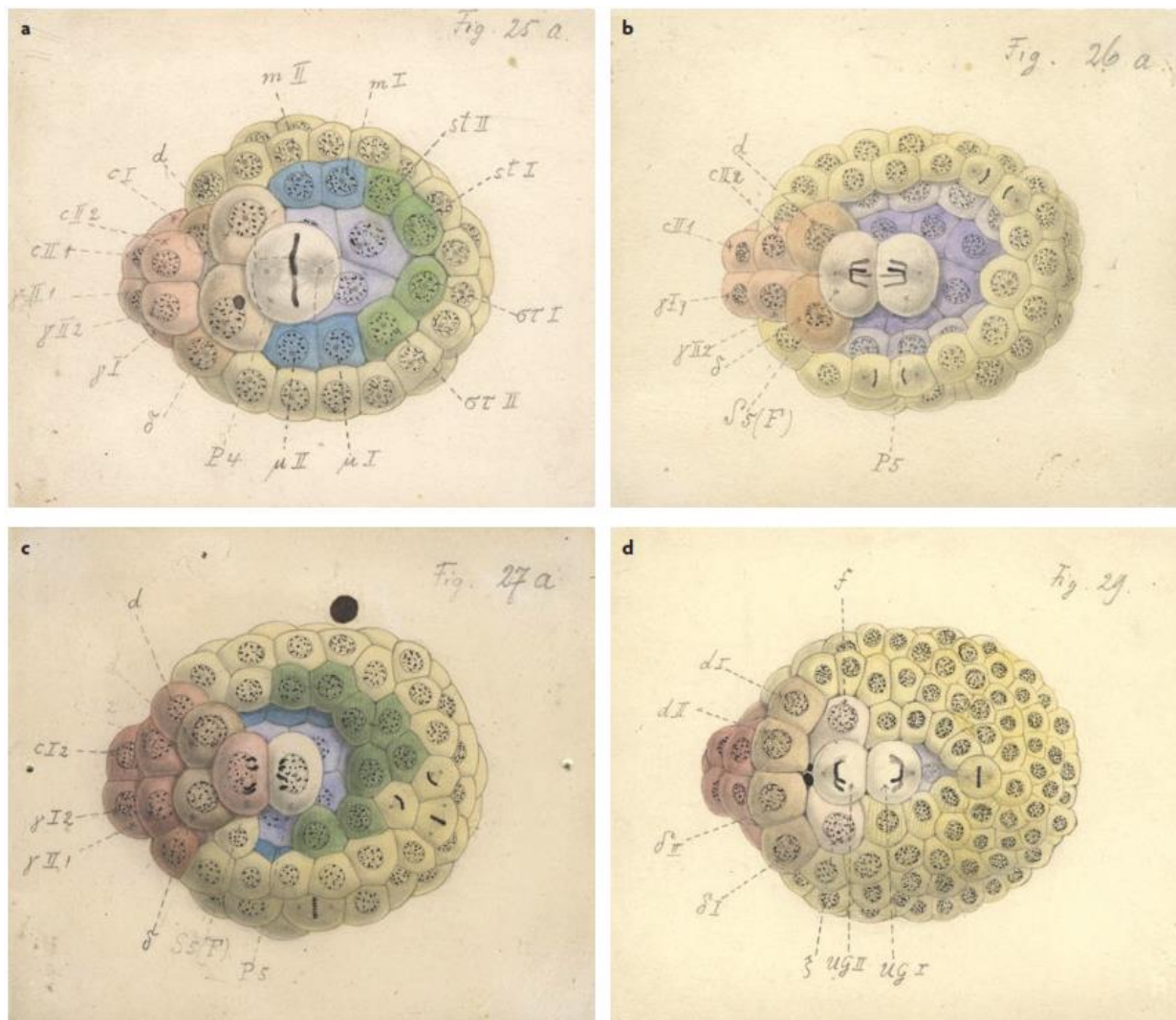
Ilustraciones de las observaciones de T. Boveri que muestran la disminución cromosómica en las primeras etapas de la división celular en *A. megaloccephala*.



Nota. Tomado de *Theodor and Marcella Boveri: chromosomes and cytoplasm in heredity and development*, por Satzinger, H. (2008), p. 234.

**Figura 14.**

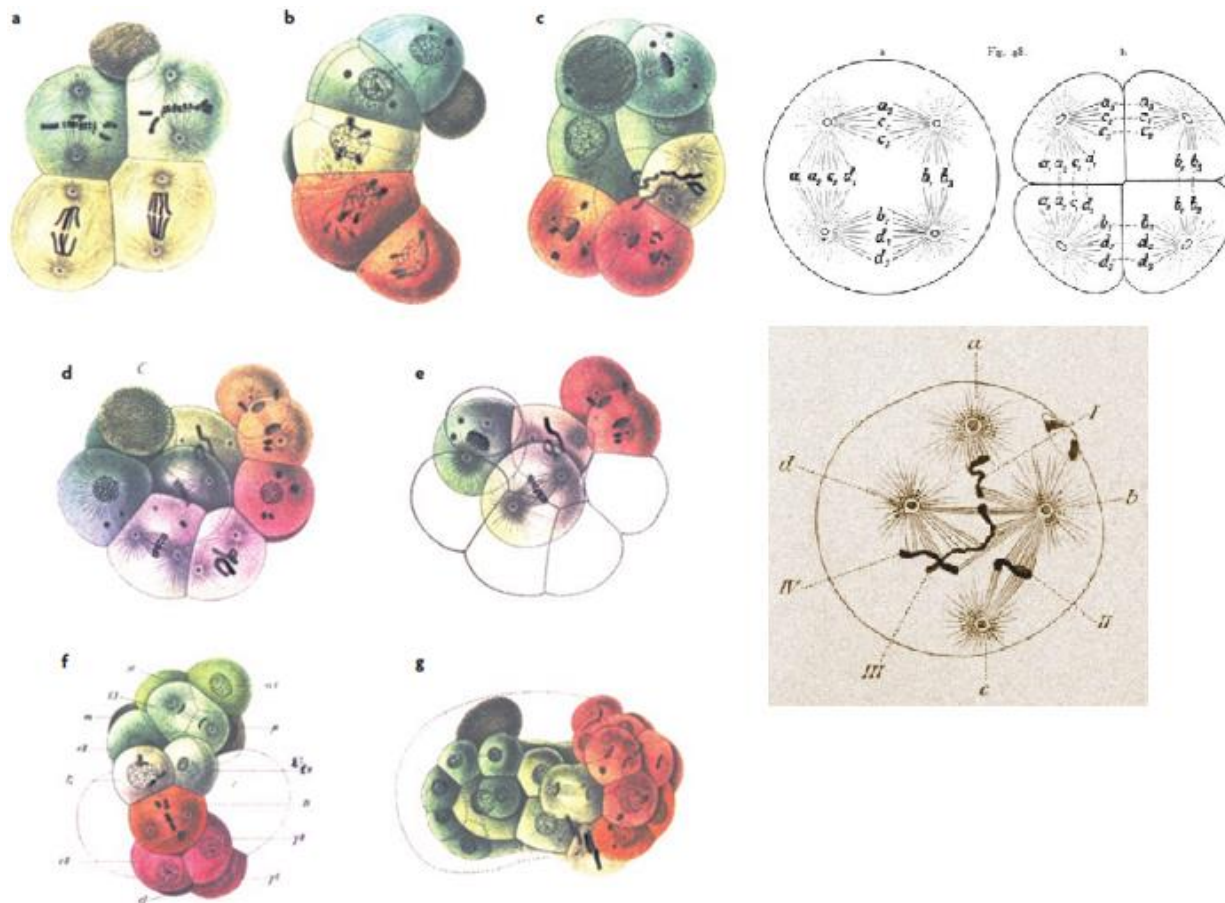
Ilustraciones de las observaciones de T. Boveri. En etapas avanzadas del desarrollo, el número de cromosomas se conserva.



Nota. Tomado de Theodor and Marcella Boveri: *chromosomes and cytoplasm in heredity and development*, por Satzinger, H. (2008), p.236.

**Figura 15.**

*Desarrollo embrionario en los erizos de mar durante las primeras etapas después de la intervención experimental.*



*Nota.* Tomado de *Ergebnisse über die Konstitution der chromatischen Substanz des Zellkerns*, por Boveri T. (1904), p. 46.

De forma casi simultánea, pero de manera totalmente independiente a las investigaciones de Boveri y su esposa, Marcella. Walter Sutton, llegaría a conclusiones, no sólo compatibles sino también similares a las propuestas por el citólogo alemán. Su famoso artículo *The chromosomes in heredity* inicia con las observaciones que había realizado sobre las células germinales de los saltamontes del género *Brachystola*<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> 1. El grupo cromosómico de las células germinales presinápticas se compone de dos series cromosómicas equivalentes, y que una de ellas es paterna y la otra materna. 2. El proceso de sinapsis

Sutton, (1903) realiza un análisis asignando los caracteres dominante y recesivo expuestos por Mendel a conjuntos de cromosomas en las células germinales maternas y paternas, y puede establecer que podría existir una correlación entre los cromosomas y los caracteres, en el sentido que una forma para un carácter puede estar en las células maternas que, al combinarse con las paternas, el resultado podría exhibir las probabilidades mendelianas. Sutton afirma entonces,

Si concluimos, a partir de la evidencia ya presentada, que la doble base de los caracteres híbridos se encuentra en los pares de cromosomas homólogos de las células germinales presinápticas, entonces también debemos concluir que, de igual manera, en las formas puras, la disposición pareada de los cromosomas indica una doble base para cada carácter. (Sutton, 1903, p. 238)

El trabajo de Sutton, siguiendo a Vicedo (1992), termina por corroborar tres proposiciones que ya se habían hecho antes de la publicación de sus estudios; la primera, que el conjunto completo de cromosomas se compone de dos arreglos procedentes, uno del padre, y el otro, de la madre. Segundo, que la sinapsis cromosómica consiste en la conjugación o apareamiento de los cromosomas maternos y paternos homólogos. Tercero, los cromosomas mantienen su individualidad morfológica y funcional a lo largo de la historia de vida.

Por otra parte, también afirma, que durante la división reductora los cromosomas se dividen aleatoriamente y no están sujetos a la naturaleza del origen materno o paterno, es decir, su distribución es equitativa pero independiente. Así, si se asume que las unidades hereditarias se encuentran en los cromosomas, el comportamiento de estas estructuras durante

---

(pseudorreducción) consiste en la unión por pares de los miembros homólogos (es decir, los que corresponden en tamaño) de las dos series 3. La primera mitosis postsináptica o de maduración es ecuacional (conservativa) y, por tanto, no da lugar a diferenciación cromosómica. 4. La segunda división postsináptica es una división reductora, que da lugar a la separación de los cromosomas que se habían conjugado en la sinapsis, y su distribución a diferentes células germinales. 5. Los cromosomas conservan una individualidad morfológica a lo largo de las distintas divisiones celulares

la división celular “se entendería como el mecanismo físico que se encuentra a la base de la ley mendeliana de la segregación” (Vicedo, 1992:119).

Con Sutton termina por consolidarse el germen de una teoría cromosómica de la herencia que se correlaciona con las proposiciones centrales del trabajo de Mendel, al asegurar que, si los genes, son parte de los cromosomas, entonces todos los alelos representados en un mismo cromosoma deben heredarse juntos (Vicedo, 1992).

Ahora bien, todos los avances y desarrollos en citología y la observación del núcleo celular y, en particular, de los cromosomas y su comportamiento durante la división celular, otorgaron el sustento material a los principios mendelianos. Los desarrollos citológicos ocurrieron al margen de los estudios por hibridación y estadísticos que revivieron las leyes mendelianas, en la discusión que aquí se lleva, la cuarta condición teórica; ***el auge del mendelismo***. De manera independiente, hacia 1900, Hugo de Vries, Carl Correns y Erich von Tschermak “redescubren” el trabajo de Mendel publicado en 1866 y no dudan en poner en conocimiento la importancia de lo registrado allí (Giordan et al., 1988).

Cada uno de ellos (Correns y Tschermak más cercanos), desarrollaba trabajos sobre hibridación en plantas, pero con enfoques un poco diferentes. Según Olby (1985) de Vries llevaba a cabo experimentos de hibridación sobre las plantas de maíz desde 1876, sin embargo, no pudo obtener resultados debido a las pésimas condiciones climáticas. Escribe en 1889 su obra en la que problematiza la necesidad de tratar las características de los organismos como entidades separadas en la herencia y la variación, en otras palabras, la obra en la que desarrolla su *pangénesis*. Posteriormente retoma el trabajo de hibridación, luego de una pausa en la que estudió los fenómenos osmóticos en las células vegetales.

La hibridación la realiza en las plantas *Silene alba* y *Silene alba* variedad glabra, de la que obtiene la descendencia en la segunda generación como resultado 536 plantas en total, de las que 392 son “velludas” y 144 lisas. Sus experimentos de hibridación se llevaron a cabo en más de treinta experiencias con plantas diferentes que arrojaron resultados en las proporciones

de la descendencia similares, de 3:1 y 9:3:31. Pudo concluir entonces, que estos resultados permitían sustentar su tesis de la combinación de sus unidades hereditarias. Cuando de Vries estuvo por publicar su artículo con los resultados obtenidos, un amigo suyo, al enterarse que estaba trabajando sobre hibridación, lleva un artículo, en el que un hibridador habría llegado a los mismos resultados tiempo atrás y que en este mismo había llegado a las conclusiones a las que de Vries exponía en su artículo. (Olby, 1985)

De otro lado, Correns, estudiaba los medios de propagación sexual en los musgos foliosos y Tschermak, trabajaba sobre intereses más agronómicos de mejora de plantas para la producción, que, con fines biológicos, evaluando el efecto de la producción de cultivos a partir de mezclas entre individuos de la misma variedad, y entre variedades diferentes (*in-and-out breeding*) (Olby, 1985).

Los trabajos de Mendel y en palabras de Giordan et al. (1988), las leyes allí expuestas, pronto atraerían atención y adeptos debido a su carácter fuertemente matemático y predictivo para los resultados de los experimentos por hibridación. Además, estos principios encajaban con el interés predominante en el momento y las controversias que se constituían, especialmente sobre el debate evolucionista alrededor de la continuidad de las especies.

La llegada del mendelismo sobre el inicio del siglo XX no sería sin un alto grado de resistencia, especialmente cuando la posición continuista de la evolución había ganado terreno. Uno de los aspectos que podría, entonces, sustentar el trabajo de Mendel es que la evolución no es continua, por el contrario, sucede a “saltos”, las nuevas especies aparecen por cambios “abruptos”, argumento que quedaba fortalecido en la formulación de *mutación* de Vries; considerada como una variación hereditaria brusca (Giordan et al., 1988).

Aunque el enfoque mutacionista inaugurado por de Vries hubiese sido ampliamente aceptado, según Giordan et al. (1988) para 1914 entraría en fuerte declive, especialmente con las evidencias que presenta Morgan en sus observaciones sobre *Drosophila melanogaster*, demostrando que ninguna mutación, por sí sola, es fuente para producir cambios de una

especie en otra. Actualmente, lo que de Vries sostenía como mutación es el producto de la segregación cromosómica en bucle y “contrariamente a lo que a menudo se sigue escribiendo en la actualidad, no son la fuente normal y general de variaciones y, aun menos, el proceso normal de formación de especies nuevas” (Giordan et al, 1988: 129).

Por otra parte, el mendelismo en sus años de apogeo (1900 a 1910) arroja una cantidad importante de experimentos que contribuyen a la validación de las leyes de Mendel, trayendo consigo un importante enriquecimiento de términos que permitieron aclarar algunas disputas conceptuales. De esta manera, por ejemplo, los términos *alelo*, *homocigoto* y *heterocigoto* tienen sentido explicativo en las observaciones de los fenómenos sobre el comportamiento de las características a lo largo de diversas generaciones (Vicedo, 1992). Términos que fueron introducidos por el investigador inglés Bateson, quien también designaría el término *genética*, para referirse al estudio de los fenómenos hereditarios (Giordan et al., 1988).

Las nociones de *dominancia* y *recesividad*, también se afinan respecto a la noción mendeliana original, en el sentido que no son únicas alternativas para las explicaciones en torno a los resultados de un procedimiento de hibridación. Correns, observa que en algunos organismos se manifiestan resultados que los hibridadores en el siglo XIX habían obtenido, el de un fenotipo intermedio entre los parentales. Bateson y Cuenot, con una robusta base experimental manifiestan la noción de *semidominancia*. (Giordan et al., 1988).

Siguiendo con el contexto ilustrado por Giordan et al. (1988), en este panorama de enriquecimiento terminológico aparecen las nociones de *genotipo* y *fenotipo*, incorporados por W. Johansenn en 1906, para referirse a la constitución genética del cigoto resultante de la unión gamética y a la media estadística de un muestreo, respectivamente. Aunque el empleo de los términos permanece vigente, su significado está más cercano a lo que Weismann

incorporaba como *germoplasma* y *somatoplasma*<sup>29</sup>. El mismo Johansenn interpreta la noción de los *factores* mendelianos y los *Pangenes* de de Vries para introducir el término *gen* y lejos de considerarlo como una unidad física en el sentido corpuscular de las *gémulas* de Darwin o los *determinantes* de Weismann prefiere mantenerlo más cercano a la noción mendeliana, como una unidad de cálculo.

En conjunto, el redescubrimiento de las leyes de Mendel y de manera casi simultánea de la teoría cromosómica de la herencia, que tuvo su consolidación a partir de los desarrollos de la teoría celular, representaron una convergencia determinante en la historia de la genética. Los trabajos de Mendel y sus posteriores desarrollos ofrecieron solidez teórica y la modelización estadística para la interpretación de la transmisión regular y cuantificable de los rasgos hereditarios. Los avances en citología terminaron por otorgar la evidencia empírica para situar físicamente los factores mendelianos en estructuras celulares observables; los cromosomas. La correspondencia entre su comportamiento en los ciclos de división celular y las proporciones mendelianas derivó en una visión integrada de la herencia biológica. Este complejo histórico de desarrollos conceptuales y técnicos, disputas, controversias y debates sentaron la base para la inauguración de la genética como disciplina.

El cromosoma como se ha discutido ha experimentado una profunda transformación desde su identificación como un cuerpo filamentosos coloreado durante la división celular, hasta constituirse como la unidad física, discreta y observable que otorga la comprensión de los fenómenos hereditarios. Su estatuto teórico está estrechamente relacionado con los desarrollos técnicos que tuvieron lugar, la invención y perfeccionamiento de instrumentos y técnicas otorgaron una comprensión material de la forma en que un conjunto de caracteres se conserva entre divisiones y se transmiten entre generaciones.

---

<sup>29</sup> Para Weismann el germoplasma es el material hereditario que se transmite de una generación a otra y está contenido en las células germinales. Por somatoplasma, entiende Weismann a la masa o características corporales de un organismo, excluyendo las células gaméticas.

### b. Condiciones técnicas y teóricas del concepto gen:

El término gen, es introducido por W. Johansenn en 1909, aunque sin definir qué significaba o representaba, en palabras de él mismo, quería una palabra que estuviera libre de una asociación con las ideas preformacionistas y las explicaciones corpusculares que se discutían en torno a la herencia por aquel entonces. Propuso el término para referirse, principalmente a los elementos presentes en los gametos que determinan el conjunto de caracteres de un organismo (Barahona, 1994). El mismo Johansenn escribe al respecto:

parece que lo más simple es aislar la última sílaba, "gen" [del Pangen de de Vries], que es lo que nos interesa... La palabra gen está completamente libre de hipótesis; expresa solamente el hecho evidente, en cualquier caso, que muchas de las características de un organismo están especificadas en los gametos por medio de condiciones especiales, bases y determinantes que están presentes de forma única, separada y, por lo tanto, independiente; en pocas palabras lo que deseamos llamar genes. (Johansenn, 1909 en Keller, 2000)

El concepto de gen solo empezaría a tomar significado como unidad en relación con el resultado de su acción, es decir por su manifestación más que por su carácter físico. De esta manera, esta sección discute las condiciones técnicas y teóricas que permitieron su consolidación conceptual, a partir de tres momentos o etapas que le permitieron al gen establecerse dentro de la genética y el aspecto técnico que permitió su desarrollo. El primero de estos desenvuelve la **consolidación experimental de la *Drosophila*** así, la condición técnica se representa desde los elementos y procedimientos que permitieron considerar un organismo como modelo explicativo y asociada a este, se encuentra su condición teórica, es decir las propuestas conceptuales que irían constituyendo y transformando la noción de gen. El segundo momento es el **desarrollo de los mapas cromosómicos** en el que la condición técnica está enmarcada en los modelos y procedimientos de análisis de las frecuencias de

cruzamiento y, teóricamente, permite la ubicación espacial del gen mediante el desarrollo de modelos de posición o ubicación genética. En un tercer momento desarrolla la **noción de mutación**, a nivel técnico se desarrollan los procedimientos que permiten inferir los cambios que pueden ocurrir en un gen y, teóricamente permite establecer cómo las alteraciones en un gen contribuyen a que se manifieste de formas diferentes, lo que fundamenta la idea del gen como unidad estructural.

El desarrollo de la teoría cromosómica de la herencia, representada principalmente por Sutton y Boveri, formalizada entre 1902 y 1903, tuvo un importante logro; la integración de las observaciones citológicas con las proporciones genéticas, derivando en la aceptación general de que existe una relación física entre los cromosomas y los factores hereditarios o genes. Las conclusiones, aunque plausibles, aún se mantenían exclusivamente en el campo teórico sin un sustento empírico robusto y pronto se consideraron como hipótesis a corroborar o a controvertir, frente a este reto se encumbra un grupo de investigadores que se dispuso someter la teoría cromosómica a escrutinio, conformado en New York en la Universidad de Columbia y conocidos ampliamente como el *grupo de la Drosophila*, se congregan en torno a un nombre T. H. Morgan, junto a él, A.H. Sturtevant, H.J. Müller, y C.B Bridges

El desarrollo de los trabajos de Morgan y sus colaboradores tendrían por lo menos tres aspectos que servirían de punto de partida para desplegar sus investigaciones; la noción de mutación de de Vries, que en 1901 propondría como fuente de los fenómenos evolutivos, consideraba que los organismos tenían la probabilidad de sufrir cambios o modificaciones repentinos y podrían llegar a ser heredables. La observación de un corpúsculo en la serie cromosómica de un insecto (*Pyrrhochoris*) por H. Henkins en 1891, y que posteriormente adquiere la condición de cromosoma X y su relación con la determinación del sexo por McClung en 1902, afirma el autor en el estudio de la espermatogénesis; “parecería suficiente demostrar que el elemento es un cromosoma de la espermatogonia y que se divide en una mitosis posterior del espermatozoide como un cromosoma.” (McClung, 1902: 5).

Otro elemento crucial para el desarrollo de los trabajos de Morgan, fueron los excepcionales aportes derivados de los estudios sobre la determinación del sexo llevados a cabo por Nettie Maria Stevens —una de las primeras, pocas y excluidas mujeres por el imperante sexismo de la época y (específicamente) en la ciencia— quien en 1905 publica sus observaciones sobre los cromosomas del coleóptero *Tenebrio molitor*, y que extendió a más de 23 especies de coleópteros más (Carey, Aközbek, Karkess, 2022) en los que identificó que la determinación del sexo está directamente relacionada con la presencia específica de un par de cromosomas.

Las observaciones de Stevens se realizaron comparando las células somáticas de los coleópteros en estado larvario, notando que de los 10 pares de cromosomas que contienen, en los machos, 9 eran normales (homólogos) y el último par mostraba una naturaleza “extraña”, formado por un cromosoma de mayor tamaño en comparación con su compañero, condición que se repetía únicamente en los especímenes macho, por lo que su primera conclusión fue que el cromosoma pequeño provenía del macho (Delgado, 2000). Al par de cromosomas “impares” (Heterólogos) los denominó como cromosomas *l* y *s* (large y small) que posteriormente se reconocieron con el nombre de cromosomas X y Y (notación introducida por E.B. Wilson en 1906) (Carey, Aközbek, Karkess, 2022). Stevens pensó que los machos producían, entonces, dos tipos de gametos, la mitad de sus espermatozoides deberían contener el cromosoma *s* y la otra mitad, el cromosoma *l*, por lo cual la determinación del sexo dependía de la presencia de este cromosoma aportado por los machos en el par de cromosomas sexuales. De esta manera se demostraba que los cromosomas no son sólo estructuras visibles, sino que también son los portadores de caracteres hereditarios concretos<sup>30</sup> (Delgado, 2000., Carey, Aközbek, Karkess, 2022).

---

<sup>30</sup> El trabajo de Stevens fue desarrollado de manera simultánea e independiente del desarrollado por E.B Wilson que presentó en 1905 y se publicó en 1906, y aunque en su trabajo reconoce la relevancia de los trabajos de la fisióloga norteamericana, la comunidad científica del momento solo otorga el reconocimiento a su coterráneo zoólogo.

El aporte de Stevens en cuanto a su rigor e importancia para responder a los interrogantes del momento están al nivel de los desarrollados por Sutton, Boveri y Wilson, afirmando la posición de la mujer en el progreso de la ciencia, al que a menudo se le otorga únicamente un carácter masculino. Por eso, a manera de paréntesis, se permite en estas cortas líneas reconocer su lugar como mujer en la ciencia y su participación en el legado que representaría para el desarrollo de la genética como disciplina.

De esta manera queda ilustrado el contexto experimental y enunciativo sobre el que desarrollarían Morgan y su grupo sus investigaciones. A continuación, se desarrolla el contexto técnico de la **consolidación experimental de la *Drosophila***. La introducción del famoso díptero a los estudios cromosómicos de la herencia fue un acierto en lo que concierne a su importancia técnica y metodológica, pues como organismo modelo ofrecía un conjunto de ventajas destacables; un ciclo de vida corto (no superior a los diez días), lo que suponía la obtención de varias generaciones en un tiempo relativamente corto, el gran número de descendientes producido en cada cruce, que representó un factor importante sobre el cual aplicar los análisis estadísticos de los factores heredados y su comportamiento. En cuanto a los cuidados y mantenimiento de los ejemplares no requerían mayores empeños, además se podían almacenar en orden de cientos a miles en espacios muy reducidos. A nivel citológico, la mosquita de la fruta también mostró ser un organismo excepcional porque presenta cromosomas inusualmente grandes (politénicos) en las glándulas salivares, visibles con cierta facilidad al microscopio óptico, permitiendo la observación y seguimiento de sus comportamientos y presumibles anomalías (Kohler, 1994)

En cuanto a la selección de la mosquita de la fruta, relata Kohler (1994), un pasaje bastante particular que entre las razones que llevaron a la *Drosophila* al laboratorio para los estudios en genética, se debió a la supuesta susceptibilidad de la mosca a manifestar mutaciones inducidas, por lo que Morgan utilizó sales, fermentos y un sinfín de sustancias que inyectaba a los individuos en su estado de pupa, en zonas corporales cercanas a las

estructuras reproductivas con el fin de alterar los procesos de desarrollo de las células germinales y así obtener individuos con las mutaciones deseadas en la generación siguiente. También junto a un alumno suyo, Fernandus Payne, sometieron a las moscas al calor, la centrifugación e incluso a los rayos X, método, este último, habrían logrado observar mutaciones que se heredaban, aunque los ensayos con esta radiación fueron pronto abandonados. Al parecer Morgan de alguna manera quería inducir el período de mutaciones al que de Vries hacía referencia.

Otros aspectos técnicos adicionales a la selección del organismo modelo, estuvo acompañado del uso de los microscopios y técnicas histológicas que ampliaron los resultados de las observaciones de los cruces, que serían la principal aplicación técnica con fin de establecer la relación gen-mutación-cromosoma. En este aspecto, siguiendo los ya bien metódicos procedimientos de cruce, que bien podrían atribuirse desde los experimentos de Mendel, en términos del conocimiento de la biología del organismo, así como selección de caracteres a observar, siguiendo por los métodos de registro y representación de la información. Por ejemplo, la formalidad de la nomenclatura para registrar los caracteres dominantes y recesivos, así como la relación de estos con el sexo de los individuos dispuestos en un cruce y las generaciones resultantes (Kohler, 1994).

De esta manera estaba dispuesto el soporte técnico sobre el cual Morgan y sus colaboradores empezarían a argumentar su trabajo; al principio tratando de conseguir las famosas *mutaciones devrisianas*. Los experimentos comenzarían en 1908, y fue solo hasta 1910, que Morgan reporta haber encontrado una variación de la mosca; un macho de ojos blancos. (Giordan et al. 1988, Kohler, 1994) que cruza con una hembra de ojos rojos (o silvestre), obteniendo de esta manera una primera generación (F1) de individuos formada completamente por moscas de ojos rojos. Pero en la siguiente generación (F2) reaparecían los machos con el fenotipo de ojos blancos, lo que supuso que este carácter se había expresado de forma repentina y, además, era recesivo frente al de los ojos rojos (Giordan et al. 1988).

Inicialmente Morgan criticó fuertemente al mendelismo por su fuerte formalidad y poco sustento material, sin embargo, fueron sus propios experimentos los que lo llevaron a aceptar, no solo los postulados mendelianos si no también la teoría cromosómica que empezaría a desarrollar, en lo que para muchos se considera el establecimiento de la genética clásica. Ejemplo de ello fue la determinación de la relación existente entre los caracteres y el sexo, cuando en una serie de cruces entre los individuos obtenidos de la F1 (del experimento del párrafo anterior) obtiene proporciones entre el color de los ojos rojos y blancos 3:1 respectivamente, y la proporción sexual entre hembras y machos era de 2:1 (Kohler, 1994).

En los experimentos en los cuales el cruce se realizaba entre hembras con ojos de color blanco y machos con ojos de color rojo, encontró que la descendencia siempre mostraba que las hembras manifestaban el carácter del color de ojos rojo y los machos siempre presentaban ojos de color blanco. Los experimentos, sin lugar a amplios cuestionamientos, demostraban que el gen responsable del color de ojos y el sexo son dependientes (Kohler, 1994). Morgan, a partir de sus observaciones, introduce el término *sex-limited character* o carácter limitado por el sexo, actualmente se refiere como *sex linked (linkage)*. Esta observación daría pie para afirmar, entonces, “En lugar de la segregación aleatoria en el sentido de Mendel, se asocian factores ubicados cerca unos de otros en los cromosomas. La citología proporciona el mecanismo que exige la evidencia experimental.” (Morgan 1911, en Giordan et al., 1988: 144).

T. H. Morgan, a partir de sus observaciones propone “un modelo estructural de disposición lineal de los genes en los cromosomas “(Giordan et al., 1988) que desarrolla a partir de los planteamientos que Janssens (1909) realiza a partir de observaciones citológicas, de las que propone sus conocidas *chiasmata* (quiasmas); supone que los cromosomas homólogos durante la meiosis intercambian partes o fragmentos en espacios donde se superponen durante la sinapsis. La probabilidad de que haya un intercambio de secciones cromosómicas depende de la distancia que los separe (Portin, 1993). De esta observación derivan dos aportes

conceptuales de gran importancia; que los genes no se separan totalmente y que entre cromosomas homólogos se lleva a cabo el entrecruzamiento (*Crossing-over*).

La afirmación de que los genes ubicados en los cromosomas, se intercambian con su contraparte (alelos) en el par homólogo no sería totalmente dilucidada sino hasta los trabajos de H.B. Creighton y B. McClintock en 1931, al observar y describir de forma admirable que, durante el entrecruzamiento, los cromosomas homólogos de las células del maíz intercambian material, en su trabajo publicado concluyen “se ha demostrado que los cromosomas apareados, heteromórficos en dos regiones, intercambian partes al mismo tiempo que intercambian genes asignados a estas regiones” (Creighton & McClintock, 1931 en Moreno, 2024: 670). A semanas de la publicación de Creighton & McClintock, C. Stern, documentó el entrecruzamiento del cromosoma X en células “anormales” de *Drosophila melanogaster*, entre el par de cromosomas X e Y, y entre el cromosoma X y el IV en el que confirma que entre los cromosomas se da el intercambio de fragmentos (Moreno, 2024).

Los adelantos descritos hasta ahora fijan el segundo momento dentro del conjunto de condiciones técnicas y teóricas que influirían en el robustecimiento del concepto gen. Así pues, **el desarrollo de los mapas cromosómicos** se adelantaría como consecuencia de los estudios de Morgan y específicamente con las moscas del fenotipo de ojos blancos. Bridges, en 1914 da cuenta de un comportamiento inusual en un linaje de moscas, habitualmente el cruce entre hembras homocigotas de ojos blancos con machos de ojos rojos produce una proporción equivalente entre machos y hembras en la F1, sin embargo, en un linaje en las que una pequeña porción de los descendientes en la F1 las hembras presentan ojos blancos y los machos ojos rojos, un evento que el modelo que ya había propuesto Morgan, permitiría explicarlo, y es que habría un cromosoma Y adicional, el estudio citológico de las hembras que manifestaban el fenotipo de ojos blancos, reafirmó la predicción realizada, se había descrito entonces, el primer caso de trisomía, que abriría paso a otra línea de investigación; la patología cromosómica. (Giordan et. al. 1988).

La idea de que el material hereditario, los genes, se organizaban en los cromosomas pronto fue puesta en marcha, a través de una serie de modelos de organización por las frecuencias de aparición de los caracteres en las descendencias de un conjunto de cruces que involucraban diferentes características. En 1913, un discípulo de Morgan, integrante del grupo de la *Drosophila*, A.H. Sturtevant, propuso que la posición relativa de un gen en el cromosoma es posible establecerla por las recombinaciones que ocurren durante la meiosis (Portin, 1933).

Para poner a prueba su hipótesis, Sturtevant realizó una serie de cruzamientos entre características distinguibles (color de ojos, forma de las alas, o el color del abdomen), luego se registraron sistemáticamente los resultados de los cruces, de manera que pudiera establecer las proporciones de individuos recombinantes en la descendencia (Vicedo, 1992).

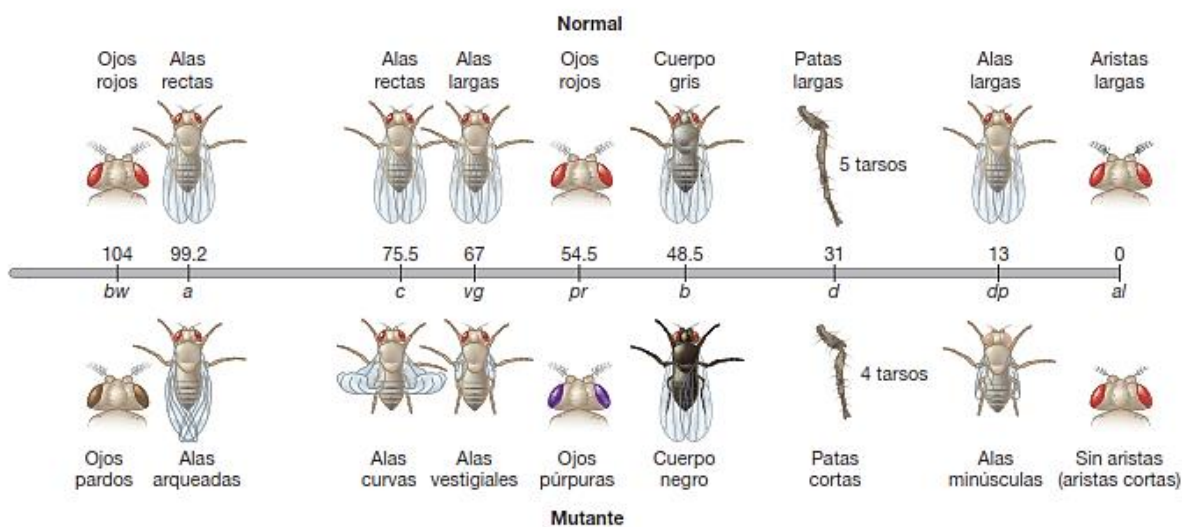
La esencia del mapeo cromosómico radicaba en la suposición (que después fue confirmada) que los cromosomas intercambian segmentos durante la meiosis en el entrecruzamiento, en consecuencia, generando nuevas combinaciones de alelos, así, la probabilidad de que un entrecruzamiento entre un par de alelos se llevara a cabo dependía de la distancia que existía entre estos dos sobre un cromosoma. Así, no solamente pudo ubicar los alelos en los cromosomas, sino que pudo establecer una unidad de distancia entre los alelos recombinantes, unidad que llamó centiMorgan (cM). Como resultado de estos análisis se obtuvo la posibilidad de construir un mapa lineal de genes, lo que suponía, que era posible predecir la estructura de un cromosoma (en términos de la ubicación de los genes) a partir de datos estadísticos, sin llegar a requerir la observación directa de los cromosomas y su estructura física. A.H Sturtevant y todo el equipo de Morgan asignaron ubicaciones específicas mediante mapeo cromosómico a, por lo menos, 85 genes diferentes en *Drosophila* (Figura 16), así se demostró de forma convincente que el número de grupos de ligamiento era igual al número de cromosomas observados en muestras citológicas (Watson et al. 2016).

El logro del mapeo cromosómico no fue únicamente técnico, sino que permitió a nivel teórico la transformación de la idea de gen como un factor, enteramente matemático y sin

sustento material, sino que ahora se trataría como una unidad localizable y organizada en una estructura física, además, permitió la integración de la teoría cromosómica con los principios mendelianos a través de un modelo que representaba la distribución de los factores heredables con las estructuras celulares observables (Giordan et al. 1988). La genética del grupo de la Universidad de Columbia demostró, si no la existencia, la influencia de los genes como unidades microscópicas que afectan a la célula, sus funciones y la manifestación de las características de un organismo (Barahona, 1994).

### Figura 16.

*Esquema del mapa genético del cromosoma 2 de Drosophila melanogaster.*



*Nota. Tomado de Biología molecular del gen (7ª edición), por Watson, J. et al. (2016), p. 15.*

Ahora bien, se desarrolla el que aquí se considera el cuarto momento de desarrollo del concepto gen, la discusión alrededor de la **noción de mutación**. La búsqueda de explicaciones sobre los fenómenos hereditarios durante los primeros años del siglo XX, tenía, hasta entonces un sustento fisiológico, es decir, una aproximación desde las observaciones sobre las células y sus componentes nucleares, sin embargo, el entorno de investigación del momento se inclinaba principalmente sobre otros aspectos, principalmente los procesos evolutivos y

específicamente las preguntas se concentraban sobre las condiciones de la estabilidad y variación de las especies.

El término de mutación se introduce al campo de la biología por Hugo de Vries, uno de los redescubridores del trabajo de Mendel, reconocido por su obra *Teoría de la Mutación*, publicada en 1901, de la que el primer tomo tuvo un importante impacto en la biología del momento, pues en esta, escribía el autor, explicaba lo que consideraba el mecanismo de la evolución, cuando aún los principios mendelianos no tenían una aplicabilidad general (Barahona, 1992).

La idea de mutación devrisiana se contraponía a la idea de la variación continua y gradual defendida por el darwinismo, pues para de Vries la aparición de nuevas características en las especies se daba por cambios abruptos; las modificaciones en los caracteres deberían ocurrir repentinamente de una generación a otra, en lo que denominaba un periodo de mutación. Esta idea ponía en duda la estabilidad estricta de los caracteres mendelianos, afirmación que sería puesta a prueba por el grupo de Morgan y compañía (Barahona, 1992).

Mientras que la mutación de de Vries daba cuenta de las explicaciones sobre la especiación por aparición repentina, la noción más moderna del concepto y sus influencias sobre el significado del gen se deben principalmente a los trabajos de Herman Joseph Müller que publicó entre 1927 y 1928 (Portin 1993), en los que describe el conjunto de procedimientos que siguió para inducir las mutaciones en poblaciones artificiales de *Drosophila melanogaster*, trabajo que representa aquí un hito técnico como condición para el desarrollo del concepto gen.

A continuación, se describen de forma general cuáles fueron aquellos desarrollos técnicos que permitieron dar cuenta de una nueva connotación de las mutaciones. Para llevar a cabo su desarrollo metodológico Müller, toma las observaciones ya realizadas que sus compañeros de la universidad Columbia habían realizado sobre los genes que se podrían encontrar en el cromosoma X, de manera que elige una cierta cantidad de las características que manifiestan y desarrolla una serie de cruces que garanticen estas *mutaciones naturales*.

Posteriormente somete a algunos de los individuos (especialmente los machos), que serán parentales en cruces posteriores, a exposición con diferentes intensidades de Rayos-X, notó que cuando las intensidades de radiación eran más altas, más altas eran las frecuencias de mutaciones que aparecían en los descendientes (Müller, 1927., Portin, 1993).

En uno de los experimentos, en los que se observaban seis loci diferentes en una serie de cruces entre machos silvestres sometidos a rayos-X con hembras homocigotas para diferentes características, dos de estas resultaban letales para los machos, lo que sugería una especie de “deficiencias”. Entre los alelos dominantes, se encontró que el efecto de la radiación inducía no solo modificaciones para las características ubicadas en el cromosoma X, sino que también provocaba mutaciones autosómicas. Lo que demostraba que las mutaciones eran fácilmente inducidas tanto en la cromatina de los cromosomas autosómicos como en el cromosoma-X (Müller, 1928).

Müller pudo diferenciar que la exposición a los rayos-X no solamente se manifiestan mutaciones puntuales, sino que provocan traslocaciones, deleciones e inversiones. De lo que pudo concluir que de las mutaciones provocadas la mayoría son letales, las demás tienen efecto directo sobre la viabilidad y fertilidad. En términos de su manifestación, pudo afirmar, que en mayor proporción las mutaciones son recesivas en comparación con las dominantes. También, pudo notar que las mutaciones cuando se expresan no manifiestan cambios abruptos, en realidad, muchos de estos pueden pasar desapercibidos. En cuanto a la frecuencia de las nuevas mutaciones, afirma Müller, que son repetidas cuando aparecen. El efecto de las mutaciones ocurre sobre toda la cromatina, aunque, las que fueron inducidas aparecen en zonas preferenciales. Encontró que las mutaciones también pueden presentar reversión y finalmente, afirma, que las mutaciones son puntuales, (Müller, 1928., Barahona, 1992)

El orden técnico de desarrollo de los experimentos de Müller, acertaron en la demostración que el gen no es una unidad invariable, la implementación de técnicas de

cruzamiento, la elección de las características y su ubicación cromosómica, la recolección registro y análisis de datos para determinar la frecuencia de las mutaciones fortaleció el estatuto técnico de la mutación como unidad observable del cambio genético.

El desarrollo teórico que ofreció Müller, sobre la concepción del gen no fue menor, la naturaleza del cambio genético no estaba soportado en factores estables y principalmente teóricos, la idea de una estructura física y observable se empezaba a consolidar, ahora como una estructura de cambio (Barahona, 1992). A la luz de las nuevas observaciones derivadas del despliegue de los dispositivos técnicos, la mutación modifica su sentido, no es solamente un fenómeno producible, es la evidencia de la expresión visible de alteraciones en la estructura interna del material hereditario. La relación entre la mutación y el gen se hace, ahora, más estrecha, el gen no es solamente la estructura que determina una o varias características en el organismo, la mutación se constituye, entonces, como la unidad de cambio que opera sobre el gen y posibilita la manifestación de un efecto fenotípico (Barahona, 1992).

Los aportes del grupo de la *Drosophila*, sentaron las bases de una naciente genética, que pudo establecer la existencia de los genes como unidades de cambio en los cromosomas, aun así, su existencia estaba ligada a la predicción y análisis estadístico. Afirman Harman y Lamm (2015), que el alcance de la genética clásica (como se le denomina a partir de los estudios de Morgan y colaboradores) llegaba hasta las preocupaciones por explicar los patrones de la herencia, las explicaciones de la materialidad del gen y especialmente sobre su acción aún estaban limitadas.

Una de las primeras pistas sobre la acción de los genes aparecería en 1908, de manera insospechada, en el ámbito de la medicina, cuando el médico Archibald Garrod, tratando pacientes con alcaptonuria (un tipo de “desorden” que causa artritis, particularmente dolorosa en edades avanzadas), estableció que esta afección mostraba un patrón de herencia mendeliano y se manifestaba en la ausencia de una enzima especializada en el metabolismo

del ácido homogentísico<sup>31</sup>. Por el patrón hereditario que mostraba, Garrod, concluyó que se trataba de la acción de un gen recesivo, por extensión la falla en la síntesis de la enzima se debía a un defecto en el gen correspondiente. Sugirió entonces que este “error innato del metabolismo” producía la alcaptonuria. En una conferencia de la Royal Society of Physicians presentó la reconocida frase “un gen, una enzima” para describir qué es lo que hace un gen. (Harman y Lamm (2015).

Los descubrimientos de Garrod, fueron respaldados experimentalmente por las observaciones de G. Beadle y E. Tatum, que realizaron en la década de 1940 en la universidad de Stanford, sobre el hongo *Neurospora crassa*; notaron que cuando era irradiado con rayos-X resultaban afectados genes que le impedía producir las enzimas necesarias para desintegrar elementos sencillos incluidos en su dieta. A conclusiones similares llegaron los trabajos de J.S. Huxley, y los efectos de los *genes defectuosos* sobre el color de los ojos de los camarones de río *Gammarus*. Hacia los años 50, Linus Pauling, observó que la anemia falciforme también sigue patrones hereditarios mendelianos, causando un defecto en la hemoglobina, lo que lo llevó a ir más allá con la conocida frase; “un gen, una proteína” (Porti, 1993, Harman y Lamm 2015).

Los estudios mencionados dan cuenta de la acción de los genes, pero aún no se ha configurado una explicación observacional de estos elementos, esto es, que responda a la pregunta ¿de qué están hechos los genes? Este interrogante es el punto de partida para iniciar la discusión sobre el siguiente apartado de este capítulo.

### **c. Condiciones técnicas y teóricas del concepto ADN**

Si, para la primera mitad del siglo XX, Morgan había postulado la existencia material de los genes, basada en la inferencia estadística de los resultados de cruces entre características

---

<sup>31</sup> Que es excretado en la orina y se torna negro cuando entra en contacto con el aire. Coloración que es signo diagnóstico de la afección.

morfológicas y ligadas al sexo en las moscas de la fruta, Müller había demostrado su existencia material, mediante los efectos de la radiación de rayos-X en la expresión de diferentes mutaciones, sin embargo, aún no había alguna certeza sobre su naturaleza material, es decir sobre su composición.

En este sentido, debido a la pluralidad de estudios que permitieron el posicionamiento del ADN como concepto y estructura central de lo que inaugura la genética moderna se pueden establecer en orden de su principal aplicación como condiciones técnicas los trabajos con **técnicas de microbiología y bioquímica** que fueron significativos para el reconocimiento de la composición material de la base de la herencia. La siguiente condición técnica es la **cristalografía de rayos X**, ingenioso desarrollo que permitió la modelización de la estructura de la molécula del ADN. Y, por último, de manera general, la descripción de las **técnicas de manipulación y lectura del ADN**.

Los desarrollos teóricos habrían dirigido la atención sobre los genes y su composición física, si además su ubicación se encuentra en los cromosomas, no habría duda, que la atención se ubicaría nuevamente sobre el núcleo celular, en este sentido, los trabajos experimentales que aplicaron **técnicas de microbiología y bioquímica** tendrían un papel fundamental en la determinación de la naturaleza material de los genes.

El primer registro que se relaciona con la composición química del núcleo se puede atribuir a la caracterización química que Friedrich Miescher en, 1869, realiza en Alemania, en el castillo de Tübing, sobre núcleos de células (neutrófilos específicamente) presentes en el pus de las heridas de pacientes que extrae de vendajes hospitalarios. Logra aislar los núcleos celulares mediante el rompimiento citoplasmático de la membrana celular usando pepsina extraída del estómago del cerdo. Pudo aislar una sustancia que contenía una proporción especialmente rica en fósforo y de naturaleza ácida que no se comparaba con otra sustancia orgánica conocida hasta entonces, por su ubicación la nombró como *nucleína*, sustancia que encontró exactamente igual en los espermatozoides de rana, carpa común, salmón y del toro.

Posteriormente, Albrecht Kossel, en la década de 1880, purificó esta sustancia, determinando de manera específica sus propiedades ácidas, lo que le permitió darle el nombre, ahora, de ácido nucleico. Su caracterización daría otro paso, e identifica que el ácido nucleico está conformado por bases púricas y pirimídicas, además azúcar y fosfato. Por sus aportes a la caracterización del ácido nucleico, Kossel recibió el premio nobel en fisiología en 1910 (Ortiz-Hidalgo, 2024).

La capacidad transformativa de las sustancias nucleares empezaría a ser demostrada con los trabajos de F. Griffith (1928) en los que investigaba una vacuna contra la neumonía, describe un fenómeno de transformación genética en el neumococo *S. pneumoniae*, utilizando dos cepas cultivadas de la bacteria, S (smooth) y R (rough), la cepa S, denominada por la apariencia que brinda la pared constituida por polisacáridos; inoculada en ratones provocaba la enfermedad y producía la muerte de los animales, mientras que la cepa rough, carecía de esta capa de sacáridos y resultaba inofensiva para los ratones. (Porti, 1993).

Como parte de su despliegue experimental, tomó células S y las inactivó sometiéndolas al calor. Estas células inactivas inyectadas en los ratones resultaban inocuas. La observación destacable viene cuando inyecta una mezcla de células R y S inactivas, no solo los ratones desarrollaron la enfermedad y murieron, sino que, en la sangre se encontraban nuevamente células S vivas. (La característica envoltura celular era una característica heredable), Griffith declaró, que esta transformación de cepas inocuas a virulentas se debía a un principio transformador en las células bacterianas (Porti,1993). Entre 1931 y 1933, Dawson, Pia and Alloway demostraron la transformación *in vitro* de las cepas R en S, mediante extractos celulares de cepas S inactivadas por calor (Porti,1993). Se llegó a pensar que la responsabilidad de la transformación de la cepa inocua en virulenta podría deberse, bien a las proteínas o bien a los ácidos nucleicos.

Los trabajos experimentales definitivos que mostrarían la acción de este principio transformante vendrían de la mano de O.T. Avery, C. McCleod y M. McCarty que hacia 1944

llevaron los experimentos con el neumococo un paso más allá. Utilizaron la cepa S inactivada mediante calor, y luego mediante técnicas de *lisado* provocaron la ruptura de la membrana celular de las bacterias de la cepa, luego clasificaron los extractos celulares en cinco fracciones distintas a las que, mediante enzimas líticas (ADN-asa, ARN-asa, proteasa, lipasa y polisacaridasa) eliminaron un tipo de componente. Luego trataron de transformar las cepas inactivadas en virulentas mezclándolas con cepas R inofensivas e inoculando ratones. Comprobaron que la fracción que había sido tratada con ADN-asa, no producía la enfermedad y los ratones sobrevivían. El equipo investigador pudo demostrar, entonces, que la única fracción que no puede transformar los neumococos R en S, es aquella que carece de ADN, por lo tanto, el *principio transformante* que describía Griffith, debe ser el ADN (Avery, McCarty, McLeod, 1944).

Los indiscutibles hallazgos del equipo encabezado por Oswald Avery que demostraban que el ADN es, en efecto, la molécula portadora de la información hereditaria, no representó para la comunidad científica del momento mayor importancia, pues la simpleza de la composición del ADN, comparada con las proteínas, no lo destacaba como un candidato de interés para ser el soporte bioquímico de la información hereditaria (Harmann & Lamm, 2015).

Por otra parte, con un enfoque experimental diferente, los trabajos de Martha Chase y Alfred Hershey presentados en 1952, resultaron ser bastante convincentes para la comunidad científica. Utilizando técnicas de marcaje isotópico, rotularon de forma independiente los componentes del virus bacteriófago T2, utilizando azufre y fósforo radioactivo ( $^{35}\text{S}$ ,  $^{32}\text{P}$ ) para las proteínas y el ADN, respectivamente. Después de que se producía la infección de las bacterias, se sometían a centrifugación para retirar los virus no absorbidos. Las bacterias eran posteriormente centrifugadas a altas revoluciones para separar partículas virales de las paredes celulares de las bacterias. Observaron que más del 80% del azufre rotulador permanecía en la superficie de las bacterias, que se eliminaba, mediante agitación, mientras que la mayor parte del fósforo había ingresado a la célula. Hershey y Chase coligen que la

mayor parte, si no toda la proteína del virus no tiene ninguna participación durante la infección viral (Portin, 1933).

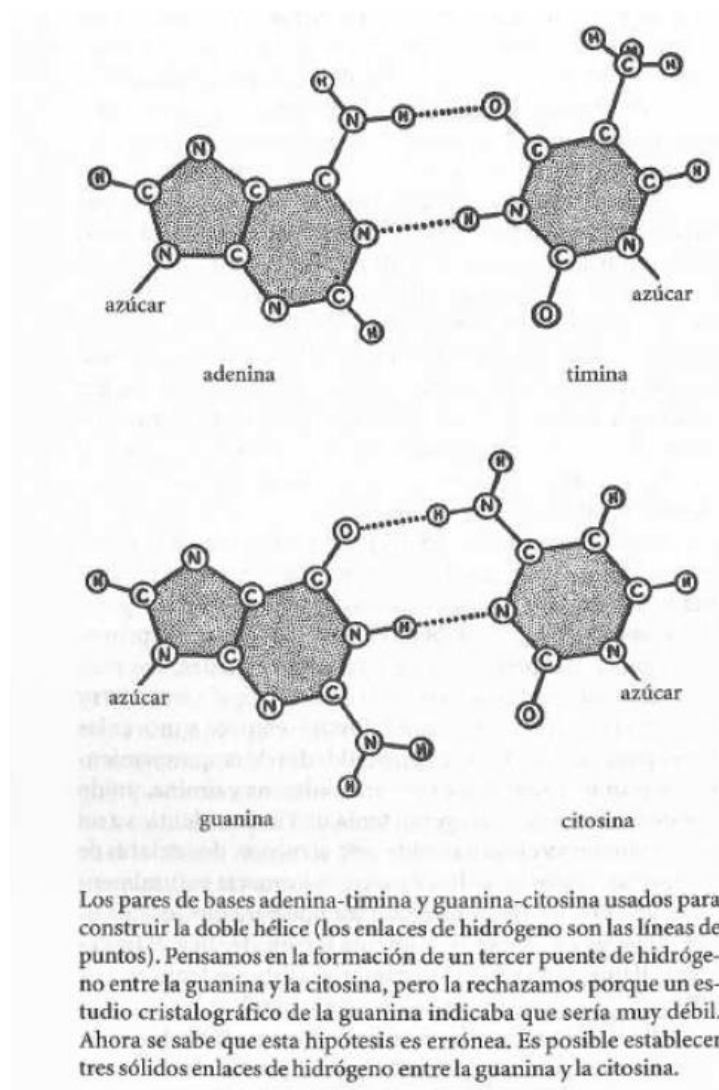
El trabajo de Chase y Hershey, señala Portin, (1993), tenía correspondencia con el presentado por Avery y su equipo, mostrando que el ADN sería el portador de la información hereditaria. Estos trabajos sugerían entonces que en los organismos más complejos también sería el ADN el sustento químico de la herencia y que la porción proteica de los cromosomas tendría una función diferente, de acuerdo con la relación de cantidad de ADN y las bases en el ADN.

Los análisis químicos del contenido nuclear de los tejidos y órganos en grupos biológicos más complejos mostraban la misma composición química, aunque en proporciones ligeramente diferentes. Sería E. Chargaff, en sus estudios de composición química que encuentra que la cantidad de guanina era igual a la de citosina, y del mismo modo la cantidad de timina igual a la de adenina. Estas proporciones, se conocerían como las *reglas de Chargaff* y sugerían un patrón estructural una vez llegaron a ser interpretadas en la consolidación del modelo de la molécula del ADN (Figuras 17 y 18) (Watson, [1968] 2000).

La **cristalografía de rayos X**, fue una aplicación técnica que se desarrollaba paralelamente para la descripción de las estructuras cristalinas de muestras biológicas, sin embargo, fue una aplicación que ya se había establecido desde 1912 en una serie de experimentos con rayos X en los que se pudo reconocer los patrones de difracción que tienen los rayos X al incidir sobre una estructura cristalina y modelar las estructuras tridimensionales, en los estudios de análisis químicos representó un importante soporte técnico para ilustrar las propiedades de una molécula (Mingos, 2020). Su importancia en el desarrollo de la biología estuvo marcada por el análisis estructural de las proteínas y los ribosomas, por supuesto, el aporte crucial estuvo determinado por el análisis de muestras de ADN, que repercutirían en la revolución de la genética y la biología molecular (Giordan et al., 1988).

**Figura 17.**

*Esquema de enlace entre pares de bases nitrogenadas propuestos por Watson y Crick.*



*Nota. Tomado de La Doble Hélice, por Watson J. (2000), p.21*

El trabajo a partir de esta técnica que se desarrolló en el King's College de Londres en cabeza de Rosalind Franklin y Raymond Gosling con muestras cristalizadas de ADN obtuvieron imágenes por difracción de rayos X que representaron un aporte excepcional para el trabajo que desarrollaban Watson y Crick. Las fotografías, particularmente, la famosa fotografía 51, obtenida por Rosalind Franklin, fue crucial para determinar la organización de la estructura del

ADN. En una historia casi novelesca, contada por el mismo Watson, le piden a Maurice Wilkins que “robe” la mencionada fotografía, con la cual logran establecer el ordenamiento de las bases nitrogenadas y las hebras antiparalelas, desarrollo por el cual Watson, Crick y Wilkins reciben el reconocimiento con el premio nobel en 1962 (Watson, 2000 [1968]).

La interpretación de las reglas de Chargaff y la fotografía por cristalografía, resultaron los insumos trascendentales en la constitución del modelo de la molécula del ADN propuesta por Watson y Crick en 1953, así constituyen un modelo molecular; *la doble hélice*. Un polímero bicatenario, complementario y antiparalelo. Cada hebra está formada por nucleótidos, que se conforman por un azúcar (desoxirribosa), un grupo fosfato que se une al sacárido y una base nitrogenada (adenina, guanina, citosina y timina). Siguiendo las reglas de Chargaff, supone que las bases nitrogenadas en la estructura se disponen por apareamientos entre una purina y una pirimidina, por dos puentes de hidrógeno entre la adenina y la timina, y tres puentes de hidrógeno para enlazar la guanina con la citosina. (Watson, 2000 [1968])

Por último, las **técnicas de manipulación y lectura del ADN**, siguiendo en adelante a Porti (1993), inauguraron una nueva era para la genética y sus aplicaciones, lo que algunos autores denominan la genética moderna. La influencia y desarrollo de programas experimentales y teóricos que tuvieron origen en otros campos y otros intereses transformó a la genética de una ciencia experimental a todo un campo científico de ingeniería. Entre los avances técnicos, en este sentido, se destacan la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) desarrollada por Kary Mullis hacia 1985, es una técnica que permite crear copias de un fragmento o segmento específico de ADN lo que permitió la replicación de material de análisis suficiente para secuenciación o aplicaciones de clonación.

La secuenciación del ADN, también constituye una importante técnica que permite ilustrar el orden de las secuencias genéticas a partir del ordenamiento de los nucleótidos, es decir, puede considerarse una técnica para “leer” el código genético. Esta técnica utiliza

marcadores fluorescentes y electroforesis lo que permitió la secuenciación de genomas completos, incluido el humano. (Porti, 1993)

Todo el despliegue técnico y experimental que se ha descrito hasta ahora determina, en conjunto, las condiciones que hicieron posible la consolidación del ADN como un concepto estructurante para la genética, el contexto teórico en el que tuvo lugar no fue dependiente de una única forma de abordar el problema, por el contrario la diversidad de técnicas, dispositivos y secuencias metodológicas se originaron quizás desde campos de conocimiento inicialmente divergentes, que terminaron por encajar en un interés particular. De esta manera, la primera condición teórica se puede expresar como la **reconceptualización del gen**, si bien el gen se había considerado inicialmente como unidad de cálculo, luego como unidad de análisis estadístico y de cambio, con el ADN, el gen adquiere su materialidad, es una unidad no solo física, sino que también es funcional y si se quiere, informacional, pues el modelo de su estructura permite comprender los fenómenos de expresión de una proteína a partir de secuencias de nucleótidos.

La segunda condición teórica es la delimitación del ADN como **sustancia química caracterizable**; desde la descripción o identificación de la nucleína por Mieschner se fue constituyendo la idea de que esa sustancia nuclear no es una mezcla inespecífica, sino que químicamente responde a una organización molecular compleja y específica. Los trabajos posteriores de Chargaff, por ejemplo, determinaron que su organización química corresponde con proporciones estequiométricas entre sus unidades estructurales. Posteriormente estas relaciones darían cuenta que el ADN es una estructura polimérica, constituida por unidades que se repiten, los nucleótidos, que a su vez tienen propiedades químicas que se pueden determinar mediante el uso de técnicas de caracterización.

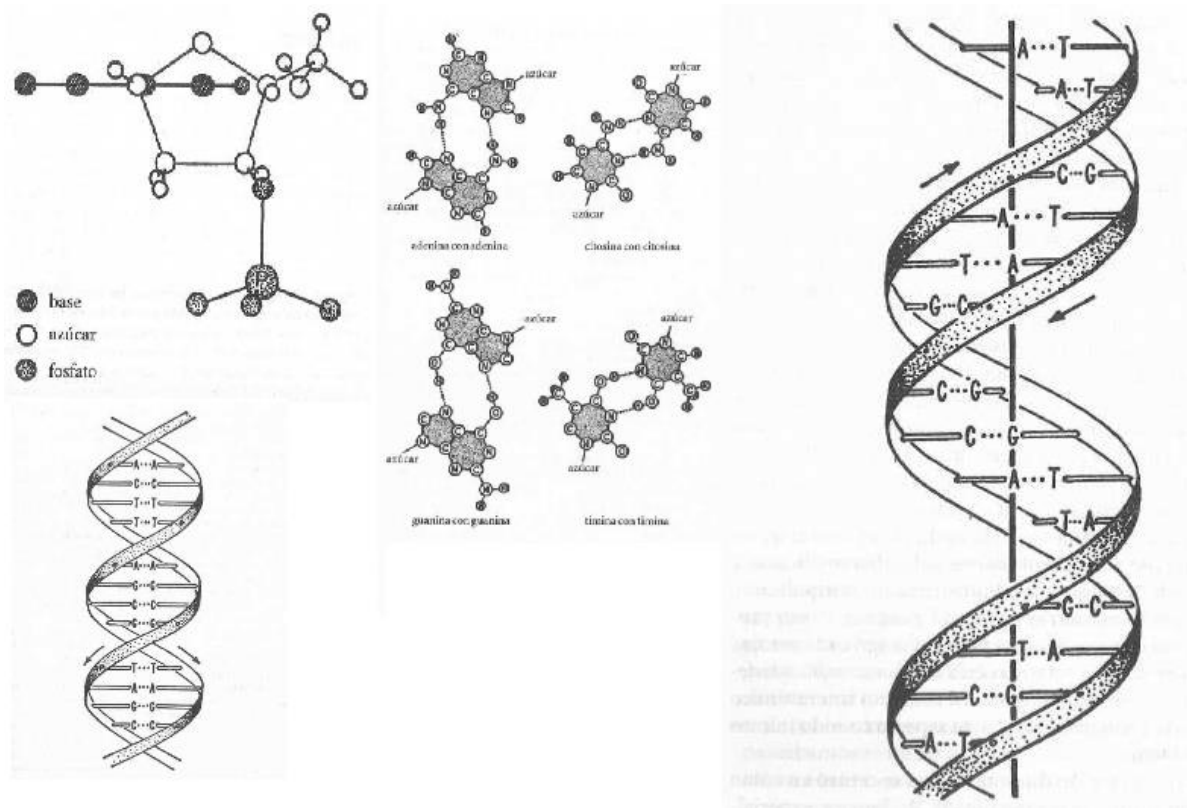
La **constitución de modelos** puede considerarse como la tercera condición teórica, pues los desarrollos técnicos sobre los que el ADN empieza a constituirse como una estructura que responde a un conjunto de principios teóricos, los modelos, según Chamizo (2006 en

Arduriz-Bravo, 2012) son representaciones de objetos, sistemas, fenómenos o procesos, que buscan la simplificación y simplicidad de lo que representan, y en tanto que modelo son a su vez instrumentos que sirven para responder a otras preguntas. En este sentido, la representación molecular del ADN constituye un modelo (Figura 18), que permite explicar, en este, caso la organización material del soporte de la herencia, y se complementa con las observaciones de las caracterizaciones químicas, así como con los aportes de otras técnicas, el caso de las imágenes de cristalografía de rayos X. Además, sirve como base al desarrollo o representación de otros procesos, por ejemplo, la relación entre la duplicación del ADN y la explicación de la duplicación de las cromátidas durante la mitosis.

En este sentido, la constitución del ADN como concepto central del cuerpo teórico de la genética no solo se debe a la caracterización de sus propiedades químicas o la descripción como la unidad informacional y material del gen, sino que es en sí mismo es una construcción teórica y sobre todo explicativa en diferentes niveles. El ADN como concepto, formaliza la síntesis de los desarrollos técnicos que le otorgan el estatuto de la base material del gen, transformando la comprensión de los procesos hereditarios, vinculando la función y la información incluso entre diferentes campos de conocimiento. Es precisamente este origen multidisciplinar el que constituye el concepto del cromosoma como germen para el desarrollo de una ciencia moderna, en la que los límites de su aplicación no se refieren exclusivamente a la genética o a la biología molecular.

**Figura 18.**

*Esquemas del proceso de desarrollo del modelo del ADN por F. Crick y J. Watson. ;(sup. izq.) Nucleótido, (centro) apareamiento de nucleótidos por bases iguales;(inf. izq.) Esquema doble hélice por apareamiento de bases iguales;(Der) Modelo del ADN*



Nota. Tomado de *La Doble Hélice. Relato personal del descubrimiento de la estructura del ADN*, por Watson, J ([1968] 2000), Pp. 40, 59, 71, 74.

## 8. PRODUCCIÓN DISCURSIVA

La realización de este trabajo se sustenta sobre las motivaciones que, como educador en ciencias naturales, se han manifestado en torno a la enseñanza de la genética como un cuerpo de conocimientos que actualmente toman relevancia no solo en los espacios escolares sino también en los contextos menos formales, permitiendo hacer de la experiencia de la práctica educativa propia una fuente de indagación sobre lo que se enseña y sobre por qué se enseña.

A menudo, desde la práctica como docente se da cuenta de una especie de sujeción a criterios o lineamientos que resultan determinantes para la actividad de la enseñanza, esto es, que la práctica resulta limitada a los programas educativos y a los lineamientos curriculares. Parte del planteamiento problémico que dio origen a este trabajo está relacionado, en sentido particular, con prácticas educativas que resultan en la asunción de un cuerpo de conocimientos ya terminados, que llevan al agotamiento de los libros de texto y de un cuerpo conceptual que se presume como suficiente para dar respuesta a planteamientos que, en el contexto escolar, por ejemplo, evoquen las preguntas por la herencia, o la transmisión de las características entre los padres y los hijos.

Otra de las motivaciones que impulsó la realización de la discusión hasta ahora llevada a cabo, es la posibilidad de constituir un saber propio que, a partir del cuestionamiento por aquello que se enseña resulte en la posibilidad de ser alimentado por la profundización teórica, histórica y epistemológica, dicho de otro modo, de fundamentar el saber propio como disposición para otras posibilidades de la práctica educativa. En este punto cobra particular importancia el sentido formativo como educador en ciencias, que está consolidado desde el objetivo de formación desde los seminarios de la Maestría en Docencia de las ciencias Naturales, que invitan al cuestionamiento de las ideas habitualmente afirmadas sobre la ciencia, su proceder, la naturaleza de su conocimiento y su alcance. Así, los elementos

formativos procuran por una actividad crítica que no solamente constituye un elemento de aprendizaje, sino un elemento de acción pedagógica, al promover una constante valoración de lo que se enseña y el fundamento sobre el cual se enseña.

El trabajo que se ha desarrollado en los apartados anteriores —y que se empieza a concluir en esta sección— se reconoce que en la profundización teórica, así como el análisis histórico y epistemológico en el que un cuerpo de conocimientos tiene lugar, se sitúan en un campo de conflicto, que no debe ser entendido como una confrontación antagónica sino como el contexto en el que dentro de una época, una comunidad, convicciones y afiliaciones tienen lugar debates en torno a posibles respuestas a problemas comunes. Dando lugar a controversias, afirmaciones o refutaciones a desarrollos técnicos y teóricos, en otras palabras, al desarrollo de la ciencia.

Siguiendo las ideas expuestas en los párrafos anteriores, el trabajo desarrollado a lo largo de esta disertación, sobre los aspectos históricos en los que tuvieron lugar los conceptos del cromosoma, el gen y el ADN son resultado de la necesidad por documentar aquellos objetos que resultan en la constitución de cuerpos teóricos. La transformación de estos conceptos determinó en el transcurso dinámico de su propia historia, la consolidación de disciplinas en las que sus bases explicativas se originan a partir de problemas comunes. Este ejercicio permite comprender desde una perspectiva diferente el sentido de la práctica del educador en ciencias y sus alcances en el contexto escolar principalmente. La exploración de este mosaico de transformaciones históricas, epistemológicas y materiales no solo sustenta la comprensión de la naturaleza del conocimiento que consolida a la genética como disciplina, sino que es el punto de partida para problematizar su acción más allá de una enseñanza convencional limitada por contenidos ya elaborados.

Por otra parte, este trabajo contribuye a enriquecer una postura crítica del educador frente a los contenidos. Permite que se planteen preguntas sobre la pertinencia de los contenidos y su enseñanza plantearse, discriminar entre saberes propios del conocimiento

científico y aquellos que pueden tener lugar en el aula o un contexto experimental educativo, valorar los elementos expuestos en los libros de texto y establecer si entre estos el marco conceptual corresponde con lo que debe explicar. En este sentido una de las posibilidades que otorga esta mirada es la de identificar el uso impreciso de términos, explicaciones obsoletas o simplificaciones excesivas que permanecen en los textos escolares, aun cuando han sido superadas por modelos más actuales o generales. Por ejemplo, la permanencia en los libros de texto de la explicación de que durante el ciclo celular mitótico los núcleos desaparecen y vuelven a reaparecer. De esta manera, se asume una postura crítica que, a partir de la identificación de tensiones, anacronismos y contradicciones, brinde la capacidad de pensar una alternativa a su práctica que incluya estos elementos en sus objetivos de la formación en ciencias.

Esta mirada crítica del educador, sustentada en ejercicios de documentación y profundización histórica y epistemológica no busca exteriorizar estos ejercicios en su práctica, por el contrario, es a partir de esta realidad que rodea el desarrollo conceptual de una disciplina que se pueden establecer criterios para seleccionar de manera contextualizada el saber científico, reconociendo que no todos los cuerpos conceptuales tienen la misma relevancia en todos los contextos, es decir, qué conocimientos tienen sentido en relación con el entorno cultural, social y escolar de los estudiantes. Resulta importante, en este sentido, que el ejercicio de profundización no se trata solamente de reconocer y saber la teoría, sino que su valor radica en cómo se transforma en su práctica pedagógica.

Aunque, el desarrollo de este trabajo es exclusivamente una profundización histórica y epistemológica, no es un ejercicio espontáneo, sino el resultado de todo un proceso formativo que exige la apropiación crítica del conocimiento científico. En este sentido, la profundización que se ha desarrollado sobre los conceptos del cromosoma, el gen y el ADN demuestran que el conocimiento en la ciencia no es estático, se ha transformado siempre en medio de polémicas, controversias, discusiones acuerdos y disensos. Este proceder no solo enriquece el

conocimiento disciplinar, sino que es a partir de aquí donde otros también pueden tener un punto de partida para desarrollar una práctica igualmente reflexiva y coherente con la intención de construir saberes igualmente propios.

En concordancia con lo anterior, la realización de este trabajo demuestra la importancia de los estudios históricos, en el sentido que permiten comprender el panorama en el cual se llevan a cabo los desarrollos científicos y se configuran los objetos de conocimiento de las ciencias. En este caso, rastrear y caracterizar las condiciones técnicas y teóricas que otorgaron el estatus conceptual al cromosoma, al gen y al ADN, que muestran que su condición nunca estuvo terminada, o que su estado de origen hubiese explicado los fenómenos a los que se refieren, por el contrario, en el desarrollo del trabajo, se discute cómo estos conceptos fueron realmente construidos, de manera progresiva (a la manera de Kuhn o Bachelard), que lejos de la acumulación, fue a través de debates, tensiones y rupturas.

En este sentido, la profundización histórica que se ha desarrollado es un ejercicio riguroso por superar la mirada conmemorativa de la ciencia, esto es, que la historia de la ciencia, a menudo se entiende como el relato de los logros y eventos más importantes que llevaron a la consolidación de una teoría o el merecimiento de un premio. Esta noción “histórica” consolida a la ciencia como una secuencia lineal de logros, en la que un trabajo sobre una pregunta, termina siempre en una teoría exitosa, y en consecuencia en un conjunto de conceptos totalmente definidos. Dice Nietzsche al respecto de esta idea de la historia “Un fenómeno histórico estudiado de una manera absoluta y completa, reducido al fenómeno del conocimiento, está muerto, y por lo mismo vaciado de su valor histórico real” (Nietzsche, [1874] 2000).

Así como se ha escrito a lo largo de los capítulos precedentes en orden de comprender las condiciones técnicas y teóricas que permitieron la consolidación conceptual fundacional de la genética, también se establecieron los momentos y preguntas que eventualmente llevaron a su desarrollo, es decir cuáles fueron sus antecedentes. En este ejercicio, una mirada

retrospectiva permite reconocer que los avances técnicos y teóricos no han seguido nunca una secuencia lineal que conduzca de manera inevitable a la formulación de un concepto definitivo. Por el contrario, el conocimiento en las ciencias se transforma en la medida que surgen nuevas preguntas, nuevos problemas, como sostiene Bachelard ([1948] 2000) un problema científico se formula, a partir de otras preguntas, y cada respuesta solo lleva a nuevas preguntas.

El ejercicio historiográfico realizado, efectivamente da cuenta que la ciencia, y en este caso, la genética, no se consolidó por acumulación, nunca un nuevo conocimiento significó *un mejor conocimiento*. Valga aquí tomar por ejemplo al cromosoma, la transformación de su estatuto conceptual, se transformó en la medida que las condiciones técnicas y teóricas lo permitieron, ya no era un elemento en el núcleo celular que respondía a las técnicas de tinción, con forma rizada y que estaba en el núcleo celular. Si no que fue precisamente por el desarrollo de elementos técnicos y desarrollos teóricos que fue posible considerarlo como un elemento físico en el cual se encuentran los componentes materiales de la herencia; los genes. Sin embargo, en esta consolidación, se presentaron un sinnúmero de discusiones y controversias en las que una propuesta teórica tuvo éxito por su fundamento empírico y capacidad explicativa.

Como trabajo de investigación y en sentido estricto, como consolidación de un ejercicio en torno a las condiciones en que el conocimiento científico tiene lugar, esto es, en la interdependencia entre los desarrollos teóricos y las innovaciones técnicas que posibilitan la producción de conocimiento científico. El presente trabajo puede considerarse como fuente de referencia para futuras investigaciones que tengan a su base el interés por el desarrollo científico, la historia de la genética y de la consolidación de sus conceptos estructurantes. El desarrollo de los eventos y las fuentes de referencia que fueron seleccionadas ofrecen de manera estructurada y clara un recorrido por el desarrollo histórico sobre la fijación de la genética como un cuerpo disciplinar que responde a problemas específicos sobre la

transmisión y expresión hereditaria a partir de las condiciones técnicas y teóricas que lo hicieron posible.

El desarrollo historiográfico que se ha realizado, especialmente en el capítulo anterior permite establecer que los desarrollos teóricos y técnicos permitieron la consolidación conceptual de tres elementos constitutivos sobre los que la genética como disciplina científica establece sus propios problemas de conocimiento; en este sentido, se puede afirmar que, entre el cromosoma, el gen y el ADN, no existe una independencia conceptual estricta, es decir, que en tanto concepto cada uno contiene y hace referencia a los otros, se encuentran interdependientes entre sí, sin embargo, se afirma aquí, que su identidad no es exclusivamente conceptual, sino que son distinguibles en su estatuto histórico y epistémico, así cada uno de ellos aunque pueda referirse a un nivel de organización, resulta más bien un nivel explicativo en el que los fenómenos hereditarios pueden ser abordados. Así pues, estos conceptos, en relación con las condiciones en los que se consolidan, hacen parte de tres niveles; el de la estructura, o nivel microscópico, el nivel molecular o del modelo, y el nivel del código o informacional.

En el primer nivel, o nivel de la estructura, el cromosoma se constituye como la unidad hereditaria, se ubica como la entidad física, discreta y observable que interviene en los procesos biológicos relacionados con la herencia, en este nivel convergen aspectos como la Teoría cromosómica de la herencia y su relación con procesos meióticos y mitóticos, así como eventos ligados a la reproducción como la fecundación y conformación del cigoto.

El segundo nivel, nivel molecular o del modelo, describe cómo se compone y se organiza el modelo de la estructura del ADN, se puede enmarcar en lo que Giere (1999 en Ardúriz-Bravo, 2012) describe como modelo analógico. Supone para este autor un “modelo teórico” que se comporta exactamente según una serie de criterios, enunciados o proposiciones que definen esta entidad y que resulta representativo de los elementos que conforman un fenómeno. Por ejemplo, el modelo de la molécula propuesta por J. Watson y F.

Crick (junto a M. Wilkins y los importantes aportes de R. Franklin) responde a criterios como las reglas de E. Chargaff en su composición, y los criterios de apareamiento entre bases nitrogenadas a través de la conformación de puentes de hidrógeno dobles y triples entre la adenina y la timina, y la citosina y la guanina, respectivamente.

Así mismo sobre el modelo del ADN, en palabras de Oh, P. & Oh, S. (2011 en Ardúriz-Bravo, 2012), se puede afirmar que, en tanto modelo, guarda analogía con los fenómenos que representa, es hasta cierto punto una representación de la realidad y permite que se deriven hipótesis susceptibles de ser puestas a prueba. Se puede decir, que la consistencia del modelo de la molécula del ADN significó para la biología molecular un sustrato importante para dar cuenta de eventos como la duplicación, transcripción y traducción.

El tercer nivel, el nivel del código o informacional, establece las condiciones explicativas en las que el gen tiene lugar como unidad de información (sin contar por ahora con los elementos del código que no son codificantes, es decir, no se traducen), si bien contempla una base molecular y estructural, su expresión no tiene lugar fuera de un contexto explicativo que no sea el de unidad de información. Este nivel se considera, pues, un nivel explicativo analógico, derivado de un enfoque cibernético de la información, se trata aquí, de un modelo computacional que establece relaciones de función en relación con aspectos como, por ejemplo, el almacenamiento y la expresión.

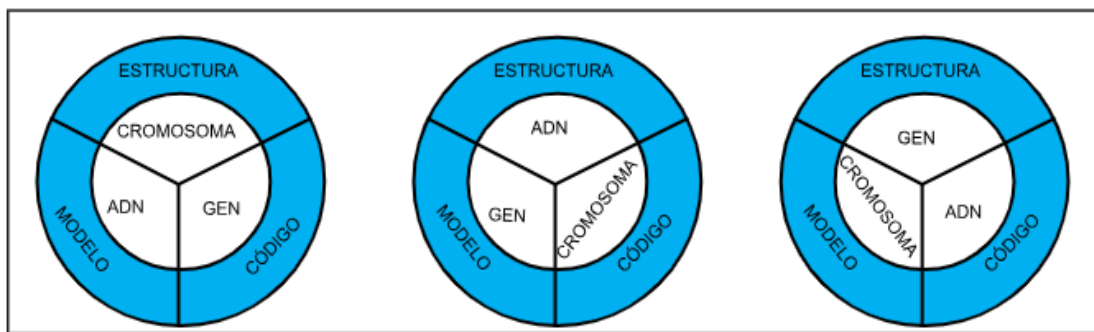
Lo anterior, como se menciona, es una aproximación sobre unas consideraciones conceptuales derivadas del trabajo desarrollado, esta aparente discriminación de niveles explicativos en los que se ubican el cromosoma, el gen y el ADN, debe decirse de manera enfática que no es estricta, no se pretende poner límites entre uno y otro, y menos asumirlos como independientes, lo que se quiere hacer notar es que existen aspectos conceptuales que los ubican interdependientes entre sí y aspectos epistémicos que los distinguen a su vez.

La relación entre el estatuto conceptual y el estatuto epistémico entre estos niveles puede pensarse de manera análoga en un disco que contiene a los conceptos cromosoma, gen

y ADN (el estatuto conceptual) contenido en otro que representa los niveles del estatuto epistémico (Estructura, código y modelo) (Figura 8). El primer disco puede girar, estableciendo diferentes combinaciones entre un estatuto y otro, y en esas combinaciones entre lo conceptual y lo epistémico emergen relaciones que permiten abordar un concepto desde un ámbito epistémico particular, pero que mantiene la interdependencia en lo conceptual y lo distingue en lo epistémico.

**Figura 8.**

*Relaciones que se establecen entre los estatutos conceptual y epistemológico.*



Por ejemplo, si se considera la relación cromosoma-estructura, aparecerán todas las relaciones de desarrollo en torno a la teoría celular que permitieron su consolidación y la importancia para responder a los interrogantes por la herencia, su relevancia en la mitosis y la meiosis, así como en la fecundación. Si se considera la relación cromosoma-modelo, se refiere a las representaciones del cromosoma y sus comportamientos durante las divisiones celulares o sobre las que se han desarrollado los mapas cromosómicos sobre los que se ubican los genes.

Por ahora este modelo es una aproximación a las relaciones que se fueron encontrando entre los conceptos de gen, cromosoma y de ADN en torno a su constitución desde el contexto histórico en el que las condiciones teóricas y técnicas permitieron su concepción y consolidación como conceptos realmente explicativos de los fenómenos celulares, físicos y químicos como informacionales en los que tuvieron lugar.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril A.M., Mayoral M. V. y Muela, F. J. (2004). Los medios de comunicación social y la didáctica de la Genética y la Biología Molecular en E.S.O. En La nueva alfabetización: un reto para la educación del siglo XXI (pp. 367-368). Madrid: Ed. Centro de Enseñanza Superior en Humanidades y Ciencias de la Educación "Don Bosco".
- Albarracín, A. (1982). *La teoría celular, paradigma de la Biología del siglo XIX*. Dynamis: Acta Hispanica ad Medicinae Scientiarumque Historiam Illustrandam, 1982, Vol. 2, Pp. 241-262, <https://raco.cat/index.php/Dynamis/article/view/106184>.
- Albarracín, A. (1983). *La Teoría Celular. Historia de un paradigma*. Alianza Editorial S.A. Madrid
- Ardúriz- Bravo, A. (2012). Algunas características clave de los modelos científicos relevantes para la educación química. Educación química, ISSN 0187-893X, Vol. 23, N.º. Extra 2, 2012, pp. 248-56.
- Ariza, L. B. & Caicedo, V. (2018). *La herencia: la cuestión de lo evidente al modelo para su comprensión*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/9668>.
- Avery, O.T., MacLeod C.M., & McCarty. M. (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. Induction of transformation by a desoxyribonucleic acid fraction isolated from pneumococcus type III. J. Exp. Med, 79:137-158
- Ayuso, G. & Banet, E. (1995). Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato: I. Contenidos de enseñanza y conocimientos de los alumnos. Enseñanza de las Ciencias, 13(2), pp. 137-153
- Ayuso, G. & Banet, E. (2002). Alternativas a la enseñanza de la genética en educación secundaria. Revista enseñanza de las ciencias. Vol. 20. Barcelona, 2002, pp. 133-57
- Bachelard, G. (2000). La formación del espíritu científico. Argentina. Siglo veintiuno editores.

- BALTZER, F., & Rudnick, D. (1967). *Theodor Boveri: Life and Work of a Great Biologist* (1st ed.). University of California Press. <https://doi.org/10.2307/jj.2711596>
- Barahona, Ana. (1994). Gene y mutación: una visión histórica. *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, ISSN 0210-8615, Vol. 17, Nº 32, 1994, pags. 5-24.
- Blanché, R. (1972). *El método experimental y la filosofía de la física*. F.C.E. México.
- Boveri, T. (1904). *Ergebnisse über die Konstitution der chromatischen Substanz des Zellkerns*. Verlag von Gustav Fischer. Jena.
- Burgos, J. C. & Hernández, S. M. (2016). *¿Por qué los hijos se parecen a los padres?: una mirada desde la herencia biológica*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/347>.
- Carey, S., Aközbek, L., Harkess, Alex. (2022). The contributions of Nettie Stevens to the field of sex chromosome biology. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 377. 20210215. 10.1098/rstb.2021.0215.
- Coleman, W. (1965). Cell, Nucleus, and Inheritance: An Historical Study. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 109(3), 124–158. <http://www.jstor.org/stable/986128>
- Correa, M. (2012). *Estado del arte sobre los trabajos prácticos en la enseñanza de la biología (2004-2008): un aporte a la formación docente*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Delgado, I. (2000). *Nettie Maria Stevens y la función de los cromosomas sexuales*. *Cronos* 3 (2): 239-271 (2000)
- Elkana, Y. (1983). *La Ciencia como Sistema Cultural: Una Mirada Antropológica*. Sociedad Colombiana de Epistemología, pp. 65-80.
- EVIDENT (2025). *Inmersión Media*. Consultado en <https://evidentscientific.com/en/microscope-resource/knowledge-hub/anatomy/immersion> el 12 abril de 2025

- Flemming, W. (1882). *ZELLSUBSTANZ, KERN UND ZELLTHEILUNG*. Verlag von F.C.W. Vogel. Leipzig.
- Fol; H. (1879). *Recherches sur la fécondation et le commencement de l'hénogénie chez divers animaux*. Henri Georg, Libraire Éditeur, Ginebra.
- Foucault, M (1968). *Las palabras y las cosas*. Argentina. Siglo veintiuno editores.
- Foucault, M. (2002). *La arqueología del saber*. Argentina. Siglo veintiuno editores.
- Fourez, G. (1994). *Las Ciencias Modernas como producto de la Historia*. En G. Fourez, *La Construcción del conocimiento Científico* (págs. 109-26). Madrid: Narcea.
- Gil Pérez, D. (1994). *Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: realizaciones y perspectivas*. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, [en línea], 1994, Vol. 12, n.º 2, pp. 154-64
- Giordan, A., Host, V., Tesi, D. & Gagliardi, R. (1988). *Conceptos de Biología 2*. Barcelona. Centro de publicaciones del MEC.
- Godoy-Guzmán, C. (2013). *Contribuciones de Wilhelm His a la Embriología Humana*. *International Journal of Morphology*, 31(1), 70-74.
- Hacking, I. (1983). *Representar e intervenir*. Paidós. México, Buenos Aires, Barcelona.
- Harman, O., Lamm, E. (2006). *History of Classical Genetics*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester.
- Hertwig, O. (1888). *Lehrbuch der Entwicklungsgeschichte des Menschen und der Wirbeltiere*. Verlag von Gustav Fischer. Jena.
- Íñiguez, 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*, ISSN-e 1697-011X, Vol. 10, N.º. 3, 2013, págs. 307-327
- Jacob, F. (1999). *La lógica de lo viviente*. Barcelona. Tusquets Editores
- Keller, E. (2000). *The century of the Gene*. Harvard University Press.

- Kohler, Robert E. (1994). *Lords of the fly: Drosophila genetics and the experimental life*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Kuhn, T. (1996). *La tradición Matemática y la Tradición Experimental en el Desarrollo de La Física*. La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia. Reimpresión FCE: México.
- Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. México. Fondo de Cultura Económica.
- López-Beltrán, C. (2004). *El sesgo hereditario. Ámbitos históricos del concepto herencia biológica*. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, M. L. (2005). El realismo científico de Ian Hacking: de los electrones a las enfermedades mentales transitorias. *Redes*, 11(22), 153-176.
- McClung, C.E. (1902). *The Accessory Chromosome—Sex Determinant?* *Biological Bulletin*, 3:43–84.
- McMillan, D. B., & Harris, R. J. (2018). *An atlas of comparative vertebrate histology*. Academic Press.
- Megías M, Molist P, Pombal MA. Atlas de histología vegetal y animal. <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html>. Consultado: (14 abril 2025).
- Mendel, G. (1865). *Verhandlungen des Naturforschenden Vereines, de Brno*, 4 (1865), pp. 3-47.
- Méndez, A., Méndez, J. L., Dávila, U. M., Sierra, M. A., Jover, A. (2010). *El microtomo y el microscopio. Historia de dos instrumentos básicos en los avances de la ciencia. XVI Congreso Nacional y VII Iberoamericano de Historia de la Veterinaria:*
- Mingos, D. & Raithby, Paul. (2020). *21st Century Challenges in Chemical Crystallography I History and Technical Developments: History and Technical Developments*.
- Ministerio de Educación Nacional (2004). *Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales*.

- Ministerio de Educación Nacional (2016). Derechos Básicos de Aprendizaje. Ciencias Naturales.
- Mojica, P. E. (2016). *Propuesta didáctica para la enseñanza de la Genética Mendeliana centrada en el aprendizaje basado en problemas en grado noveno a través de un ambiente virtual de aprendizaje*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12209/172>.
- Moreno, M. (2024). *Breve historia del cromosoma, elemento fundamental en la transmisión de los caracteres hereditarios y en los procesos evolutivos*. Boletín de la Real Academia de Córdoba de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes, ISSN 0034-060X, Vol. 103, N°. 173, 2, 2024, págs. 659-688
- Moreno, R. (2014). *Desarrollar una estrategia didáctica constructivista a partir de los conceptos de gen y cromosoma que permitan una mejor comprensión de la herencia biológica en el grado noveno del seminario menor de la arquidiócesis de Medellín*. [monografía de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Medellín]  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21095>
- Morin, E. (1996). El problema del Conocimiento del Conocimiento. En H. R. Fischer, El final de los Grandes proyectos. Barcelona: Gedisa.
- Muller, H. J. (1927). Artificial Transmutation of the Gene. *Science*, 66(1699), 84–87.  
<http://www.jstor.org/stable/1651551>
- Muller, J. H. (1928). The Production of Mutations by X-Rays. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 14, No. 9 (Sep. 15, 1928), pp. 714-726
- NIETZSCHE, F., *De la utilidad y los inconvenientes de los estudios históricos para la vida*. Alianza Editorial, Madrid 1986.
- Olby, Robert C. 1966. Origins of Mendelism. New York: Schocken Books
- Orozco, Y. (2013). Aprender sobre herencia genética: Más que un cuadro de Punnett. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC Águas de

Lindóia, SP – 10 a 14 de Novembro de 2013, 1-8.

[https://abrapec.com/atas\\_enpec/ixenpec/atas/resumos/R0514-1.pdf](https://abrapec.com/atas_enpec/ixenpec/atas/resumos/R0514-1.pdf)

Ortiz-Hidalgo, Carlos. (2024). Los secretos de la cocina del Castillo de Tübingen: Friedrich Miescher y el descubrimiento de la nucleína, piedra angular del ADN. *Gaceta médica de México*, 160(4), 465-471. Epub 07 de febrero de 2025. <https://doi.org/10.24875/gmm.24000213>

Portin, P. (1993). *The Concept of the Gene: Short History and Present Status*. The Quarterly Review of Biology. Vol. 68, No. 2 (Jun., 1993), pp. 173-223.

Posada, J.M (2000). El estudio didáctico de las ideas previas. Didáctica de las ciencias experimentales. (Perales F. & Cañal, P.) Alcoy: Marfil

Richardson MK, Keuck G. (2022). *The revolutionary developmental biology of Wilhelm His, Sr*. Biol Rev Camb Philos Soc. 97: 1131–60

Ríos, O. (2014). Conversaciones sobre la práctica de la enseñanza de las ciencias. Nietzsche el provocador. Monografía, Trabajo de grado. Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional.

Roma, S. M., Pérez, F. A., & D'Ottavio, A. E. (2021). EL DESAFIANTE DERROTERO DE LA HISTOLOGÍA MÉDICA: Pasado a valorar, presente a construir, futuro a descifrar. *Revista Médica De Rosario*, 87(2), 98-105. Recuperado a partir de <https://revistamedicaderosario.org/index.php/rm/article/view/145>

Rossi, A. (2008). Aportes a la enseñanza de la biología. El desafío de aprender y enseñar genética en la escuela secundaria. Bio lógica N.º 10, noviembre- diciembre de 2008. Revista Boletín Bio lógica, pp. 17-19

Sánchez, R., Oliva, N. (2015). Historia del microscopio y su repercusión en la Microbiología. *Humanidades Médicas*, 15(2), 355-372.

- Satzinger H. Theodor and Marcella Boveri: chromosomes and cytoplasm in heredity and development. *Nat Rev Genet.* 2008 Mar;9(3):231-8. Doi: 10.1038/nrg2311. PMID: 18268510.
- Schneider, A. (1873). *Untersuchungen über Plathelminshbhen*. J. Ricker'sche Buchhandlung. Giessen.
- SCIENCE MUSEUM GROUP (2025). Microtome in box. Consultado en <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co1887/microtome-in-box> el 12 de abril de 2025
- Strasburger, E., et al. (1923). *Tratado de Botánica*. Manuel Marín, Editor. Barcelona.
- Sturtevant, A.H. (2000). Una historia de la genética. New York. Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Sutton, W. (1903). *The Chromosomes in heredity*. The Biological Bulletin. Volume 4, Number 5 April 1903
- Vargas, M., Méndez O., Jiménez, G., Pedreros, R. & Tarazona, L. (2020). El Aula como sistema de Relaciones. Módulo de Pedagogía II. En Tarazona, L. (2020). Material de apoyo seminario el aula como sistema de relaciones. Universidad Pedagógica Nacional.
- Vicedo, M. (1992). Citogenética: La búsqueda de la base física de los genes. *Asclepio*, 44(1), 115–133. <https://doi.org/10.3989/asclepio.1992.v44.1.516>
- Von Glasesrsfeld, E. (1996). Aspectos del Constructivismo Radical. En M. Pakman, Construcciones de la experiencia Humana. Barcelona: Gedisa.
- Walczak, C., Cai, S. & Khodjakov, A. *Mechanisms of chromosome behaviour during mitosis*. *Nat Rev Mol Cell Biol* 11, 91–102 (2010).
- Watson, J. D., Baker, T. A., Bell, S. P., Gann, A., Levine, M., & Losick, R. (2016). Biología molecular del gen (7a ed.). Editorial Médica Panamericana.
- Watson. J. (2000). *La Doble Hélice. Relato personal del descubrimiento de la estructura del ADN*. Alianza Editorial S.A. Madrid.

## 10. ANEXOS

### a. ANEXO A. Matriz de acercamiento a condiciones técnicas y teóricas de los conceptos de Cromosoma, Gen y ADN

	ESTRUCTURA	MODELO	CÓDIGO
<b>CROMOSOMA</b>	Cuerpo coloreado Secciones distinguibles Centrómero y Cromátides Diversidad de formas y tamaños Forma de X Es el estado de condensación de la cromatina Son susceptibles de tinción	Forma de empaquetamiento de la cromatina Histonas- Fibras de ADN Nucleosomas Solenosomas Cromatide-Centrómero-Telómero	
<b>ADN</b>			
<b>GEN</b>			

HISTORIA DE LA GENÉTICA
NIVEL DE COMPLEJIDAD

**b. Anexo B. Matriz de determinación de condiciones técnicas y teóricas para el concepto de Cromosoma**

CONCEPTO	ESTRUCTURA		MODELO		CÓDIGO	
	Condiciones		Condiciones		Condiciones	
	Teóricas	Técnicas	Teóricas	Técnicas	Teóricas	Técnicas
CROMOSOMA	<p>Willheim von Nageli (1842), "Citoblastos transitorios"</p> <p>Eduard van Beneden</p> <p>Contó el número de cromosomas de células de diferentes especies y llegó a la conclusión de que el número de cromosomas es una característica de la especie.</p>	<p>Observación del núcleo celular en plantas. Interés por la composición del citoplasma y el núcleo celulares.</p> <p>Observación en <i>Ascaris</i> (nematodos)</p>				
	<p>H.W.G Waldeyer (1888): Término <i>cromosoma</i></p>	<p>Desarrollo de métodos de tinción a partir de anilinas.</p>				

	<p>Eduard Strasburger (1875, publica en 1894); "Los núcleos celulares, provienen de células con núcleos que las preceden"</p>	<p>Observación de estados de los cromosomas durante la división celular (Mitosis).</p>	<p>Descripciones y representaciones de los estadios de los cromosomas durante la división celular</p>	<p>Observación microscopio óptico</p>		
	<p>Walter Flemming (1882); Describe las fases de la mitosis. Distribución cromosómica durante la división nuclear.</p> <p>Primeras observaciones de cromosomas humanos.</p>	<p>Coloración de los cromosomas (cromatina y acromatina)</p>	<p>Descripciones y representaciones de los estadios de los cromosomas durante la división celular</p>	<p>Observación microscopio óptico</p>		
	<p>Hermann Henking (1891); Describe el elemento o cuerpo X.</p> <p>C.E. McCLung (1901); "cromosoma accesorio", sistema XX, XO</p>	<p>Observa espermatozoides de insectos, en las que se reciben un cromosoma menos después de la meiosis.</p>				

	<p>Walter Sutton y Theodor Boveri (1901 a 1902)</p> <p>Los cromosomas son morfológicamente individualizables en las fases de la meiosis.</p> <p>(TEORÍA CROMOSÓMICA)</p> <p>Pares de cromosomas similares se unen para separarse en la división reductora</p> <p>Los factores mendelianos están en los cromosomas</p>	<p>Observación de cigotos de saltamontes (<i>Brachystola magna</i>) y erizos de mar (), células con 36 cromosomas y células embrionarias, de las primeras divisiones.</p>				
	<p>Nettie Stevens – E.B. Wilson (1905); Determinación del sexo por diferencias cromosómicas. El cromosoma “minúsculo” es de origen paterno. Solo una parte de los espermatozoides</p>	<p>Trabajo con <i>Tenebrio molitor</i>, observación de gametos femeninos y masculinos.</p>				

	<p>aportan dicho cromosoma.</p>					
	<p>EL GRUPO DE DROSOPHILA (T.H Morgan, A.H. Sturtevant, H.J. Muller, C.B. Bridges)</p> <p>Dependencia entre el sexo y el gen responsable del color de los ojos, está en el cromosoma X. (Sex-limited character).</p> <p>Descripción de la primera trisomía, inaugura la patología cromosómica.</p> <p>Mapas cromosómicos y <i>crossing over</i>.</p> <p>CITOGENÉTICA</p> <p>G. A. Levitsky 1924; utiliza el término cariotipo, para referirse al</p>	<p>Cruces de variantes de Drosophila, de ojos rojos (salvaje) con variante ojos blancos (mutante). Dependencia del sexo y el color de los ojos.</p> <p>Refinamiento de técnicas de tinción, Giemsa, anilinas. Cultivos in vitro de células, en metafase</p>		<p>Normas de identificación de la morfología cromosómica</p>		

	<p>ordenamiento de los cromosomas de las células.</p> <p>Tjio y Levan 1956; Determinación del cariotipo humano (2n=46).</p> <p>J. Lejeune - M. Gauthier (1959) Observan e identifican la trisomía del cromosoma 21.</p> <p>TÉCNICAS DE BANDEO</p> <p>Torbjörn Caspersson 1968</p>	<p>(mitógenos e inhibidores)</p> <p>Cultivo de fibroblastos adultos. Protocolo colchicina-choque hipotónico-fijación con ácido acético y etanol-coloración con azul de Unna</p> <p>Bandas Q fluorescentes; quinacrina unida a sitios de abundancia A-T, generaba bandas claras y oscuras.</p> <p>Bandas C hidróxido de sodio, incubación en una solución salina y tinción por el Giemsa.</p> <p>Bandas G Denominadas así por la tendencia a teñirse con el colorante de Giemsa.</p> <p>Bandas T Se obtienen cromosomas teñidos</p>	<p>Estructura característica de cada brazo cromosómico</p> <p>En el centrómero la cromatina está más condensada que en el resto del cromosoma</p> <p>Patrones de tinción claras y oscuras en los brazos del cromosoma, distinguibles de cada par homólogo.</p> <p>Ricas en G-C, conforman las regiones distales de los brazos de los</p>	<p>Las regiones centroméricas se tiñen fuertemente.</p> <p>Patrones de coloración a lo largo del cromosoma</p>		
--	--	--	---	---	--	--

	<p>F. Arrighi</p> <p>M. Shaw, M. Drets</p> <p>Ricas en pares de bases adenina y timina, replicar su ADN tardíamente durante el período de síntesis, condensarse tempranamente durante la mitosis y reflejar el patrón cromomérico de los cromosomas meióticos.</p> <p>B. Dutrillaux</p> <p>Tinción de las bandas distales de los brazos de los cromosomas (Telómeros)</p>	<p>en forma débil excepto los segmentos terminales donde la tinción continúa siendo intensa.</p>	<p>cromosomas (Telómeros)</p>		
--	---	--	-------------------------------	--	--

ADN						
GEN						

c. ANEXO C. Diagrama de intención del desarrollo de la propuesta monográfica

