



Didáctica de la Genética

Josep
Cuello
Subirana

DIDACTICA DE LA GENETICA

J. Cuello Subirana

DIDACTICA DE LA GENETICA

J. Cuello Subirana



PUBLICACIONS I EDICIONS DE LA
UNIVERSITAT DE BARCELONA

1983

publicacions
edicions
universitat
de barcelona



Publicacions de l'ICE
Col·lecció Documents A-63

Disseny portada: t. jordà

© Edicions de la Universitat de Barcelona
Avgda. Xile s/n. — Barcelona — 28
I.S.B.N. 84-7528-068-4
Dipòsit Legal B.; 10.949-1983
Imprimeix: Barnagràfic

PROLOGO

Los materiales aquí reunidos constituyen una muestra bien amplia de lo que personalmente he podido reunir acerca de la didáctica de la genética desde el curso 1970-71, en el que inicié mis años de estancia y colaboración en el Departamento de Genética de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona. En recuerdo de aquellos años debo expresar mi agradecimiento a todas las personas que integraban dicho departamento por la ayuda y colaboración que me prestaron. Luego, durante algunos años —especialmente 1975 y 1976— desde el laboratorio de Biología General de la misma Facultad tuve la suerte, en una efímera coincidencia, de colaborar (y beneficiarme del entusiasmo) con algunos colegas especialmente preocupados por los aspectos pedagógicos y didácticos de la biología y pude así incrementar notablemente mis conocimientos acerca de este aspecto de la biología y, más especialmente de la genética. A todos quienes fueron mis colegas por aquel entonces agradezco sinceramente su colaboración, especialmente a Miguel Hernández Martínez y a Jaume Josa Llorca que prepararon conmigo algunos materiales que incluyo en esta selección.

También me fue de gran utilidad la enorme riqueza de intercambio de datos y experiencias que supuso el Congreso del Eulo (III European Conference on the educational use of living organisms) celebrado en Sevilla, en 1976, especialmente por la presencia de las delegaciones holandesa, inglesa y norteamericana. De aquel congreso deben destacarse también —por su interés— todos los materiales preparados por el personal del Departamento de Genética de aquella Universidad.

En 1978-79 colaboré con el Seminario Permanente de Biología del ICE de la Universidad de Barcelona. Aquella colaboración consistió, por mi parte, en recoger (por diversos medios y de forma masiva) información acerca de alrede-

dor de 300 entidades cívicas o comerciales extranjeras (especialmente en Gran Bretaña) dedicadas total o parcialmente a la didáctica de la biología. De aquella vasta información obtenida seleccioné especialmente la referida a la genética, y muchos de los materiales aquí recogidos tienen dicha procedencia. Del ICE de la Universidad de Barcelona he recibido además muchos otros estímulos para perseverar en esta línea emprendida, especialmente facilitando la contrastabilidad de los materiales en cursos, seminarios y grupos de trabajo auspiciados desde allí por muchos de sus miembros, con los que también estoy en deuda.

Finalmente, desde el Instituto he seguido pendiente de ampliar mi información y especialmente de verificar la idoneidad de muchos métodos y materiales que hasta entonces sólo había podido emplear con alumnos universitarios. En este aspecto mis compañeros del Seminario de Ciencias Naturales del Instituto tienen también mi más sincero reconocimiento por su constante estímulo.

*Josep Cuello Subirana
Barcelona, enero de 1982*

I. OBJETIVOS Y PROGRAMACIÓN DE LA ENSEÑANZA DE LA GENÉTICA

No he creído oportuno ofrecer una programación pormenorizada por cursos, sino que por el contrario indico solamente unas líneas directrices de la programación, desarrollo conceptual, objetivos operativos, etc. a nivel de todo el período de enseñanza en el Instituto (o equivalente). Cada centro de enseñanza media (y dentro de él cada colectivo de profesores de biología) tienen un buen número de circunstancias más o menos locales que les llevan a unas elecciones concretas: posponer unos temas para cursos superiores, adelantar otras materias, etc., etc. En este sentido una programación muy concreta si no fuera acompañada por una cantidad notable de notas y matizaciones —cuyo volumen no tiene sentido aquí— no tendría demasiada utilidad. Me limitaré, por tanto, a ofrecer una visión global de la programación aumentada, tan solo, por algunas observaciones que sin embargo no quiero dejar de hacer.

Entre ellas la ubicación en el curriculum del estudio de temas clásicos como son la *mitosis* y la *meiosis*. A mi modo de ver la mitosis puede y debe estudiarse —con una prolijidad relativamente grande— ya en el primer curso de ciencias naturales del actual bachillerato. Los motivos son numerosos: la importancia capital del proceso desde el punto de vista de la teoría celular que en este curso tiene una importancia asimismo fundamental; el dominio del microscopio que se pretende también en este curso; la relativa sencillez de la técnica y de los materiales necesarios que hacen posible la repetición del «protocolo práctico» tantas veces como sea necesario para lograr preparaciones aceptables, etc. En cambio, insistir en este nivel en la *meiosis* suele conducir a engendrar falsas dicotomías meiosis/mitosis y a trastocar no sólo el aprendizaje (enrevesado para el principiante) de fases y subfases sino también el del significado más profundo de ambas. Creo que el estudio de la meiosis debe posponerse a una fase posterior —*distanciada en el tiempo del aprendizaje de*

la *mitosis*, aunque lógicamente será conveniente traer a ésta a colación para analizar las semejanzas y las diferencias— a la que los alumnos han de llegar con un mayor bagaje de conocimientos, y en unas circunstancias, por tanto, de mayor perspectiva para comprender su *exacto significado* (no olvidemos —y dicho sea de pasada— que en el fondo la exacta memorización de los *paquite-no, diploteno,...* es lo menos importante).

La genética molecular merece también un comentario. Los impresionantes avances logrados por ciertas ramas de la biología fundamental —la genética molecular entre ellas— iniciada ya la segunda mitad de este siglo han tenido un cierto efecto exagerador sobre los programas de la enseñanza media desplazando —por un efecto de péndulo— materias más clásicas como la anatomía y la zoología. La situación está lejos de estar normalizada (fundamentalmente porque en nuestro país los currículums carecen de estabilidad global) aunque ha variado ya mucho y cada vez es mayor el número de profesores que se dan cuenta de esta asimetría. Con este preámbulo se comprenderá fácilmente que mi opinión es que deben reservarse una exposición más o menos detallada —aunque lógicamente elemental— de la genética molecular a los cursos preuniversitarios (llámense COU, preu, primer curso de licenciatura o como se llamen) e insistir (y empezar) en el bachillerato por las leyes y las consecuencias de los mecanismos genéticos más que en su disección.

La programación que sigue debe entenderse pues como una secuencia lógica más que como una secuencia en el tiempo; aunque es válida mayoritariamente también en este sentido, salvo en unos pocos puntos en los que se implican subsecuencias parciales en las que deben ser introducidos sino explicaciones detalladas sí, por lo menos, conceptos previos. Como es lógico en el momento de su confección he consultado diversas obras al respecto que se han seguido de forma desigual. Por lo que respecta a la expresión de objetivos y contenidos he seguido en parte lo expuesto por H. Medrano en su programación del primer curso de Ciencias Naturales para el ICE de la Universidad Literaria de Valencia adaptándolo a las necesidades *globales* (de toda la enseñanza media) de esta programación.

Objetivos básicos

1. Obtención de una explicación científica del problema de la herencia.
2. Conocimiento de las particularidades más sobresalientes de la investigación genética.
3. Conocimiento y capacidad de crítica acerca de los trabajos de Mendel y sus consecuencias.
4. Adquisición de capacidad de explicación y predicción de la herencia de caracteres sencillos.
5. Adquisición de conocimientos básicos sobre las limitaciones de las leyes de Mendel y la importancia de la teoría cromosómica de la herencia.
6. Adquisición de la capacidad crítica para valorar el interés de las aplicaciones de la genética en la agricultura, ganadería, medicina y la economía doméstica.

Análisis conceptual

1. Introducción: la herencia y la reproducción. Bosquejo histórico.
2. La base citológica de la herencia.
3. Los trabajos de Mendel. Técnicas de cruzamiento. Autofecundación, fecundación cruzada.
4. Caracteres. Razas puras. Hibridación.
5. Primera ley de Mendel. Segunda ley de Mendel. Concepto de: gen, alelo, homocigosis, heterocigosis, genotipo, fenotipo. Dominancia, recesividad. Herencia intermedia. Codominancia. Cruzamiento prueba.
6. «Tercera ley de Mendel».
7. Redescubrimiento de Mendel. Teoría cromosómica de la herencia: los trabajos de Morgan.
8. Excepciones a la «tercera ley de Mendel». Explicaciones.
9. Ligamiento genético. Su base citológica. Cálculos sencillos de la frecuencia de recombinación.
10. Genética del sexo. Caracteres ligados al sexo. Caracteres ligados al cromosoma Y. Caracteres influidos y caracteres limitados al sexo.
11. Anomalías aparentes de la acción ejercida por los genes. Interacción génica. Alelomorfismo múltiple. Factores letales.
12. La herencia mendeliana en el hombre. Tipos y ejemplos. Casos sencillos. Alelomorfismos. Anomalías y aberraciones.
13. La herencia mendeliana en los animales domésticos y en la agricultura.
14. Nuevo concepto del gen. Expresión génica. Fisiología del gen. Operón, mutón y recón.
15. Los genes en las poblaciones. Variabilidad. Herencia polimérica. Mutaciones. Herencia poligénica y mutación en el hombre. Frecuencias génicas. Ley de Hardy-Weinberg. Factores disruptivos de las frecuencias génicas: migración, mutación, selección y deriva genética. Panmixia.
16. Las bases de la Ingeniería genética.
17. Aplicaciones y perspectivas de la genética.

Objetivos operativos.

El alumno que habrá superado todo el currículum en genética será capaz de:

1. Razonar las bases experimentales de las leyes de Mendel.
2. Definir correctamente y con capacidad para fabricar sus propios ejemplos los conceptos de: raza pura, híbrido, gen, alelo, homocigoto, heterocigoto, dominancia, recesividad, codominancia, herencia intermedia, genotipo, fenotipo y árbol genealógico.
3. Resolver problemas sencillos que impliquen el conocimiento y comprensión de las leyes de Mendel y de la herencia ligada al sexo.
4. Razonar el significado de cada una de las leyes de Mendel.
5. Razonar las limitaciones de dichas leyes.

6. Enlazar los conceptos de: meiosis, núcleo, gametos, cromosomas con los de locus, ligamiento, entrecruzamiento, teoría cromosómica y mapa cromosómico.
7. Diseñar árboles genealógicos elementales de ciertos caracteres de su propia familia. Prever la posible transición a su descendencia.
8. Describir un experimento que demuestra que el ADN es el material genético.
9. Explicar de forma clara y sencilla la expresión de los genes.
10. Enumerar las aplicaciones de la genética a los distintos campos, deduciendo el alcance de estas aplicaciones.
11. Comprender las consecuencias de la consanguinidad sobre la herencia.

Desarrollo conceptual

A modo de ejemplo se ofrece un desarrollo conceptual para un curso de biología de COU con indicación de los materiales precisos y de los recursos prácticos que se emplean en cada tema. Consta de los principales temas del programa anterior y de una selección de los recursos de los que se trata más adelante. *Se trata, por tanto, de un programa (para COU) exhaustivo, a utilizar solamente en circunstancias especialmente adecuadas. Se indican, asimismo, las unidades didácticas que pueden equivaler —holgadamente— a una sesión de clase. Aproximadamente cada 4 sesiones está programada una que permite ser utilizada fuera del aula, lo que aumenta la frecuencia de clases semanales a 5.*

1. Introducción a base de un «repaso» de la mitosis (tratándose de una nueva observación del fenómeno (véase pág. 1) se empleará en este caso un nuevo organismo; p. ej. *Tradescantia* —véase Capítulo II). Observación de cromosomas gigantes de *D. melanogaster* (Capítulo II).
2. Plantear a la clase un conjunto de preguntas sobre la herencia, la genética y la reproducción, para ser contestadas en pequeños grupos. Proceder a una confrontación de sus conocimientos. Elaboración de una síntesis.
Explicación de los rasgos más sobresalientes de la historia de la genética.
Entrega a los alumnos de una tabla para la recogida de datos acerca de algunos caracteres familiares a cumplimentar con parientes próximos: padres, abuelos, hermanos, y... tíos. (Sobre color del iris, del pelo, etc. etc. Los datos registrados en esta tabla servirán de base para algunos trabajos a efectuar a posteriori.
3. Poner a germinar (en la estufa, en un estuche de germinación, etc.) las semillas de judía o tomate para el estudio del mendelismo (dependiendo en buena parte de la estación del año en que se proceda a este estudio convendrá adelantarlo) y las semillas de tomate (o alfalfa) para el estudio de la mutación (semillas irradiadas).
4. Rememoranza de la figura y la obra de Mendel. Insistiendo en la explicación de las características de su método: tipo de planta utilizada, tipo

- de cruzamiento, método analítico, cuantificación de los resultados, utilización de razas puras, etc. y en las técnicas de trabajo.
5. Presentación de datos acerca de los resultados de la hibridación de ciertas razas puras. Los alumnos los analizarán en pequeños grupos y tratarán de obtener conclusiones. Presentación de nuevos resultados. obtención de conclusiones. Estudio de datos en los que aparecen en la 2ª generación los caracteres de los abuelos.
Cálculos de las proporciones. Búsqueda de explicaciones. Esta presentación de datos se efectuará, de preferencia, con cruzamientos simulados con semillas (véase Capítulo IV) y con mazorcas de maíz híbrido especialmente preparadas para este fin (véase Capítulo IV).
Introducir en el desarrollo de la segunda ley, tanto en la presentación de los resultados como en la síntesis final, los conceptos de: gen, alelo, homocigosis, heterocigosis, dominancia, recesividad, codominancia, y herencia intermedia.
Iniciación de un cruzamiento experimental con *Tribolium* (*Tribolium castaneum* o *T. confusum*, véase Capítulo V), tipo monohibridismo normal.
 6. Presentación y explicación en la pizarra de un par de problemas típicos. Introducción y explicación de los símbolos y pautas.
Dedicar la sesión a la realización y resolución de problemas, evaluando a lo largo de la misma la asimilación de conceptos.
Explicación de los conceptos de cruzamiento prueba o retrógrado y recíproco.
Analizar casos sencillos de la tabla de datos familiares. Estos datos pueden aprovecharse para la realización de los problemas indicados en el párrafo segundo.
 7. Planteamiento del estudio de la herencia de dos caracteres a la vez. Y de la obtención de razas puras y cruzamiento de las mismas.
Presentación de datos al respecto también aquí utilizaremos cruzamientos simulados en semillas y mazorcas de maíz). realización de problemas.
Iniciación de un cruzamiento experimental (dihibridismo clásico) con *Tribolium*.
Explicación de la «tercera ley», mediante un problema explicativo.
 8. Resolución de problemas de la segunda y «tercera ley» de Mendel. Revisión y evaluación de la asimilación de conceptos.
 9. Resolución de problemas de la segunda y tercera leyes aplicados en lo posible a la tabla de datos familiares. «Repaso» de conceptos. Insistir sobre los puntos fundamentales tratados hasta aquí.
Concepto de árbol genealógico. Elaboración de árboles genealógicos propios para aquellos caracteres de los que se disponga de más información.
Estudio de árboles genealógicos clásicos (la hemofilia en los Borbones; la familia Bach, etc.).
 10. Meiosis. Estudio de la misma. Confección de preparaciones temporales y estudio al microscopio de la meiosis en testículo de saltamontes. (Véase Capítulo II).

- Estudio y observación de la meiosis en *Coprinus lagopus* (basidiomicete), (Capítulos II y III).
11. Presentación de datos (con algún material de los anteriormente citados y a base de problemas: un material por caso) de cruzamientos cuyas descendencias no cumplen la tercera ley.
Cálculo de las proporciones fenotípicas observadas. Cálculos de las proporciones esperadas.
Interpretar la explicación de estas aparentes anomalías mediante una exposición en la que los alumnos tomen parte activa recordándoles la formación de cigoto, la meiosis y sus fases.
Explicación detallada de la teoría cromosómica de la herencia de Morgan y de los conceptos de locus y de genes ligados.
Breves nociones sobre mapas cromosómicos: elaboración y utilización.
Frecuencia de recombinación. Coeficientes de coincidencia.
 12. Iniciación de un cruzamiento experimental con *Drosophila melanogaster* (genes ligados).
«Repaso de los conocimientos adquiridos recientemente».
Presentar con énfasis la relación existente entre los conceptos aprendidos «teóricamente» (recombinación, entrecruzamiento) con los fenómenos visualizados en la observación de la meiosis (quiasmas, etc.).
 13. Iniciación de un cruzamiento experimental con *Drosophila melanogaster* (genes ligados al sexo).
Seguimiento de los demás cruzamientos experimentales ya iniciados.
Estudio, si procede, del mendelismo en plántulas y plantas jóvenes de tomate o judía (vide día 3); posponer si procede.
 14. Estudio y explicación de las anomalías aparentes de la acción ejercida por los genes. Explicación de los conceptos de alelomorfismo múltiple. Factores letales.
Estudio de la interacción.
Resolución de problemas al respecto.
Presentación de datos en forma de juegos con árboles genealógicos
 15. La genética mendeliana en el hombre. Presentación de resultados a base de juegos y problemas con factores letales, dominantes simples y recesivos.
El alelomorfismo múltiple en el hombre. Presentación de datos con respecto a los grupos sanguíneos.
Resolución de problemas —teniendo en cuenta los grupos sanguíneos— de paternidad dudosa.
Introducción mediante simulación (problemas-juego) del consejo genético. Presentación de casos simples. Idem. en animales domésticos.
 16. Resolución de problemas de la segunda y «tercera» ley de Mendel acerca de caracteres ligados al sexo.
Elaboración de árboles genealógicos para algunos casos sencillos.
Esta unidad didáctica es *opcional* dependiendo del ritmo seguido hasta aquí. Puede obviarse —si la adquisición de conocimientos los permite—, tratarla en forma de problemas a resolver individualmente, etc.
- 16^{bis} Seguimiento de los cruzamientos experimentales.

17. Estudio del descubrimiento del material genético.
Bosquejo histórico.
Metodología utilizada. Idea de la epistemología al respecto. Naturaleza de las pruebas.
Descripción detallada de —por lo menos— un experimento que demuestre que el ADN es el material hereditario.
Estudio y explicación de la expresión de los genes en la célula. Las teorías clásicas al respecto: un gen, un enzima, etc. La síntesis de proteínas.
Ejercicios prácticos de manejo de la clave genética.
18. Estudio experimental de la complementación y de los requerimientos nutritivos genético-dependientes en cepas de *Coprinus lagopus*.
19. Estudio de la genética molecular (fin). La estructura fina del gen.
Concepto de cistrón, mutón y recón.
Estructura del cromosoma.
Estructura del ADN.
El diseño de esta unidad depende lógicamente del diseño de las unidades de temas relacionados: bioquímica, metabolismo, etc.
20. La genética de poblaciones (I).
Explicación de la primera parte del temario. (página 4)
Estudio de la variabilidad y del polimorfismo.
Estudio experimental del polimorfismo en *Cepaea nemoralis* o en *Cepaea hortensis* (Capítulo VII).
Estudio experimental del polimorfismo en *Cepaea nemoralis* o en *Cepaea cahuete* (Véase capítulo IV).
21. Seguimiento de los cruzamientos experimentales.
22. Estudio de la variabilidad en la especie humana.
Estudio experimental y recogida de datos en el colectivo de la clase (o más amplio si no es suficiente) de: peso, estatura, fuerza manual, visión de los colores, enrollamiento de la lengua, etc., etc., y de grupo sistema ABO, grupo factor Rh, etc.
Tabulación de los resultados (capítulo VI).
23. Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos en la sesión anterior (Capítulo VI).
24. La genética de poblaciones (II).
Estudio de la segunda parte del programa (página 4): migración, mutación, selección y deriva genética. Frecuencias génicas. Resolución de problemas de mutación en los codones, mediante la utilización de la clave genética.
Utilización práctica del concepto de frecuencias génicas con los datos recogidos en la sesión 2.
Utilización práctica del concepto de frecuencias génicas con los datos obtenidos en la sesión 23 (sistema ABO, y factor Rh).
Averiguación práctica de si para estos caracteres (ABO, Rh) se puede considerar panmítico el colectivo de procedencia y representativa la muestra.
25. Estudio experimental de la selección con modelos simples (modelos con coeficiente de selección = 1) (véase Capítulo VII). Estudio experimental con modelos simples de la deriva genética (Capítulo VII).

Resolución de problemas elementales de mutación.

Explicación de la importancia fundamental de la mutación y sus tipos; aberraciones cromosómicas.

Poliploidía.

Introducción —si es posible práctica— a los modelos simples con ordenador.

26. Seguimiento de los cruzamientos experimentales.

27. Estudio de las aplicaciones de la genética. A modo orientativo podría hacerse detallando:

un ejemplo para la agricultura (obtención de nuevas razas de trigo, maíz... y su incidencia social).

idem para la ganadería (razas de pollos o gallinas ponedoras, idem para la medicina (por ejemplo, prevención de la subnormalidad).

Además pueden encargarse trabajos sobre tales explicaciones.

Si procede, *seguimiento final* de los cruzamientos experimentales.

28. Colofón.

II. ESTUDIO DE LA REPRODUCCION CELULAR Y DE LOS CROMOSOMAS

En este capítulo se consideran únicamente algunas técnicas sencillas de laboratorio, clásicas, para el estudio de la división celular (*mitosis* y *meiosis*) y las que permiten el estudio de los *cromosomas gigantes*.

En todos los casos se trata de *técnicas muy sencillas* sin dificultad real que pueden ser llevadas a cabo enteramente por los propios alumnos y que, por tanto, son de *elevado valor pedagógico*.

Por tratarse de técnicas muy conocidas y por esta facilidad antes citada no merecen, apenas, ningún comentario desde el punto de vista metodológico (el que nos importa aquí). Únicamente valdrá la pena anotar dos consideraciones.

La primera tiene que ver con la ubicación en el currículum de la realización de estos ejercicios o sea del momento (curso) en que deben ser planteadas a la consideración del alumno. De este punto, y de los argumentos que me merecen mayor consideración, ya me he ocupado anteriormente (página) y por tanto no será necesario insistir en ello. Recordemos, tan solo, que habíamos «colocado» la mitosis en el programa de 1º y la meiosis (y por supuesto algo tan puntual —e importante si se quiere, pero puntual al fin y al cabo— como son los cromosomas gigantes) mucho más tarde, es decir en el actual COU. No obstante (véase página 6) si las condiciones son muy favorables puede repetirse aquella observación en este último curso.

La segunda consideración es la única que tiene una trascendencia directamente didáctica. Se trata de la elección del material idóneo y de las razones para ello.

Es obvio que la mayoría de organismos eucariotas podrían servir para el estudio de la mitosis. Y algunos de tales organismos ciertamente deberán utilizarse cuando se pretenda estudiar un *determinado tipo de mitosis*.

Sin embargo como lo que debe importarnos es un *material con valor pedagógico* debemos escogerlo en base a las razones que le confieren dicho valor. En resumen dichas razones son:

- 1° El material debe contener, presumiblemente, muchas células en división. Ello permitirá, quizá, sorprender en el momento de iniciar la preparación a varias o a muchas) células en división y probablemente en distintas fases de la misma. La consecuencia será un *campo* más ilustrativo o pedagógico. Los tejidos de (o en) crecimiento cumplen este requisito.
- 2° Debe ser «fácil de manipular». Esta facilidad es, en términos generales, mayor para tejidos y órganos vegetales frescos que para sus homónimos animales.
- 3° El número de cromosomas será reducido. Cuánto menor sea este número más claras o pedagógicas resultarán las preparaciones.
- 4° Los materiales de crecimiento rápido (como por ejemplo las raíces vegetales en ciertas condiciones) permiten disponer (si se cumplen los anteriores requisitos) con un mínimo de previsión de materiales adecuados.

Estas condiciones las cumple el polen a condición de ser de una especie cuyo crecimiento rápido pueda inducirse fácilmente y cuyas cubiertas o bien no sean muy gruesas o sean fácilmente tratables. Un buen material en este sentido es el polen de *Tradescantia* cuyas especies pueden ser inducidas a florecer casi de continuo a base de días de 14-16 horas (Para ello cualquier habitación o laboratorio puede servir de invernadero a condición de disponer únicamente de un fluorescente tipo Gro-lux y un sencillo interruptor programable).

Además del polen los meristemas terminales de las raicillas son, como es sabido, un material excelente. *La única dificultad que ofrecen al alumno* consiste en obtener *cortes suficientemente finos*; muchas veces la observación se malogra (o corre este peligro) por este motivo (realmente existen muy pocas dificultades más). La técnica para conseguir dichos cortes es realmente simple: el mejor utensilio cortante es la cuchilla de afeitar y el procedimiento probar y probar.

Sin lugar a dudas la especie más adecuada para el estudio de la mitosis en sus ápices radiculares es: *Crocus balansae* (o especies próximas como *C. candidus*) por sus únicos 6 (= 2n) cromosomas realmente muy grandes. En países como el nuestro donde la red de suministros de material didáctico es pésima puede ser una especie problemática, sin ser rara. En estos casos hay que recurrir a la jardinería (en otoño es más fácil de encontrar) o bien... cambiar de especie.

Otra buena especie es la comunísima (como planta de interior) *Tradescantia* con todas sus variedades. Sus raíces crecen con facilidad y puede propagarse muy bien por esqueje. No requiere cuidados especiales. Su número diploide es de 12. Los tetraploides, con 24 cromosomas, son bastante corrientes y son casi más útiles por cuanto —a pesar de ser los cromosomas de tamaño relativo similar— hay en ellos un cierto gigantismo celular.

Por supuesto que la cebolla (*Allium cepa*), sin ser la mejor, es una especie adecuada con sus 16 (2n) cromosomas y su facilidad de manejo. Lo mismo

puede decirse del ajo (*Allium sativum*) y del lirio (p. ej. *Lilium regale*, $2n = 12$) con un manejo en todo semejante.

También la común haba (*Vicia faba*) con sus relativamente grandes, y escasos, $2n = 12$, cromosomas es un buen material (a emplear de forma alternativa a la cebolla; en todo caso debe tenerse presente que las membranas celulósicas pueden ser más desarrolladas y requerir un pretratamiento con HCl).

Entre los animales son estadios adecuados los embrionarios. Por razones fáciles de comprender los profesores de genética han mostrado también predilección por enseñar la mitosis a sus alumnos a partir de ciertos organismos corrientes en sus laboratorios: huevos de drosófila o embriones de saltamontes. Sin ser los únicos, son también adecuados y de manejo francamente poco complicado.

Si el logro de un corte lo suficientemente fino es, decíamos, un obstáculo para la observación de la mitosis, ésta, que no tiene —repetámoslo una vez más— mayores dificultades puede verse obstaculizado por otra razón, externa en este caso: la correcta utilización del microscopio.

Es corriente que muchos alumnos que han conseguido preparaciones aceptables o incluso buenas no acierten a enfocarlas por la escasa profundidad de campo que el aumento exigido para ver el detalle impone. Pero, si bien esta dificultad es trivial, en menor medida lo es la correcta iluminación.

Con un objetivo de 40 x y un ocular de 15 x se consigue un sistema de aumentos casi idóneo que es suficiente para observar con detalle la preparación, pero para ello es *imprescindible utilizar condensador*. La iluminación, pues, es aquí el factor limitante. Además en algún caso puede ser conveniente utilizar un filtro verde o azul. *Tratándose de la meiosis la necesidad del condensador es, si cabe, todavía mayor.* (Si se pretende claro algo más que una visión panorámica).

Por lo que respecta a la meiosis las características que debe poseer un material de interés pedagógico son —con las debidas trasposiciones— similares a las exigidas con respecto a los materiales para mitosis. De hecho el que una especie sea didáctica desde el punto de vista del estudio de la meiosis depende de numerosos factores, entre ellos: que sea fácilmente localizable y conservable; que tenga, relativamente, pocos y grandes cromosomas (p. ej. *Tradescantia*) o el hecho de que en una misma inflorescencia o gónada puedan observarse todas las fases meióticas (saltamontes y langostas; entre los cuales —y respectivamente: *Chorthippus spp.*, $n = 17$, o *Schistocerca gregaria*, $n = 23$) en los cuales en cada túbulo testicular es posible encontrar células en cada una de las fases, agrupadas las del mismo estadio en un mismo cisto; o también en cereales (cebada ($2n = 14, 28$), trigo ($2n = 14, 28, 42$) o avena ($2n = 42$) en cuyas espigas hay un gradiente de maduración que es más acentuada en las flores que ocupan posiciones más centrales (eje vertical) y más laterales (ejes horizontales de la espiga), mientras que las anteras de una misma flor suelen estar en la misma fase. Esta idoneidad también puede depender de que en un determinado organismo sea posible apreciar especialmente bien alguna particular fase meiótica —difícil de observar, quizá, en otras especies— o de alguna particularidad cromosómica. Así, por ejemplo, en *Allium fistulosum* la mayo-

ría de los quiasmas están localizados cerca del centrómero, al contrario de lo que sucede en *Allium cepa*; en *Humulus lupulus* es muy fácil de estudiar el mecanismo XX/XY, puesto que el cromosoma X es muy grande y el Y, relativamente pequeño. En *Paeonia* son relativamente fáciles de observar los quiasmas en la metafase I, mientras que los saltamontes constituyen un material inmejorable para el estudio del entrecruzamiento y de los quiasmas diploténicos.

Protocolo práctico de la mitosis

Desde un punto de vista práctico la observación en el laboratorio de la mitosis a este nivel debe comprender a mi juicio las siguientes etapas (por este orden):

- a) visualización (pase) de diapositivas sobre mitosis en el mismo material a utilizar.
- b) confección de las preparaciones.
- c) observación al microscopio y dibujo de las distintas figuras de mitosis.
- d) observación de fotografías y comparación con los dibujos y esquemas tomados. Repaso al microscopio, si procede, de las preparaciones.
- e) lectura de un texto adecuado para profundizar en algunos aspectos (este texto debe ser muy simple y esquemático si la observación se realiza en primer curso).

Por todo ello un guión de la práctica para entregar a los alumnos podría quedar así:

OBSERVACIÓN DE FIGURAS DE MITOSIS EN MERISTEMOS TERMINALES DE RAÍZ DE CEBOLLA. PROTOCOLO PRACTICO.

Diapositivas. Las diapositivas que integran esta serie deberán haber sido tomadas con una gama de aumentos entre 100 y 1250 x en preparaciones efectuadas a partir del mismo material que se va a utilizar.

Confección de las preparaciones;

- a) Elijase una raíz de cebolla de unos 5 a 10 mm de longitud (puede probarse con distintos tamaños y observar los resultados). Cortarla por la base con una hoja de afeitar y situarla sobre el porta.
- b) Sujétese por la base con una lanceta mientras que con la cuchilla se elimina la cofia (dispositivo protector cuyas células no están en división).
- c) Inmediatamente por debajo de la cofia se encuentran las células meristemáticas; por tanto, sujetando con la lanceta hay que procurar hacer cortes transversales (rodajas) lo más finos posible inmediatamente debajo la cofia. Recoger los cortes —2 ó 3— con la lanceta y situarlos horizontalmente en el centro del porta.
- d) (opcional) fijar los cortes durante 10 min. con alcohol acético.
- e) Colocar unas gotas de colorante (orceína acética y clohídrica) sobre los cortes. Teñir por lo menos durante 10 minutos. Este tiempo puede no ser

suficiente. Si la primera preparación resulta poco teñida se repetirá la operación con un tiempo de tinción mayor.

- f) Flamear suavemente 2 ó 3 veces la preparación evitando, sin embargo que el colorante hierva.
- g) Una vez enfriada la preparación colocar el cubre y proceder al aplastamiento o «squash» que consiste en apretar con firmeza (*sobre una superficie muy plana*) mediante el pulgar sobre el cubreobjetos. Para evitar que el colorante manche la piel —es difícil de eliminar y algo tóxico— se colocará un pedazo de papel de filtro entre pulgar y cubre.
- h) La preparación está ya lista para ser observada. Si es preciso hacerla durar algunas horas puede procederse así: levantar el cubre, o *mucho mejor antes de colocarlo*, colocar una gota de glicerina, proceder después al squash y sellar los bordes con laca de uñas. De lo contrario la preparación se deshidrata rápidamente, máxime si recibe una iluminación intensa.

Observación y dibujo de las figuras de mitosis.

La observación al microscopio se efectuará lógicamente a partir de objetivos de poco aumento con lo que se localizará y centrará en el centro del campo lo más destacable para ser visto a mayor aumento.

Observación de fotografías y comparación con los esquemas tomados. Repaso, si procede, de la preparación.

(Se ofrecerá al alumno en este momento, y no antes, una serie de fotografías en blanco y negro —como las de las figuras 1 a 11— que ilustren las distintas fases mitóticas). (En el guión puede incluirse alguna nota explicativa como la siguiente): Una vez observadas detenidamente todas las preparaciones observe las fotografías en blanco y negro —fotografías tomadas al microscopio que corresponden al mismo material con el que se ha trabajado. Compárense con los esquemas y acábese su identificación. Identifíquense las distintas partes, escriba, en su cuaderno, los nombres de cada fase y estructura. Conteste, además, a las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se distinguen al microscopio las distintas fases mitóticas?
2. ¿Cuál es el momento más adecuado para contar los cromosomas? ¿Por qué? ¿Cuántos cree que tiene la especie utilizada?
3. ¿En las distintas preparaciones ha observado distintos tipos de células?
4. ¿Existen diferencias en la relación núcleo-citoplasma entre los distintos tipos de células?
5. ¿Se observan los cromosomas en las células de los cortes alejados del ápice de la raíz?
6. ¿Ha podido observar nucleolos? ¿En qué fase? ¿Cuántos por núcleo?
7. ¿De qué manera podría comprobarse que la sucesión de fases es realmente la de profase, metafase, anafase y telofase y no otra?

Lectura (Incluir aquí una lectura adecuada al nivel de los alumnos).

Protocolo práctico de la meiosis

Con antelación al trabajo de laboratorio se habrá tratado ampliamente el significado teórico y el detalle de las distintas fases meióticas. La observación en el laboratorio de la meiosis (en este caso en testículo de saltamontes) deberá comprender a mi juicio las siguientes etapas por este orden:

- a) Visualización (pase) de diapositivas de meiosis, en el mismo material que vaya a emplearse.
- b) Lectura de un texto explicativo (que sin embargo no debe sustituir la explicación descriptiva del detalle de las fases meióticas previa).
- c) Confección de las preparaciones.
- d) Observación al microscopio de las figuras de meiosis y dibujo de las mismas.
- e) Observación de fotografías y comparación con las notas tomadas.

Además puede ser útil confeccionar algún modelo simple de los quiasmas como el propuesto en las figuras 17 y 18 que puede materializarse en hilo eléctrico.

Por tanto el guión-protocolo para el alumno puede ser algo así:

OBSERVACIÓN DE LA MEIOSIS EN TESTÍCULO DE SALTAMONTES. PROTOCOLO PRÁCTICO.

Diapositivas (Pase de diapositivas ilustrativas de las distintas fases meióticas tomadas a partir del mismo material que vaya a utilizarse. En el guión para el alumno se hará notar este extremo).

Lectura (Se incluirá un texto adecuado).

Confección de las preparaciones

- a) Colocar un saltamontes macho (generalmente más pequeño que las hembras de la que se distingue por la ausencia de oviscapto) sobre la lámina de disección y realícese una incisión dorsoabdominal en forma de I, que nos permitirá separar la pared del cuerpo.
- b) Localícense los testículos: manchas anaranjadas situadas al lado del intestino.
- c) Extraerlos y, mediante agujas enmangadas, manipularlos ligeramente con lo que el testículo se revelará constituido por un buen número de túbulos seminíferos. Recoja uno o dos tubos y colóquelos, con una gota de agua, sobre el porta. En un túbulo testicular, desde el ápice hasta su final pueden apreciarse diversos cistos que agrupan células en la misma fase; cerca del ápice cistos con espermatogonias, espermatocitos en leptoteno, zigoteno, paquiteno y diacinesis; en su posición media meta-fase I, espermatidas y hacia el final espermátidas más maduras y espermatozoides.
- d) Teñir con orceína acética durante 10 minutos (véase, sin embargo, página 22, punto e).

- e) Flamear suavemente a la llama, evitando, sin embargo que hierva el colorante.
- f) Colocar el cubre y proceder al «squash» del mismo modo que para la mitosis.

Observación al microscopio

A pequeño aumento se observará la zonación tubular y a mayor aumento el detalle de las fases. Dibujo de las mismas.

Observación de fotografías.

(Al igual que para la mitosis en este momento se facilitan a los alumnos unas series de fotografías en blanco y negro de las distintas fases meióticas y que deben comparar con sus notas y esquemas; además completarán sus anotaciones y observaciones según el siguiente cuestionario):

1. Anótese para cada fase, y para cada estructura observada en las mismas su nombre y significado.
2. Contéstese razonando la respuesta a las siguientes preguntas:
3. ¿El entrecruzamiento siempre se realiza en la fase de dos filamentos de la meiosis?
4. ¿El porcentaje de recombinación entre dos loci (o genes) de un cromosoma permanece constante siempre?
5. ¿La segregación de los distintos álelos sólo puede ocurrir durante la primera división meiótica?
6. ¿Los centrómeros siempre se separan reduccionalmente en la anafase I?
7. ¿El entrecruzamiento siempre da lugar a recombinación?
8. ¿El resultado de la meiosis es siempre el de cuatro células haploides?
9. ¿La meiosis en los animales superiores es distinta, en algunas fases, entre machos y hembras?
¿Dónde se localiza la meiosis en los mamíferos?

Nota: Si es menester los saltamontes pueden ser preservados durante semanas, incluso, meses, en alcohol de 70°.

Protocolo práctico de la observación de cromosomas gigantes.

Por lo que respecta a la observación de cromosomas gigantes se escogerán, según es clásico, larvas (criadas a baja temperatura -10-12°C) del tercer estadio larvario y bien desarrolladas de *Drosophila melanogaster* (o cualquier otra especie afín).

En este caso los puntos más importantes a tener en cuenta son: a) la correcta separación de las glándulas salivales; b) un squash vigoroso, y c) un condensador y un diafragma correctos. La mayoría de los contratiempos surgidos en la realización de esta experiencia lo son por dichos motivos.

De acuerdo con lo anterior un gui3n-protocolo de esta experiencia podr3a quedar as3 (supuesto un previo enfoque te3rico del tema en clases previas):

OBSERVACI3N DE CROMOSOMAS GIGANTES (POLITENICOS) EN (gl3ndulas salivales de) DROSOPHILA MELANOGASTER. PROTOCOLO PR3CTICO.

- a) C3jase una larva del 3ltimo estadio larvario de *Drosophila melanogaster* coloc3ndola sobre el porta en donde se sujetar3 con las pinzas.
- b) Entre tanto con la otra mano tirar —por medio de una lanceta— suavemente de las piezas bucales (que destacan por su color oscuro).
- c) Si la operaci3n ha tenido 3xito detr3s de las piezas bucales saldr3n las gl3ndulas salivales (pares y trasl3cidas) y probablemente los cuerpos grasos, y a3n quiz3 m3s fragmentos digestivos.
- d) Mediante una aguja enmangada retirar todo excepto las gl3ndulas salivales.
- e) Decantar el agua e *inmediatamente* te3nir con orce3na ac3tico-l3ctica, o bien con carm3n, durante 15-30 minutos. Una dilaci3n de la tinci3n puede ocasionar que se sequen las gl3ndulas y estropear irremediablemente la preparaci3n.

Observaci3n al microscopio.

Dibujo de lo observado. Anotaciones y contestaci3n del siguiente cuestionario:

1. 3Por qu3 se agrupan en roseta los cromosomas?
2. 3Podr3a averiguarse el sexo del individuo al que pertenec3an los cromosomas polit3nicos de la preparaci3n?
3. Observe las bandas caracter3sticas y explique su significado.
4. Idem con respecto a los puffs.

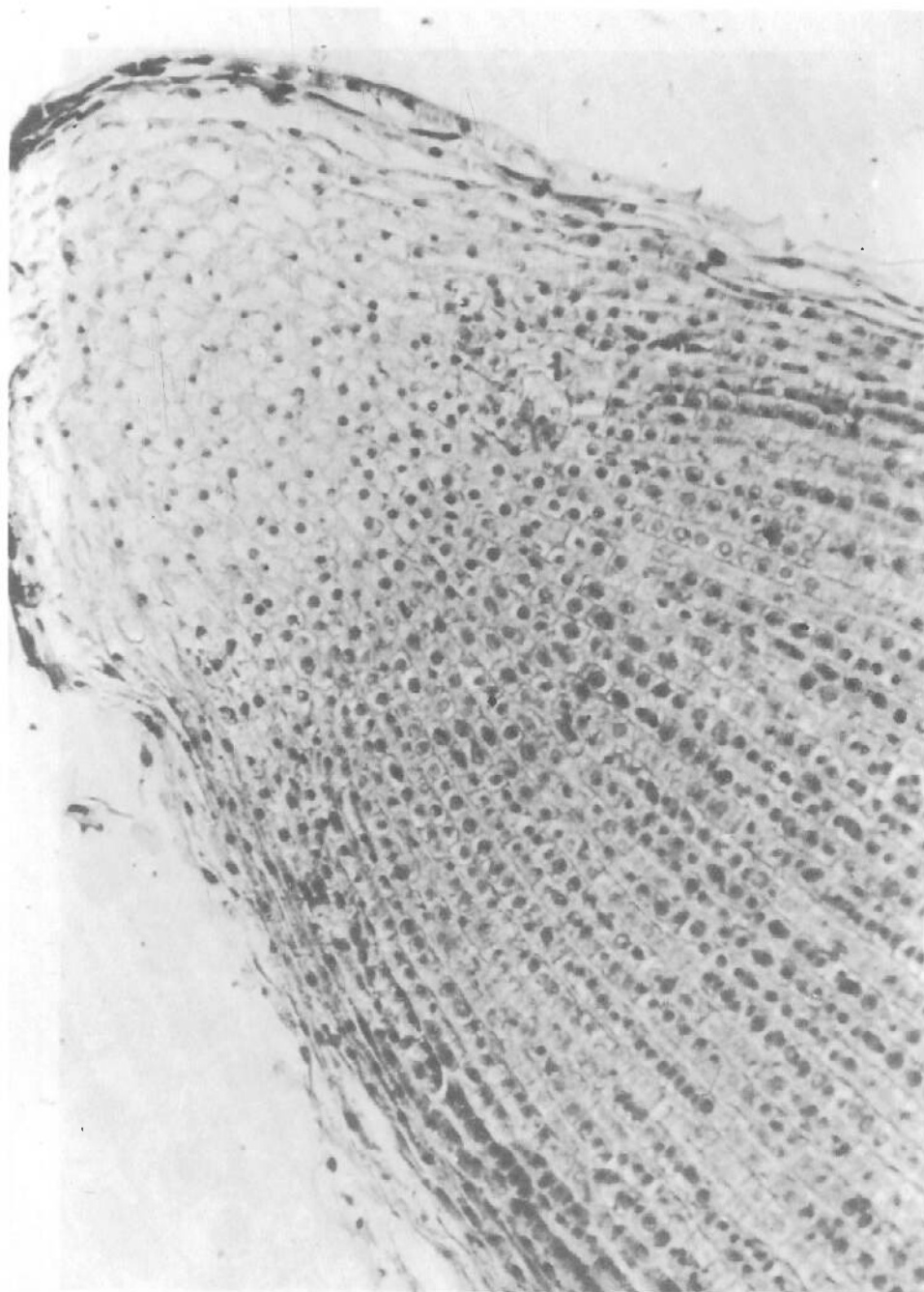


Figura 1. Fases mitóticas en meristemas terminales de raíz de cebolla (hematoxilina).

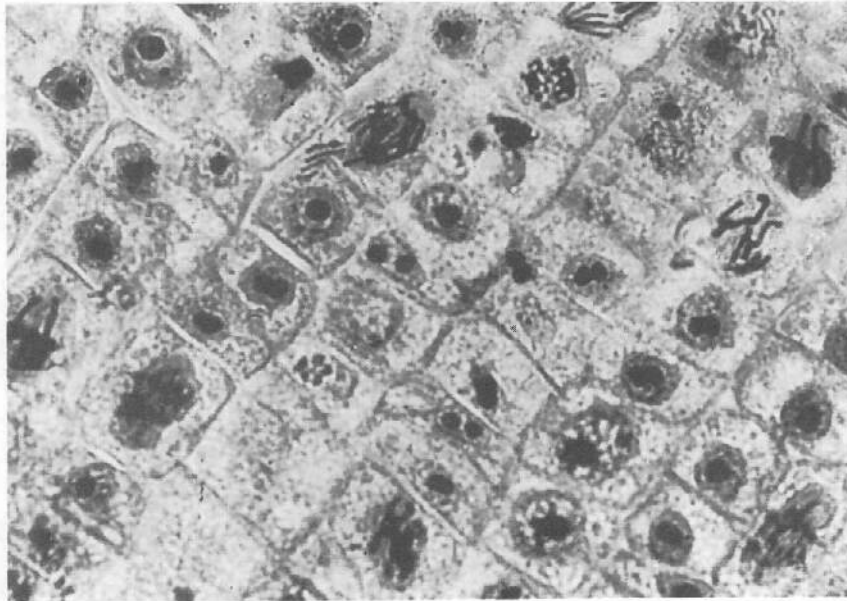
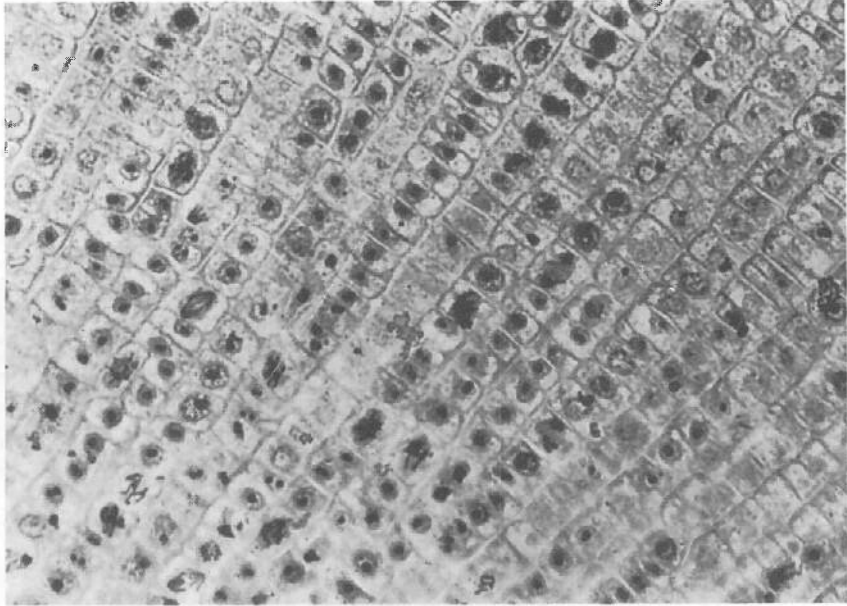
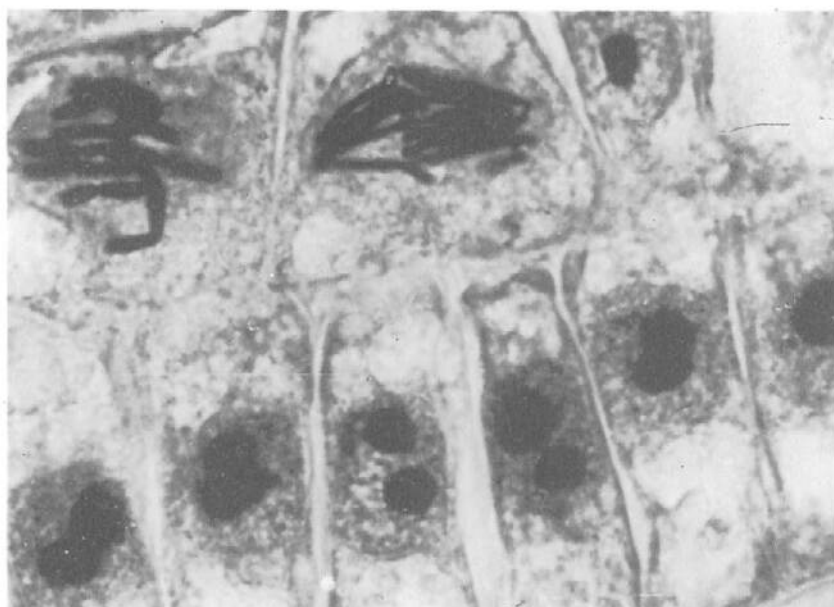
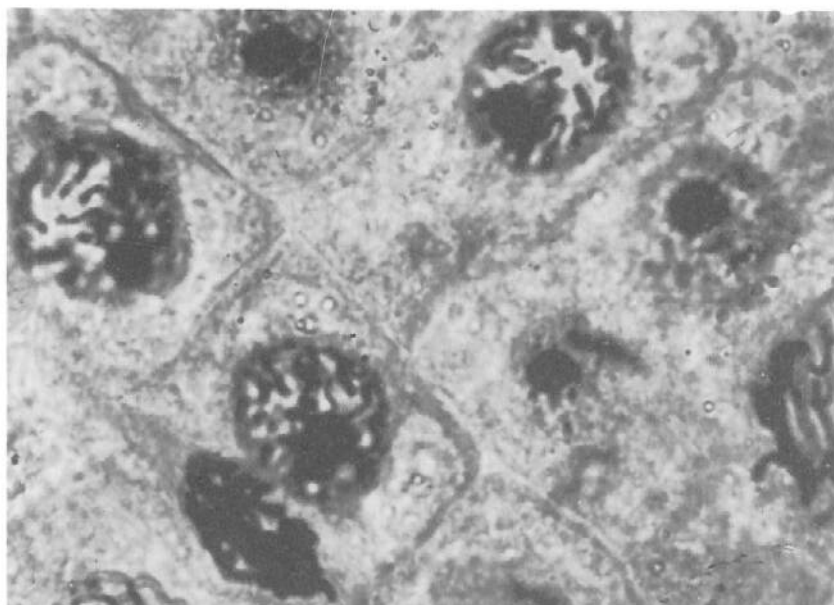
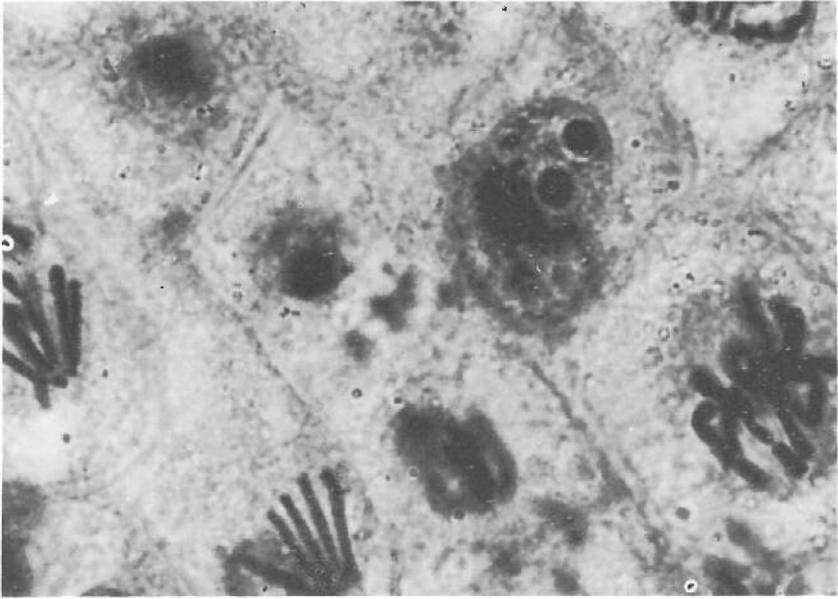
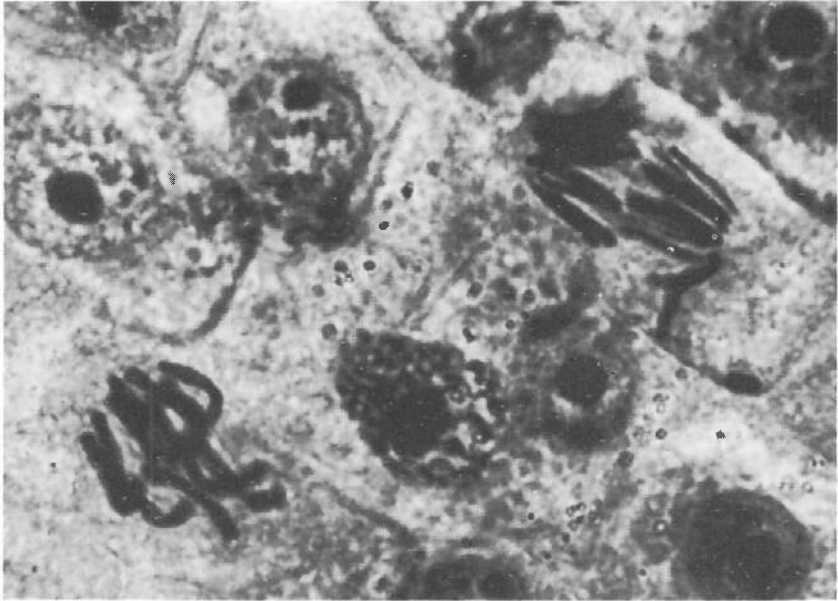


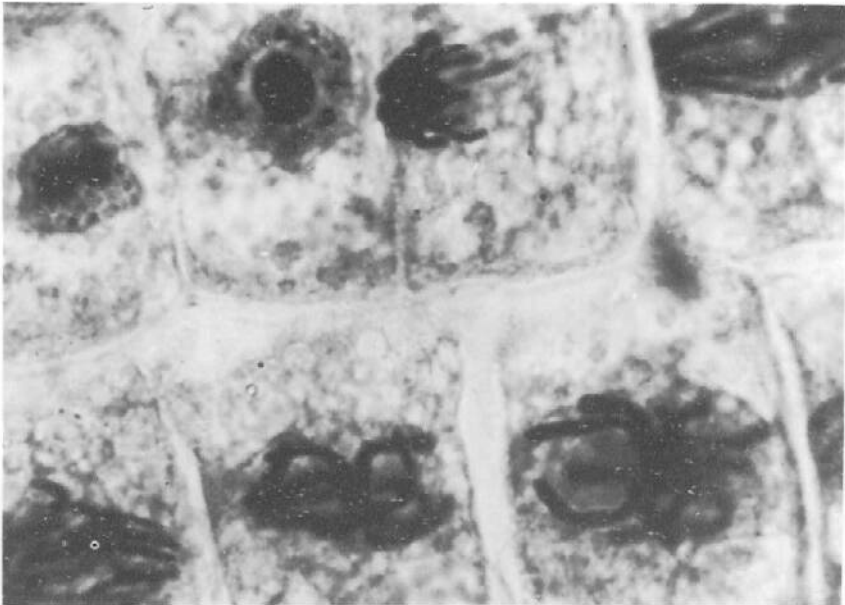
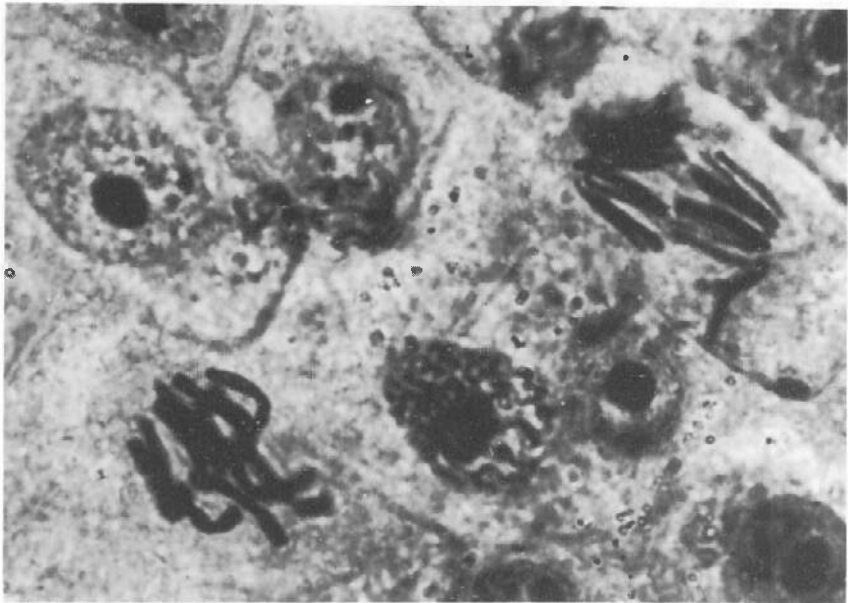
Figura 2 y 3. Fases mitóticas en meristemas terminales de raíz de cebolla (hematoxilina).



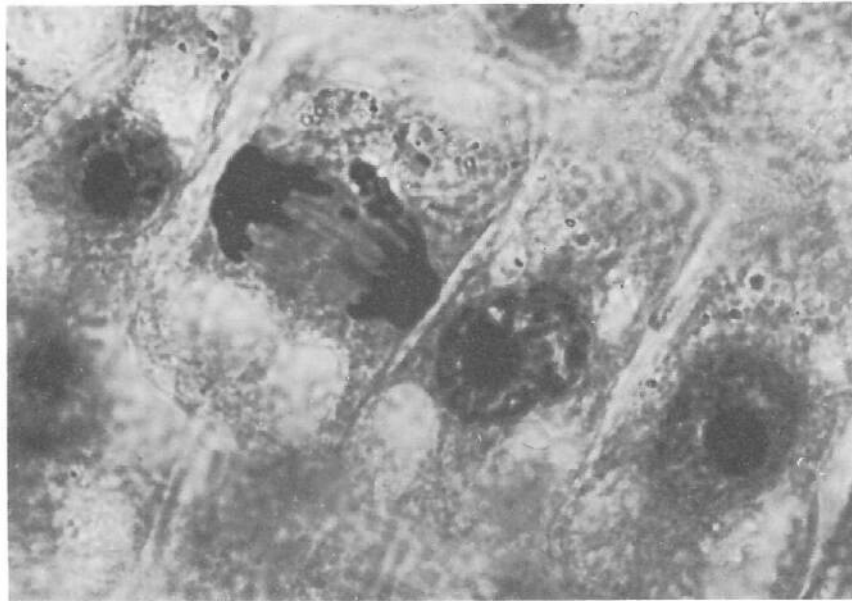
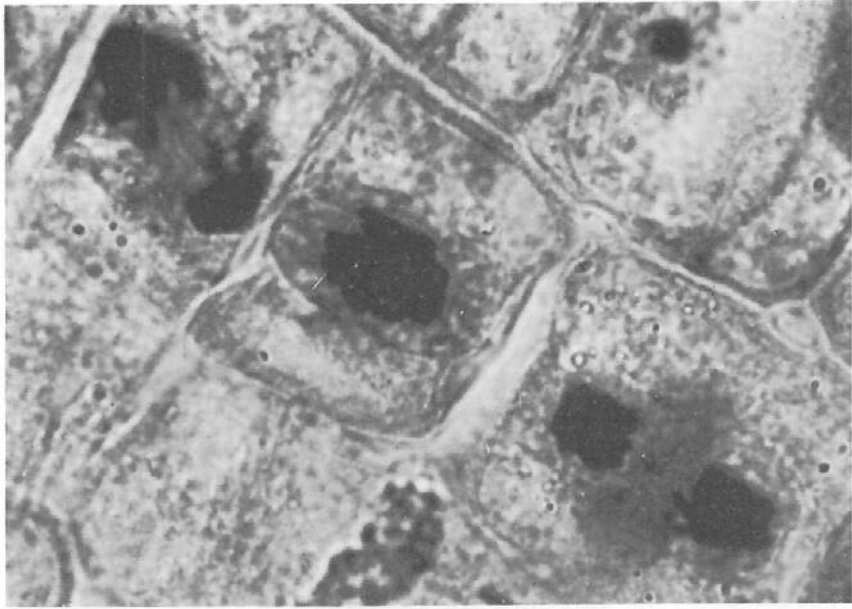
Figuras 4 y 5. Fases mitóticas en meristemas terminales de raíz de cebolla (hematoxilina).



Figuras 6 y 7. Fases mitóticas en meristemas terminales de raíz de cebolla (hematoxilina).



Figuras 8 y 9. Fases mitóticas en meristemas de raíz de cebolla (hematoxilina).



Figuras 10 y 11. Fases mitóticas en meristemas terminales de raíz de cebolla (hematoxilina).



Figura 12. *Tradescantia*. Un género idóneo para el estudio de la mitosis.

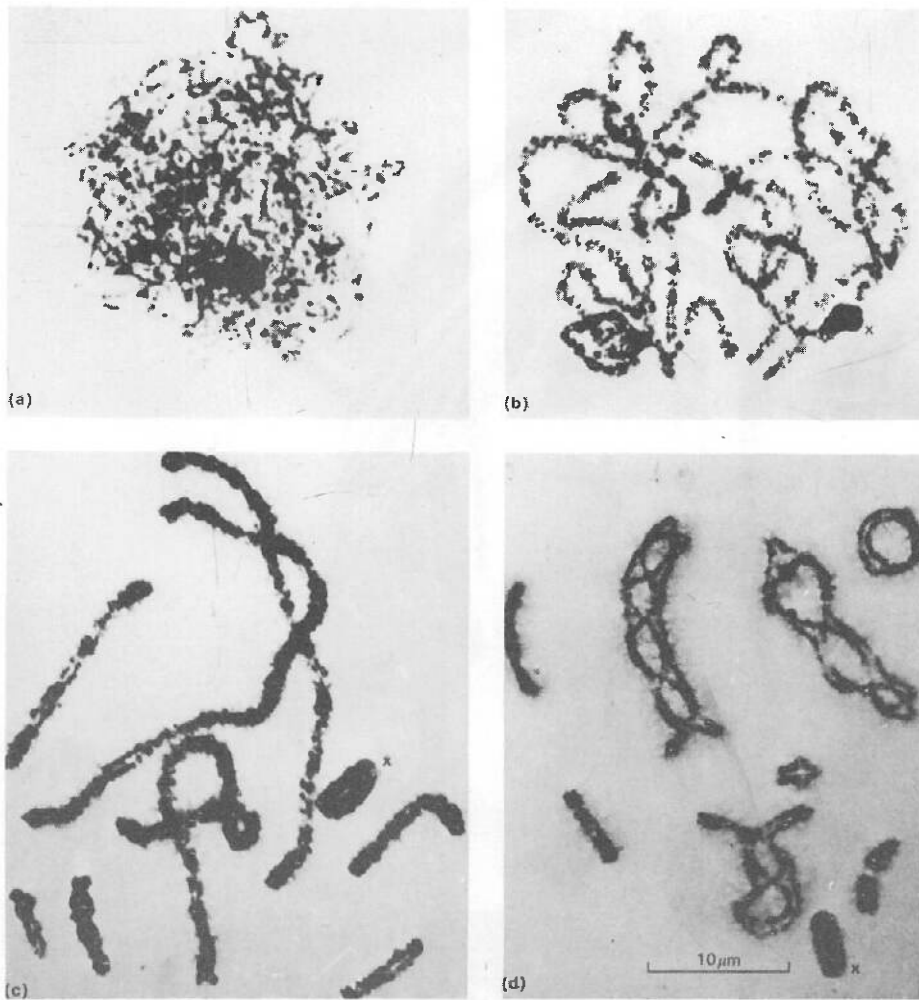


Figura 13. (a: leptoteno; b: zigoteno; c: paquiteno; d: diploteno) Meiosis en testiculo de *Chorthippus brunneus*.

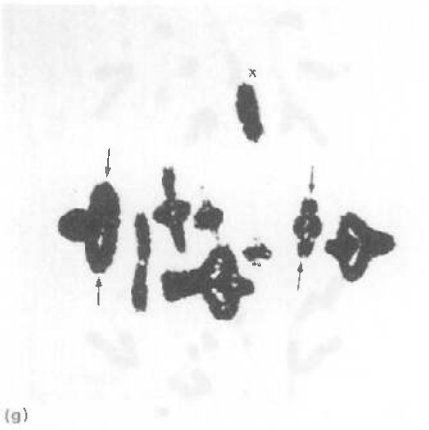
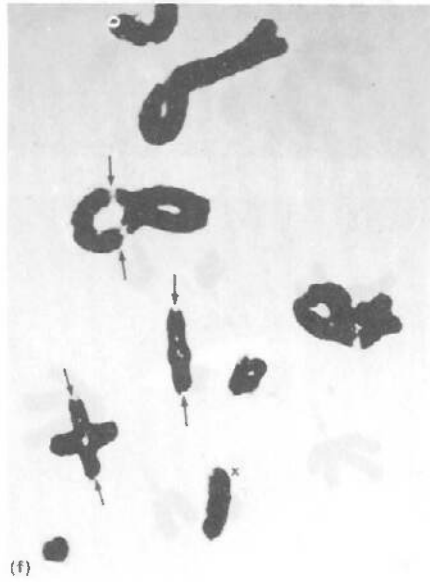
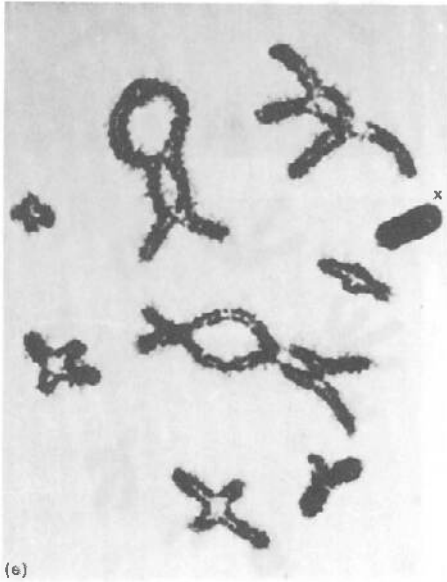


Figura 14. (e: diacinesis; f: prometafase I; g: metafase I; h: anafase I). Meiosis en *Chortippus brunneus*.

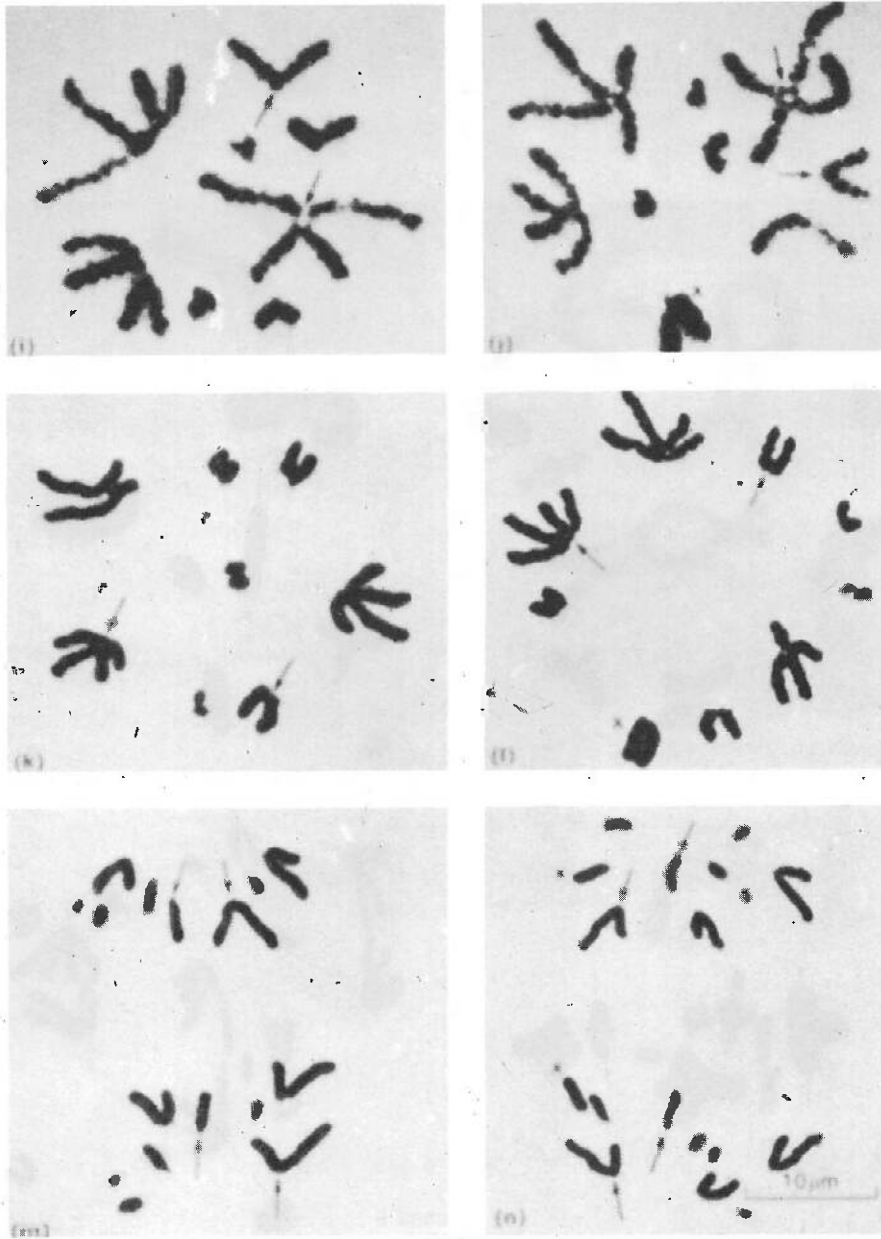


Figura 15. (i, j: profase II; k, l: metafase II; m, n: anafase II.) Meiosis en *Chortippus brunneus*.

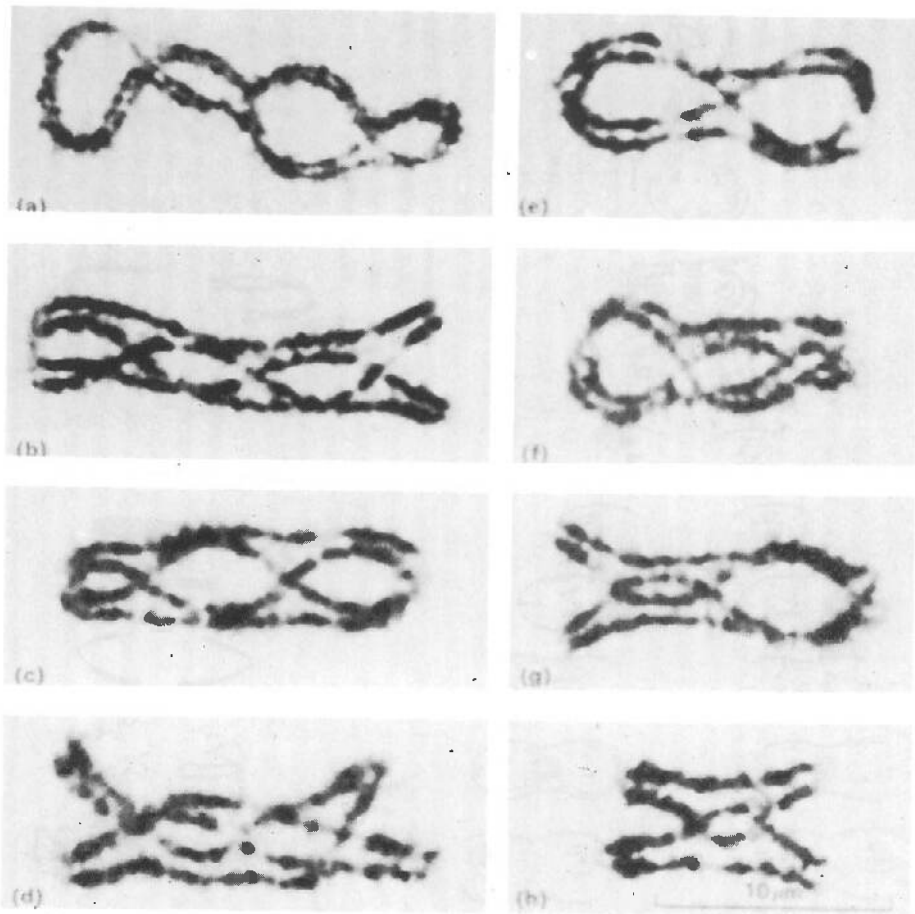


Figura 16. (diversos bivalentes diploténicos con un número variable de quiasmas). Meiosis en *Chortippus brunneus*.

III. EXPERIMENTOS CON MICROORGANISMOS

Los trabajos de Beadle y Tatum a partir de 1941 con *Neurospora crassa* pusieron de manifiesto las ventajas del trabajo experimental con microorganismos, que a partir de entonces se hicieron rápidamente populares entre los genéticos y bioquímicos, ensanchándose el campo a otras especies de hongos además de bacterias.

Con respecto a la investigación genética los microorganismos presentan ventajas que les distinguen de las plantas o animales superiores; posiblemente la principal de todas ellas sea su corto ciclo biológico de forma que en un breve período de tiempo pueden estudiarse varias y también el hecho de que —por ser extremadamente prolíficos— posibilitan un alto grado de resolución en la investigación emprendida.

Otra ventaja adicional es que hacen posible un control estricto del ambiente ya que el trabajo se lleva a cabo en una área relativamente pequeña con un equipo estéril. Factores como la temperatura, humedad, luz, etc. son controlados de ordinario. Todo ello contrasta enormemente con las condiciones de campo en donde sólo es posible un muy limitado control ambiental, lo que trae como consecuencia una variación estacional de los cultivos que no permite dilucidar muchas veces hasta que punto la variabilidad es genética, ambiental, o en que punto compartida.

Las técnicas para el estudio de la genética de los hongos son relativamente fáciles; con mucha probabilidad más fáciles para el inexperto que las implicadas en la utilización de bacterias y virus, y, además, el utillaje requerido es modesto.

Los hongos permiten además mostrar a los alumnos de forma práctica, en el laboratorio, aspectos de la genética que de otra forma son inabordables con los organismos de experimentación genética clásicos —tipo drosófila—, estos aspectos son, entre otros: la expresión genética en un ambiente celular haploide, diversas facetas de la llamada genética bioquímica, la segregación en la meiosis, la complementación además del estudio experimental de la mutación y otros.

En este sentido y si bien es cierto que puede ocasionar algún trabajo extra, la utilización de microorganismos para la didáctica de la genética no es ninguna cuestión descabellada si se dispone de un laboratorio con unos mínimos standard. Las dificultades en todo caso han de venir, desgraciadamente, por motivos externos: dificultades en la obtención de las cepas u otras de índole parecida.

Todas las especies que se citan en este capítulo incluyendo todos sus mutantes sugeridos, pueden obtenerse —en cualquier momento— en cualquiera de los grandes suministradores de material didáctico/biológico (Philip Harris, Griffin, Carolina Biological Ltd., etc.), (aunque como es sabido, lamentablemente, esta afirmación puede no ser tan cierta en este país).

Sordaria fimicola

Una primera propuesta para la utilización de hongos consiste en el análisis de las tétradas meióticas en *Sordaria fimicola*. Más adelante, no obstante, se propone *Coprinus lagopus* como la especie más indicada para muchos otros aspectos (el análisis de las tétradas en *Coprinus lagopus*, es desaconsejable —desde un punto de vista pedagógico— por estar éstas desordenadas).

En el ascomiceto *Sordaria fimicola*, en el cual las esporas sexuales están contenidas en un saco, el asca, no es preciso su aislamiento para el estudio. El estadio sexual de *Sordaria* es parecido al de *Neurospora* pero *Sordaria* constituye un material más idóneo que ésta por cuanto su crecimiento no es rampante y, además, porque no es preciso utilizar ningún medio de cultivo especial para lograr cuerpos fructíferos; precisamente, y por el contrario, *Sordaria fimicola* fructifica rápidamente, en el plazo de una semana, en agar de harina de maíz.

El asca de *Sordaria* contiene ocho esporas ya que una vez finalizada la meiosis y la formación de las tétradas tiene lugar una división mitótica con la consiguiente formación de cuatro pares de esporas hermanas. Los husos mitóticos no están cruzados (como sucede en *Coprinus*, dificultando su estudio) sino que son lineales de forma que los cromosomas, durante la meiosis, siempre se mueven hacia el norte o hacia el sur, y los mismo hacen durante la mitosis postmeiótica. La propia asca, y por ser larga y estrecha, también dificulta los movimientos laterales del núcleo, resultando de todo ello la formación de tétradas ordenadas.

El estudio de las tétradas puede hacerse mediante disección del asca (en cuyo caso hay que abrirla por un extremo y —mediante una manipulación adecuada— retirar entonces, de forma ordenada, las ascas que serán cultivadas —ordenadamente— por separado, a fin de analizar su dotación genética: Pero también puede hacerse este estudio sin necesidad de recurrir a la disección del asca mediante la utilización de dos cepas de *Sordaria* que difieren por el color de sus esporas pudiendo así distinguirlas a través de la pared ascal. El tipo salvaje de *Sordaria* presenta ascósporas negras, existiendo mutantes de ascósporas grisáceas o blancas.

Existiendo ascósporas de dos colores, previo cruzamiento entre tales cepas, aparecerán ascas con diversas combinaciones de sus ocho productos meióticos, cuyo orden será la consecuencia directa del mecanismo de esta división (y de la localización cromosómica de tales genes) (el detalle del proceso y de su estudio puede verse en la tabla 1).

TABLA N° 1

Análisis de las tétradas en *Sordaria fimicola*

El tipo salvaje de *Sordaria fimicola* presenta esporas de color negro; existen mutantes deficientes cuyas esporas son blancas. Ello permite el estudio de las tétradas y del desarrollo de la meiosis sin necesidad de diseccionar el asca ya que las esporas (blancas o negras) se distinguen a través de su pared.

El asca de *Sordaria* presenta ocho esporas puesto que una vez finalizada la meiosis tiene lugar una mitosis normal formándose cuatro pares de esporas hermanas, tal y como se representá.

división mitótica



división mitótica

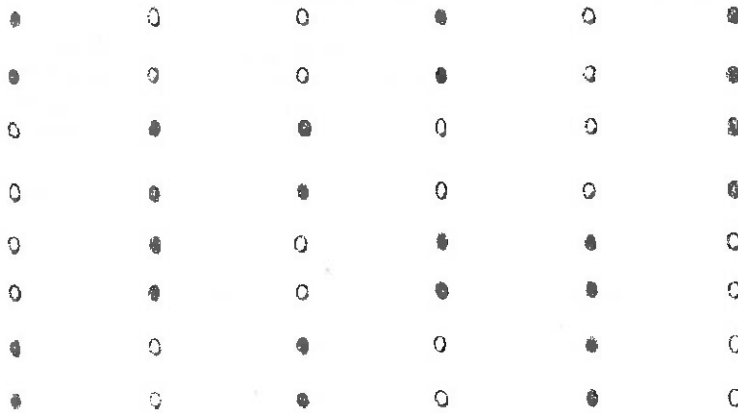


Como se explica en el texto las tétradas de *Sordaria* están ordenadas; ello implica que su orden aparente es en realidad expresión de la posición de los genes en el cromosoma y de los eventos que han tenido lugar en la meiosis.

Para emprender un estudio cuantitativo (cálculo, p. ej., de la distancia genocentrométrica) basta con unas pocas cápsulas de Petri puesto que en cada una de ellas pueden obtenerse numerosos cuerpos fructíferos (peritecios), para obtener un resultado fiable. Aunque el hongo es homotálico se intercrusa con facilidad (para ello basta inocular ambas cepas a ambos extremos de una misma cápsula, a los pocos días habrán entrado en contacto formándose cuerpos fructíferos (neuros) en el centro.

Para observar las ascas bastará con obtener mediante una aguja algunos peritecios, montarlos en agua sobre un porta y una vez colocado el cubre proceder a un ligero squash; (los peritecios de los márgenes — con todas las esporas blancas o todas las esporas negras deben descartarse por cuanto son producto de autocruzamientos).

Son posibles seis combinaciones de esporas, combinaciones que dependen del modo de segregación de los genes durante la meiosis (primera y segunda división). Estas seis combinaciones son:



Combinaciones meióticas

Si no tiene lugar entrecruzamiento entre el gen y el centrómero entonces tiene lugar segregación entre los genes negro y blanco (mutante deficiente del tipo salvaje) durante la primera división meiótica. Si por el contrario este entrecruzamiento tiene lugar entonces cada centrómero permanecerá unido a un alelo negro y a un alelo blanco, a diferencia de lo que sucedía antes donde ambos centrómeros retenían sus genes originales. Cuando tiene lugar el entrecruzamiento los genes blanco y negro no pueden separarse uno del otro hasta que el propio centrómero se divide, lo cual tiene lugar durante la segunda divi-

sión meiótica y es entonces cuando tiene lugar la segunda segregación entre blanco y negro.

Las seis ordenaciones de la página anterior incluyen todas las posibilidades y son recíprocas dos a dos. Las combinaciones 1 y 2 se forman cuando no tiene lugar entrecruzamiento y son por tanto, el resultado de la segregación de la primera división, mientras que las combinaciones 3, 4, 5 y 6 son el resultado de la segregación en la segunda división que se produce cuando tiene lugar entrecruzamiento entre el gen y el centrómero.

La combinación 2, recíproca de la 1, se produce cuando los dos alelos toman direcciones distintas durante la primera división (el negro hacia el norte y el blanco hacia el sur). Lo mismo sucede en la combinación 4, la recíproca de la 3, pero en este caso ello se produce durante la segunda división cuando se divide el centrómero. Las combinaciones recíprocas 5 y 6 también dependen de la orientación de los alelos durante la segunda división. Si comparamos la combinación 3 y la 5 podremos ver como la combinación 5 se produce cuando los genes unidos al centrómero negro cambian sus direcciones, es decir el huso inferior tiene el negro hacia el norte y el blanco hacia el sur. La última combinación, la 6, la recíproca de la 5 se forma cuando los alelos unidos al centrómero blanco cambian sus direcciones, es decir en el huso superior el negro va hacia el norte y el blanco hacia el sur.

La relación de ligamento, que permite mapar el gen negro con respecto al centrómero, se basa en el entrecruzamiento, por lo que si puede testarse el número de entrecruzamientos que tienen lugar entre el gen y su centrómero es posible calcular la distancia que existe entre ellos. Habida cuenta de que las combinaciones fruto de la segregación durante la segunda división son la consecuencia del entrecruzamiento entre el gen y su centrómero puede entonces calcularse una estima de la distancia genética procediendo al cálculo de la proporción de segregación durante la segunda división (es decir, calculando el número de ascas fruto de segregación durante la segunda división (que presentan esta segregación) con relación al número total de ascas. Este cálculo puede hacerse por dos vías, por ascas (tétradas) o por esporas, pero en ambos casos conviene recordar que en un asca solamente la mitad de la descendencia es recombinante.

(Los datos del cálculo siguiente están tomados de G.E. Anderson).

Cálculo en base a las tétradas

$$\begin{aligned} \% \text{ recombinación} &= \frac{\text{total recombinante} \times 100}{\text{descendencia total}} = \text{unidades de mapa} \\ &= \frac{\text{mitad del número de ascas de la segunda div.}}{\text{total de ascas}} \end{aligned}$$

Resultados:

ascas de la 1º div.	=	56
ascas de la 2º div.	=	44
Total ascas	=	100

$$\frac{1/2 \times 44 \times 100}{100}$$

= 22 % o 22 unidades de mapa entre el centrómero y el gen negro

Cálculo por esporas individuales

56 ascas de la primera división = 56 meiosis = 224 esporas
44 ascas de la primera división = 44 meiosis = 176 esporas
total esporas = 400

$$\% \text{ recombinantes} = \frac{88 \times 100}{400}$$

= 22

= 22 unidades de mapa

Coprinus lagopus

Sin embargo, como ya se ha dicho, la especie más utilizada en las aulas es otra: *Coprinus lagopus* (= *Coprinus fimetarius* syn., = *Coprinus cinereus* syn.). Este basidiomiceto (uno de los antiguamente utilizados para la preparación de tintas chinas) se encuentra —en forma espontánea— habitualmente en la mayor parte de Europa, donde se le puede hallar sobre los desperdicios y excrementos especialmente en otoño.

Su interés pedagógico —desde el punto de vista de la genética— es doble. Puede utilizarse tanto para ejemplificar el ciclo biológico de los hongos superiores (en esta especie son fácilmente observables todas y cada una de las fases del mismo) como para la demostración práctica, de laboratorio, de determinados aspectos bioquímicos (y otros) de la herencia.

En este último sentido conviene decir que seis de sus diez cromosomas presentan marcadores mapados y aislados que resultan especialmente indicados. Tanto los mutantes como las cepas de tipo salvaje son fácilmente cultivables en el laboratorio y por presentar un crecimiento no rampante, como sucede por ejemplo con *Neurospora*, no plantean problemas de posibles contaminaciones.

Sus mutantes morfológicos (que afectan, principalmente, al aspecto de la colonia y a la densidad hifal) son fáciles de obtener —y de identificar— pero presentan el inconveniente de que, una vez cruzados con el tipo salvaje, producen progenies muy poco homogéneas que dificultan su utilización; esta variación es tal, en penetración y expresividad, que muchas veces parece ser en realidad expresión de una herencia poligénica, y por dicho motivo han sido poco estudiados.

Por el contrario los mutantes nutricionales son fáciles de reconocer y producen una segregación muy clara en sus cruzamientos lo que les convierte en excelentes para la demostración de clase.

Los mutantes bioquímicos lo son por mutaciones puntuales, en un locus particular implicado en la producción de una vitamina, aminoácido u otro metabolito esencial. Tal mutación hace que su portador sea incapaz de sintetizar este requerimiento vital; estos mutantes toman su nombre de tales deficiencias, así —por ejemplo— el mutante que requiere colina se conoce con el nombre de mutante colina (*chol*) aunque en realidad sea un mutante colina deficiente.

En *Coprinus lagopus* se conocen muchos de estos mutantes, de los cuales —y entre los de utilización más aconsejable— cabe citar a los (mutantes) colina, adenina, arginina y ácido paraamino-benzoico. A tales mutantes se les denomina también auxotróficos, mientras que el tipo salvaje —por oposición— se designa como prototrófico.

Para el trabajo con *Coprinus* existen dos medios de cultivo (véase tabla 2): el *medio mínimo*; integrado por una mezcla simple de sales minerales, glucosa, asparagina y tiamina; y el *medio completo* que consiste en medio mínimo más extracto de levadura, caseína hidrolizada, extracto de malta y un hidrolizado de ácidos nucleicos.

Ambos tipos de medios sirven para diferenciar los mutantes del tipo salvaje. Mientras que las cepas de tipo salvaje son capaces de sintetizar todos sus requerimientos vitales a partir de lo que toman en el medio mínimo —creciendo perfectamente sobre él— los mutantes bioquímicos, por el contrario, sólo pueden crecer sobre tal medio cuando es enriquecido con determinadas sustancias (medios enriquecidos). Este hecho —el mutante no puede crecer sobre el medio mínimo— es el que permite diferenciarlo del tipo salvaje; (sin embargo, y salvo que se precise específicamente detectar la presencia de mutantes auxotróficos, en el laboratorio se utiliza, comunmente, medio completo para los cultivos de cepas normales así como para cepas mutantes).

Cuando se trata, por ejemplo, de estudiar la inducción de mutaciones (o de cualquier otra aplicación concreta) hay que plantearse la elección del mejor estadio del ciclo biológico para tal estudio.. Siguiendo con el ejemplo el estadio ideal es el de célula única, de propagación rápida, uninucleada y haploide. En *Coprinus* el oidio —la espora asexual— cumple perfectamente estas condiciones (en cambio los conidios de *Neurospora* que habían sido utilizados con anterioridad presentan una desventaja grave: son multinucleados, de forma que la mutación en un núcleo puede quedar enmascarada por los genes de tipo salvaje presentes en los otros núcleos de la misma célula.

Ciclo biológico de Coprinus lagopus

Las distintas fases del ciclo principal son:

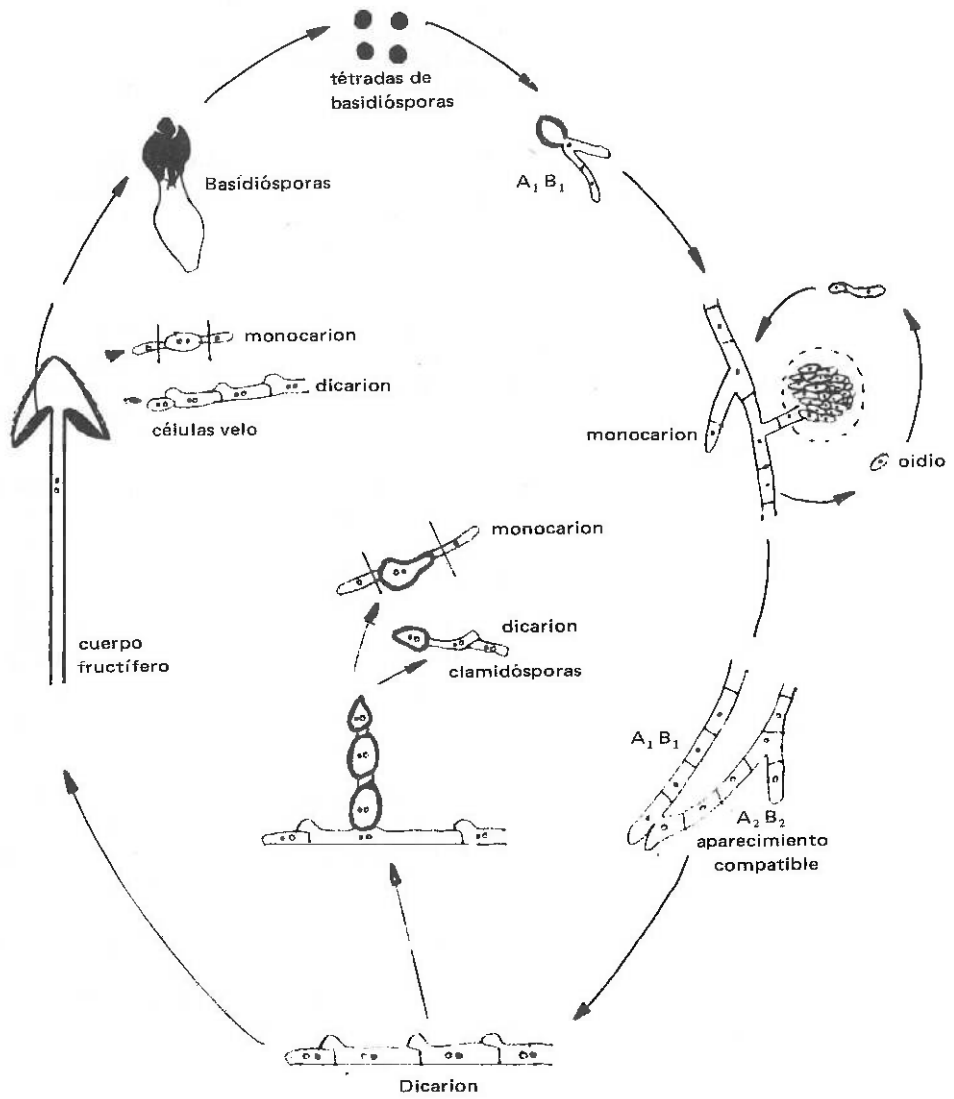


Figura 19.

Basidióspora. Es una espora negra, grande (10 x 6 micras) que puede verse fácilmente a 100 aumentos. Para su examen bastará coger un fragmento muy pequeño de laminilla del hongo (seta) y de forma aséptica colocarlo en agua destilada (por ejemplo 10 ml). Bastará pipetear algunas gotas sobre el porta para la observación. Para verlas germinar se colocarán algunas gotas de disolución sobre una placa de agar completo a 37° C. Al cabo de unas 24 horas pueden observarse ya (directamente de la cápsula, una vez eliminada la tapa).

Fase sexual. Monocarion. Se trata de la fase de micelio con células de un sólo núcleo (los micelios de células con dos núcleos pertenecen al dicarion, véase más adelante). Es fácil obtener una colonia monocariótica —4 ó 5 días a 37° C— a partir de basidiósporas, oidios, o fragmentos hifales de monocarios preexistentes. Las hifas aéreas, blanquecinas, del monocarion dan lugar a oidiofóros y cabezuelas oidiales.

El oidio. Es una espora —en forma de píldora— de membrana delgada de unas 5 x 2 micras. (Para su examen debe prepararse una suspensión a partir de un cultivo de monocarion de cinco días, en agua destilada. Los oidios germinan en el plazo de 3 a 5 días. Para observarlos hay que proceder como en el caso de las basidiósporas, aunque los oidios por ser incoloros y más pequeños son algo más difíciles de observar.

Fase sexual. Para proceder a cruzar dos fragmentos monocarióticos de *Coprinus* basta con sembrarlos sobre una misma placa a escasa distancia uno del otro, incubando a 37° C. De ordinario al cabo de 48 horas se habrá formado un dicarion del que eventualmente se originará un cuerpo fructífero o seta. El cruzamiento, sin embargo, puede no tener lugar si los dos filamentos hifales no son sexualmente compatibles. La compatibilidad o incompatibilidad sexual depende de la naturaleza de los alelos presentes en dos loci (A y B) situados en distintos cromosomas. En orden a la producción de un cuerpo fructífero normal los alelos parentales del locus B (se han contabilizado, en las poblaciones naturales de *Coprinus lagopus*, hasta 339 alelos del locus A y 64 del B).

El dicarion. Para elucidar si los progenitores son compatibles y, por tanto, si ha habido formación de dicarion, es indispensable poder identificar el dicarion y distinguirlo del monocarion, lo cual puede hacerse de tres formas: macroscópicamente presenta un crecimiento muy «velludo» y los bordes de la «colonia» son muy rugosos lo cual contrasta con el crecimiento plano y la superficie lisa de la «colonia» del monocarion. Microscópicamente las conexiones en abrazadera (véase figura 20) son características del dicarion. Finalmente, y en tercer lugar, el dicarion se caracteriza por la ausencia de cabezas oidiales, que sólo se forman en el monocarion. Las conexiones en abrazadera, el rasgo más fácil y seguro en observación microscópica son fáciles de observar a 100 aumentos, en la misma cápsula de Petri, mejor en la periferia que en el centro (con la tapa quitada).

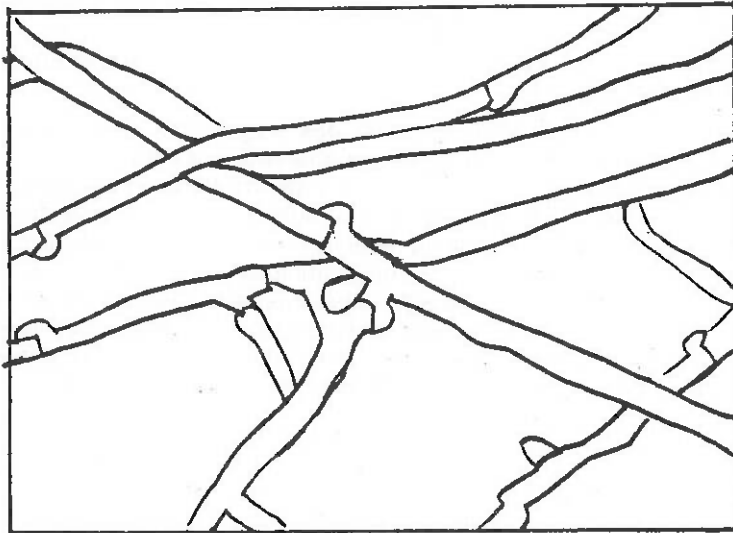


Figura 20.
Esquema de un campo microscópico (según Anderson) que muestra las conexiones en abrazadera propias del di-
carion.

El cuerpo fructífero («seta»). La obtención de cuerpos fructíferos en el laboratorio —en condiciones controladas— implica la utilización de estiércol estéril, y muy probablemente sea éste el principal handicap de la utilización de *Coprinus* (aunque fuera de los cuerpos fructíferos todas las demás fases pueden cultivarse sin problemas sobre agar, véase tabla 2). La utilización de estiércol en un centro docente urbano plantea sin duda problemas materiales y formales que en otras circunstancias pueden ser incluso muy distintos. Al margen de ello hay que anotar que el estiércol (de caballo, por ejemplo) debe humedecerse ligeramente, e introducirse —algo prensado— en frascos de alrededor de medio litro, cuyo fondo debe de llenar hasta una altura de 6 o 7 centímetros. Las botellas tapadas con torundas de gasa o algodón se autoclavan a 6 kg durante 30 min.

TABLA N° 2

Medios de cultivo para *Coprinus lagopus*

Medio mínimo

contenido:

glucosa	20 g
asparagina	2 g
solución base (*)	25 ml
tiamina	4 ml
	(0,001 g/ml)
agar-agar	20 g
agua destilada	1000 ml

preparación:

1. disolver la asparagina en 100 ml de agua
2. disolver la glucosa en 200 ml de agua
3. disolver el resto en 500 ml de agua
4. mezclar las tres disoluciones y completar a 1000 ml
5. añadir el agar-agar
6. llevar a ebullición para que se disuelva bien el agar
7. colocar en los tubos o cápsulas
8. autoclavar a 6 kg. durante 15 min.

(*) solución base:

tartrato amónico	10 g
KH_2PO_4	20 g
NA_2SO_4	5,8 g
NA_2HPO_4	45 g

en agua destilada hasta 500 ml.*

Medio completo

composición:

a un litro de medio mínimo se le añade:

extracto de levadura	0,75 g
eupeptona	0,75 g
extracto de malta	0,60 g
hidrolizado de ácidos nucleicos (*)	1,25 ml

(*) hidrolizado de ácidos nucleicos:

1 g ácido nucleico de levadura y
1 g ácido nucleico de timo en 15 ml de
NaOH 1 N

más

1 g ácido nucleico de levadura y
1 g ácido nucleico de timo en 15 ml
de HCl 1 N

en frascos destapados se autoclava a 2 kg. durante 20 min.; se mezclan ambas y se ajusta el pH a 6. Se filtra en caliente, se enrasa a 40 ml con agua destilada y se guarda en botella oscura, bajo cloroformo).

Para obtener cuerpos fructíferos se colocan en el interior de estos frascos algunos fragmentos de agar conteniendo dicariones y se incuban a 37° C, y al cabo de unos dos días a la luz a una temperatura inferior (no superior a 28° C). En circunstancias favorables el cuerpo fructífero aparece al cabo de unos siete días, estando hacia el décimo plenamente desarrollado. El cuerpo fructífero o «seta» es de un color gris y se caracteriza por su superficie rugosa. Hacia el décimo día las basidiosporas van madurando en las laminillas y empieza la lisis del sombrerillo o cuerpo fructífero —cuya función es la de contribuir a la dispersión de las esporas— y en cuya fase se producen los pigmentos negros que se han utilizado para la fabricación de tintas. La lisis se completa en pocas horas.

El basidio y las basidiósporas. Los dos núcleos parentales de la fase dicariótica se fusionan en el basidio para formar un núcleo diploide que sufre la meiosis para formar cuatro esporas: porciones de citoplasma terminal del basidio —que permanecen unidas a él por el esterigmata— a cuyo interior emigra cada uno de los cuatro núcleos haploides meióticos. (Las tétradas de *Coprinus* son desordenadas como consecuencia del cruce de los husos meióticos, y no tienen demasiado valor didáctico). Las tétradas (o las simples esporas) pueden observarse fácilmente a partir de un pequeñísimo fragmento de laminilla —en agua destilada— a 100 aumentos.

El ciclo subsidiario:

La clamidóspora posee una gruesa pared y es de forma y tamaño variable (20 o 40 micras, por término medio). Aparecen sobre la superficie de las hifas

dicarióticas de cultivos de siete días o más, y están íntimamente relacionadas con las áreas pigmentadas de marrón (más fácilmente visibles por el reverso de la cápsula) que aparecen en las placas. Su observación —que debe seguir las mismas pautas que la de las basidiósporas— puede hacerse a partir de pequeños fragmentos de cultivo —1 mm o menos— recogidos con el asa y a partir de los cuales se prepara una suspensión. Las clamidósporas colocadas en medio completo germinan a partir de las 24 horas (a 37° C).

Las células velo, o células tónica, son grandes células de forma alargada (90 x 12 micras) que se encuentran cubriendo la superficie externa del sombrerillo del cuerpo fructífero, de donde son muy fácilmente obtenibles —individualmente o en grupos— frotando ligeramente con una aguja o asa estériles. Colocadas luego en agua pueden ser fácilmente observables al microscopio. Incubadas en medio completo durante 24 h a 37° C semejan el comportamiento de las clamidósporas y germinan por uno o ambos extremos. Como en ellas, la germinación única produce hifas dicarióticas y la germinación doble hifas monocarióticas.

Estudios de complementación con *Coprinus lagopus*.

A continuación se describe un protocolo práctico de carácter muy sencillo:

ESTUDIO DE LA COMPLEMENTACIÓN GÉNICA CON LOS MUTANTES *ad* (ADENINA) y *paba-1* de *COPRINUS LAROPUS*.

Tanto la adenina como el ácido paraaminobenzoico son indispensables para el desarrollo de *Coprinus lagopus*. En realidad las dos cepas indicadas son, respectivamente, deficientes para la síntesis de tales sustancias (son incapaces de sintetizarlas).

Material: Además de las dos cepas indicadas arriba son precisas cápsulas de Petri, medio de cultivo mínimo y completo (véase tabla 2), asas de cultivo y equipo mínimo de esterilización (quemador, etc.).

Finalidad: Comprobar que ambos mutantes son incapaces de crecer en medio mínimo y lo hacen, en cambio, en medio completo. 2. Realización de un cruzamiento entre ambos. 3. Comprobar como el dicarion de ambos es capaz de crecer en medio mínimo, puesto que presenta ambas dotaciones génicas.

Procedimiento:

24 horas antes de la siembra hay que preparar los medios de cultivo (agar entubos cortos). Para cada experimento se requerirán 3 tubos de medio mínimo y dos de medio completo. Es conveniente efectuar, al menos, un duplicado, con lo cual los tubos serán 6 y 4, (que se marcarán con un lápiz graso con una M (mínimo) o una C (completo). Una vez enfriado el contenido se guardarán en el refrigerador.

Mediante un asa de cultivo estéril se recoge un fragmento de cultivo y de agar (no mucho mayor que una cabeza de cerilla) de la cepa *ad* (adenina) y se coloca en un tubo de medio mínimo.

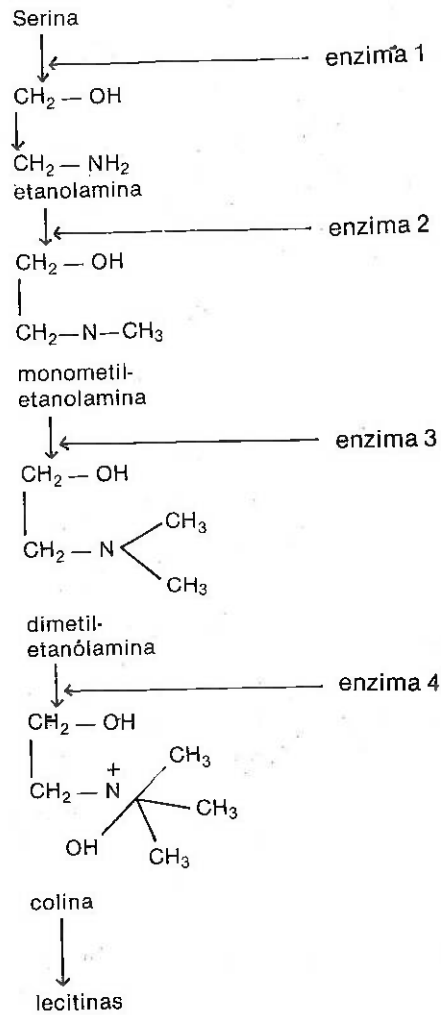


Figura 21. *Biosíntesis de la colina*

Se repite lá misma operación pero sembrando ahora en medio completo. Se rotulan *adenina* ambos tubos.

Se repiten las dos operaciones anteriores utilizando ahora la cepa *paba-1* (paraamino-benzoico).

Con el asa estéril se recoge un fragmento de agar y cultivo de *ad* y se coloca en el centro de un tubo de medio mínimo. Con el asa estéril se recoge ahora un fragmento de agar y cultivo de *paba-1* y se siembra muy cerca del anterior. Se rotula este tubo *ad + paba-1*;

(*nota*: es muy importante no tomar —al hacer las siembras— demasiado agar de los cultivos patrón, ya que por ser de medio completo (ordinariamente) podría enmascarar los resultados).

Se incuba a 30° C.

Las observaciones del crecimiento se harán en los primeros cinco a siete días.

Un estudio de la complementación, algo más completo, puede efectuarse —con técnicas idénticas— utilizando los mutantes que implican fallos en la síntesis de la colina en *Coprinus lagopus*.

Se conocen cuatro mutantes auxotróficos que requieren colina, llamados respectivamente: etanolamina, monometil etanolamina, dimetil etanolamina y trimetil etanolamina (colina). Como puede verse en la figura 21 cada uno de los enzimas implicados añade un grupo metilo en el proceso de síntesis. Mientras que los tres primeros mutantes responden a la adición de dimeil-etanolamina, el cuarto (colina) sólo crece a condición de añadir sobre el medio mínimo colina. Los tres primeros mutantes se denominan *chol-1*, y en realidad son alélicos, es decir están situados sobre el mismo locus del cromosoma B, mientras que el cuarto mutante, llamado *chol-2* lo es de un gen distinto, situado a 5 unidades de distancia sobre el mismo cromosoma.

En este caso la formación de un heterocarion (como la de un dicarion) sobre medio completo entre algún *chol-1* y *chol-2* y posterior resiembra sobre un medio mínimo permitirá ver como se da crecimiento sobre éste ya que entre *chol-1* y *chol-2* es posible la complementación (y en cambio dicho medio mínimo no permite el crecimiento ni de *chol-1* ni de *chol-2*, por separado).

Por el contrario un heterocarion entre dos mutantes *chol-1* compatibles fracasará en la resiembra sobre el medio mínimo, ya que no hay complementación posible por tratarse de alelos de un mismo gen, de acuerdo con el siguiente esquema.

Por último es preciso indicar que *Coprinus lagopus* puede utilizarse para detectar mutaciones inducidas. Para ello se utilizan oidios irradiados (con UV, cuyas características tanto técnicas como de seguridad no es posible incluir aquí; aunque pueden obtenerse fácilmente, del suministrador).

Estudios de genética del comportamiento

Phycomyces crece bien a temperaturas comprendidas entre 13 y 25° C (su temperatura óptima es 22°C), y dentro de este margen en unos 3-4 días, por término medio, produce esporangióforos, hifas aéreas rematadas por un glómerulo negro o esporangio, portador de las esporas. De ordinario el esporangióforo presenta *fototropismo positivo* (crece en dirección al foco luminoso, y si se le mantiene a oscuras una vez que se ha introducido algún foco de luz en su medio varía su dirección de crecimiento para dirigirla hacia aquél).

Además presenta *geotropismo negativo*, es decir crece en sentido contrario al de la acción de la gravedad y presenta también la capacidad de evitar —sorteándolos con su crecimiento— los obstáculos que se interponen en su camino («*evitación*»). Todo esto no tendría ninguna importancia sino fuera por el hecho de que existen mutantes «de comportamiento» en *Phycomyces* —y que como tales puede obtenerse a partir de laboratorios de investigación o de casas comerciales— deficientes para estas habilidades. Estos mutantes han sido denominados, abusivamente, mutantes ciegos (los que carecen de fototropismo) y mutantes paráliticos (tanto el tipo incapaz de evitar los obstáculos, como el tipo —distinto del anterior— que no presenta geotropismo negativo).

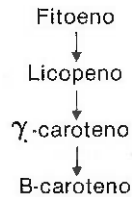
Resulta muy vistoso utilizar estos mutantes para ilustrar aspectos de la genética. Así, por ejemplo, *Phycomyces* puede utilizarse —si se dispone de una cepa normal y una de mutante incapaz de fototropismo, «ciega»— se puede poner de manifiesto, haciéndolas crecer en el interior de una campana de plástico rojo traslúcido o mejor transparente que nos permite observar a su través y que en cambio para *Phycomyces* crea unas condiciones de oscuridad absoluta puesto que esta especie es incapaz de reaccionar frente al rojo. A partir del momento en que se abra un orificio en la campana la cepa normal percibirá la luz y empezará a crecer hacia ella (al cabo de unos quince minutos) lo que se demostrará por un acomodamiento del esporangióforo. Por su parte, la cepa «ciega» no variará su «comportamiento» y seguirá creciendo en sentido vertical.

La respuesta a la gravedad es mucho más lenta y se puede evidenciar colocando un esporangióforo ya crecido en posición horizontal. Al cabo de unas doce horas se observa perfectamente un acodamiento de 90° hacia arriba. En cambio una «cepa» sin geotropismo seguirá creciendo horizontalmente. Existe además la posibilidad de «perfeccionar» las observaciones del geotropismo en *Phycomyces* recurriendo a artilugios simples, como por ejemplo un viejo tocadiscos girando a la ahora desusada velocidad de 78 rev/min.

Para comprobar la capacidad (o incapacidad para el correspondiente mutante «paralítico») de *Phycomyces* de sortear obstáculos se pueden colocar los esporangióforos de ambas cepas —ya crecidos— en el interior de una campana de plexiglás rojo (a fin de que la luz no influya en el experimento) y se aproxima algún objeto hasta unos 5 mm del esporangio. Al cabo de algunas (pocas) horas puede observarse como el esporangióforo de la cepa normal ha doblado en dirección contraria al obstáculo, mientras que el mutante no lo ha hecho.

Estudios de genética del metabolismo.

Existen algunos mutantes en *Phycomyces blakesleanus* que tienen alterada la capacidad de síntesis de beta-caroteno (precisamente el tipo silvestre es amarillo por acumulación de dicho pigmento). En este organismo la ruta de síntesis del beta-caroteno es la siguiente:



El paso de fitoeno a licopeno está catalizado por una deshidrogenasa y en realidad cursa en cuatro subfases sucesivas. Cuando alguna o todas ellas están afectadas se acumula el fitoeno y el organismo presenta color blanco. El paso del licopeno —rojo— al beta-caroteno (con un intermedio: el gamma-caroteno que es amarillo) está regulado por una ciclasa y cuando esta falla se acumula el licopeno por lo que el organismo toma color rojo. En un heterocarión es posible reunir varias estirpes y por tanto varios pigmentos, de entre los citados: licopeno, gamma-caroteno y beta-caroteno.

En la práctica puede introducirse una sencilla cromatografía en papel para separar los pigmentos. Para ello se colocan los fragmentos de micelio de las diferentes cepas en sendos matraces con éter de petróleo, y se muelen. Una vez molidos —y filtrados— se pipetea una cierta cantidad de líquido sobre una tira de papel cromatográfico sobre la que se hace ascender por capilaridad éter de petróleo con lo que se separan los pigmentos (el de mayor velocidad —y por tanto el que más se desplaza— es el beta-caroteno (amarillo) seguido del gamma-caroteno (naranja) y finalmente por el licopeno (rojo).

IV. EL TRABAJO EXPERIMENTAL CON VEGETALES SUPERIORES

Los ejercicios y prácticas de laboratorio (y de campo) más utilizados de entre los que implican el uso de vegetales superiores o de derivados suyos para la exposición didáctica de la genética pueden agruparse en uno de los siguientes siete grupos:

1. **Cruzamientos simulados con semillas.**
2. **Utilización de mazorcas de maíz, preparadas ex-profeso.**
3. **Cruzamientos reales con variedades seleccionadas.**
4. **Estudio de resultados de cruzamientos preparados de antemano para su observación.**
5. **Estudio de resultados en semillas (seleccionadas) *en germinación*: observación de rasgos hereditarios en la *plántula*.**
6. **Estudio de la segregación en el grano de polen.**
7. **Estudio de la variabilidad continua. Introducción a las técnicas estadísticas: cálculo de parámetros estadísticos básicos. La correlación.**

A estos habría que añadir algunos ejercicios de laboratorio y de campo que por estar relacionados con aspectos evolutivos (o más ecológicos) de la genética son tratados en el Capítulo VII.

La utilización de organismos superiores diploides (tanto si son vegetales como animales) en relación con la genética mendeliana implica una serie de técnicas comunes, como por ejemplo el contaje de las progenies, cálculo de frecuencias, cálculo de valores esperados, etc. Y entre tales técnicas el tratamiento estadístico de los resultados. En este aspecto y como es sabido la prueba de χ^2 tiene una gran utilidad. Evidentemente su utilización presupone una asimilación previa por parte del alumno del tipo y características de tal he-

rramienta (a un nivel, empero, básicamente intuitivo). Para ello es preciso concederle la misma categoría —y tratamiento— de concepto a «aprender». En los protocolos prácticos que se incluyen en este apartado el primero de ellos contiene una breve explicación —teórico-práctica— sobre dicho test, que aún y preparando imprescindible no debe ser la única.

1. Cruzamientos simulados con semillas.

Este es, desde luego, el tipo de trabajo «experimental» más fácil de utilizar. Es abordable en cualquier circunstancia, sumamente sencillo y, sin embargo, si los «cruzamientos» y su elección están concienzudamente estudiados y preparados puede ofrecer un gran rendimiento pedagógico.

Tal como se apuntó en el Capítulo I (programación) estos cruzamientos se utilizarán para presentar cuestiones a resolver por el alumno, a modo de ejercicios. En este aspecto su utilidad e idoneidad es mucho mayor a la de los «problemas» clásicos, por cuanto el interés que despiertan es mucho mayor. El hecho de que puedan materialmente manipularse sin límites los «resultados» del cruzamiento facilita también la asimilación de los aspectos teóricos que tales cruzamientos simulados vehicular.

En la práctica se trata de servirse de semillas (cualquier especie de la que se disponga de una variabilidad adecuada es buena) con las que imitar la herencia de algún (o algunos) caracteres mendelianos. Así por ejemplo, con semillas de judías largas y blancas, largas y beig, redondas y beig, y —finalmente— redondas y blancas podremos simular un dihibridismo clásico en el que, por ejemplo, los progenitores (P_1 y P_2) sean respectivamente largas-blancas y redondas-beig; la F_1 larga-blanca toda ella y la F_2 segregando en una proporción 9 : 3 : 3 : 1 de acuerdo con unas relaciones de dominancia/recesividad para, respectivamente, blanco versus beig y largo versus redondo. Prácticamente —y siguiendo con el ejemplo iniciado— el *cruzamiento simulado* se le presenta al alumno en forma de un lote de 4 frascos conteniendo:

- 1º) (etiquetado P_1): una muestra (unas 10 a 20, p. ej.) de semillas largo-blanco
- 2º) (etiquetado P_2): idem pero con semillas redondo-beig.
- 3º) (etiquetado F_1): con un número superior de semillas (unas 100, p. ej.) blanco-beig.
- 4º) (etiquetado F_2): unas 200 semillas en una proporción 9 : 3 : 3 : 1 para cada una de las siguientes cuatro clases, respectivamente:
 - a) largo-blanco
 - b) largo-beig
 - c) redondo-blanco
 - d) redondo-beig, aunque no exactamente. La cantidad exacta debe calcularse minuciosamente en función de la desviación que se pretenda.

Juntamente con el lote el alumno recibe un guión explicativo (véase más adelante) e instrucciones para que —sin mezclarlos— abra y observe —sin limitación alguna— el contenido de los frascos.

Nótese que es posible, y fácil, preparar *cruzamientos*, simulando no sólo monohibridismos, dihibridismos y demás modelos elementales de herencia sino también casos diversos de epistasis, de alelomorfismo múltiple, etc., etc.

Como es lógico las semillas de ciertas plantas (judías, etc.) ofrecen, por la variedad existente en el mercado, más posibilidades. En la figura 23 se muestran algunos de tales cruzamientos posibles con elementos corrientes.

Como guión para el alumno puede ser de utilidad el siguiente protocolo (que ya había publicado con anterioridad en otro lugar):

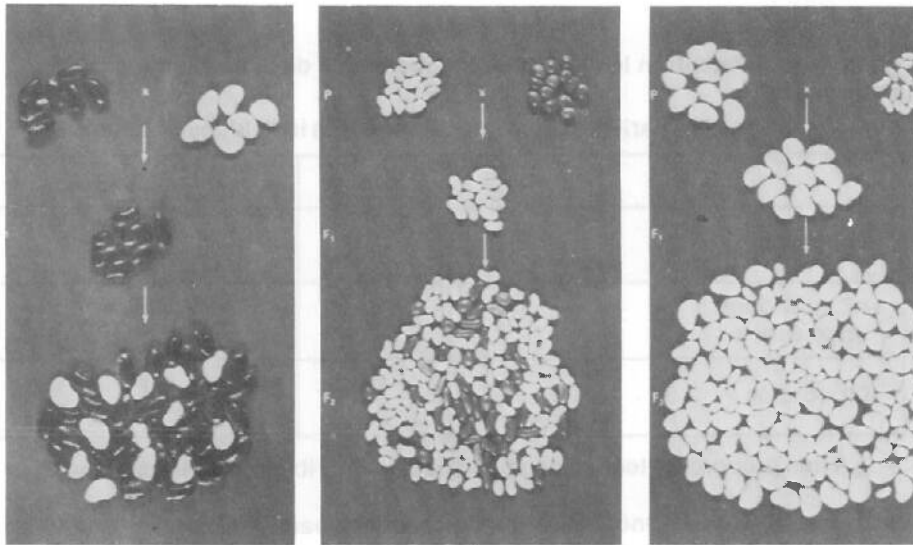


Figura 23. Tres cruzamientos simulados con semillas de judía. Arriba las generaciones parentales. En el centro las F_1 y abajo las F_2 . El cruzamiento de la izquierda es un monohibridismo. El del centro un dihibridismo y el de la derecha un dihibridismo para dos genes duplicados con efectos acumulativos.

ESTUDIO DE CRUZAMIENTOS SIMULADOS

CRUZAMIENTO N° 00

Introducción:

Los cuatro frascos que componen este «problema» contienen las semillas de las plantas del siguiente cruzamiento:

$$\begin{array}{ccc}
 P_1 & \times & P_2 \\
 & & \downarrow \\
 & & F_1 \\
 & & \downarrow \\
 & & F_2
 \end{array}$$

En realidad el cruzamiento es simulado, es decir no se ha realizado sino que con distintas clases de semillas se ha simulado un resultado, que de todas formas es posible.

Observación:

- a) Describáanse las características de las semillas en este cruzamiento simulado:

Padre 1:

Padre 2:

F₁:

En la F₂ se encuentran los individuos procedentes de la autofecundación simulada de la F₁.

- b) Obsérvense sus características y cuéntense los individuos de cada clase:

	1	2	3	4
fenotipos				
nº individuos observados				
proporción				

- c) ¿A qué proporción teórica se asemeja esta distribución de frecuencias?
- d) ¿Qué hipótesis genética se puede proponer para explicar estos resultados?
- e) Es posible comprobar si la hipótesis emitida es o no correcta mediante una prueba estadística muy utilizada en Biología: la prueba de X² (ji-cuadrado). Esta prueba sirve para evaluar si las diferencias entre los resultados obtenidos y los valores esperados son estadísticamente significativas o, por el contrario, pueden considerarse debidas al azar del muestreo. Para ello establecemos la *hipótesis nula*: partimos de la base hipotética de que las diferencias son debidas al azar. Después comparamos los resultados obtenidos y los esperados mediante la fórmula:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

donde O_i es la *frecuencia absoluta observada* para la clase i, mientras que E_i es la *frecuencia esperada* según la hipótesis e igual a N · p_i donde N es el número total de observaciones o individuos y p_i la proporción de observaciones que se espera que pertenezcan a la clase i.

Es evidente que cuanto mayor sea la diferencia entre lo observado y lo esperado mayor será el valor χ^2 , que obtendremos sumando los valores parciales para cada clase.

Una vez obtenido el valor de χ^2 , lo comparamos con el valor correspondiente de la tabla χ^2 , que, de forma resumida se adjunta a continuación:

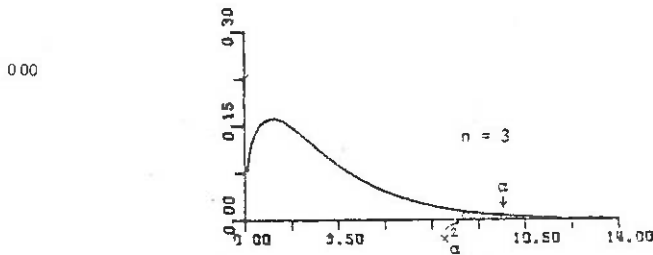
n	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	2,076	3,841	5,416	6,635	10,827
2	4,605	5,991	7,824	9,210	13,815
3	6,251	7,815	9,837	11,345	16,263

n = grados de libertad

Lo que hay que mirar en la tabla es la probabilidad de que las diferencias entre lo observado y lo esperado sean debidas o no al azar.

Si es cierto que las diferencias pueden atribuirse al azar, es decir, si es correcta la hipótesis emitida sobre las proporciones teóricas, χ^2 sigue una distribución de probabilidad llamada ji-cuadrado, con 3 «grados de libertad», en este caso (ver más adelante), que está tabulada.

Como se conoce cuál es la distribución de χ^2 cuando se supone que las proporciones son correctas, se puede hallar un margen de confianza k , tal que la probabilidad de hallar un valor de χ^2 mayor o igual a k , sea un valor α muy pequeño (0,05) y previamente fijado. Por ejemplo, si este valor de probabilidad es 0,05, para tres grados de libertad, el valor de k correspondiente es 7,815.



Representación gráfica de la distribución de χ^2

Si el valor de χ^2 obtenido en un caso concreto supera a este margen de confianza k , habrá sucedido algo que no es de esperar si las proporciones son correctas (que esto ocurra tiene una probabilidad α , de 0,05) y por lo tanto, rechazaremos la hipótesis emitida, con un riesgo de error igual a α , pues debido al azar puede ocurrir (con probabilidad α) que siendo correcta la hipótesis, χ^2 haya superado a k .

Por lo tanto, en la práctica procederemos del siguiente modo:

Si el valor obtenido de χ^2 es menor del valor que nos indica la tabla (para el número de grados de libertad correspondientes), aceptamos la hipótesis nula; y si es mayor la rechazamos.

Hemos de tener en cuenta el número de *grados de libertad*, que consiste en el número de datos que pueden variar (por ejemplo, si tuviésemos 20 semillas que a priori pudiesen ser claras u oscuras y 12 de ellas fuesen claras, el número de oscuras, 8, está ya determinado por el de las claras. Luego, en este caso, hay dos clases posibles y un grado de libertad, el número de grados de libertad es inferior en una unidad al número de clases).

$$\text{Grados de libertad (n)} = \text{n.º de clases} - 1$$

También se ha de tener en cuenta que todos los valores esperados han de ser, como mínimo, superiores a cinco (condición necesaria para que la prueba de ji-cuadrado sea correcta, en caso contrario puede aplicarse la prueba de ji-cuadrado con la corrección de Yates). A continuación se aplicará la prueba de χ^2 para comprobar la hipótesis del cruzamiento.

2. Utilización de mazorcas de maíz, preparadas ex-profeso

Una mazorca de maíz contiene algunos centenares de granos o semillas cuyas características morfológicas (color, rugosidad, etc.) son variables y en buena parte hereditarias, pero que sin embargo no dependen del genotipo de la planta madre sobre la que se ha formado la mazorca sino que están controladas por los genes de las propias semillas. Así, pues, de hecho, una mazorca reúne a un conjunto de individuos de la *generación siguiente* a la de la planta que la porta.

Por otra parte el maíz, por su importancia económica, ha sido bien estudiado genéticamente y se conocen muchos mutantes de los cuales se sabe además su modelo de herencia. Entre estos mutantes algunos afectan a características de la semilla. Y, a su vez, entre estos, algunos son morfológicos y tan fáciles de identificar como por ejemplo variaciones en el color, en la forma, tamaño y textura del grano.

Además, el número elevado de granos en una mazorca hace que la desviación entre los resultados observados y los esperados no sea, generalmente, demasiado grande.

La feliz coincidencia de todas estas características hacen de la mazorca del maíz un estupendo material de elección.

Todos los grandes suministradores de recursos y material didáctico para la enseñanza de la biología (entre ellos Philip Harris, Griffin, Gerrard and Co., Carolina Biological Ltd. etc.) ofrecen en su catálogo un número considerable de tipos de mazorcas *reales* de maíz (que en su inmensa mayoría contienen una F_2 o bien la progenie de un retrógrado), *realmente híbridos* para diversos caracteres morfológicos de herencia mendeliana (Tales mazorcas, se insiste una vez más, son el resultado de cruzamientos efectuados realmente). Estas mazorcas suelen presentarse con «ciertas mejoras técnicas»: barnizadas a la laca, revestidas de plástico transparente y fumigadas para hacerlas aún más vistosas y protegerlas de los depredadores (aún así necesitan un mínimo de cuidados y según me han contado los ratones son capaces de dar buena cuenta de ellas cuando se hacen dueños de un laboratorio).

La utilización de estas mazorcas, igual que la de los cruzamientos simulados puede ser varia, y como forma de presentar al alumno aspectos teóricos de la genética muy superiores a los «problemas» clásicos. La motivación que suscitan es, lógicamente, mucho mayor y su eficacia real —por tratarse de casos auténticos— muy posiblemente sea mayor que la de los cruzamientos simulados.

A título orientativo incluyo la relación de *mazorcas para el estudio de la genética* que ofrece en su catálogo una de las firmas antes citada:

- 1) *Purple-yellow* (3 : 1). F_2 de un monohibridismo para un único factor de color de la aleurona. Fotografía 24.
- 2) *Starchy-sweet* (3 : 1). F_2 de un monohibridismo para un único factor de la textura del endospermo.
- 3) *White-purple* (3 : 1). F_2 para un inhibidor del color.
- 4) *Yellow-white-starchy-sweet* (9 : 3 : 3 : 1). F_2 para los caracteres reseñados en 1) y 2).
- 5) *Yellow-purple* (13 : 3). F_2 que muestra una segregación entre dos pares alelos implicados en una epistasia de un dominante.
- 6) *Purple-yellow-starchy-sweet* (1 : 1 : 1 : 1). Progenie de un retrógrado para 2 alelos de 2 loci independientes. Fotografía 25
- 7) *Purple-yellow* (1 : 1). Retrógrado. Fotografía 24
- 8) *Starchy-sweet* (1 : 1). Retrógrado.
- 9) *Purple-yellow-starchy-sweet* (9 : 3 : 3 : 1). F_2 de un dihibridismo. Fotografía 25.
- 10) *Yellow-purple-starchy-sweet* (9 : 3 : 3 : 1). Resultado de un cruzamiento entre *yellow-sweet* y *purple-starchy* (un inhibidor del color se halla implicado).
- 11) *Purple-yellow-red-white* (9 : 3 : 3 : 1). F_2 de un cruzamiento entre un progenitor púrpura (*purple*) y otro blanco (*white*) con segregación para 3 factores (aleurona púrpura-aleurona roja; aleurona coloreada-aleurona incolora; y endospermo amarillo-endosperma blanco). Los genotipos de los progenitores son: CCPrPrRRYY y ccprprRRyy.

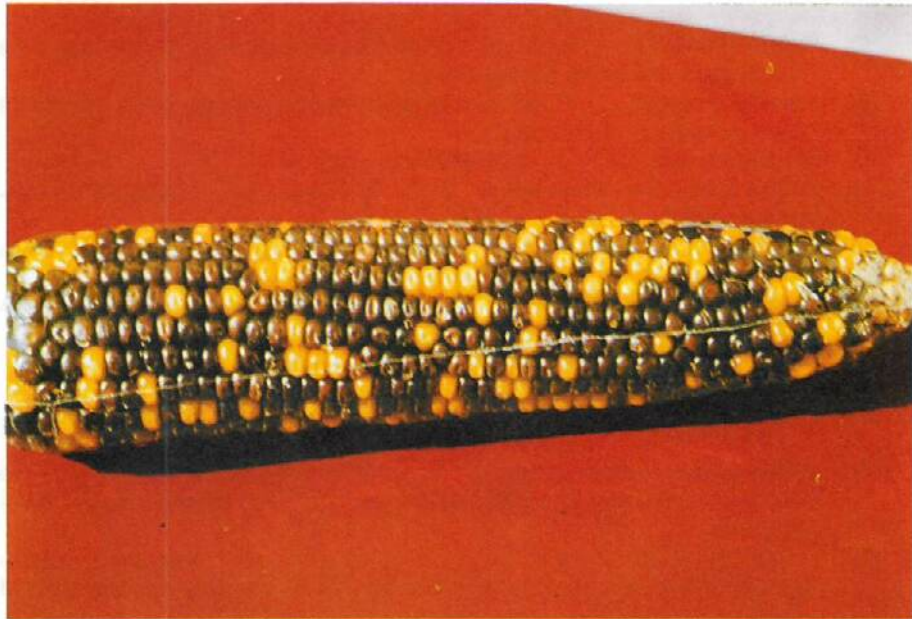
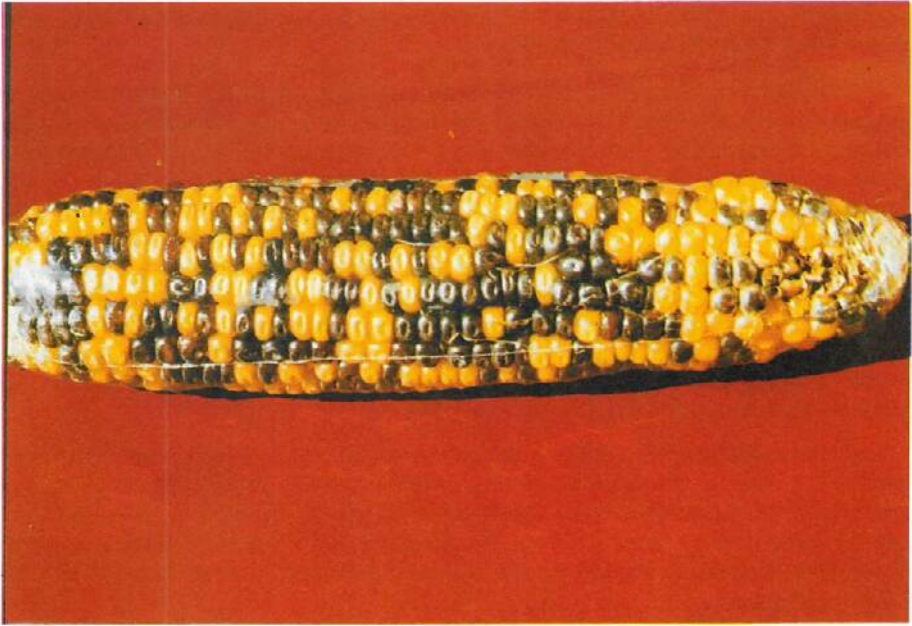


Figura 24. (arriba): *Purple-yellow* (1:1) Retrógrado.
(abajo): *Purple-yellow* (3:1) F₂

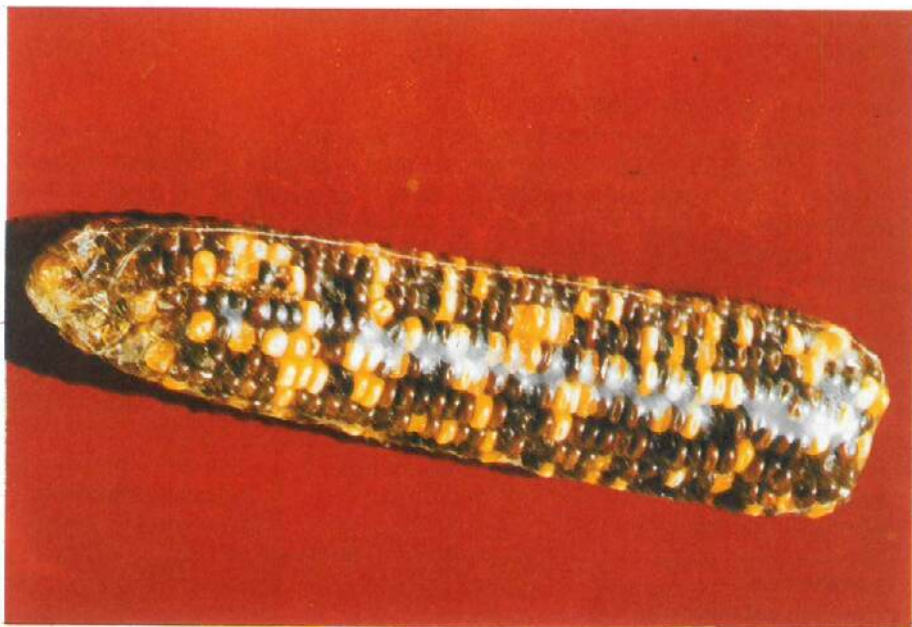
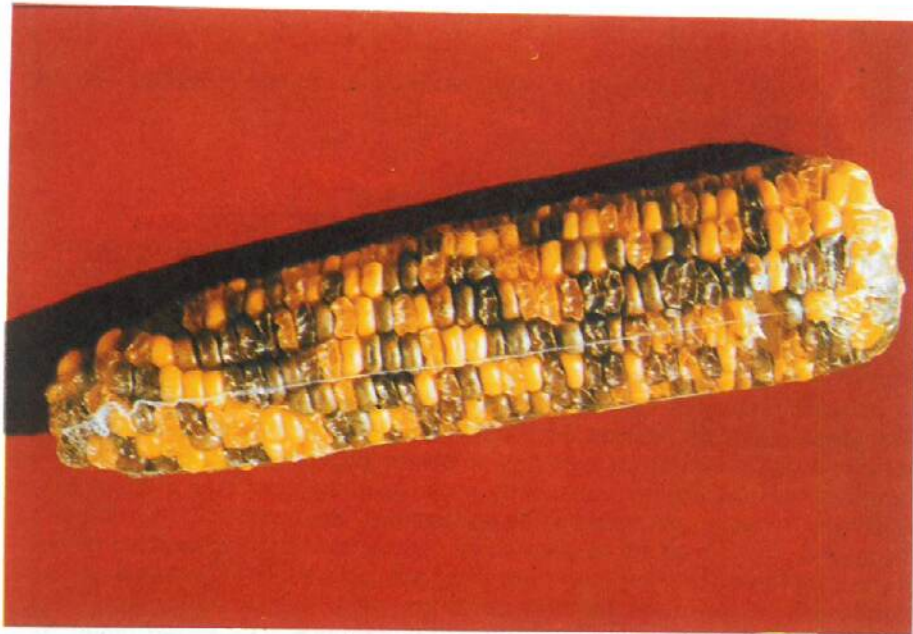


Figura 25. (arriba): *Purple-yellow-starchy-sweet* (1:1:1:1) *Retrógrado*.
(abajo): *Purple-yellow-starchy-sweet* (9:3:3:1) F_2 .

La presentación a los alumnos de estos ejercicios puede ir acompañada del siguiente protocolo:

ESTUDIO DEL MODELO DE HERENCIA DE CARACTERES MORFOLÓGICOS DE LA MAZORCA DE MAIZ. PROTOCOLO PRÁCTICO

MAZORCA N°

Introducción

Las infrutescencias del maíz, las *mazorcas*, contienen las semillas, cuyas características (color, textura, etc.) son hereditarias (en buena parte). Estos caracteres de cada una de las semillas no están gobernados por los genes de la planta progenitora sobre la que se ha formado la mazorca sino que son la expresión de los genes de cada una de las semillas. Por tanto una mazorca es un conjunto de individuos (de la generación siguiente) y la observación y estudio de sus características (color, textura, etc.) orientará sobre la herencia de tales características (genotipo y fenotipo de los progenitores, tipo de herencia...).

La mazorca N° 00 es el resultado de cruzar plantas P_1 y P_2 , ambas homocigóticas, que dieron lugar a una F_1 , cuyos individuos cruzados entre sí han producido esta mazorca (que es por tanto una F_2 del cruzamiento $P_1 \times P_2$) (véase el texto en pág. 58).

Observación y toma de datos.

Obsérvese cuántos tipos (fenotipos) distintos de granos presenta la mazorca (por el color, por la textura de la superficie, etc.) y cuéntense (la mejor manera de hacerlo es por filas enteras). NO ELIMINAR NI DAÑAR LA ENVOLTURA PLÁSTICA. ES UNA GARANTÍA DE QUE OTRAS PERSONAS NO HAN ALTERADO SU CONTENIDO. Calcúlese la proporción de los datos obtenidos (tomando la clase más rara como unidad).

	1	2	
fenotipo (descripción del mismo):			tantas columnas como sea menester
N° individuos (granos) observados:			
Proporción			

Elaboración de hipótesis y contrastación de las mismas.

Ensáyense algunos mecanismos genéticos que permitan explicar la herencia observada; emítanse hipótesis sobre: número de genes implicados, número de alelos implicados, genotipos de P_1 , P_2 , F_1 y F_2 según el modelo propuesto; frecuencias esperadas de acuerdo con el modelo. Una vez comentado suficientemente el modelo contrastétese. Rellénese para ello el siguiente cuadro y calcúlese la X^2 .

modelo genético propuesto:			
fenotipos (descripción):	1	2	
nº individuos observados:	O_1	O_2	
frecuencias observadas:			
frecuencias esperadas según el modelo:			
nº individuos esperados según el modelo:	E_1	E_2	

Discusión de la verosimilitud del modelo.

De acuerdo con el margen de error elegido (indíquense las razones) y los grados de libertad correspondientes al caso estudiado, verifíquense mediante una tabla de X^2 el significado de la magnitud de la X^2 encontrada y dígase (rellénese el siguiente cuadro):

nº de grados de libertad	margen de error eleg.	valoración de la magnitud de la X^2 encontrada.

Por tanto:

¿Hasta qué punto es razonable —de acuerdo con el resultado estadístico— mantener la hipótesis propuesta?

¿Por qué?

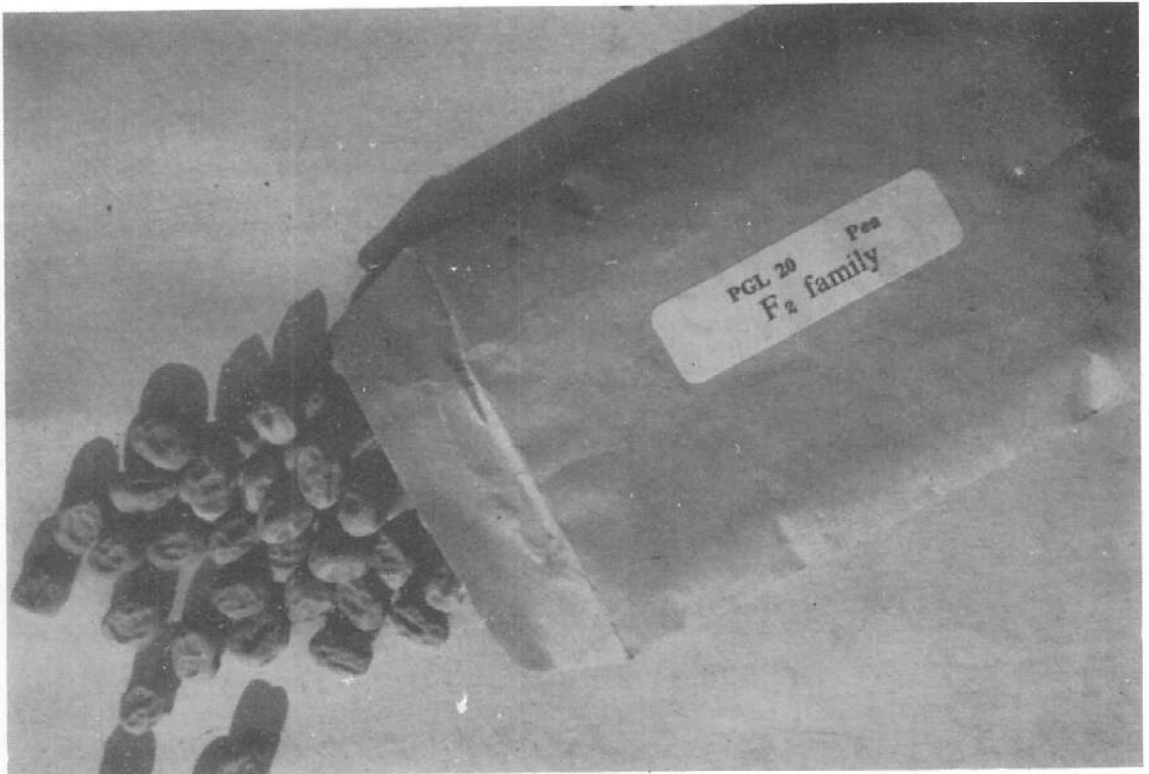
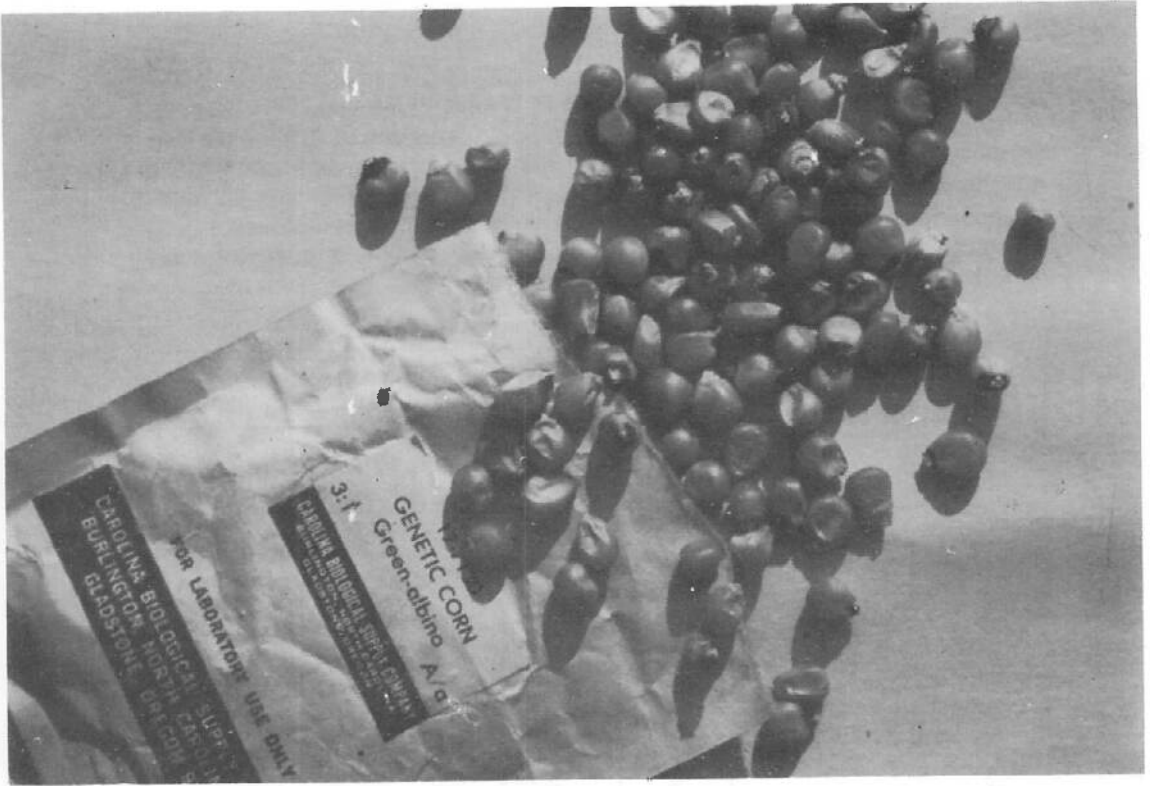


Figura 26. Cruzamientos preparados de antemano. Arriba una F_2 para un monohibridismo en maiz. Abajo una F_2 para otro monohibridismo, en guisante. Listas ya para sembrar.

Y, contéstese además:

¿Nos indica X^2 que el modelo propuesto es verdadero? (*)

¿Nos indica X^2 que el modelo propuesto es falso? (*)

Nota. (*) Hágase notar *siempre* a los alumnos que la contestación a ambas preguntas, en todos los casos, es siempre *NO*.

3. Cruzamientos reales con variedades seleccionadas y

4. Estudio de resultados de cruzamientos preparados de antemano.

Además de lo sugerido en el apartado 1. de este capítulo los cruzamientos pueden realmente llevarse a cabo. Es más, si se quiere, pueden repetirse los experimentos clásicos de la historia de la genética: los cruzamientos con guisantes de Mendel, la herencia intermedia en el dondiego de noche, etc. El factor limitante consistirá, ahora, en disponer de las cepas (las líneas puras o mutantes adecuados). Sin embargo, este escollo puede obviarse fácilmente porque también los comercios suministradores pueden proporcionarlos. Y de hecho proporcionan tanto semillas para hacer los cruzamientos (y en este caso las dificultades han de surgir por el tiempo largo que implican muchos de tales cruzamientos) como también proporcionan colectivos de semillas que en realidad son ya progenies de cruzamientos efectuados con anterioridad (por la firma comercial) de modo que una vez germinadas las semillas los individuos adultos constituyen ya una F_2 (o la descendencia de un retrógrado) sobre la que hacer los cómputos. En este caso, como es obvio, se soluciona —en buena medida— el problema de tiempo que lleva consigo realizar realmente los cruzamientos; aunque, claro está, la idoneidad pedagógica puede no ser la misma.

De hecho la variedad de mutantes que es posible obtener es grande y basta tan solo un poco de imaginación para idear cultivos, cruzamientos y demostraciones. Por lo demás las plantas que normalmente se utilizan exigen para su cultivo cuidados mínimos y —en todo— convencionales. En las ilustraciones 26 y siguientes se ejemplifican algunas de las cepas y variedades que pueden ser utilizadas.

5. Estudio de los resultados de cruzamientos (preparados de antemano) en semillas en germinación: observación de caracteres hereditarios de la plántula.

De hecho los experimentos reales, (*in vivo* utilizando material vegetal) para la enseñanza de la genética que más se utilizan son los correspondientes a este apartado; mucho más utilizados que los indicados en los apartados 3. y 4). La razón es lógica: una mayor economía de tiempo.

Se trata, pura y simplemente, de utilizar caracteres observables y diferenciables no ya en la planta adulta sino en la *plántula* (o cuanto más en las primeras fases de vida autótrofa de la nueva planta) sin necesidad de tener que aguardar a que cada generación agote el tiempo requerido para su desarrollo completo.

Aunque ciertamente incidental, debe hacerse también el siguiente comentario: en estas primeras fases pueden utilizarse caracteres incompatibles con un desarrollo normal de la planta que provocan una interrupción del desarrollo y que hacen que tales plantas no prosperen. Ello da pie a disponer de una amplia gama de caracteres, por otra parte fáciles de obtener (p. ej. por irradiación).

De hecho cuando se utilizan caracteres observables y diferenciables en las primeras fases de vida de la planta (lo que en un sentido muy laxo hemos llamado plántula) puede recurrirse a efectuar realmente el cruzamiento o, para ganar todavía más tiempo —como suele suceder—, partir del lote de semillas producto de tal cruzamiento previo. Es decir, existen aquí también dos posibilidades comparables a las que ilustran los apartados 3 y 4, respectivamente.

Como ya se ha dicho la diversidad de cepas y variedades ofrecidas es alta. Algunos suministradores tienen en su catálogo «Programas» o «Cursos de genética vegetal» con números elevados de lecciones, que utilizando como material de laboratorio el que comentamos exponen todos los aspectos relevantes de la genética clásica. En las ilustraciones 26 y siguientes se muestran algunos de tales materiales.

Ciertamente a partir de algunos de tales materiales cualquier profesor puede montar sus propias lecciones o «cursos» que ordinariamente le resultarán más adecuados por estar más adaptados al curso al que van dirigidos. Se trata de idear un programa de utilización del material disponible. Como ayuda para estimular la imaginación en este sentido la figura 27 incluye una reproducción de la «lección introductoria» de uno de los anteriormente mencionados «cursos comerciales de genética vegetal».

En la práctica, las plántulas germinadas pueden utilizarse también de modo análogo al sugerido para los cruzamientos simulados y para las mazorcas de maíz, es decir para presentar problemas o introducir datos. No se incluye ningún modelo de protocolo que (incluyendo una descripción de la especie y variedades utilizadas) por lo demás será muy parecido al de los apartados 1. o 2.

Las semillas se colocarán de preferencia —para su germinación— en cápsulas de Petri, sobre papel de filtro, verificándose cada día el grado de humedad, que no debe ser excesivo (conviene siempre decantar el agua sobrante). De ordinario y en una habitación calefaccionada las semillas estarán aptas para ser observadas en unas 2-3 semanas.

6. Estudio de la segregación en polen.

Se trata de un apartado bastante clásico de los programas de didáctica experimental de la genética que no obstante es muy concreto en cuanto al material a utilizar.

El fundamento consiste en disponer de flores masculinas de maíz heterocigoto de forma que existan dos tipos de granos de polen y que estos difieran por algunos caracteres fácilmente identificables. Es decir, se trata, como puede

PRACTICAL PLANT GENETICS
 PCL 2D - INTRODUCTION TO GENETICS

This lesson which is based on peas, lettuce, tobacco and radish is intended as a first introduction to the principles of heredity. It reveals the particulate nature of inheritance and illustrates Mendel's Law of Segregation. The genes produced by the parents are passed on to the hybrid. The lesson demonstrates the principle of dominance and the recovery of parental characters in the second generation. Their predictable ratio gives the clue to their genetic control. By using an incompletely dominant gene in tobacco the genotypes of all three phenotypes recovered in one F_2 can be deduced.

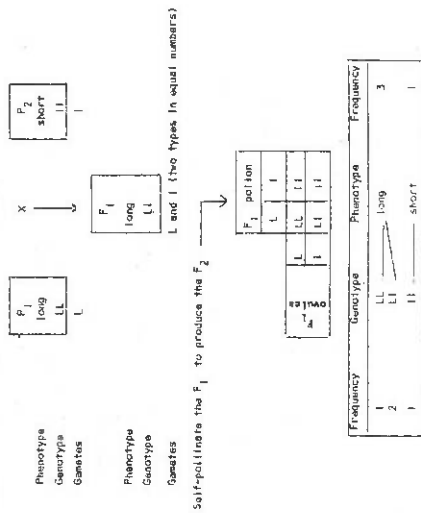
The use of four contrasting species emphasizes that the principles apply in all organisms. The peas, lettuce and tobacco reveal the simplicity of the basic genetic control. The radish illustrates the rôle of modifier genes, and by expressing an incompletely dominant gene in tobacco the complexity of the genetic control is shown by characters in many organisms. Although a character may appear impossible in its inheritance, especially in outbreeding species, the basis of such a character is many interacting genes which are individually following a simple pattern of inheritance.

The characters in this lesson have been chosen for their clarity and they are little influenced by the growing conditions. The principle Genotype X Environment can be very effectively demonstrated with PCL 3.

The notes below give details of the characters studied in the four species, statistical analysis, cultural methods, and background information.

THE CHARACTERS

The pea provides a classical example of monohybrid inheritance with complete dominance. The familiar difference tall vs. dwarf is better described as stems long vs. short. The characters are controlled by a single gene with two alleles, L and l, and L is used for the dominant and recessive traits at the controlling locus. The plan and checker board below shows how the character is inherited. Only F_2 seed is supplied.



PCL 20/2

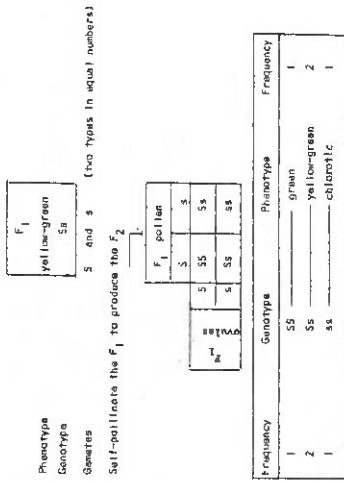
The F_2 seedlings grown in the experiment should be classified into the two possible phenotypes and the numbers per group recorded. The resulting data should then be analysed as outlined in the section - Data Analysis.

The analysis will show that the observed F_2 ratio agrees with the expected 3:1 ratio. This confirms the belief that the genes produced by the hybrid carry unchanged one or other of the two factors contributed by the parents to the hybrid.

The lettuce F_2 family will segregate to give a 3:1 ratio for green vs. albino cotyledon colour. Use the symbols A and a for this character. Classify and count the seedlings, and analyse the observed data in relation to expected.

The albino seedlings do not survive for very long so it is not possible to grow mature plants of this genotype in order to produce F_1 hybrid seeds. The stock has to be maintained by separately sowing individual green F_1 plants and then progeny testing them. The heterozygotes are identified by virtue of their segregating offspring.

The tobacco F_2 family is based on the mutant 'sulphur' for which the symbol is su. In order to simplify the checker board below S and s are used.



Incomplete dominance allows all three F_2 genotypes to be distinguished so the expected ratio is 1:2:1.

The F_2 seedlings grown in the experiment should be classified into the three possible phenotypes and the numbers per group recorded. The resulting data should then be analysed as outlined in the section - Data Analysis. Remember that for three classes there are two degrees of freedom.

The analysis will show that the observed ratio agrees with the expected 1:2:1 ratio. This confirms the belief that the genes produced by the hybrid carry unchanged one or other of the two factors contributed by the parents to the hybrid.

Because of the lethal effect of su when homozygous, it is not possible to grow mature plants of that genotype for multiplication or hybridisation. The stock has to be maintained by selecting heterozygous (F_1) plants in an F_2 family and sowing them to produce another segregating generation.

P.F.O.

Figura 27 Reproducción de una «lección introductoria» de un curso comercial de «genética vegetal» en los que se manejan semillas de cruzamientos preparados de antemano, caracteres observables en «plántula» y cruzamientos reales.

Redish seed of both parental lines. The F_1 hybrid and the F_2 family are supplied. F_1 is the variety Cherry which is a round seed and a long scarlet. F_2 is the variety Carrot which is a round seed and a long scarlet. The F_2 family is divided into two groups: one with round white and long scarlet and one with round white and long scarlet. The F_2 family is divided into two groups: one with round white and long scarlet and one with round white and long scarlet. The F_2 family is divided into two groups: one with round white and long scarlet and one with round white and long scarlet.

Radish has a self-incompatibility system so the species is an obligate outbreeder. This tends to maintain modifiers in a very heterogeneous state. The result may be slight variation between plants in each of the parental and F_1 hybrid lines, though the basic type will be obvious.

The F_2 seed can only be produced by cross-pollination of F_1 plants and this also increases the chance of variation in the genetic background. The F_2 is that, although radish appears to be a simple Mendelian trait, the F_2 family will be found, there are many intergrades for both colour and shape. Classification of the radishes in various ways should lead to considerable discussion on the inheritance of these characters. The ultimate conclusion will be that there is evidence of single genetic control but with the ratio very distorted due to the effects of gene interaction and modifiers.

Fortunately the environment has little effect on the expression of the colour and shape characters, but any attempt to score for seed shape is hampered by variation in the growing conditions especially due to position in the seed tray.

DATA ANALYSIS

After the seedlings in a segregating population have been classified and counted, the next step is to compare the observed data in relation to the expected results. It must be decided whether the ratio detected in the sample investigated agrees with the postulated ratio for the total population. The experimenter must decide whether he is likely to get the recorded result purely by chance, or if it disagrees with the hypothesis which has been set up.

There will be two or three phenotype classes in the F_2 data: two if there is complete dominance, three if dominance is incomplete. The principles of analysis are the same, no matter how many classes are involved.

The various samples for data obtained in the F_2 generation of a monohybrid cross with complete dominance. The hypothesis is that the pair of factors segregates to give a 3:1 ratio. There are two phenotype classes which are designated a, b and the data should be set out as follows:-

	Class		Total
	a	b	
Observed	102	26	128
Expected	96	32	128
Deviation	6	-6	0

It is quite unsatisfactory to divide 102 by 26 and say that the ratio 3.92:1 approximates to the expected 3:1. The components total 4.92 instead of 4, and there are no limits to the size of discrepancy which can be obtained. The data must be subjected to statistical analysis by means of the chi-squared test.

This test enables the goodness of fit between observed and expected to be determined. It is based on the deviation from the expected value for each class, and the number of independent comparisons which can be made.

Chi-squared is calculated by summing the squares of the deviation divided by the expected for each class. (See note below for the continuity correction for small samples).

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{deviation})^2}{\text{expected}}$$

$$\chi^2 = \frac{6^2}{96} + \frac{-6^2}{32} = 1.5$$

Reference must now be made to the theoretical distribution of χ^2 which is set out in the table below. The degrees of freedom, the number of independent classes in each category, is always one less than the number of classes involved. In this analysis 2-1 = 1.

From the table it will be seen that for 1 degree of freedom, the χ^2 value of 1.5 gives a probability value between 0.1 and 0.2.

It is usual to accept a probability value of less than 0.05 as proof of a significant discrepancy between the observed and expected; for values above 0.05 there is no reason to suspect the accuracy of the hypothesis. This standard provides a reliable, but not infallible interpretation of the data.

The probability value obtained in the analysis is above the 0.05 limit so it can be assumed that the deviations observed were due to chance; there is no significant discrepancy from the expected 3:1 ratio. He can conclude that garden with either the dominant or recessive allele are equally frequent in the population and that there is equal chance for any pollen grain nucleus to fertilise any ovule.

Continuity correction for small samples

When the total sample size is small, say below 100, and there is only one degree of freedom, it is desirable to reduce the deviation of the observed from the expected by half a unit before calculating the χ^2 . For example, a family of 48 which segregated 30:18. Instead of the expected 30:12 had a deviation of 6 for each class.

$$\text{If no continuity correction is made } \chi^2 = \frac{6^2}{30} + \frac{6^2}{12} = 4.0$$

The probability for 1 d.f. is below 0.05 indicating a lack of statistical agreement between observed and expected.

When the correction is applied $\chi^2 = \frac{5.5^2}{30} + \frac{5.5^2}{12} = 3.36$, the probability is above 0.05 so it can be accepted that the observed sample does agree with the theoretical expectation.

DISTRIBUTION OF χ^2

χ^2	.95	.90	.80	.70	.50	.30	.20	.10	.05	.01
1	.00017	.00393	.0158	.0342	.146	.485	1.074	1.642	2.706	5.024
2	.0201	.103	.211	.446	.713	1.386	2.408	3.219	4.605	9.210

The table is taken from Table IV of Fisher and Yates: Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, published by Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh, and by permission of the authors and publishers.

Figura 27 (continuación)

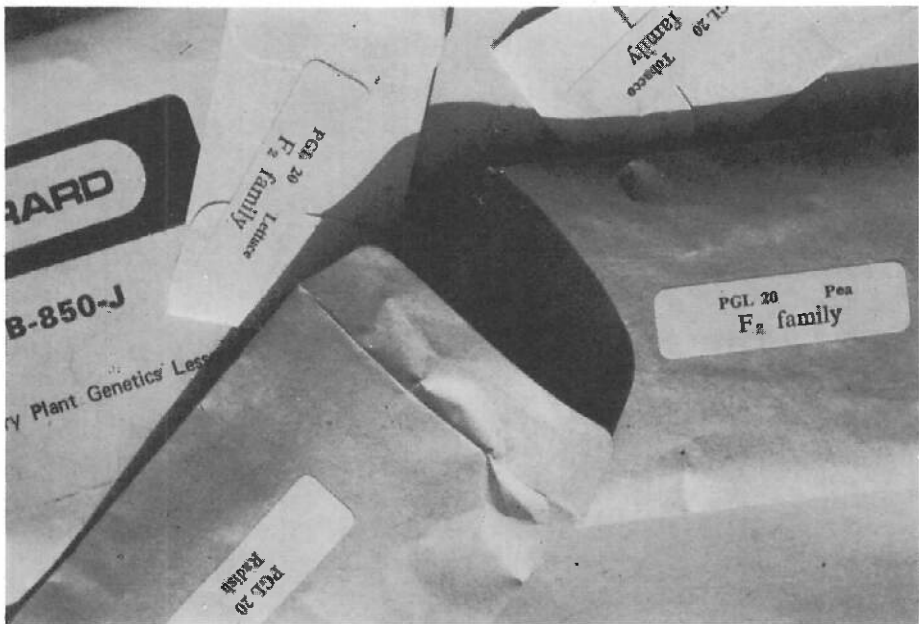


Figura 28. Materiales previamente preparados para el estudio experimental de la genética clásica en vegetales (lechuga, guisante, rábano, tabaco, etc.).

verse, de estudiar muy directamente la segregación de los alelos que tiene lugar durante la meiosis.

Por tratarse de un «método» distinto a todos los anteriores (que suelen ser mayoritarios) su utilidad es grande pues despierta rápidamente interés y puede gozar, por tanto, de bondad como instrumento pedagógico.

En la práctica, sin embargo, este tipo de materiales no son muy corrientes porque es difícil dar con caracteres que presenten diferencias a nivel del grano de polen. Usualmente, estudio (didáctico) de la segregación en el grano de polen es sinónimo de utilización de la cepa *wx* del maíz (*wx = waxy endosperm*).

El grano de polen del maíz suele contener almidón como reserva hidrocarbonada. Esta característica viene determinada por un gen normal que denominamos *Wx*. Un alelo mutante suyo, *wx*, determina que la reserva hidrocarbonada del polen esté compuesta exclusivamente por la fracción amilopectina del almidón, que en realidad no contiene en absoluto almidón entero. Como es sabido mientras que, con tintura de iodo, el almidón se colorea característicamente de azul oscuro la amilopectina lo hace en pardo-rojizo.

En la práctica se parte de flores (anteras) de maíz heterocigoto *Wx/wx* para este gen. Con ligeros golpes secos sobre un porta se espolvorea éste de polen, se tiñe con tintura de iodo y se coloca un cubre. Al microscopio se distinguen muy bien ambos tipos de polen y se efectúan los contajes (esta observación puede presentarse también con un protocolo de práctica que ayuda y estimula a cuantificar, formular hipótesis, etc.; este protocolo puede ser semejante a los de las páginas 26-27).

7. Estudio de la variabilidad continua.

Con vegetales pueden estudiarse también otros aspectos de la genética distintos a la clásica. Entre ellos la variabilidad y la herencia cuantitativa.

A mi juicio, en una primera aproximación (como es, de hecho, un curso pre-universitario básico) queda fuera de lugar el estudio en profundidad de los mecanismos de la genética cuantitativa pero no el de la variabilidad que de algún modo implica (aunque se puede hacer, a este nivel, de más y de menos) la presentación de aquella.

El estudio de la variabilidad comprende una faceta que consiste en la introducción (y por tanto utilización práctica) de los parámetros básicos de la estadística aplicada a la biología: medias, desviación, típica, varianza y correlación, entre otros.

Personalmente he utilizado indistintamente algunos rasgos de variabilidad humana fáciles de medir y la variabilidad ofrecida por un colectivo de frutos vegetales para presentar tales conceptos. Siguiendo con mi criterio, ambos planteamientos son adecuados y tienen sus ventajas aunque como sucede normalmente el estudio de la variabilidad en el hombre, «en carne propia» resulta comparativamente más atractivo. Por este motivo he postpuesto hasta el Capítulo VI un análisis más detallado de todas estas cuestiones.

A continuación se incluye un protocolo práctico para el estudio de la variabilidad en un colectivo de frutos de cacahuete (se atiende a la longitud, anchura, número de semillas y sus relaciones). En el propio protocolo se contienen algunas razones de la elección del material.

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA VARIABILIDAD EN FRUTOS DE CACAHUETE. PROTOCOLO PRÁCTICO

El estudio biométrico se realizará aquí en frutos de cacahuete. Con la ayuda de un pie de rey se medirán dos caracteres: longitud (x) y anchura (y). La anchura viene dada por la línea de máxima anchura del fruto medida perpendicularmente a la línea de sutura de la legumbre. El tercer carácter considerado es el número de semillas que contiene el fruto (z).

Evidentemente, las nociones y conceptos que se emplean están limitados a su aspecto puramente empírico, sin connotaciones teóricas. El planteamiento de la experiencia parte de la elección de un material de estudio que cumpla una serie de requisitos:

- Facilidad de obtención y suficiente inalterabilidad de los caracteres a estudiar.
- Medición de tres caracteres distintos con utillaje y metodología simple.
- Suficiente variabilidad de los caracteres en relación con la precisión de la medida.
- Perdurabilidad durante la práctica para que las mediciones puedan ser repetibles si es necesario.

Cada grupo de alumnos dispondrá de 10 frutos escogidos al azar y de un pie de rey. En la tabla I, y en las columnas x , y , z , se anotarán los valores de los tres caracteres para cada fruto. Seguidamente se calcularán los valores para las restantes columnas de la tabla y los valores parciales del material estudiado por el grupo.

A partir de los resultados de cada grupo se elaborarán los resultados totales y se rellenan las tablas restantes (debe estudiarse un mínimo total de 200 frutos).

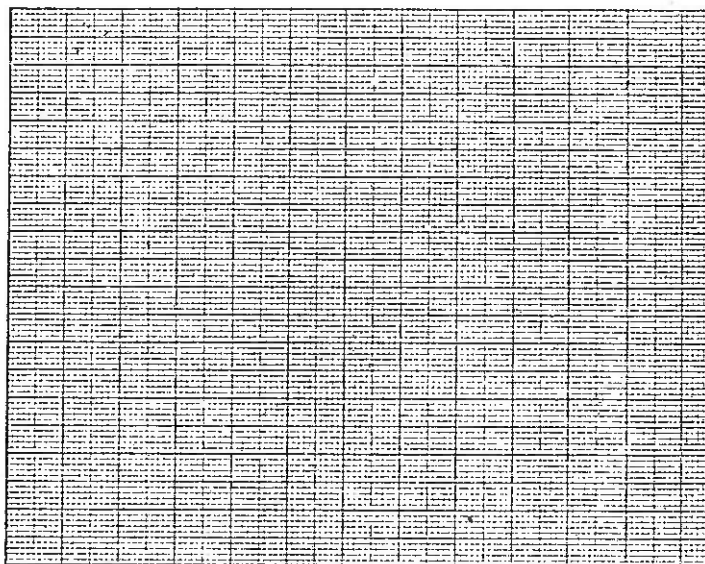
Con los datos obtenidos en las tablas se construirán los histogramas de frecuencias y las curvas correspondientes para los caracteres: longitud del fruto y número de semillas.

Se hallarán los siguientes parámetros: media, mediana, moda y desviación típica muestral para cada uno de los tres caracteres. Y las correlaciones (x , y), (y , z).

TABLA I. RESULTADOS GRUPO

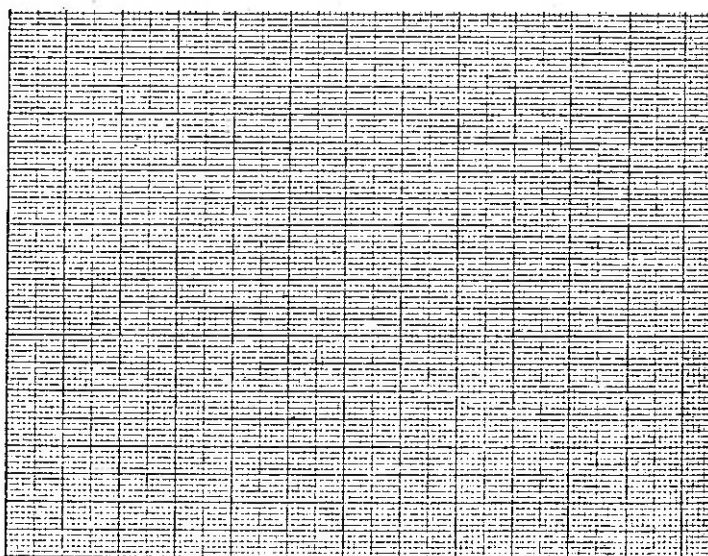
x_i	x_i^2	y_i	y_i^2	z_i	z_i^2	$x_i y_i$	$x_i z_i$	$x_i z_i^2$
$\Sigma x_i =$	$\Sigma x_i^2 =$	$\Sigma y_i =$	$\Sigma y_i^2 =$	$\Sigma z_i =$	$\Sigma z_i^2 =$	$\Sigma x_i y_i =$	$\Sigma x_i z_i =$	$\Sigma y_i z_i =$

Frecuencia relativa



Longitud

Frecuencia relativa



N.º de semillas

media:

$$\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

teniendo en cuenta las marcas de clase:

$$\bar{X}'_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r F_j c_j$$

mediana:

$$\frac{c_r - c_l}{2} + c_l$$

moda: marca C_j cuya clase presente mayor frecuencia.

desviación típica:

$$S_n = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - (\bar{X}_n)^2}$$

teniendo en cuenta la marca de clase:

$$S_n' = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^r F_j c_j^2 \right) - (\bar{X}'_n)^2}$$

PARAMETROS	longitud (x)	anchura (y)	nº de semillas (z)
media			
mediana			
moda			
desviación típica			

Correlaciones:

$$n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

r =

$$\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}$$

CORRELACIONES	r
(x,y)	
(x,z)	
(y,z)	

V. EL TRABAJO EXPERIMENTAL CON ANIMALES SUPERIORES

En vistas a la didáctica de la genética, existen, por un lado, tres especies «clásicas» para criar en el laboratorio y llevar a cabo cruzamientos entre distintas cepas de las mismas. Estas tres especies son de amplia difusión y conocidas prácticamente por todos los alumnos y estudiantes de biología. En nuestro país sin embargo, y por razones que no vienen al caso, solamente una de ellas: *Drosophila* (y, especialmente, *D. melanogaster*) goza de difusión general. Las otras dos son: *Tribolium* (en realidad se trata de dos especies muy próximas: *T. confusum* y *T. castaneum*) y el ratón (*Mus musculus*).

Por otro lado existe una variedad mucho mayor de organismos, más o menos fáciles de criar en el laboratorio, muchos de ellos comunes en el ámbito natural y que presentan algún polimorfismo genético y conocido que les hace muy adecuadas para ilustrar aspectos de la herencia de los caracteres. Empezaremos por estas últimas especies.

En realidad podríamos tratarlas también en el Capítulo VII puesto que también pueden utilizarse para ilustrar el polimorfismo propiamente, la selección natural y otras facetas de la genética de poblaciones. Por un lado hay que citar muchas variedades de peces de acuario (de los llamados peces tropicales o de agua caliente) que por haber sufrido un fuerte proceso de selección artificial con finalidad comercial presentan numerosas «razas» que difieren más habitualmente por el color y el dibujo. Estas «razas» son muy comunes (y pueden encontrarse en cualquier comercio especializado) en especies como los «gupys» (*Lebistes reticulatus*), los «platis» (*Xyphophorus maculatus*), los «xifus» (*Xiphophorus helleri*), las «molinesias» (*Mollienesia velifera*, y especies próximas), los «escalares» (*Pterophyllum scalare*) y bastantes más.

El cuidado que requieren estos organismos (una vez bien instalados en el acuario) es mínimo ya que se trata precisamente de las especies consideradas «mas fáciles» por los aficionados.

Por lo general, estas «razas» que difieren por el color con respecto al tipo «salvaje» o normal se distinguen de ellos por algún carácter mendeliano sencillo (un alelo mutante, segregación en un par de loci, etc.) de forma que en los cruzamientos se suelen dar progenies que ilustran los mecanismos básicos de la herencia. No obstante, puesto que tales «razas» son comerciales y están continuamente sujetas a manipulación es imposible catalogarlas para nuestros propósitos.

Debe ser señalado, no obstante, que (a una temperatura adecuada) pueden obtenerse en el transcurso de la duración de un curso académico bastantes resultados ya que de ordinario (en el caso de los poecílicos, especialmente) las hembras dan lugar a generaciones filiales aproximadamente cada mes, mientras que, por su parte, las crías alcanzan un desarrollo casi completo en unos seis meses o algo menos.

Los llamados peces de acuario son de utilidad; también, para ilustrar otras facetas. Así, por ejemplo, los citados poecílicos son *vivíparos*, cualidad que por lo anteriormente expuesto es fácil de observar (además de espectacular). También especies como *Xiphophorus helleri* son de utilidad por ilustrar perfectamente un caso de *hermafroditismo protergínico*. Es frecuente en esta especie que las hembras viejas (después de haber funcionado como tales y «parido» numerosas crías) se transformen —morfológicamente incluso— en machos. Se trata de un mecanismo de regulación del sexo en el que además de la regulación cromosómica influye un balance hormonal, de modo que cuando descende la tasa en sangre de hormonas femeninas el organismo desarrolla su potencialidad masculina. Precisamente, todas estas especies son buenos ejemplos de dimorfismo sexual (con caracteres sexuales secundarios notables: las colas de los gupys machos, la espada de los xifus macho, etc.).

Y también el comportamiento. Entre los peces de acuario que pueden encontrarse normalmente en una tienda del ramo algunas especies presentan un comportamiento tan rico en estereotipos que bien puede merecer una utilización docente. La descripción de estos comportamientos queda fuera del alcance de este capítulo; citemos, tan solo, la agresividad de los peces combatientes (*Betta splendens*), los cuidados maternales de las hembras de las «grandes» tilapias (*Tilapia mossambica*) dispensan a sus crías llevándolas en la boca, de la que salen para alimentarse y a donde vuelven apresuradamente al menor peligro. Precisamente a la familia de las tilapias, la de los Cíclidos, pertenecen también muchas otras especies de comportamientos espectaculares —generalmente relacionados con la cría—. Normalmente los cíclidos son «pendencieros» y su comportamiento en acuario no es excelente, aunque hay especies más pacíficas, como por ejemplo algunas de la familia de los anabánidos, y con comportamientos también muy ricos (p. ej. *Trichogaster trichopterus*).

Otros grupos bien distintos pueden ser también de utilidad para la didáctica de la genética, y más concretamente los insectos. Existen numerosísimas especies, muy corrientes, con algún tipo de polimorfismo, el cual en muchos casos es genético. Basta con que se trate de una especie relativamente fácil de criar y prolífica (esto último no suele ser ningún obstáculo) para que sea adecuada para nuestros propósitos. Como ejemplo tomaremos el de las mariposas. Entre ellas existen innumerables especies con polimorfismo que podrían ser de utilidad. Me limitaré a exponer dos ejemplos, de mariposas que son ubiquestas y oportunistas (esto último hace que se introduzcan por todas partes a favor de la degradación de los ambientes naturales, tanto que incluso son frecuentes en el ecosistema urbano).

La primera de ellas es la mariposa grande de la col: *Pieris brassicae*. Esta especie es tan corriente que se la puede ver incluso muy cerca del centro de las ciudades (y por tanto de los centros docentes allí ubicados). Esta mariposa suele visitar las coles (su planta nutricia en fase larvaria) de modo que si se plantan algunas de ellas en el huerto del centro —incluso con una finalidad distinta— no sean raras, al contrario, las visitas que suelen acabar con una puesta de huevos sobre nuestras coles. Huevos que constituirán el inicio de nuestra cepa. Estos huevos son amarillos, en forma de botella (alargados) y quedan depositados en el haz de las hojas, en pie y agrupados estrechamente en paquetes de 100-150. De todas maneras estos huevos pueden obtenerse también —si es preciso— de las firmas comerciales indicadas (y también de *Butterfly Farm Ltd.* en Bilsington, Ashford, Kent. Gran Bretaña; en donde es posible encontrar «de todo» en insectos vivos y para insectos vivos). La alimentación de las orugas de *Pieris brassicae* con hojas de col no constituye ningún problema pero, por si lo fuere, existe una dieta sintética que las substituye y que puede obtenerse juntamente con los huevos.

Desde un punto de vista genético hay que decir que algunas formas como por ejemplo *coerulea* o *albinensis* son producidas por alelos recesivos mientras que algunas razas geográficas (especies o subespecies) como por ejemplo la *cheiranthi* que habita en las Canarias difieren multifactorialmente. Desde el punto de vista didáctico, sin embargo, es el polimorfismo de las larvas el más adecuado. Se trata de una diferencia de color, existiendo dos tipos: color de fondo amarillo (ocasionado por un gen recesivo) y color de fondo gris-azulado (ocasionado por su alelo dominante), tal como se aprecia en la figura 29.

Es precisamente este polimorfismo el que se puede estudiar en el laboratorio. Para ello se partirá de los huevos recolectados (el polimorfismo es muy general y los huevos muy probablemente presentarán segregación para este carácter) o bien de alguna cepa comercial (es muy frecuente entre los suministradores la cepa Nuffield que es, precisamente, heterocigótica, para este carácter). Los pasos a seguir se ilustran en la figura 31.

Pieris brassicae ilustra además otros muchos aspectos de la biología de forma muy asequible. Por tanto, pueden aprovecharse las cepas para —por ejemplo— estudiar la influencia de la luz sobre la diapausa de forma experimental, a la influencia de la iluminación y del color del fondo sobre el color de

la envoltura pupal, o la influencia de la humedad en el desarrollo, etc., etc., y todo ello de forma muy sencilla (aunque escapa por completo a la finalidad del presente capítulo).



Figura 29. Oruga de la mariposa de la col (*Pieris brassicae*)



Figura 30 Orugas de *Pieris brassicae*. La tonalidad de fondo puede ser gris-azulada o amarilla. El color amarillo está regulado por un alelo recesivo frente al que produce color gris-azulado.

Por su parte *Colias crocea* (véase fotografía 32) es otra mariposa comunísima, de color azufre y orlada de negro, excepto en el caso de algunas hembras (las llamadas formas *pallida* y *helicina*) cuyo color de fondo es de un azul pálido. La diferencia es notable y, además, relativamente corriente. Las formas *pallida* y *helicina*, están producidas, en cada caso, por un gen recesivo que se manifiesta solamente en el sexo femenino (se trata de un carácter de *expresión limitada a un sexo*) de forma que los machos son todos amarillos mientras que las hembras son polimórficas. El estudio en el laboratorio podría hacerse criando la descendencia de una hembra *pallida* fecundada en el campo, o bien —lo que es más largo— estudiando la descendencia de un cruzamiento experimental. (*Colias crocea* se alimenta, en su fase de oruga de variedad de gramíneas).

Los organismos clásicos

Se incluyen aquí aquellas especies que por su facilidad de cría y manejo y por el conocimiento profundo de su genotipo constituyen un material de elección para la enseñanza experimental de la genética mediante animales superiores.

Estos organismos son, como se sabe: *Drosophila*, *Tribolium* y *Mus musculus*.

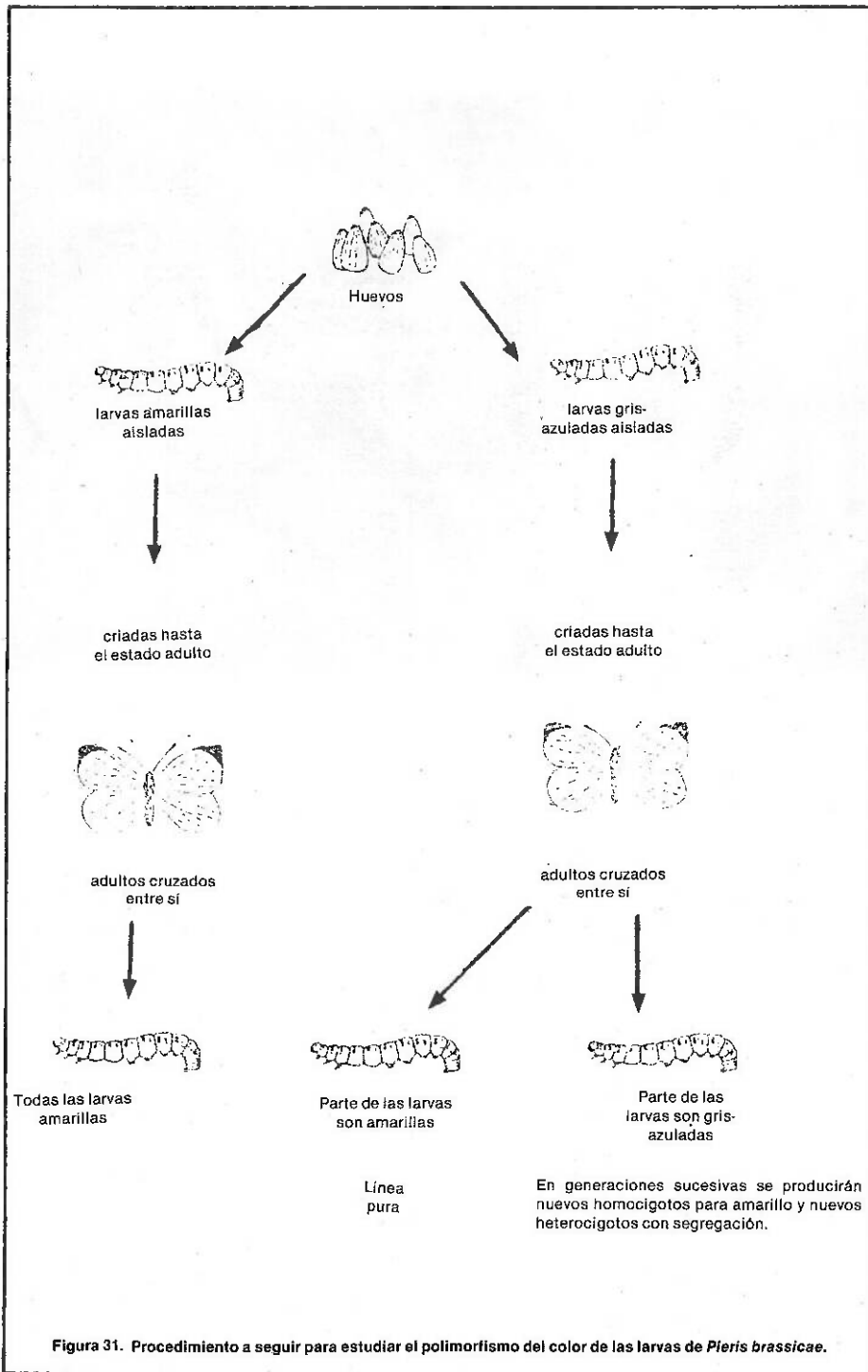




Figura 32. *Colias crocea*; a la izquierda macho; a la derecha hembras: arriba forma nominal y abajo forma *helice*.

DROSOPHILA

Se relaciona, a continuación, un modelo de cruzamientos (entre mutantes especialmente seleccionados) agrupados en dos niveles de dificultad: A (previo) y B (posterior):

Tipo A:

- A₁: *vestigial* x *ebony*
- A₂: *ebony* x *normal*
- A₃: *black* x *normal*
- A₄: *sepia* x *normal*
- A₅: *normal* x *Bar*
- A₆: *white* x *normal*

alternativos:

- eyeless* x *normal*
- normal* x *forked*
- normal* x *miniature*

Tipo B:

B₁: *cinnabar* y *vestigial* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

B₂: *vermillion* x *brown*

B₃: *white* x *white apricot*; y F₁ x *normal*

B₄: *normal* x *Curly*; y F₁ *Curly* x *Curly* (retrógrado)

B₅: *cut* y *miniature* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

B₆: *Bar* y *miniature* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

B₇: *Bar* x *ebony*

B₈: *yellow* x *brown*

B₉: *white* x *ebony*

alternativos:

ebony y *rough* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

crossveinless y *lozenge* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

cinnabar x *miniature*

normal x *Stubble*; y F₁ *Stubble* x *Stubble* (retrógrado)

black y *cinnabar* x *normal*; y ♀ F₁ x padres (retrógrado)

Entre los cruzamientos propuestos hay, como puede verse, una variedad de tipos (monohibridismos, dihibridismos, herencia ligada al sexo, etc., etc.) (para más detalles puede consultarse, entre otros, «CUELLO, J. y otros "Prácticas de Biología", Barcelona, 1978» que, en líneas generales, sigo aquí). En la figura 34 se representa el ciclo biológico *Drosophila*. En la 35 y en la 36 la anatomía de las fases larvaria y pupal, respectivamente. En la tabla 1 se describen los mutantes propuestos y en la tabla 2 puede verse su localización cromosómica, mientras que en la figura 37, finalmente, se contiene su localización anatómica.

En la presentación al alumno se incluirá, dentro del protocolo —además de una explicación acerca del organismo, mutantes y cruzamientos propuestos—, un esquema del cruzamiento (como el de la tabla para el cruzamiento A₁), una hoja de recogida de datos (como la de la tabla 3) y un cuadro para tabular los valores de X₂ (como el de la figura 4), juntamente con unas instrucciones de carácter general como las siguientes:

Procedimiento

Háganse los dos cruzamientos recíprocos (utilizando hembras vírgenes), *después de haber observado con detenimiento las características de la cepa normal, y las de las cepas mutantes*. En la medida de lo posible prepárense tres frascos por cruzamiento. Cuando deba obtenerse la F₂ (en todos los casos en que no se especifica lo contrario) deje que las hembras de la F₁ sean fecundadas por sus hermanos. Por el contrario cuando los individuos de la F₁ deban cruzarse con sus padres (*cruzamiento retrógrado*) o bien con individuos de otra cepa será preciso utilizar de nuevo hembras vírgenes.

Colóquense 2 o 3 hembras en cada frasco y varios machos; cuando observe que hay descendencia (larvas en la papilla) retire *todos* los progenitores. Si debe hacerse la F₂, tome algunas moscas, machos y hembras de la F₁ e intro-

dúzcalas en frascos nuevos. Para hacer los retrógrados (u otros cruzamientos) sepárense las hembras y los machos a medida que vayan naciendo.

No olvide tabular los fenotipos de los individuos utilizados como progenitores de la siguiente generación.

Por último, es preciso recordar que actualmente existen medios de cultivo sintéticos para *Drosophila* (p. ej. en Carolina Biological Ltd.) que por ser desecados pueden almacenarse casi indefinidamente y son de preparación muy rápida. Sus ventajas son obvias, y además del ahorro de tiempo que suponen suelen llevar emparejados en la práctica —para muchos profesores no necesariamente especialistas en *Drosophila*— una mejor defensa de los cultivos frente a los hongos. Por otra parte existen también reactivos para anestesiar a las drosófilas alternativos al éter, al que reemplazan ventajosamente en algunos aspectos.

Por lo demás el ciclo biológico de *Drosophila* y las técnicas rutinarias para su cultivo y utilización son las siguientes:

Ciclo biológico:

La drosófila es un insecto holometábolo que pasa en su desarrollo, a partir del huevo, por las fases de larva, pupa o crisálida y finalmente imago o insecto adulto. La duración total del ciclo así como de las distintas fases está estrechamente relacionada con la temperatura de cultivo; a 20° C la duración de la fase de huevo y larva conjuntamente es de 8 días; la de pupa de 6,3 días; a 25° C estas fases duran, respectivamente, 5 y 4,2 días. Lo que da unos totales, respectivamente, de 15 y 10 días desde la puesta del huevo hasta la emergencia del imago.

El huevo de *D. melanogaster* mide aproximadamente 0,5 mm de longitud, y de él emerge, alrededor de 24 horas después de la puesta, la larva, que en su crecimiento sufre dos mudas, de ahí que el período larvario, esté dividido en tres estadios. Las larvas del tercer estadio pueden alcanzar los 4,5 mm de longitud. La larva es extremadamente voraz y va alimentándose de la papilla de cultivo, por la que avanza excavando galerías con sus mandíbulas.

Las larvas maduras del tercer estadio suelen pupar, dentro de los frascos de cultivo, sobre un sustrato sólido y relativamente seco (las paredes del frasco, o sobre un pedazo de papel absorbente que se habrá introducido previamente); para ello salen de la papilla nutritiva y ascienden por el papel o las paredes del frasco. La metamorfosis tiene lugar dentro de la cubierta de la larva, que poco a poco va oscureciéndose y endureciéndose.

Cumplida aquella, el imago recién formado rompe la cubierta de la crisálida y emerge. Al principio el adulto es muy largo y despigmentado, y tiene las alas todavía plegadas. En el transcurso de unas pocas horas éstas se despliegan y el individuo toma un aspecto más robusto y pigmentado, propio de los adultos maduros.

Los adultos se aparean a las pocas horas de emerger, y las hembras retienen los espermatozoides en un receptáculo seminal; aquéllos van fecundando los óvulos a medida que éstos descienden por los conductos reproductores feme-

nicos. Una vez agotada la reserva de espermatozoides la hembra volverá a aparearse, pero no antes, generalmente. Las hembras inician la puesta de huevos dos días después de emerger (pudiendo llegar a 500 durante toda su vida adulta). Las drosófilas bien alimentadas conservan su capacidad reproductora durante toda su vida adulta, sin embargo la ovoposición desciende mucho a partir del 10° día aproximadamente. La duración de la vida adulta depende en buena medida de la disponibilidad de alimento, si ésta es adecuada los adultos pueden vivir fácilmente varias semanas (hasta 100 días en algunos casos).

Cultivo:

A ser posible es conveniente mantener los cultivos en cámaras termorreguladas, y provistas asimismo de un regulador de humedad. Las temperaturas de cultivo, oscilarán, según la velocidad de crecimiento deseada, entre 17° C y 25° C. Sin embargo, a condición de evitar temperaturas extremas, pueden cultivarse a temperatura ambiente.

Hay que tener en cuenta que la temperatura de cultivo influye sobre el tamaño del adulto (a mayor temperatura, menor tamaño).

Una exposición prolongada por encima de los 30° C causa esterilidad y la muerte de numerosos individuos; por debajo de los 10° C el ciclo biológico se entorpece de forma notable (a 10° C, p. ej., el desarrollo de la larva ocupa 57 días).

En frascos de cultivo (de vidrio y de tamaño diverso, según la cantidad de individuos que quieran obtenerse, siendo usuales los de 10 cm de altura por 5 de diámetro) se coloca una papilla nutritiva que se espolvorea con levadura de panificación; y a la que se añade un trozo de papel plegado y ligeramente absorbente para facilitar la pupación.

Las cantidades para un volumen de papilla suficiente para 100 frascos son:

- a) En 2300 cc de agua añadir 40 g de agar-agar y 6 cucharadas de azúcar.
- b) Poner al fuego hasta ebullición, evitando la formación de grumos.
- c) Cuando empiece a hervir añadir 520 g de harina de maíz disueltos en 1100 cc de agua.
- d) Mantener en ebullición, removiendo, durante unos 15 minutos.
- e) Retirar del fuego y añadir 6 gramos de nipagín disueltos en 60 cc de alcohol etílico, removiendo la mezcla.

En caliente, antes de que cuaje la mezcla, verter en los frascos, de modo que queden 1 o 2 cm de papilla sobre el fondo. Si los frascos no van a utilizarse de inmediato pueden conservarse durante unos pocos días en el frigorífico. En el momento de su utilización secar las paredes interiores del frasco con papel de filtro; espolvorear con levadura y añadir el papel en zig-zag.

Identificación de los sexos

En todos los estadios del desarrollo es posible reconocer los sexos; sin embargo, si no se está muy habituado a ello es aconsejable hacerlo en el estadio

adulto, en el cual el reconocimiento es más fácil. En este caso es posible hacerlo a simple vista; no obstante, es conveniente comprobar siempre al binocular.

Fase larvaria

Los testículos de los machos son mucho mayores que los ovarios de las hembras; al binocular, por transparencia, es fácil apreciar esta diferencia en el tercer estadio larvario.

Fase de pupa

Por transparencia, a través de la cubierta de la pupa puede verse la presencia de los *peines sexuales* (en los machos solamente), uno en cada primer artejo del tarso del primer par de patas. Deben utilizarse para el diagnóstico pupas maduras (pigmentadas) observadas por su cara ventral.

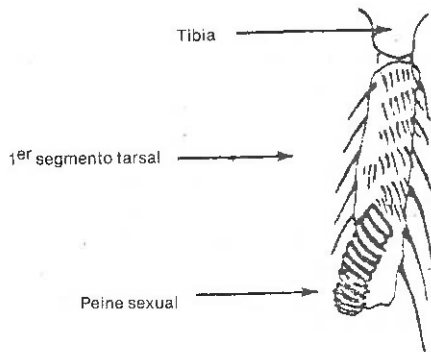


Figura 33. Morfología externa del primer segmento tarsal de un macho de *D. melanogaster*.

Fase de imago

Las diferencias entre machos y hembras adultos son varias, entre ellas: La *pigmentación* de la parte distal del abdomen (cara dorsal) es continua —una mancha oscura que se extiende sobre los últimos segmentos abdominales en el macho, y discontinua en la hembra— formada por anillos oscuros que alternan con bandas claras.

Por la *forma* y el *tamaño*; el extremo es más romo en el macho y más puntiagudo en la hembra; éstas son algo mayores que los machos.

La presencia de *peines sexuales* en los machos (véase identificación en la fase de pupa).

Genitalia: En el extremo distal de la cara ventral del abdomen, además de la placa anal existe en las hembras una sola plaquita vaginal de color claro, mientras que en el macho se presenta una estructura de color pardo el «arco genital».

Cruzamientos experimentales

A temperaturas normales de cultivo las hembras alcanzan la capacidad copuladora 6 u 8 horas después de emerger. Debido a la presencia en ellas de receptáculo seminal (véase "Ciclo biológico de *D. melanogaster*") la posibilidad de realizar cruzamientos experimentales queda reducida a la utilización de hembras que no hayan efectuado ninguna cópula (hembras vírgenes). Estas hembras son las que acaban de emerger, o bien las mantenidas, desde, por lo menos, su emergencia, en cultivos sin machos.

Para obtenerlas pueden separarse larvas o pupas de sexo femenino y cultivarlas en frascos aparte o bien, lo que resulta más cómodo, utilizar uno de los dos procedimientos siguientes:

a) Cuando se observe que las pupas están a punto de eclosionar, retírense *todas* las moscas del frasco. Repítase la operación al cabo de 6 u 8 horas. Todas las moscas procedentes de esta segunda recolección son vírgenes —y deben separarse inmediatamente los machos de las hembras— pues tienen 8 horas o menos de vida; este método no es muy seguro pues en la segunda recolección pueden encontrarse algunos individuos que hayan pasado desapercibidos en la primera.

b) Las moscas recién emergidas son fáciles de reconocer (por los caracteres que se indicaban en l. ciclo biológico de *D. melanogaster*); pueden separarse de entre éstas las hembras; si no se tiene demasiada práctica compruébese siempre la presencia o ausencia de peines sexuales, que es el carácter de más fácil y segura identificación. Repítase la operación a intervalos de algunas horas. Hay que tener presente que las hembras suelen completar antes su ciclo biológico por lo cual, en las primeras horas o días de nacimiento de una generación, son más abundantes que los machos, situación que se va invirtiendo poco a poco.

Siempre que se utilice el método a) o el b) es conveniente mantener los cultivos en lugares no demasiado caldeados (17° C mejor que 25° C) pues el margen de seguridad es mayor.

Obtención de cepas. En muchos Departamentos de Genética de distintas universidades se trabaja con *Drosophila*; en ellos se mantienen numerosas cepas (que se diferencian por los mutantes de que son portadoras) algunas de ellas desde hace decenas de años. Pueden obtenerse de estos Departamentos muestras de las cepas que se vayan a utilizar en los experimentos que se describen a continuación. En *Drosophila Information Service*, una revista mensual editada por el Departamento de Biología de la Universidad de Oregón (Eugene, Oregón 97.403 USA) aparecen periódicamente directorios de los centros de investigación en *Drosophila* de todo el mundo, con especificación de las cepas que cada uno mantiene.

Los experimentos que se describen más adelante están diseñados teniendo en cuenta la utilización de caracteres mutantes fáciles de reconocer, y su posición cromosómica. Sin embargo si resulta difícil obtener algún mutante, quien le suministre las drosófilas puede aconsejarle sobre su sustitución.

¡Existen miles de mutantes identificados y localizados en *D. melanogaster*! Sobre la descripción y localización de los mutantes de esta especie puede consultarse la obra de D. L. LINDSLEY y E. H. GRELL *Genetic variation in D. melanogaster*, publicación n.º 607 de la Carnegie Institution of Washington, USA.

Una vez comprobado que existe descendencia —por la presencia de larvas en la papilla— retire los padres del frasco de cultivo para impedir que se crucen con la descendencia y para no confundirlos con ella.

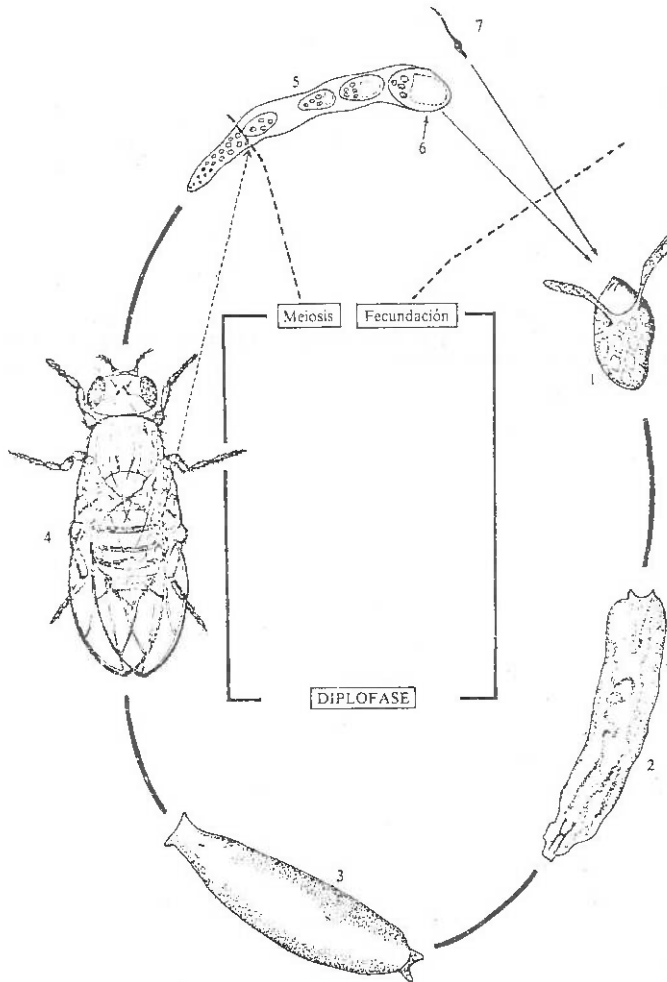


Figura 34. Ciclo biológico de *Drosophila melanogaster*. 1. huevo; 2. larva; 3. pupa; 4. mosca adulta (); 5. un tubo ovárico, donde tiene lugar la meiosis (al igual que en las gónadas masculinas, que aquí no están representadas); 6. óvulo rodeado de células nutricias; y 7. espermatozoide.

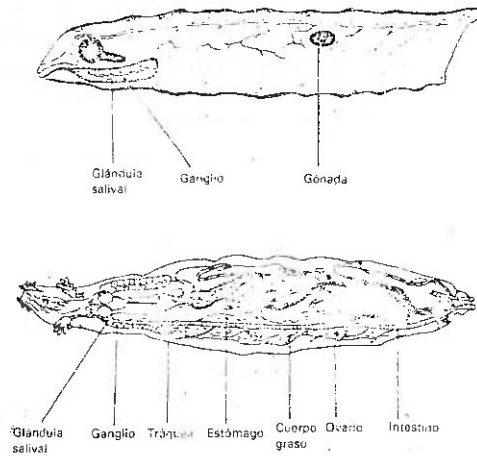


Figura 35. Anatomía interna (abajo) de una larva del 3er estadio de *D. melanogaster*, y (arriba) posición relativa (en visión lateral) de las glándulas salivales, ganglio y gónada.

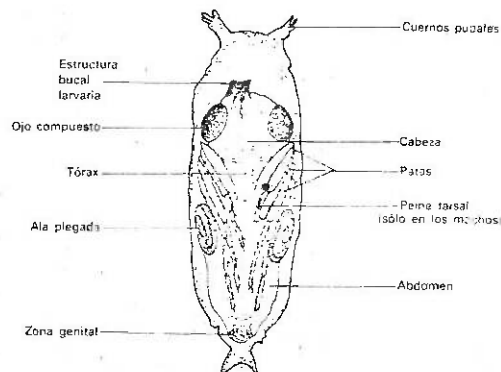


Figura 36. Anatomía interna de una pupa de *Drosophila melanogaster*.

<i>Bar (B)</i>	Los ojos están reducidos en los machos y en las hembras homocigóticas, a una barra vertical. Las hembras heterocigóticas son intermedias.
<i>black (b)</i>	Cuerpo, tarsos y venas alares de color oscuro, casi negro.
<i>brown (bw)</i>	Ojos de color más oscuro que el normal, de color vino en las moscas jóvenes, y púrpura en las de más edad. En combinación con <i>cn</i> y <i>v</i> , produce interacción y da fenotipo de ojos color blanco.
<i>cinnabar (cn)</i>	Ojos de color rojo vivo. Interacciona con <i>bw</i> .
<i>crossveinless (cv)</i>	Venas transversales (anterior y posterior) ausentes, o muy reducidas.
<i>cut (ct)</i>	Alas acabadas en punta; vena marginal ondulada; ojos más pequeños y arriñonados.
<i>Curly (Cy)</i>	Alas curvadas hacia arriba. En homocigosis es letal. Es una mutación asociada a una inversión del brazo izquierdo del cromosoma II.
<i>ebony (e)</i>	Cuerpo de color oscuro, ébano; progresivamente más pigmentado con la edad.
<i>eyeless (ey)</i>	Ojos de tamaño reducido; variando desde ausencia absoluta hasta tamaños próximos al normal, pero normalmente de tamaño mitad del normal.
<i>forked (f)</i>	Quetas cortas, truncadas, bifurcadas, y/o deformadas.
<i>lozenge (lz)</i>	Ojos de forma estrecha, con áreas oscuras, brillantes y rugosas sobre un fondo de color rojo normal. <i>Parte de las hembras son estériles.</i>
<i>miniature (m)</i>	Alas pequeñas, rebasando apenas el abdomen; superficie de color gris, más opaco que en el fenotipo normal.
<i>rough (ro)</i>	Ojos de aspecto rugoso y más reducidos que en el fenotipo normal.
<i>sepia (se)</i>	Ojos color sepia.
<i>Stubble (Sb)</i>	Quetas en forma de maza y de tamaño menor al normal. En homocigosis es letal.
<i>vermillion (v)</i>	Ojos color bermellón. Interacciona con <i>bw</i> .
<i>vestigial (vg)</i>	Alas (y balancines) muy reducidos.
<i>white (w)</i>	Ojos color blanco. Existen otros alelos de estos locus, como p. ej. <i>white apricot (w^a)</i> , que produce ojos de color amarillo y <i>white eosin (w^e)</i> , ojos rosados, etc.
<i>yellow (y)</i>	Cuerpo, quetas y venas alares de color amarillo.

TABLA 1. Descripción de los mutantes de *Drosophila melanogaster* propuestos en los ejercicios citados en la página 85/86.

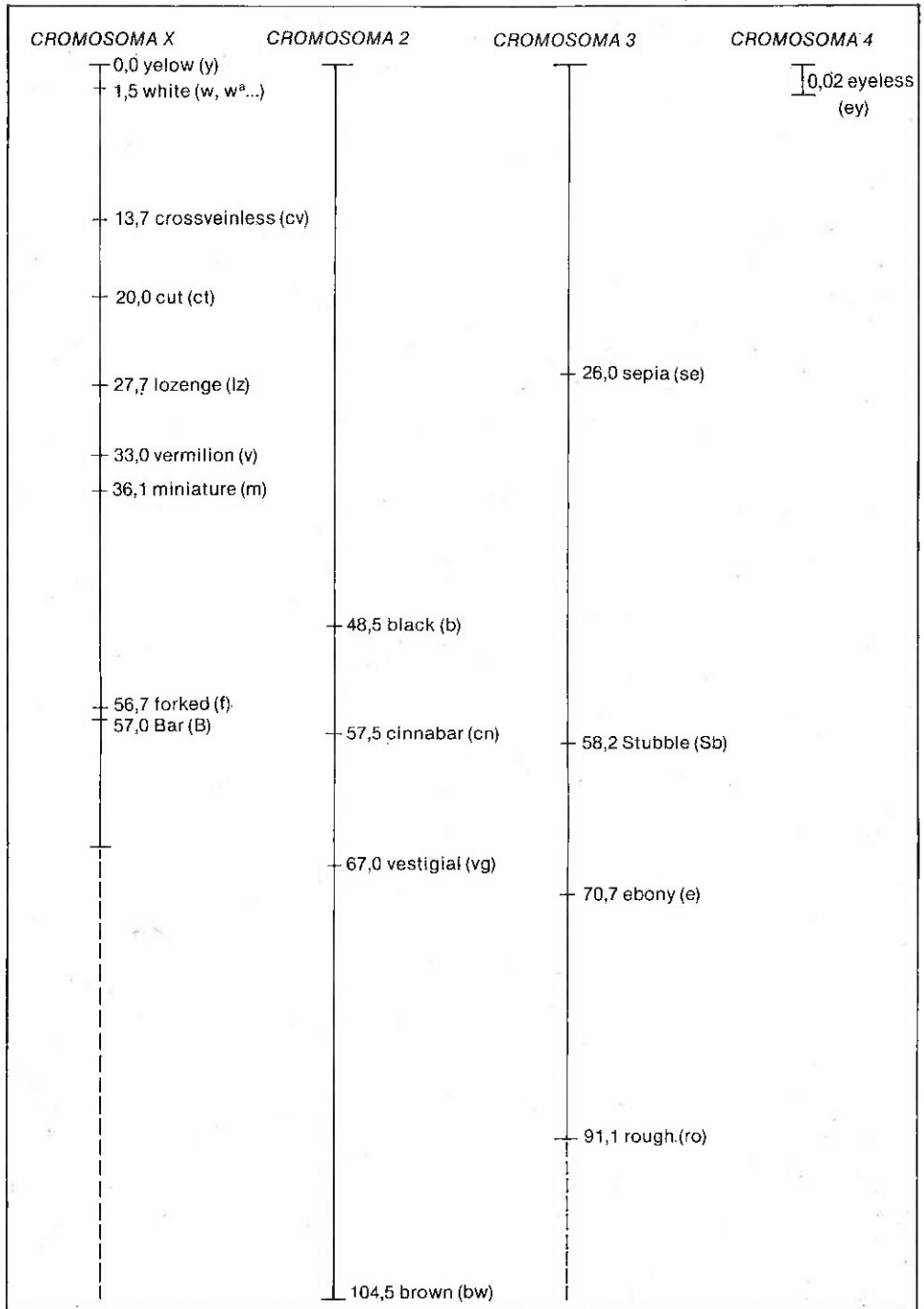


TABLA 2 LOCALIZACION CROMOSOMICA DE LOS MUTANTES DE *DROSOPHILA MELANOGASTER* DESCRITOS EN LA TABLA 1.

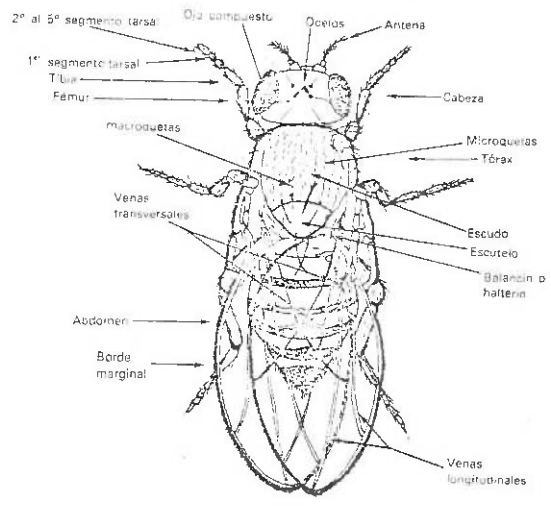


Figura 37. Morfología externa de una hembra de *D. melanogaster* y localización anatómica de los mutantes de la tabla 1.

Cruzamiento A₁ :

vestigial x ebony

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{vg } e^+ & \\
 \text{P } \text{♀} & \frac{\text{vg } e^+}{\text{vg } e^+} & \times \text{♂ } \frac{\text{vg}^+ e}{\text{vg}^+ e} \\
 & \downarrow & \\
 \text{F}_1 & \frac{\text{vg}}{\text{vg}^+} & \frac{e^+}{e}
 \end{array}$$

Cuadro gamético de los individuos de la F₁:

♀ \ ♂	25% vg e	25% vg e ⁺	25% vg ⁺ e	25% vg ⁺ e ⁺
25% vg e				
25% vg e ⁺				
25% vg ⁺ e				
25% vg ⁺ e ⁺				

(recíproco idéntico)

Tabla 00. Modelo de esquema de cruzamiento (en este caso del cruzamiento A₁) para el protocolo del alumno.

CRUZAMIENTO: ♀ (FENOTIPO GENOTIPO) x ♂ (FENOTIPO GENOTIPO) FECHA:												
F ₁	FENOTIPO 1 descripción:		FENOTIPO 2 descripción:		FENOTIPO 3 descripción:		FENOTIPO 4 descripción:		TOTALES			
	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♂ ♀	
INDIVIDUOS OBSERVADOS												
1.er Recuento, fecha:												
2.º Recuento, fecha:												
3.er Recuento, fecha:												
4.º Recuento, fecha:												
5.º Recuento, fecha:												
6.º Recuento, fecha:												
TOTALES (por sexos)												
TOTALES												
F ₁ ó...	FENOTIPO 1 descripción:		FENOTIPO 2 descripción:		FENOTIPO 3 descripción:		FENOTIPO 4 descripción:		TOTALES			
	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♀ ♀	♂ ♂	♂ ♀	
INDIVIDUOS OBSERVADOS												
1.er Recuento, fecha:												
2.º Recuento, fecha:												
3.er Recuento, fecha:												
4.º Recuento, fecha:												
5.º Recuento, fecha:												
6.º Recuento, fecha:												
TOTALES (por sexos)												
TOTALES												

TABLA 3. MODELO PARA EL PROTOCOLO DEL ALUMNO I DE CUADRO DE RECOGIDA DE DATOS DE LOS CRUZAMIENTOS EXPERIMENTALES CON *DROSOPHILA MELANOGASTER*.

FENOTIPOS: CLASES	Número de individuos observados O_i	Número de individuos esperados E_i	Desviación $(O_i - E_i)$	$(O_i - E_i)^2$	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
FENOTIPO 1: descripción:					
FENOTIPO 2: descripción:					
FENOTIPO 3: descripción:					
FENOTIPO 4: descripción:					
GRADOS DE LIBERTAD:			TOTAL	$X^2 =$	
			P		

TABLA 4. Modelo de cuadro de tabulación de los datos en los cruzamientos experimentales con *Drosophila melanogaster* (para el protocolo del alumno).

TRIBOLIUM

A pesar de pertenecer al mismo grupo taxonómico que *Drosophila* el gusano (o escarabajo) de la harina —*Tribolium*— presenta diferencias de cultivo, de comportamiento y de biología, etc., etc., que lo hacen bien distinto desde un punto de vista de su utilización didáctica de la genética.

De entrada hay que señalar que tal utilización es posible y conveniente porque es una especie que —aunque lejos de alcanzar la profundidad lograda en *Drosophila*— es de genotipo relativamente bien conocido.

El hecho de que no esté muy difundido su uso en nuestro país y sí en cambio en otros como Inglaterra, Estados Unidos, Alemania, etc., cabe achacarlo simplemente a las deficiencias en la información recibida por nuestros profesionales y en el sistema de apoyo a su labor.

El género *Tribolium* comprende algunas especies prácticamente cosmopolitas actualmente en su distribución que vulgarmente reciben el calificativo (que induce a confusión) de gusano de la harina por alimentarse y crecer en este medio y por convertirse muchas veces en plagas de este producto y, en general, de los cereales y semillas oleaginosas almacenados. De acuerdo con ello presenta una fototaxia negativa y preferencias por una temperatura no muy baja y una cierta humedad. El tamaño general (longitud total) es de 2,3-4,4 mm y el color pardo-rojizo, en las dos principales especies: *Tribolium confusum* y la más estudiada (y algo más termófila) *Tribolium castaneum*.

En la figura 38 pueden apreciarse la morfología general del género y las principales diferencias entre ambas especies, que son: presencia, en *T. castaneum*, y ausencia, en *T. confusum*, de un reborde o visera por encima de los ojos; antenas con los últimos 3 segmentos mazudos en *T. castaneum* y más uniformes en *T. confusum* y la separación de los ojos más pronunciados en *T. confusum*.

DIFERENCIACIÓN DE LOS SEXOS

Las diferencias sexuales son muy marcadas en el estadio de pupa y más sutiles en el adulto (tanto que si bien —al contrario de lo que a veces se escribe— son reconocibles, todos los manuales las omiten y recomiendan —como se hace aquí— la diferenciación y separación sexual en la fase de pupa):

En el estado de pupa la diferencia sexual estriba en la distinta morfología que presentan los cercos terminales del abdomen, presentando en su base —en la hembra— otro par más pequeño, par que está ausente en el macho y en el que una pequeña depresión ocupa su lugar. Esta diferencia puede apreciarse en la figura 39.

Ciclo biológico

Es el típico de un coleóptero, es decir con holometabolía (como en *Drosophila*, por otra parte). Fundamentalmente está influido —en su duración— por la temperatura y la humedad tal como puede apreciarse en las siguientes tablas:

Tribolium castaneum

Temperatura °C	Fase de huevo (incubación)	Período larvario			Fase de pupa	Total a 70% H.R.
		Humedad relativa 30%	70%	90%		
17.5	30.4	—	—	—	—	
20.0	16.9	98.3	79.4	81.6	21.6	117.9
22.5	11.5	57.3	43.0	36.2	14.0	68.5
25.0	7.7	35.6	28.9	27.7	10.3	46.9
27.5	5.6	31.0	22.7	21.0	7.7	36.0
30.0	4.9	25.1	18.0	17.8	6.1	29.0
35.0	3.9	23.9	17.9	—	5.0	26.8

Tribolium confusum

Temperatura °C	Fase de huevo (incubación)	Período larvario			Fase de pupa	Total a 70% H.R.
		30%	70%	90%		
17.5	—	—	—	—	—	
20.0	13.9	—	109.3	—	24.4	147.6
22.5	9.3	74.0	51.0	44.9	13.4	73.7
25.0	6.8	39.9	31.2	25.0	10.2	48.2
27.0	4.7	32.0	24.3	21.0	7.5	36.5
30.0	3.6	34.8	17.2	15.3	5.5	26.3
35.0	2.7	19.7	12.9	12.0	4.5	20.1
40.0	2.7	—	23.6	—	4.4	30.7

TABLA 5. Tiempo de desarrollo (días) de *Tribolium* en función de la temperatura y de la humedad relativa (según Howe, 1960).

(en estas tablas los tiempos están calculados en base a un medio de cultivo constituido —fundamentalmente— por harina de trigo que es el básico. Sin embargo los medios de cultivo pueden ser muy variados y de hecho, implicar otros tiempos muy distintos).

Las hembras adultas son capaces de empezar a poner huevos a los 10 días de haber alcanzado esta última fase, y, como en el caso de *Drosophila*, los óvulos van siendo fecundados a medida que van madurando por los espermatozoides retenidos en el receptáculo seminal, de ahí que —como en aquella especie— conviene partir de hembras vírgenes. El número de huevos puestos por día es de hasta un máximo de 20-30 diarios (con unas cifras más standard del orden de 5-10/día), durante unos 100 días, por término medio. La media de huevos puestos por hembra es del orden de 360 huevos (con un margen de 195-570). La transferencia a un medio fresco incrementa la puesta.

El uso de Tribolium en el laboratorio. Ventajas e inconvenientes

De un modo esquemático podemos decir que las principales VENTAJAS, son:

1. Una longevidad elevada, de 6 a 9 meses, en condiciones óptimas de temperatura y humedad (y dieta adecuada).
2. Esta dieta o *medio de cultivo* es *muy simple*, y puede consistir en: harina de trigo, con un 5 % de levadura de cerveza seca (p. ej: «Cervesina» de productos Verkos, «Vigor» de productos Santiveri o levadura «Sorribas» de igual marca) de venta en farmacias. La única manipulación que debe sufrir este medio es una esterilización para evitar contaminaciones. Esterilización que no debe tostar el medio; lo más adecuado son algunas horas (6-8) a 70-80°.
3. Las diferencias sexuales pueden establecerse en una fase inmóvil del ciclo biológico, lo que facilita la separación de los sexos (la manipulación se hace más sencilla, no es preciso anestesjar, etc., etc.).
4. Los cultivos requieren un mínimo de cuidados. De forma que cuando no se utilizan las cepas pueden quedar (a unos 20-25°) durante 4-6 meses sin cuidado alguno, sin necesidad tampoco de reemplazar el medio de cultivo. Los períodos de vacaciones escolares no son así (como contrariamente sucede en el caso de, p. ej. *Drosophila*) ningún obstáculo para mantener los cultivos de un año para otro.
5. Todas las fases del ciclo biológico pueden observarse a la vez y son muy fácilmente separables del medio de cultivo. Basta para ello la utilización de cedazos (aprox. de 1 mm) que retienen los animales y elimina el medio de cultivo. Un pincel ligeramente humedecido permite manipular sin peligro a los animales.
6. La gama de condiciones de cultivo es muy amplia. Casi cualquier temperatura y casi cualquier humedad permiten que el ciclo biológico no se detenga. No es absolutamente preciso disponer de cámaras de cultivo, y todas las condiciones locales —o casi todas— son apropiadas (no obstante, el óptimo estriba en unos 30° C y una humedad del orden del 70 %).

7. Las pupas no están encerradas en una envuelta quitinosa, por lo que pueden utilizarse también las diferencias de morfología en este estadio en los estudios.
8. Cualquier tipo de frasco (p. ej. los convencionales botes de cierre hermético en la industria alimentaria) sirve para guardar los cultivos sin necesidad de mayores gastos.
9. El hecho de que puedan mantenerse los cultivos indefinidamente en el laboratorio y lo expuesto en el punto 5. hacen que sea un material de elección para en cualquier momento, ilustrar otros aspectos como p. ej. un ciclo biológico, etc.
10. Idem como presa viva, para alimentar animales insectívoros que puedan tenerse en el laboratorio.
11. Los adultos no vuelan a temperaturas ordinarias (si lo hacen, y mucho, las drosófilas, por ejemplo).

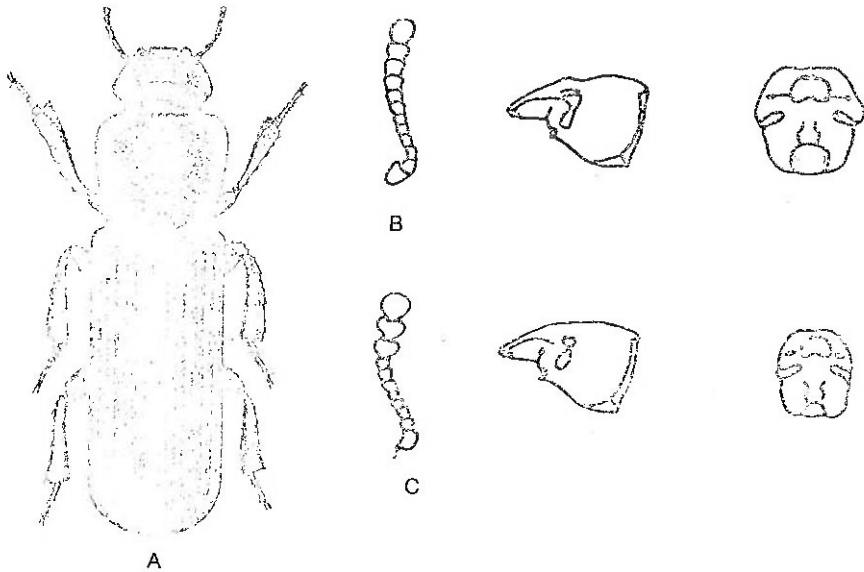


Figura 38. Morfología externa de *Tribolium* (A) y principales diferencias entre *Tribolium castaneum* y *Tribolium confusum*. B: antena, visión lateral y visión ventral, respectivamente de *T. confusum*. C: antena, visión lateral y visión ventral, respectivamente de *T. castaneum*. (véase texto)

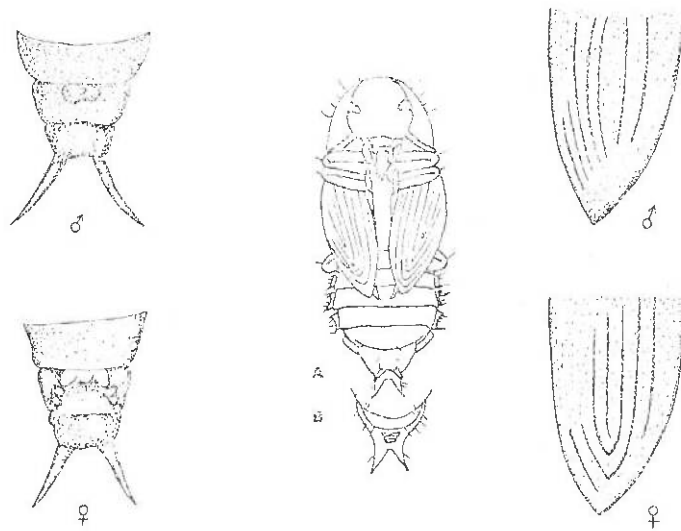


Figura 39. Dimorfismo sexual de *Tribolium*. En el centro visión ventral de la pupa (hembra) de *Tribolium castaneum* (A) y porción terminal del abdomen del macho (B). A la izquierda se presenta ampliada esta misma zona: arriba de un macho y abajo de una hembra: (similar en todo en el caso de *T. confusum*). Los adultos también presentan dimorfismo, aunque la identificación de los sexos es problemática para toda persona no muy familiarizada en el manejo de estos organismos. En todo caso el mejor carácter para el diagnóstico es el dibujo de la parte distal de los élitros: derecha arriba, de macho, y derecha abajo, de hembra, en el caso de *Tribolium confusum*.

Por su parte, las principales DESVENTAJAS —relativas— son:

1. La mayor parte de las diferencias morfológicas implicadas en un cruce requieren para su examen y diagnóstico un reconocimiento bajo aumento (uso del microscopio estereoscópico) y un cierto grado mínimo de cuidado, paciencia y experiencia (en general, la situación, en este aspecto es la misma que para *Drosófila*) que no lo hacen muy adecuado para escolares sin una familiaridad con las técnicas más comunes de laboratorio.
2. Los estadios móviles de *Tribolium* tienden al canibalismo; especialmente en los cultivos viejos y excesivamente «poblados» (puede llegar a ser un inconveniente si se olvida su cuidado, durante mucho tiempo).
3. Incluso en condiciones óptimas (30° y 70 % de humedad) el tiempo de generación es de —aproximadamente— un mes; por tanto, un cruce experimental completo con obtención de una F₂ requiere un tiempo considerable (en este punto *Drosophila* es claramente más adecuada).
4. La separación de sexos en adultos es difícil, excepto para personas experimentadas (debe evitarse la utilización de esta especie para la comprobación de modelos de herencia ligada al sexo de manifestación en el adulto; no, por ejemplo, en pupa).
5. *Tribolium* segrega quinonas, que juntamente con otros desechos metabólicos se acumulan en los medios de cultivos viejos, haciéndolos gomosos. Estas quinonas pueden constituir una trampa —por su viscosidad— para los adultos, o si están muy concentradas pueden llegar a producir anomalías en las fases juveniles.
6. Los cromosomas son relativamente pequeños y no permiten estudios complementarios de citogenética.

Manejo y utilización

El medio de cultivo ha quedado descrito anteriormente. También se ha dicho que para separar los *Tribolium* de la harina se utilizan cedazos (aprox. de 1 mm); los *Tribolium* se colocarán sobre un papel o cartulina blanca (u de otro color que los contraste bien) y con un pincel humedecido se transfieren a la platina de un estereomicroscopio (unos 10 x son generalmente suficientes) donde se realizan las observaciones. Los adultos, por su movilidad, deben ser anestesiados (se puede proceder de igual forma que para las *Drosófilas*).

Otras condiciones generales de cultivo o en la preparación de cruzamientos son similares a las exigidas por el trabajo con *Drosófila* (utilización de hembras vírgenes, retirada de los padres del cultivo una vez comprobada la presencia de descendencia, etc., etc.). Recuérdese no obstante que los huevos quedan mezclados con la harina y que por tanto hay que devolver siempre ésta al medio de cultivo de donde procede).

Cepas y mutantes adecuados en Tribolium confusum

Tribolium confusum presenta nueve grupos de ligamiento y en cada uno de ellos se conocen diversos mutantes, sin embargo para una utilización didáctica solamente tres son adecuados: *pearl* y *ebony* del grupo de ligamiento II y *black* del grupo III.

pearl: (ojos perla), mientras que en el tipo silvestre el ojo es negro, el autosómico recesivo *pearl* bloquea la síntesis de pigmento produciendo ojos pálidos con reborde («antifaz»).

p

ebony: (cuerpo negro brillante), autosómico recesivo que causa que el color del cuerpo sea el indicado en lugar del pardo-rojizo del tipo silvestre. Se encuentra localizado a 2,5 unidades de *pearl*.

e₂

black: (cuerpo negro mate) prácticamente el mismo fenotipo que *ebony*, aunque no es un alelo suyo. Es autosómico semidominante.

b

Cepas y mutantes adecuados en Tribolium castaneum

Esta especie presenta diez grupos de ligamiento y una variedad de mutantes adecuados para nuestros propósitos mayor: *paddle* y *red* del grupo I (cromosoma X); *pearl* del grupo II, *black* del grupo III, *sooty* del IV, *jet* y *microcephalic* del V.

grupo I (cromosoma X)

paddle: (antena en maza), recesivo ligado al sexo de penetrancia total pero de expresión variable. En los machos los tres segmentos terminales de las antenas están profundamente fusionados en una maza, mientras que las hembras presentan la fusión localizada tan solo en el segmento 9-10 o en los 10-11, en una o en ambas antenas.

pd

red: recesivo ligado al sexo con penetración total. Ojo de color rojo burdeos.

r

grupo II

pearl: (ojo perla) autosómico recesivo con fenotipo idéntico al descrito en el caso de *T. confusum*.

p

grupo III

black: (cuerpo negro). Autosómico semi-dominante. El heterocigoto presenta un color intermedio llamado *bronze*.

b

grupo IV

sooty: (color oscuro) autosómico recesivo que produce un color del cuerpo parecido al *bronze*.

grupo V

jet: (color oscuro); otro autosómico recesivo que produce color del cuerpo más oscuro. Más que *sooty* y menos que *black*.

microcephalic: (microcefalia), autosómico de penetrancia completa que causa una reducción del tamaño de la cabeza, y también por tanto del tamaño de los ojos.

Cruzamientos experimentales

De acuerdo con los mutantes descritos (existen aún otros distintos adecuados) los cruzamientos más adecuados son:

Tribolium castaneum:

monohibridismos y dihibridismos:

silvestre x *pearl* (3 : 1)

silvestre x *sooty* (3 : 1)

pearl x *sooty* (9 : 3 : 3 : 1)

pearl x *black* (9 : 3 : 3 : 1)

ligamiento:

jet x *microcephalic*

herencia ligada al sexo (?):

tipo silvestre x *red*

Tribolium confusum:

silvestre x *pearl* (3 : 1)

silvestre x *black* (1 : 2 : 1)

monohibridismos:

dihibridismos (modificado por herencia intermedia):

pearl x *black* (3 + 6 = 9 : 2 + 1 = 3 : 3 : 1)

ligamiento:

ebony x *pearl*

Por lo demás los detalles de procedimiento no especificados aquí, la recogida de datos, los protocolos para el alumno, etc., son análogos a los indicados para *Drosophila*.

(NOTA: Todas las cepas indicadas pueden obtenerse, juntamente con algunos detalles o información adicional referente a su utilización o conservación, en comercios como Philip Harris Biological Ltd. o Griffin and Co. y, también, y generalmente de modo gratuito, de aquellos laboratorios de investigación en donde son utilizadas.

RATÓN (*MUS MUSCULUS*)

La utilización de cruzamientos experimentales (con cepas convenientemente seleccionadas) de ratones para la didáctica de la genética presenta numerosas ventajas. De hecho su popularización en los cursos de biología básicos de la enseñanza media y media-superior (O-level y A-level) fue debida —recientemente— al proyecto Nuffield (juntamente con la labor del profesor Wallace, de la Universidad de Cambridge, autor de «Learning Genetics with Mice»).

Las ventajas de utilizar este tipo de animales en el laboratorio son obvias (y no solo para la didáctica de la disciplina genética sino de otras) y entre ellas —y no las menos importantes— tenemos la inmediatez de los resultados y el paralelismo de muchas situaciones con las que se dan en mamíferos superiores (hombre incluido). Además, por el hecho de ser el ratón un animal de experimentación en muchos campos de investigación que trascienden el de la propia biología su cría está extraordinariamente estandarizada y resulta muy fácil y, relativamente, poco onerosa. En muchos comercios de animales domésticos es posible encontrar desde las jaulas especiales, pasando por la vermiculita absorbente, las botellas de agua, productos higiénicos y desinfectantes hasta la dieta sintética perfectamente compensada. En este aspecto la cría, como puede suceder en algún otro organismo, no distrae ningún esfuerzo adicional.

En *Mus musculus* se conocen numerosos mutantes, cepas mutantes que presentan peculiaridades morfológicas (y/o fisiológicas) de origen genético.

Sin embargo, solamente algunas de ellas son adecuadas para la didáctica de la genética: las que mantienen un vigor y una fecundidad elevadas, relativamente semejantes a las del tipo salvaje; muchas de las restantes cepas no son adecuadas para nuestros propósitos bien porque sus individuos fracasan a veces, a título individual, como progenitores, bien porque pese a tener descendencia esta es tan escasa que es estadísticamente no significativa. Entre las cepas que reúnen aquellas condiciones citadas al comienzo del párrafo algunas son excelentes para la enseñanza de la genética, pero también, como es bien sabido, para la enseñanza del comportamiento y aún del desarrollo.

Incidentalmente debe observarse que al contrario de lo que sucede con *D. melanogaster* o con *Tribolium* (por poner los dos ejemplos que acabamos de

tratar) las distintas cepas de *Mus musculus* no son obtenibles —a veces— de inmediato sino que es frecuente una cierta demora en el suministro (de 2 a 3 meses). No obstante esto, tales cepas son materiales standard y pueden obtenerse siempre de las casas comerciales (como las ya conocidas) o de los laboratorios de investigación en donde se utilicen; la posible demora debe tenerse en cuenta para programar con antelación suficiente nuestras necesidades.

Todos los detalles referentes al cuidado, manipulación, modo de preparar los cruzamientos experimentales si bien son elementales y las más de las veces de sentido común pueden obtenerse también —por escrito— de los suministradores (juntamente con los relacionados con los aspectos, que no deben soslayarse, de: desinfección, seguridad, etc.).

Los mutantes más indicados, dentro del nivel estudiado, la mayoría de los cuales afectan al color del pelo, se describen a continuación (finalmente, se indica una relación de los cruzamientos experimentales más adecuada con tales mutantes):

Relación de cepas:

Tipo salvaje (A). El tipo salvaje presenta de ordinario un pelo «color agutí» mientras que en el vientre es algo más claro: gris. Agutí es una coloración muy oscura, fundamentalmente negra, pero en la que la mayoría de pelos presentan una banda subterminal amarilla, característica de la capa agutí, excepto en el vientre que es uniformemente gris. Esta coloración agutí es producida por un alelo dominante y es conocida como tipo salvaje.

No-agutí (a). Alelo completamente recesivo que produce homocigotos sin la banda subterminal amarilla del pelaje agutí. En este caso el color es uniformemente negro o pardo oscuro, y el vientre algo más claro.

No-agutí-de-ventre-claro (a'). Se trata de otro alelo de la serie agutí. Los homocigotos presentan un vientre claro y el dorso no agutí (uniformemente oscuro). El efecto no agutí sobre la capa (o dorso) es recesivo, frente al tipo salvaje, mientras que el color claro del vientre (vientre claro) es dominante tanto sobre vientre gris como sobre el tipo salvaje.

Amarillo (A'). Este alelo del locus agutí es responsable de un fenotipo de color amarillo de la capa (o dorso) que es dominante; los pelos del heterocigoto, son uniformemente amarillos. Sin embargo, en combinación homocigótica es letal (mueren en las primeras fases embrionarias).

Pardo (b). Recesivo frente al tipo salvaje B. En los homocigotos *pardo (bb)* la pigmentación es completamente parda (en lugar de negra). Los ratones *pardo-agutí (AAbb)* tienen un color parecido al de la *canela*, mientras que los *pardo-no-agutí (aabb)* parecen de *chocolate*. El gen amarillo (*A'*) no permite la manifestación de los alelos del locus pardo; es por tanto epistático sobre el locus pardo

(hipostático). (A pesar de ello es posible distinguirlos por cuanto los ratones *bb* al nacer tienen los ojos más claros; los ratones amarillo-*bb* presentan también esta característica, por la cual pueden ser reconocidos).

Albino (c). De color blanco. Se trata de un alelo recesivo que produce tal color del pelo por hallarse inhibida totalmente la síntesis de tirosinasa, enzima que participa en la vía de síntesis de la melanina. (ojos rosados)

Dilución extrema (chinchilla extrema (c^e)). Se trata de un alelo de la serie *c* que produce pelaje muy claro, aunque no blanco, y ojos oscuros. Los ratones heterocigotos *cc^e* son casi blancos, aunque con ojos oscuros (el efecto de *c^e* es dominante en el ojo, y recesivo en el pelo) sin embargo, por lo que a síntesis cuantitativa de pigmento se refiere tal heterocigoto presenta, en realidad, herencia intermedia).

Diluido o dilución maltesa (d). Se trata de otro gene que diluye el color de la capa, recesivo frente a su alelo silvestre *D*. En el homocigoto (*dd*) todos los tipos presentan coloración diluida debido a la especial agrupación de las moléculas de pigmento en el interior de los pelos de los individuos *bb*. Así, por ejemplo, aguti-diluido (*AA^{dd}*) presentan una coloración parda-veteada que recuerda a la de las crías de ciervo; los diluido-no aguti (*aadd*) son gris oscuro, mientras que los pardo-no aguti-diluido son de color de chocolate con leche. Por su parte los Amarillo-diluido (*A⁺a⁺dd*) son de color crema.

Dilución-ojos rosa (p). Este gen, recesivo, también causa dilución, al contrario que su alelo salvaje *P*. Sin embargo esta dilución es diferencial con respecto a los dos tipos de pigmento. La dilución del color negro del pelaje es grande, mientras que la del color amarillo queda poco afectada. La pigmentación de los ojos es nula y estos son rosados en los homocigotos. Los individuos aguti-*pp* son amarillos (porque la banda amarilla del pelo permanece), pero los no aguti-*pp* (*aapp*) son de un gris muy claro. Los loci *c* y *p* están ligados (sobre el mismo cromosoma), separados por unas 14 unidades en el mapa.

Tabby (Ta). Se trata de un gen de herencia ligada al sexo (situado sobre el cromosoma X). Las hembras homocigóticas y los machos homocigóticos (*TaTa*, y *TaY*, respectivamente) presentan colas sin pelo y a menudo con retorcimientos, calvas detrás de las orejas y una capa grasienta que, sobre un fondo aguti, es más oscura que la normal cerca de la línea del dorso pero más amarillenta en los flancos. Además se presentan otros efectos pleiotrópicos en estructuras epidérmicas (como por ejemplo, dientes, glándulas epidérmicas, vibrisas, etc.). Los heterocigotos presentan bandas oscuras sobre la capa aguti, pero no calvas.

Cruzamientos experimentales sugeridos:

De acuerdo con la selección de mutantes descrita hasta aquí, se incluyen los cruzamientos más indicados, a mi juicio, y que son los siguientes:

monohibridismo, con dominancia (3 : 1):

agutí (AA) x negro (aa)
pardo (aabb) x negro (aaBB)
a'a' (negro vientre-claro) x negro (aa)
albino (aacc) x negro (aaCC)
dilución-ojos rosa (AApp) x agutí (AAPP)

monohibridismo, sin dominancia (1 : 2 : 1):

agutí (AA) x negro, vientre claro (a'a')
albino (cc) x chinchilla extremo (c^ec^e)

monohibridismo modificado por letalidad (2 : 1):

amarillo (A'abb) x pardo (aabb)

dihibridismo (9 : 3 : 3 : 1):

agutí (AABB) x pardo (aabb)
negro, vientre claro (a'a'BB) x pardo (aabb)

dihibridismo con epistasia (9 : 3 : 4):

agutí (AACC) x albino (aacc)
negro, vientre claro (a'a'CC) x albino (aacc)
gris (ddCC) x albino (DDcc)

herencia ligada al sexo:

TaTa (hembras Tabby) x macho agutí
TaY (macho Tabby) x hembra agutí.

(NOTA: no se incluye ningún cruzamiento con genes ligados, pues el número de descendientes obtenido normalmente no posibilita resultados concluyentes).

VI ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA GENÉTICA HUMANA

En realidad existen tantos caracteres hereditarios susceptibles de recibir atención y tantos enfoques posibles que este capítulo debería ser muy amplio para ser mínimamente comprensivo de toda la extensión de la genética humana. No es éste el caso, ni tampoco pretende serlo. El enfoque elegido es otro.

Desde mi punto de vista existen algunas características genéticas de la especie humana (pienso en el sistema ABO, factor Rh, daltonismo, etc.) claras, de herencia mendeliana manifiesta y bien conocida cuyo estudio no debe faltar en ningún programa de enseñanza experimental de la genética. Y además existen un sinnúmero de casos de herencia dudosa (o más que dudosa) que, con muy poca precisión, van tomando prestados unos manuales de otros y que se suelen presentar como tales (la capacidad para el enrollamiento de la lengua, etc.); en tercer lugar tenemos otros caracteres —hereditarios también—, como el peso, estatura, entre ellos, cuyo control genético es más complicado, polímero y en cuya expresión fenotípica influye además, y mucho, el ambiente (en su acepción más amplia).

Por otro lado existen aún características, muchas veces no genéticas o no directamente hereditarias; otras veces hereditarias (p. ej. la morfología craneal) pero de herencia compleja que tienen su importancia más desde el punto de vista de la antropología que no de la genética humana propiamente dicha.

Tengo para mí que a este nivel (enseñanza media y media superior) es más aconsejable no pretender establecer barreras muy precisas y, sin confundir los términos, aprovechar todas las posibilidades que en conjunto ofrece la diversi-

dad física humana para presentar el estudio de una amplia muestra de los caracteres más fácilmente medibles a fin de suscitar el problema —más amplio— de la variabilidad humana, de sus causas, de su tratamiento estadístico, y de su estudio.

Todo ello genera una serie de preguntas, aclaraciones, establecimiento de relaciones, temas de estudio, etc., que sería imposible preveer de antemano en su totalidad. En distintas circunstancias y durante varios cursos he planteado con mis alumnos de esta forma el estudio de la variabilidad humana. Fruto de ello son los resultados que se relacionan a continuación y los protocolos que también se incluyen (tras aquellos) y que siendo en realidad de preparación más antigua ya habían sido incluidos en alguna publicación anterior.

Finalmente, y antes de pasar a tratar los temas anunciados, recordemos que también es frecuente enfocar el estudio de la genética humana mediante el estudio de árboles genealógicos (p. ej. de los relacionados en las figuras 40 y 41), aunque, a mi juicio, tal enfoque es más parecido al de un «problema» clásico que no experimental. También sería posible incluir en este capítulo el estudio de fotografías (otra cosa es fuera de lugar a este nivel) de cariotipos humanos y su ordenamiento y clasificación (extensible desde los casos de cariotipos humanos normales a los de las aberraciones cromosómicas más comunes). Sin embargo, a mi juicio, existiendo otras posibilidades, recortar y pegar, sin ser negativo, no tiene demasiado valor pedagógico.

Desde una perspectiva, por tanto, de índole práctica de realización material del tema hay que indicar que el planteamiento elegido consiste en una o varias (las necesarias) sesiones de laboratorio en las que los propios alumnos van tomando sus datos; luego los tabulan —de acuerdo también con las plantillas y los protocolos facilitados. Y, posteriormente los tratan y analizan estadísticamente. Para, finalmente, obtener conclusiones y proceder a una discusión.

Los resultados obtenibles. Un análisis.

Los caracteres a estudiar son los que se incluyen en los protocolos de la pág. 125 y siguientes, y entre los que, claro está, se podría hacer de más y de menos (quizá falten algunos: unos por motivos injustificados, otros más justificadamente, como la prueba de los gustadores/no gustadores a la feniltiocarbamida que por tratarse de un posible cancerígeno está desaconsejada; o quizá sobren algunas).

Las características de los resultados obtenidos pueden ser orientativas para interpretar los propios datos y por ello se incluyen aquí. Concretamente se incluyen resultados obtenidos durante el curso 1976-77 con una muestra de casi un millar de alumnos con una media de edad entre 18 y 19 años. Estos resultados fueron:

daltonismo: un 1,9296 % (cifra obtenida sumando todos los tipos anómalos).

dinamometría. Las gráficas de la figura 42 reflejan claramente diferencias sexuales y lateralidad (diferencias entre mano derecha y mano izquierda) más acentuada en hombres. La distribución de mujeres presenta menor dispersión.

índice cefálico. Se puede observar una mayoría mesocéfala y mayor número de dolicocefalos que de braquicefalos. Esta distribución refleja el tipo mediterráneo de la población.

sistema ABO. Los resultados obtenidos,

n = 856	399 A	65 B	31 AB	y	361 O
	que reflejan las frecuencias,				
46,612 % A	7,593 % B	3,621 % AB	y	42,172 % O	

son concordantes con los esperados, pues de acuerdo con VALLS las frecuencias en el conjunto de la población española son,

46,142 % A	8,359 % B	3,541 % AB	y	41,954 % O
	lo que da unos valores esperados			
394,975 A	71,553 B	30,310 AB	y	359,094 O
	con lo cual el valor de la X^2 correspondiente es			
	$X^2 = 0,666$			

lo cual para 3 grados de libertad y una $P_{0,05}$ hace verosímil aceptar la hipótesis de que dicha muestra es representativa de la población española.

Rh. las frecuencias obtenidas fueron,

Rh+ 83,3723 % y Rh- 16,6276 %

que, como en el caso anterior, coinciden, aproximadamente, con lo esperado.

Estatura. Los resultados detallados con respecto a esta variable se incluyen en la tabla 4. De forma resumida puede decirse que:

media = 168,4
 mediana = 172
 moda = 172
 desviación típica = 8,6

En el intervalo $168,4 \pm 8,6$ está contenido el 68,2 % de la muestra estudiada. La mediana y la moda son coincidentes en la clase representada por el valor 172, y la clase que contiene el valor de la media es la inmediatamente anterior.

En la gráfica se observan dos cimas (vide figura 43) que podrían representar las cimas de dos distribuciones distintas, correspondientes a cada sexo.

TABLA 1. Algunos rasgos patológicos dominantes en la especie humana (según Miralles)

<i>Afección</i>	<i>Características</i>
Aclasia diafisaria	Exóstosis de los huesos largos.
Acondroplasia o condrodistrofia.	Enanismo del tipo «extremidades cortas».
Acroosteólisis	Acortamiento de los huesos de las extremidades.
Alzheimer (Enfermedad de)	Degeneración presenil progresiva del cerebro.
Amiloidosis	Depósito de sustancias amiloides en los tejidos.
Amputación	Amputación congénita de brazos y/o piernas.
Aniridia	Iris rudimentario o ausente.
Anormalidades de la córnea	Distrofias y variaciones en forma, tamaño y curvatura.
Apert (Síndrome de)**	Bóveda craneana alta, ojos separados, fusión de los dedos de las manos y pies, dedos supernumerarios, etc.
Aracnodactilia	Dedos muy largos.
Ataxia cerebral o enfermedad de Marale**	Falta de coordinación muscular, atrofia del nervio óptico; aparición tardía.
Atrofia óptica	Atrofia del nervio óptico.
Braquidactilia	Dedos muy cortos.
Catarata	Opacidad del cristalino.
Ceguera nocturna	Congénita y estacionaria.
Coloboma macular	Anormalidad de la coroides.
Corea de Huntington	Espasmos musculares progresivos, trastornos en el habla, demencia.
Dedo en martillo	Flexión anormal del segundo dedo del pie.
Dentina opalescente	Dientes pequeños, blandos y decolorados.
Dislexia	Ceguera verbal congénita.
Disóstosis craneofacial	Cierre prematuro de las suturas craneales, frente protuberante, nariz semejante a un hocico, ojos prominentes.
Dislocación	Dislocación congénita de la cadera.
Distrofia muscular (tipo facio-escapulohumeral)	Degeneración progresiva de los músculos del cingulo escapular en la juventud y en la edad adulta.
Epidermosis bulbosa	Ampollas después de traumas menores.
Epiplia	Crecimiento anormal de la piel, el corazón y los riñones; defecto mental.
Esclerosis corioidea	Endurecimiento de la coroides.
Esferocitosis	Esferocitos en la sangre periférica.
Espondilitis anquilosante	Calificación de los ligamentos paravertebrales: rigidez de la columna vertebral.
Fundus distrofia	Degeneración de la parte posterior del globo ocular.
Glaucoma**	Elevada presión intraocular.
Glicosuria renal	Excreción de glucosa por la orina (nivel de azúcar en sangre, normal).
Gota	Metabolismo anormal del ácido úrico.
<i>Hallux rigidus**</i>	Dedo grueso del pie rígido.
<i>Hallux valgus</i>	Aducción proximal extrema de la falange proximal del dedo grueso del pie.
Hipercolesteremia	Nivel muy elevado de colesterol en la sangre.
Hiperfalangia del pulgar	Falanges supernumerarias en el pulgar.
Hiperplasia gingival	Engrosamiento de las encías, dentición retrasada.
Hipodoncia**	Ausencia de incisivos laterales o de molares.
Hipoplasia del esmalte**	Esmalte dental fino y descolorido.
Hirschsprung (Enfermedad de)**	Dilatación del colon.

Tabla 1 (Continuación)

<i>Afección</i>	<i>Características</i>
Ictericia hemolítica	Eritrocitos esferocíticos.
Labio de los Habsburgo	Mentón prominente, mandíbula inferior excesivamente larga.
Mano de langosta o mano hendida	Defectos graves del esqueleto de las manos y de los pies.
Microftalmos**	Ojos anormalmente pequeños.
Miotonía congénita o enfermedad de Thomsen	Hipertrofia de los músculos faciales u oculares.
Miotonía distrófica	Miotonía y distrofia progresiva de los músculos; la miotonía más grave.
Miotonía, paramiotonía	Miotonía leve después de la exposición de los músculos al frío.
Moniletrix	Pelo moniliforme.
Neurofibromatosis o enfermedad de Recklinghausen	Tumores nerviosos en la piel.
Oftalmoplejía	Parálisis de los músculos oculares.
Orejas de gato	Pabellones auriculares pequeños y en forma de copa.
Osteítis deformante o enfermedad de Paget.	Endurecimiento progresivo de los huesos.
Osteogénesis imperfecta	Huesos frágiles, esclerótica azulada.
Otosclerosis	Tejido óseo esponjoso en la cápsula laberíntica.
Oxicefalia o acrocefalia**	Cráneo deformado, alto y puntiagudo.
Paladar hendido	Sin labio leporino.
Parkinson (Enfermedad de)	Temblor muscular progresivo y rigidez.
Pecho en túnel	Depresión congénita de la caja torácica, esternón hundido.
Pelger (Anomalía de)	Núcleos anormales de los glóbulos blancos sanguíneos.
Peutz (Síndrome de)	Poliposis del intestino delgado, pigmentación de la mucosa bucal.
Pick (Enfermedad de)	Degeneración presenil o senil progresiva del cerebro.
Piel variegada	Manchas impigmentadas en la piel.
Pies planos	Pies planos congénitos.
<i>Pili torti</i>	Pelo corto, retorcido y frágil.
Policitemia vera**	Elevado recuento de glóbulos rojos.
Polidactilia	Dedos supernumerarios.
Polineuritis progresiva hipertófica**	Dolor, insomnio, hipertrofia de los nervos periféricos.
Poliposis múltiple	Pólipos en el recto y en el colon.
Porfiria	Abrasión de la piel expuesta a la luz, excreción de porfirina por las heces y en la orina, sensibilidad a los barbitúricos.
Púrpura trombocitopénica	Puntos hemorrágicos en la piel, escasez de plaquetas.
Retinoblastoma	Tumor de la retina.
Sindactilia	Algunos dedos unidos.
Sordera laberíntica	Descenso en el límite superior del tono.
Sprengel (Deformidad de)**	Omoplatos elevados.
Subluxación del cristalino	Dislocación del cristalino.
Telangiectasia hemorrágica	Grupos esparcidos de vasos sanguíneos de pared delicada.
Tylosis	Piel engrosada en las palmas y en las plantas.

* No se hace distinción de los dominantes con efectos letales recesivos.
 ** Dominancia dudosa.

TABLA 2. Algunos rasgos patológicos recesivos en la especie humana (según Miralles)

<i>Afección</i>	<i>Características</i>
Afibrinogenemia	Deficiencia de fibrinógeno en el plasma sanguíneo.
Albinismo	Poca o ninguna pigmentación de la piel, el pelo y los ojos.
Alcaptonuria*	Excreción por la orina de ácido homogénico; artritis.
Anemia falciforme	Glóbulos rojos falciformes cuando se los priva de oxígeno; anemia fatal.
Anemia mediterránea o talasemia	Formas anormales de los glóbulos rojos cuando se los priva de oxígeno; anemia fatal.
Anemia perniciosa	Células sanguíneas anormales; aclorhidria.
Apéndices auriculares*	Tumores en el oído externo.
Ataxia espinal o enfermedad de Friedreich	Falta de coordinación de los músculos; pérdida de reflejos tendinosos; incremento de la curvatura del arco del pie; de aparición temprana.
Cistinuria	Excreción de cistina por la orina; cálculos en las vías urinarias.
Diabetes mellitus	Baja tolerancia de glucosa.
Distrofia muscular (tipo cíngulo pélvico)	Degeneración progresiva de los músculos del cíngulo pélvico en la niñez.
Enfermedad poliquística de los RIÑONES	Quistes e insuficiencia renal.
Epilepsia idiopática*	Ataques convulsivos, cambios electroencefalográficos.
Estenosis pilórica*	Constricción del píloro.
Fenilcetonuria	Excreción de ácido fenilpirúvico por la orina; debilidad mental.
Fibrosis quística del páncreas	Insuficiencia pancreática; obstrucción intestinal; trastornos en la excreción sudorípara y salival.
Galactosemia	Incapacidad de convertir la galactosa en glucosa.
Gaucher (Enfermedad de)	Acumulación de lípidos; piel bronceada; incremento del bazo; acumulación de cerebrósidos en algunas células.
Hiperlipemia	Nódulos amarillentos en la piel; dolores abdominales; infarto miocárdico temprano.
Hipoglucemia	Bajo nivel de azúcar en la sangre; retraso mental.
Hipospadía	Desembocadura anormal de la uretra en el pene.
Ictiosis eritroderma	Forma benigna de la anterior.
Idiocia amaurotica infantil o enfermedad de Tay-Sachs	Ceguera; incapacidad motora y mental; muerte en la infancia.
Idiocia amaurotica juvenil o enfermedad de Spielmeier-Vogt	Semejante a la anterior, pero la muerte se produce en la juventud o la adolescencia.
Labio leporino*	Con o sin paladar hendido.
Methemoglobinemia	Parte de la hemoglobina convertida en methemoglobina.
Niemann-Pick (Enfermedad de)*	Gran acumulación de lípidos; deterioro neurológico; muerte prematura.
Ovalocitosis	Eritrocitos elípticos; hemólisis.
Pelizaeus-Merzbacher (Enfermedad de)*	Parálisis progresiva y degeneración mental.
Psoriasis*	Pápulas rojizas en la piel.
Sordomudez congénita*	Sordera total.
Wilson (Enfermedad de)	Degeneración de los ganglios basales; cirrosis del hígado.

* Recesividad dudosa.

TABLA 3. Algunos rasgos patológicos ligados al sexo en la especie humana, (según Miralles)

<i>Afección</i>	<i>Características</i>
Agammaglobulinemia (R)	Incapacidad para desarrollar anticuerpos.
Anemia hipocrómica o microcítica (R)	Diversas anomalías de los eritrocitos.
Anoftalmia* (R)	Globos oculares pequeños.
Camptodactilia* (D)	Flexión permanente de los dedos.
Craicot-Marie (Enfermedad de) (D)	Atrofia del músculo peroneal; aparición lenta e incremento progresivo de la afección en ciertos grupos de músculos.
Ceguera para los colores (R)	Incapacidad para distinguir entre el rojo y el verde.
Coroideremia (R)	Degeneración de la coroides.
Defecto ectodérmico anhidrótico* (R)	Glándulas salivales y dientes ausentes o rudimentarios.
Diabetes insípida* 6r7	Excesiva excreción de orina.
Gargolismo* (R)	Graves defectos esqueléticos, deficiencia mental, bajo crecimiento de los cartílagos, células vacuolares en el hígado y el bazo, con depósitos de sustancias químicas aún no identificadas.
Hemofilia (R)	Hemorragia excesiva y prolongada.
Ictiosis vulgaris* (D)	«Piel de pescado»
Leber (Enfermedad de)*	Atrofia del nervio óptico.
Miopía (R)	Dificultades en la visión lejana.
Osteocondrodistrofia o enfermedad de Morquio* (R)	Anormalidades distribuidas por todo el esqueleto.
Raquitismo* (D)	Resistencia a la vitamina D.
Retinitis pigmentosa* (R)	Degeneración progresiva de la retina, con depósito de un pigmento.
Xeroderma pigmentosum (R)	Pecas, cáncer de piel.

Se sospecha que están ligados al sexo pero no están plenamente comprobados.
Se indica también si son preferentemente dominantes (D) o recesivos (R).

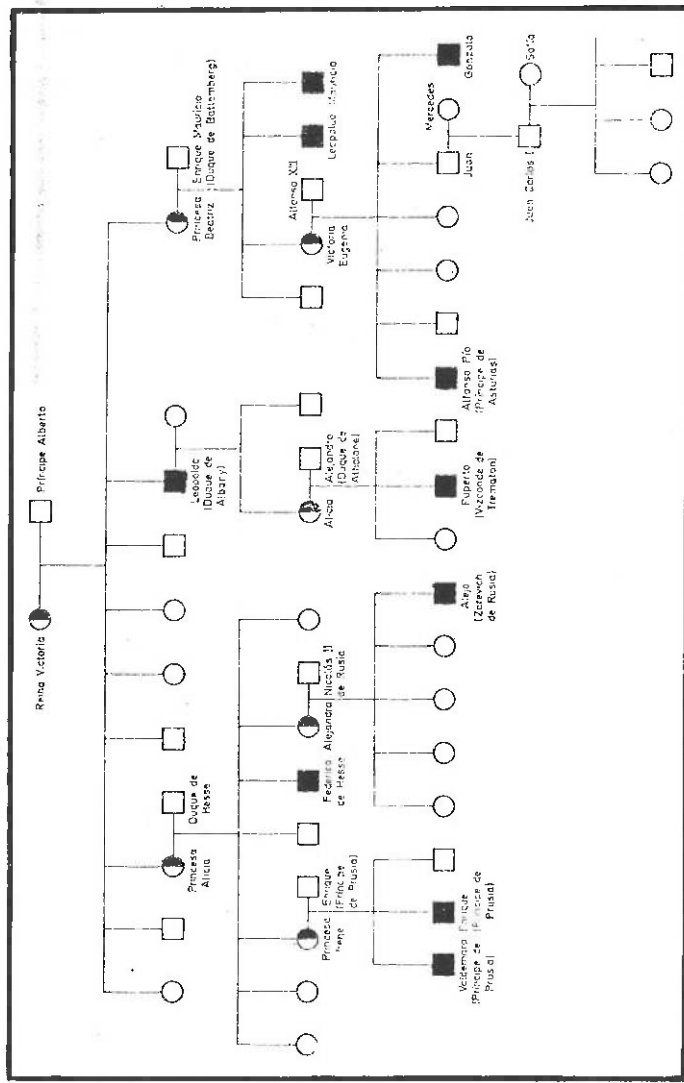


Figura 40. Arbol genealógico de la familia real en el que se aprecia la herencia de la hemofilia.

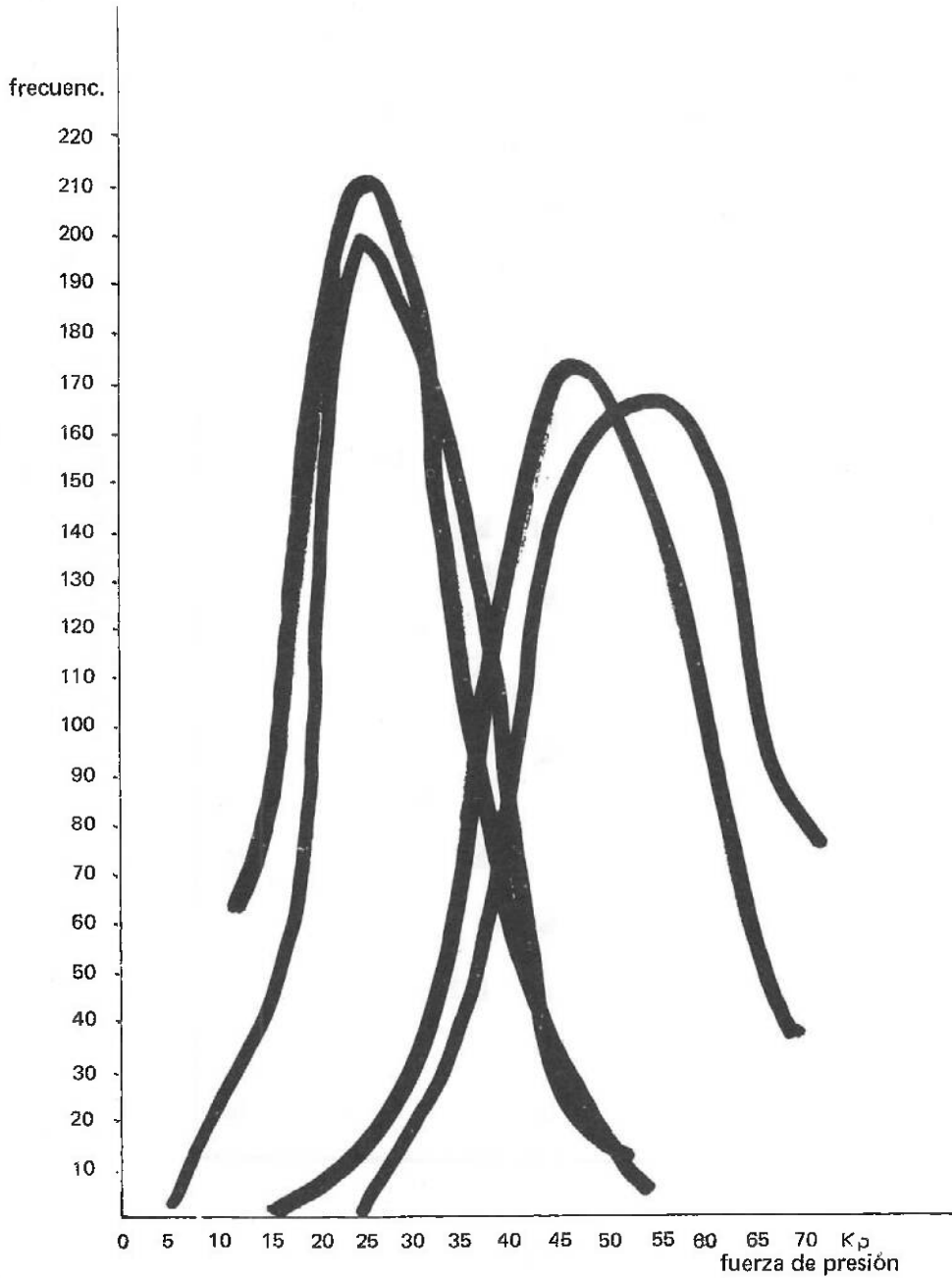


Figura 42. Representación gráfica de los resultados obtenidos con el dinamómetro de Collin en la muestra que se describe en las págs. 112 y siguientes.

TABLA 4. ESTATURA. Resultados obtenidos referentes a la variable estatura en la muestra citada en el texto.

	marca de clase x_i	f_i	$f_i x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$f_i (x_i - \bar{x})$
menos de 150	148	7	1.036	-20,4	416,16	2.913,12
150 - 153	152	37	5.624	-16,4	268,96	9.951,52
154 - 157	156	62	9.672	-12,4	153,76	9.533,12
158 - 161	160	115	18.400	-8,4	70,56	8.114,4
162 - 165	164	120	19.680	-4,4	19,36	2.323,2
166 - 169	168	133	22.344	-0,4	0,16	21,28
170 - 173	172	152	26.114	3,6	12,96	1.969,92
174 - 177	176	134	23.584	7,6	57,76	7.739,84
178 - 181	180	63	11.340	11,6	134,56	8.477,28
182 - 185	184	30	5.520	15,6	243,36	7.300,8
186 - 188	188	10	1.880	19,6	384,16	3.841,6
190 - 193	192	3	576	23,6	556,96	1.670,88
194 - 197	196	1	196	27,6	761,76	761,76
		$N = 867$	$\sum f_i x_i = 145.990$			$\sum f_i (x_i - \bar{x})^2 = 64618,12$

media = $\bar{x} = 168,4$

mediana = 172

moda = 172

desv. típica = $\sigma = 8,6$

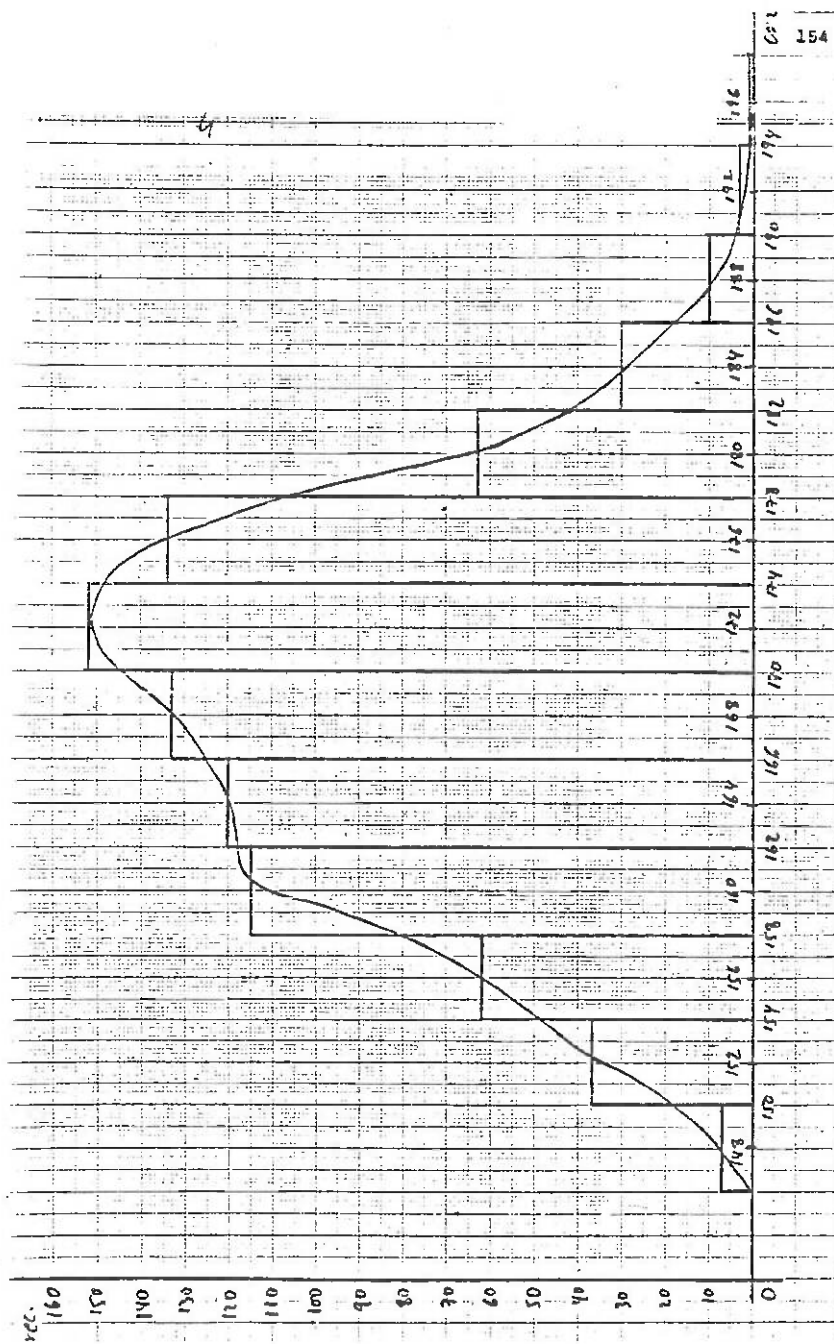


Figura 43. Representación gráfica de los resultados de la tabla 4 «Estatura»

TABLA 5. PESO. Resultados obtenidos referentes a la variable peso en la muestra citada en el texto.

	marca de clase y_i	f_i	$f_i y_i$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$f_i(y_i - \bar{y})^2$
menos de 45	43	10	430	-19,9	396,01	3.960,1
45 - 48	47	40	1.880	-15,9	252,81	10.112,4
49 - 52	51	91	4.641	-11,9	141,61	12.886,51
53 - 56	55	127	6.985	-7,9	62,41	7.926,67
57 - 60	59	132	7.788	-3,9	15,21	2.007,72
61 - 64	63	126	7.938	-0,1	0,01	1,26
65 - 68	67	126	8.442	4,1	16,81	2.118,06
69 - 72	71	78	5.538	8,1	65,61	5.117,58
73 - 76	75	59	4.425	12,1	146,41	8.638,19
77 - 80	79	32	2.528	16,1	259,21	8.294,72
81 - 84	83	18	1.494	20,1	404,01	7.272,18
85 - 88	87	12	1.044	24,1	580,81	6.969,72
más de 88	91	13	1.183	28,1	789,61	10.264,93
		$N = 864$	$\sum f_i y_i = 54.361$			$\sum f_i (x_i - \bar{x})^2 = 85.569,4$

media	=	\bar{x}	=	62,9
mediana	=	67		
moda	=	59		
desv. típica	=	σ	=	9,9

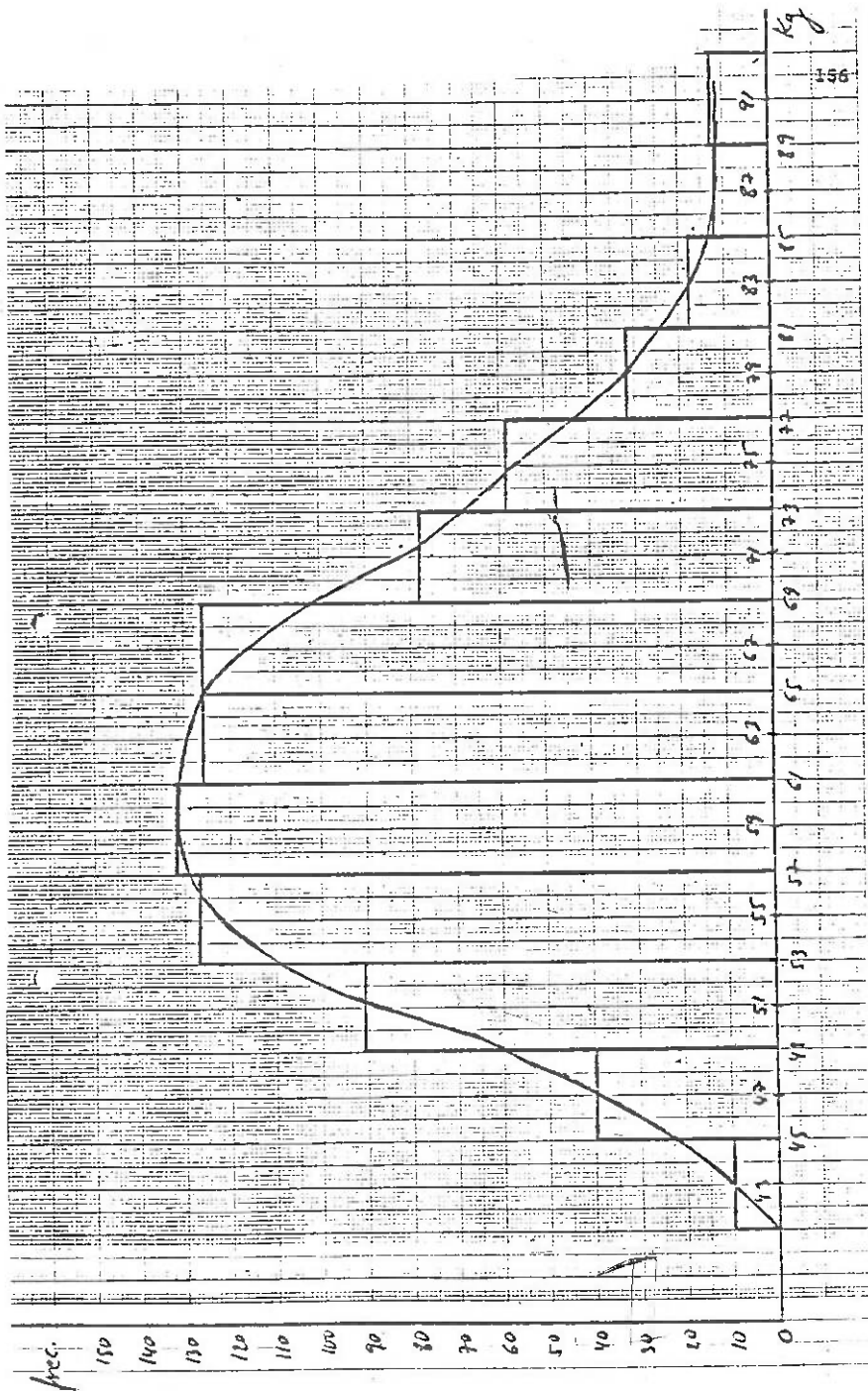


Figura 44. Representación gráfica de los resultados de la TABLA 5 «Peso».

Peso. Los resultados detallados con respecto al peso se incluyen en la tabla 00, mientras que su representación gráfica se contiene en las figuras 44. De forma resumida puede decirse que,

media = 62,9
mediana = 67
moda = 59
desviación típica = 9,9

Protocolos prácticos

En las primeras sesiones los alumnos se dedican a recoger los datos de los distintos caracteres elegidos guiados por un protocolo como el siguiente,

OBSERVACIÓN Y MEDIDA DE LA VARIABILIDAD HUMANA. PROTOCOLO PRÁCTICO.

Con esta práctica se pretende introducir el concepto de variabilidad a partir de los propios caracteres humanos.

Debe rellenarse la hoja de datos (vide pág. 126 y 129) que se entregará finalmente al profesor. En próximas sesiones estos datos, tabulados, serán tratados estadísticamente.

Estatura: Es la distancia tomada en posición vertical, de pie, desde el suelo al punto más alto del cráneo. Es un carácter de herencia polimérica en cuya manifestación fenotípica interviene el ambiente (alimentación, salud, ejercicio físico, etc.). Hay variaciones sexuales y de ordinario la mujer suele medir un 7 % menos.

MÉTODO: se medirá sin zapatos, en posición de «firmes». Se tomará el resultado en cm.

Peso: Es un carácter todavía más influenciado por el ambiente que el anterior. En un conjunto no sigue una distribución gaussiana sino asimétrica.

MÉTODO: se medirá sin zapatos y con la menor ropa posible. El resultado se expresará en Kg.

Índice cefálico: La forma de la cabeza también varía entre y en las poblaciones. Midiendo la longitud y anchura de la cabeza podemos obtener el índice cefálico (I.C.).

$$\text{I.C.} = \frac{\text{anchura de la cabeza}}{\text{longitud de la cabeza}} \times 100$$

TABLA 6. Incluye los resultados pormenorizados obtenidos en el análisis de la muestra descrita en el texto, excepto «estatura» y «peso» (tablas 4 y 5, respectivamente). En algunos casos $n = T = 882$, ya que hubo que despreciar algunos valores mal tabulados.

DATOS TOTALES

Nº individuos 882 hombres 463 mujeres 419 edad media 18,349

sistema ABO (n = 856)

A	B	AB	O
399	65	31	361

factor Rh (N = 854)

+	-
712 83,37%	142 16,63%

índice cefálico (n = 882)

HD	D	M	B	MB
34	203	370	154	21

Dinamometría (en unidades Kp)

hombres mano derecha (n = 459)

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70
-	-	2	42	155	166	94

hombres mano izquierda (n = 458)

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70
-	2	13	90	174	134	45

mujeres mano derecha (n = 414)

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70
1	38	200	151	21	3	-

mujeres mano izquierda (n = 415)

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70
-	77	212	105	21	-	-

VISIÓN DE LOS COLORES

Normal	846
Protanopia	5
Deuteranopia	2
Protanomelia	1
Deuteranomelia	1
Discromatopsia	
c. total	7
n =	881
T. normal =	846
T. anormal =	17
% anormal	1,9296 %

Las cabezas estrechas (dolicocefalia) presentan un índice cefálico menor que el de las cabezas anchas (braquicefalia). Con el compás craneométrico se mide la anchura entre los puntos laterales de la cabeza más sobresalientes (eurio), y la longitud, en el plano medio, entre el punto más saliente de la frente (glabella) y el punto occipital más alejado (opistocráneo).

Clasificación según el I.C.:

dolicocéfalos	x — 75,9
mesocéfalos	76 — 80,9
braquicéfalos	81 — x

El índice cefálico varía, en general, con el crecimiento por hacerse la cabeza más dolicocéfala; con el sexo, por ser relativamente más braquicéfalas las mujeres, y con la estatura incrementándose la dolicocefalia al aumentar ésta. Y también varía entre las distintas poblaciones humanas.

Dinamometría: Con el dinamómetro de Collin se medirá la fuerza de presión de ambas manos en Kp.

Comoquiera que la fuerza dinamométrica por presión afecta de manera exclusiva a los músculos flexores de los dedos no está, ni necesaria ni directamente relacionada con la robustez del sujeto. Sólo se registra la fuerza de contracción instantánea de los músculos, sin separar lo que en realidad es energía muscular propiamente dicha y lo que representa el esfuerzo de la voluntad del sujeto.

MÉTODO: el individuo debe sentarse comodamente, de manera que sus pies toquen el suelo y el codo descansa sobre la mesa. Deben realizarse tres pruebas (para cada mano), con un intervalo de por lo menos 10 seg. entre cada una de ellas. En general, sin embargo, la primera es la mejor. **SE TOMARÁ TAN SOLO EL MEJOR RESULTADO.**

Forma de cruzar las manos («hand clasping»). Hay ciertas actitudes preferenciales o posibilidades musculares de los individuos que, en algunos casos por lo menos, están determinadas genéticamente aunque el aprendizaje influye en su manifestación enotípica.

Este es el caso de la forma de cruzar las manos.

MÉTODO: cruzando los dedos de ambas manos como una cremallera se observará que el pulgar queda en posición superior: D, I, indiferente.

Forma de cruzar los brazos («arm folding»)

MÉTODO: cruzando los brazos se observará cuál es el que queda en posición superior: D, I, indiferente.

Forma de cruzar las piernas («leg folding»).

MÉTODO: al sentarse en el suelo se puede adelantar la pierna derecha y cruzarla sobre la izquierda (D) o viceversa (I). También puede observarse cuál es la pierna que preferentemente se cruza por delante al estar sentado en una silla. La forma de cruzar manos, brazos y piernas no presenta asociación de tipo D o I en los 3 caracteres para un mismo individuo. No está demostrada la heredabilidad en la forma de cruzar los brazos ni en la forma de cruzar las piernas.

Habilidad para mover las orejas. Hay individuos que presentan capacidad para mover las orejas. Puede tratarse de un carácter dominante irregular.

MÉTODO: Se observará si existe habilidad para mover ambas orejas, solo la derecha o solo la izquierda.

Capacidad para enrollar la lengua («tongue rolling») en forma de U. No se conoce bien la herencia de este carácter.

MÉTODO: se observará la capacidad.

Inclinación del pulgar. Hay individuos que presentan capacidad para extender la 1ª articulación del dedo pulgar más de 90°.

Ojo director. Se trata de conocer cuál de los dos ojos realiza la actividad de ojo director.

MÉTODO: Utilizando un lápiz y una arista de la pared, por ejemplo, se superpone la visión de ambas líneas. Si tapando el ojo izquierdo no cambia la visión y tapando el derecho se desplaza la imagen a la derecha quiere decir que el ojo director es el derecho. Si tapando el ojo derecho no cambia la visión y tapando el izquierdo se desplaza la imagen a la izquierda, quiere decir que el ojo director es el izquierdo.

Algunos individuos son anftoalms (sin ojo director), mientras que otros pueden ser de diagnóstico difícil o dudoso. Ambos casos no se tendrán en cuenta.

Visión de los colores. Algunos individuos presentan deficiencias hereditarias en la percepción de los colores que reciben el nombre de *discromatopsias congénitas*. El caso más frecuente es una disminución de la percepción del rojo y del verde, que produce su no identificación, y que en conjunto recibe el nombre de daltonismo; se trata de un carácter hereditario ligado al sexo.

Dentro de esta anomalía se puede distinguir entre los individuos de tipo *protano* y los de tipo *deutano*. En cada uno de estos dos casos la ausencia de percepción de aquellos dos colores puede ser total (*protanopia* y *deuteranopia*, respectivamente), o parcial (*protanomeliay deuteranomelia*, respectivamente). La protanopia consiste en una disminución de la percepción del campo visible del espectro por el extremo del rojo, a la vez que la zona que aparece azul-verde para el individuo normal al protánopo le aparece gris. El espectro del protánopo

está dividido en dos partes por esta zona gris, mientras que, además, el rojo púrpura (complementario del azul-verde) también le aparece gris.

En la deuteranopia la parte del espectro que es verde para el individuo normal aparece gris y esta zona divide su espectro en dos. En este caso no hay disminución en el resto del campo visible del espectro. También aquí el rojo-púrpura aparece gris.

En la protanomelia y en la deuteranomelia ninguna zona se ve gris, sino que en la protanomelia la zona que el protánopo ve gris se observa de color violáceo, indistinto; color con que en la deuteranomelia se observa la zona que aparece gris al deuteránopo.

Todo ello hace que a los individuos que confunden el rojo y el verde, el azul y el amarillo les aparecen por contraste muy vivos, propiedad en la que se basa su diagnóstico por las tablas de Ishihara.

Estas tablas también permiten diagnosticar los raros casos de *discromatopsia congénita total* (ceguera completa para los colores) que puede, por lo demás, coexistir con una visión normal; (hay otros tipos de ceguera total a los colores que van acompañados de otras deficiencias profundas de la visión). Por último hay que mencionar deficiencias congénitas de la percepción del azul y del amarillo (*tritanopia* y *tritanomelia*) que son muy poco frecuentes y no se pueden diagnosticar con las tablas de Ishihara.

Para el diagnóstico, mediante estas tablas, hay que observar las láminas a una distancia de unos 75 cm y perpendicularmente al eje óptico; el reconocimiento de las cifras que aparecen en ellas debe hacerse en un máximo de 3 segundos.

Los números observados se anotarán, de momento, en la siguiente Tabla (posteriormente el profesor indicará la lectura tipo de las láminas de Ishihara y su interpretación, que permitirá rellenar la casilla correspondiente de la hoja de recogida de datos.

Nº LAMINA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CIFRA OBSERVADA													
CIFRA REAL													

Nº LAMINA	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
CIFRA OBSERVADA													
CIFRA REAL													

N° LAMINA	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
CIFRA OBSERVADA													
CIFRA REAL													

NOTA: En la página 00 y 00 se incluye la lectura tipo de las láminas con indicación de la misma para cada tipo de anomalía.

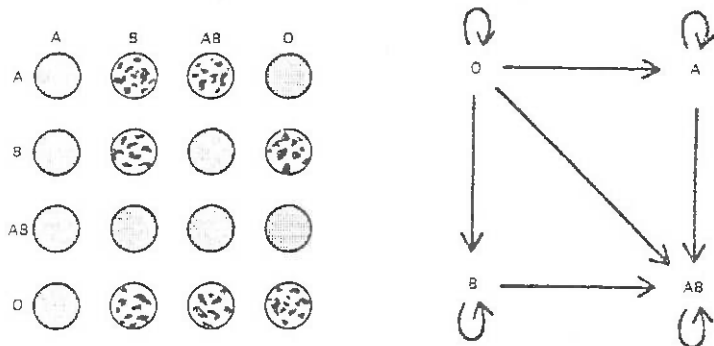
Sistema ABO. El sistema ABO fue el primer caso de alelomorfismo múltiple que se descubrió en el hombre. Se puede considerar como un carácter hereditario controlado por tres alelos de un solo gen, dos de ellos dominantes sobre el tercero y codominantes entre sí (en realidad la situación es algo más complicada, aunque esta hipótesis es válida para interpretar los resultados que obtendremos). Los tres alelos son I^A e I^B dominantes sobre i , y los cuatro fenotipos posibles son: A ($I^A I^A$ o $I^A i$), B ($I^B I^B$ o $I^B i$), AB ($I^A I^B$) y O (ii). El suero sanguíneo humano contiene los anticuerpos capaces de reaccionar con los antígenos de las células sanguíneas de otros individuos. Concretamente los antígenos (aglutinógenos) se hallan en los glóbulos rojos, mientras que los anticuerpos (aglutininas) se encuentran en el plasma. Los individuos de fenotipo A tienen aglutinógeno A y aglutinina anti-B; los individuos del grupo B tienen aglutinógeno B y aglutinina anti-A; los del grupo AB tienen los aglutinógenos A y B, pero no tienen ninguna aglutinina; finalmente los individuos del grupo O no poseen aglutinógenos y sí en cambio las dos aglutininas.

Las frecuencias de estos grupos sanguíneos varían según las poblaciones.

Grupo sanguíneo FENOTIPO	GENOTIPO	HEMATÍES (antígenos)	SUERO (anticuerpos)	FRECUENCIA EN ESPAÑA
A	$I^A I^A, I^A i$	A	anti-B	46,14%
B	$I^B I^B, I^B i$	B	anti-A	8,36%
A, B	$I^A I^B$	A, B	—	3,54%
O	ii	—	anti-A, anti-B	41,95%

Si se mezcla sangre de distintos tipos, de modo que las aglutininas se pongan en contacto con sus respectivos aglutinógenos, se produce la aglutinación de los glóbulos rojos. Debido a ello no pueden realizarse todas las transfusiones teóricamente posibles.

Si el volumen de sangre no es excesivo puede realizarse con seguridad cualquier tipo de transfusión, siempre que el suero del receptor no contenga anticuerpos para los antígenos de los hematíes del dador.



El grupo AB es denominado «receptor universal» ya que puede recibir hematíes de todos los grupos, mientras que el grupo 0 es el «dador universal» ya que sus hematíes no son aglutinados por sangre de ningún grupo.

Los anticuerpos anti-A y anti-B de la sangre del grupo 0 son absorbidos por otros tejidos o quedan muy diluídos si la transfusión es pequeña.

MÉTODO:

Se realizará una punción en el dedo anular con una lanceta esterilizada desechable (sólo se utilizará para una persona) y se recogerá la sangre con un capilar heparinizado (para evitar la coagulación) depositándose separadamente 3 gotas sobre un portaobjetos limpio. Se añadirá:

- a la primera gota, suero anti-A
- a la segunda gota, suero anti-B
- a la tercera gota, suero anti-AB

(Hay que evitar todo contacto del cuentagotas de los antisueros con la sangre). Se esperan unos dos minutos, removiendo suavemente con un palillo o una varilla de vidrio.

Interpretación del resultado:

La sangre tomada será del grupo:

- A: si hay aglutinación con el suero anti-A, y con el anti-AB, pero no con el anti-B.
- B: si hay aglutinación con el suero anti-B, y con el anti-AB, pero no con el anti-A.
- 0: si no hay aglutinación en ningún caso.
- AB: si hay aglutinación con el suero anti-A, suero anti-B y suero anti-AB

TABLA 7. LECTURA TIPO DE LAS TABLAS DE ISHIHARA

Número Lámina	Visión Normal	Discromatopsia congénita Tipo protano o deutano	Ceguera completa o percepción muy débil de todos los colores
1	12	12	12
2	8	3	—
3	6	5	—
4	29	70	—
5	57	35	—
6	5	2	—
7	3	5	—
8	15	17	—
9	74	21	—
10	2	—	—
11	6	—	—
12	97	—	—
13	45	—	—
14	5	—	—
15	7	—	—
16	16	—	—
17	73	—	—
18	—	5	—
19	—	2	—
20	—	45	—
21	—	73	—

TABLA 7 (cont.) LECTURA TIPO DE LAS TABLAS DE ISHIHARA

Número Lámina	Visión Normal	Discromatopsia congénita Tipo protano o deutano				Ceguera completa o percepción Muy débil de todos los colores
		Protano Formas Graves/Liger		Deutano Formas Graves/Liger		
		6	<u>26</u>	2	<u>26</u>	—
22	26	6	<u>26</u>	2	<u>26</u>	—
23	42	2	<u>42</u>	4	<u>42</u>	—
24	35	5	<u>35</u>	3	<u>35</u>	—
25	96	6	<u>96</u>	9	<u>96</u>	—

deuteranomefia

deuteranopia (se observan mejor)

protanomefia (se observan mejor)

protanopia

Factor Rh. El factor Rh consiste en un antígeno presente en los glóbulos rojos de la mayoría de la población europea (85 %) y de herencia dominante. Su frecuencia varía en distintas poblaciones.

Los individuos cuyos hematíes poseen proteínas Rh son Rh + , y los que no las poseen son Rh —. Aunque se le llama factor Rh no está regulado por un solo gen sino que se trata de un sistema de genes. En realidad, se supone que hay 6 alelos (Cc, Dd, Ee) para 3 loci, pudiendo producirse todas las combinaciones posibles desde CDE/CDE hasta cde/cde.

El Rh se fenotipa usualmente por la presencia o ausencia de antígeno D (que es el más potente) mediante la reacción de aglutinación con suero anti-D.

<i>genotipo</i>	<i>fenotipo</i>	<i>frecuencia en Europa</i>
cc D-ee C-D-ee cc D-E- C-D-E-	Rh +	85%
ccddee C-ddee ccddE- C-ddE-	Rh—	15%

Si a un individuo Rh — se le realiza una transfusión con hematíes Rh + , a los 12 días producirá aglutininas anti-Rh. Una transfusión posterior de hematíes Rh + dará lugar a una gran destrucción de hematíes. Es el mismo efecto que produce en una mujer Rh — la gestación de un hijo Rh + , que origina en la madre la producción de aglutininas anti-Rh que la sensibilizan para futuros embarazos.

En embarazos, posteriores, de hijos Rh + puede presentarse una seria incompatibilidad materno-filial, puesto que puede producirse una grave destrucción de los hematíes del feto (eritroblastosis fetal).

En la actualidad, se trata clínicamente este problema inyectando a la madre Rh — que ha tenido un hijo Rh + gammaglobulina anti-D, que actúa sobre los hematíes fetales que podrían provocar inmunización en la madre y los hace desaparecer antes de que esto ocurra.

Método:

- Se coloca una gota de suero anti-D sobre un portaobjetos limpio.
- Se añaden dos gotas de sangre del mismo tamaño que la anterior.
- Se mezcla bien.

- Se hace oscilar el porta durante unos dos minutos (si se posee, es preferible hacerlo colocando el porta sobre una caja de visualización a 40-50° C de temperatura).
- Observar si se produce aglutinación.

Interpretación del resultado:

- aglutinación: Rh⁺
- no aglutinación: Rh⁻
- aglutinación dudosa: es posible que los hematíes contengan la variante D^u del antígeno D. Para una determinación correcta del factor Rh habría que realizar pruebas más complicadas (p. ej. la prueba de antiglobulina de Coombs).

Todos los datos personales se incluirán en la siguiente: «HOJA PERSONAL DE RECOGIDA DE DATOS»

HOJA PERSONAL DE RECOGIDA DE DATOS
(Se incluirán todos los datos personales)

Grupo..... Día..... Hora de prácticas.....
 Sexo: varón mujer Edad.....
 Lugar de nacimiento: población..... Provincia.....

Estatura.....		Peso.....	
x/145,9 <input type="checkbox"/>	182/185,9 <input type="checkbox"/>	x/35,9 <input type="checkbox"/>	72/75,9 <input type="checkbox"/>
146/149,9 <input type="checkbox"/>	186/189,9 <input type="checkbox"/>	36/39,9 <input type="checkbox"/>	76/79,9 <input type="checkbox"/>
150/153,9 <input type="checkbox"/>	190/103,9 <input type="checkbox"/>	40/43,9 <input type="checkbox"/>	80/83,9 <input type="checkbox"/>
154/157,9 <input type="checkbox"/>	194/197,9 <input type="checkbox"/>	44/47,9 <input type="checkbox"/>	84/87,9 <input type="checkbox"/>
158/161,9 <input type="checkbox"/>	198/201,9 <input type="checkbox"/>	48/51,9 <input type="checkbox"/>	88/91,9 <input type="checkbox"/>
162/165,9 <input type="checkbox"/>	202/x <input type="checkbox"/>	52/55,9 <input type="checkbox"/>	92/95,9 <input type="checkbox"/>
166/169,9 <input type="checkbox"/>		56/59,9 <input type="checkbox"/>	96/99,9 <input type="checkbox"/>
170/173,9 <input type="checkbox"/>		60/63,9 <input type="checkbox"/>	100/103,9 <input type="checkbox"/>
174/177,9 <input type="checkbox"/>		64/67,9 <input type="checkbox"/>	104/x <input type="checkbox"/>
178/181,9 <input type="checkbox"/>		68/71,9 <input type="checkbox"/>	

Indice cefálico
 dolicefalo mesocéfalo braquicefalo

Dinamometría mano derecha.....
 0-10 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70

Dinamometría mano izquierda.....
 0-10 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70

Forma de cruzar las manos: derecho izquierdo indeterminado
 Forma de cruzar los brazos: derecho izquierdo indeterminado
 Forma de cruzar los brazos: derecho izquierdo indeterminado
 Ojo director: derecho izquierdo indeterminado
 Capacidad para mover las orejas:
 ninguna ambas sólo derecha sólo izquierda
 Capacidad para enrollar la lengua (en forma de U); sí no
 Inclinación del pulgar (más de 90°): sí no
 Grupo sanguíneo: A B AB O
 Visión de los colores: normal protanopia protanomelia
 deuteranopia deuteranomelia discromatopsia total

HOJA DE RECOGIDA DE DATOS GLOBALES
(A rellenar con los suministrados por el profesor)

Nº individuos..... hombres..... mujeres..... Edad media.....

SISTEMA ABO

	A	B	AB	O
n				
%				

FACTOR Rh

	+	-
n		
%		

ÍNDICE CEFÁLICO

	♂	♀
dolicocéfalos		
mesocéfalos		
braquicéfalos		

DINAMOMETRIA

hombres mano dcha.

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70

hombres mano izquierda

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70

mujeres mano derecha

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70

mujeres mano izquierda

0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70

VISION DE LOS COLORES:

	♂	♀	T
Normal			
Practanopia			
Deuteranopia			
Protanomia			
Deuteranomeia			
Discromatopsia congénita total			

FORMA DE CRUZAR LAS MANOS

	n	D	%	I	%

FORMA DE CRUZAR LOS BRAZOS

	n	D	%	I	%

FORMA DE CRUZAR LAS PIERNAS

	n	D	%	I	%

ENROLLAMIENTO DE LA LENGUA

	n	+	%	-	%

HOJA DE RECOGIDA DE DATOS GLOBALES (Continuación)

ESTATURA		σ^2	φ	T	PESO		σ^2	φ	o
x/145,9					x/35,9				
146/149,9					36/39,9				
150/153,9					40/43,9				
154/157,9					44/47,9				
158/161,9					48/51,9				
162/165,9					52/55,9				
166/169,9					56/59,9				
170/173,9					60/63,9				
174/177,9					64/67,9				
178/181,9					68/71,9				
182/185,9					72/75,9				
186/189,9					76/79,9				
190/193,9					80/83,9				
194/197,9					84/87,9				
198/201,9					88/91,9				
202/					92/95,9				
					96/99,9				
					100/103,9				
					104/x				

De acuerdo con el plan expuesto una vez realizadas todas las observaciones y anotados todos los resultados se recogen las *hojas personales de recogida de datos* y se procesan estos.

Estos datos globales (del conjunto de la clase, o —mejor aún— del conjunto de todas las clases del mismo nivel que siguen la experiencia) se exponen, con los comentarios necesarios, a los alumnos que las recogen en una plantilla apropiada del tipo de la *Hoja de recogida de datos globales* de la página 169 y 170.

Son estos datos los que servirán para un tratamiento estadístico de la variabilidad que se ha venido observando. Para ello es preciso, a mi juicio, que el alumno posea *previamente* algunos conocimientos básicos (conceptos de media, moda, dispersión, etc., etc.) de estadística y, *además*, que se le recuerden tales conceptos —y principalmente también las fórmulas que permiten el cálculo de los más enrevesados— en el mismo protocolo.

De ahí que el protocolo que cierra este capítulo, ESTUDIO BIOESTADÍSTICO DE LA VARIABILIDAD HUMANA (que es uno de los modelos posibles de tratamiento del tema), contenga tanto el protocolo propiamente dicho de los pasos y ejercicios a realizar como un condensado de la teoría (y fórmulas) necesarias para seguirlo.

ESTUDIO BIOESTADÍSTICO DE LA VARIABILIDAD HUMANA. PROTOCOLO PRÁCTICO.

Variables aleatorias continuas

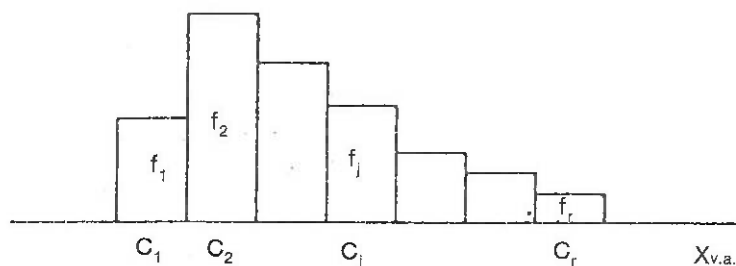
En esta práctica se analizará la variabilidad que presentan las poblaciones humanas en *caracteres cuantitativos*, como la estatura y el peso.

Las variables aleatorias son una cuantificación de las características de los individuos de una población. El valor que presenta una variable aleatoria en un individuo depende de muchos factores, ya sean genéticos, fisiológicos y/o ambientales, muchos de los cuales son incontrolables con los medios de observación actuales, por lo que dichos valores resultan «aleatorios», es decir, no se puede predecir el valor que tomará la variable aleatoria (estatura, peso, etc.) en un individuo concreto. Sin embargo, el comportamiento de la variable aleatoria en el conjunto de una población presenta unas regularidades estadísticas que permiten su caracterización matemática y estudio, pudiéndose comparar, por ejemplo, cómo se distribuyen sus valores en distintas poblaciones. Cuando la variable aleatoria estudiada puede presentar cualquier valor dentro de un intervalo, se trata de una *variable aleatoria continua*. Es el caso del peso y la estatura en las poblaciones humanas.

En la mayor parte de los estudios no se dispone de los datos correspondientes a toda la población considerada, sino que, en general, se dispone de una *muestra* de individuos de la población y, a partir de los valores de la variable aleatoria en ella (valores muestrales), se intenta inferir el comportamiento en toda la población (conociéndose este proceso como *inferencia estadística*).

A partir de los valores muestrales se puede realizar una representación gráfica de cómo se distribuye una variable aleatoria continua en la muestra mediante el diseño de un *histograma de frecuencias*. Para ello se divide el recorrido de la variable aleatoria en intervalos o *clases* que se señalan en el eje de abscisas (correspondiente a la variable aleatoria). Al punto medio de cada clase se le denomina *marca de clase* c_j y se toma como su valor representativo. Se denomina *frecuencia absoluta de la clase* c_j (F_j) al número de valores muestrales pertenecientes a la clase. La *frecuencia relativa de la clase* c_j (f_j) es el cociente F_j/n , donde n es el número total de valores muestrales.

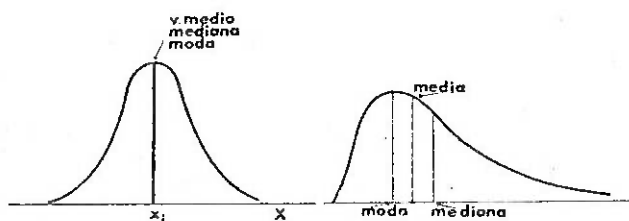
El histograma se diseña de forma que sobre cada clase quede un rectángulo cuya superficie sea precisamente la frecuencia de la clase.



En el caso de las variables aleatorias, si se representase un histograma de frecuencias para infinitos valores de una población y haciendo las clases infinitamente pequeñas, se obtendría una superficie limitada por una curva continua que puede tener distintas formas según la variable aleatoria y la población de que se trate. A este tipo de curva se le conoce como *función de densidad de la distribución de probabilidad* que se puede estudiar matemáticamente. La superficie bajo la curva sobre un determinado intervalo indica la probabilidad de que un individuo de la población tomado al azar presente un valor de la variable aleatoria perteneciente a dicho intervalo.

Para caracterizar y manejar estas curvas se utilizan unos valores llamados *parámetros poblacionales* que resumen la posición y forma de la curva. La *medida poblacional* es el valor de la variable en la población. La *mediana poblacional* es el valor de la variable aleatoria que divide a la superficie encerrada en la curva en dos partes iguales. La *moda poblacional* es el valor de la variable aleatoria correspondiente al máximo de la curva.

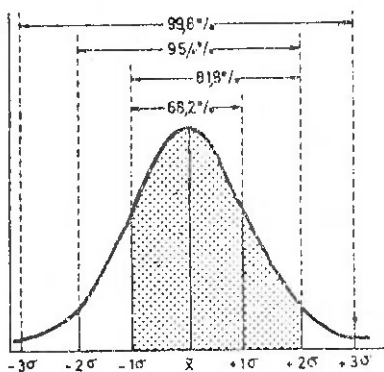
La *varianza poblacional* σ^2 es un valor que expresa el grado de dispersión de la superficie bajo la curva en torno a la media. En la práctica suele utilizarse más la raíz cuadrada de este parámetro, o, que se denomina *desviación típica poblacional*, ya que se trata de una medida de la misma dimensión que la variable aleatoria considerada.



La distribución normal y sus parámetros

La curva que sigue muchas variables aleatorias tiene forma de campana y se conoce como *distribución normal o de Laplace-Gauss* (campana de Gauss). En la figura inferior derecha la media, la moda y la mediana coinciden en un mismo punto. Una misma variable aleatoria de este tipo presentará distintas medias y desviaciones típicas en las distintas poblaciones estudiadas. Asimismo una variable aleatoria puede presentar la misma media en varias poblaciones estudiadas. Asimismo una variable aleatoria puede presentar la misma media en varias poblaciones siendo distintas las correspondientes desviaciones típicas.

Esta distribución ha sido estudiada matemáticamente y se puede relacionar la probabilidad de un intervalo con la desviación típica sea cual sea su valor:



En la figura anterior, sea cual sea m y σ , el 68,2 % de los individuos de la población presenta valores de la variable aleatoria (con distribución normal) comprendidos entre $m - \sigma$ y $m + \sigma$. El 95,4 % entre $m - 2\sigma$ y $m + 2\sigma$. El área punteada correspondería al 81,8 % (95,4/2 + 68,2/2), o sea a los valores de la variable aleatoria comprendidos entre $m - \sigma$ y $m + 2\sigma$.

Los parámetros poblacionales mencionados, generalmente no se conocen y deben estimarse a partir de una muestra de individuos poblacionales. Así, dada una colección de n valores muestrales de una variable aleatoria X :

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$$

se define la *media muestral* mediante la expresión:

$$\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Si sólo se tienen en cuenta los datos de las marcas de clase y sus frecuencias puede definirse:

$$\bar{X}'_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r F_j \cdot c_j$$

siendo F_j la frecuencia absoluta de la clase c_j .

La *mediana muestral* considerando clases se define:

$$\frac{c_r - c_l}{2} + c_l$$

Y la *moda muestral* será la marca c_l cuya clase presente mayor frecuencia.

Análogamente se define la *desviación típica muestral*:

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_n)^2}$$

que se puede simplificar:

$$S_n = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2\right) - (\bar{X}_n)^2}$$

Y considerando las marcas de clase:

$$S'_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j (c_j - \bar{X}'_n)^2}$$

Cálculo de los parámetros poblacionales

Se hallarán los parámetros considerados para la estatura, peso, fuerza de presión de la mano derecha y fuerza de presión de la mano izquierda. Para cada uno de ellos consideraremos 3 casos: hombres, mujeres y el conjunto de ambos.

Teniendo en cuenta que hemos agrupado los resultados por clases, se rellenarán las tablas correspondientes en cada uno de los tres casos de los 4 caracteres. A continuación se adjunta un modelo de tabla que nos facilita la realización de estos cálculos.

Posteriormente se obtendrán los histogramas y las gráficas de distribución de la estatura, peso y fuerza de presión en ambas manos. Para ello representaremos la variable aleatoria en abscisas y las frecuencias relativas en ordenadas. En el mismo papel se realizarán los histogramas y gráficas para hombres, mujeres y el conjunto de ambos en el caso de la estatura. Se hará lo mismo para el peso y para la fuerza manual en hojas aparte.

Una vez realizados los cálculos se interpretarán los resultados obtenidos.

Correlación lineal entre caracteres cuantitativos

Se puede estudiar conjuntamente el comportamiento de dos variables aleatorias en una población, de manera que, siguiendo un razonamiento análogo al descrito para una variable aleatoria, se considere la distribución de probabilidad conjunta.

Variable. Aleatoria clases	marca de clase c_j	frecuencia absoluta F_j	frecuencia relativa $f_j = F_j / n$	$F_j x_j$	$(x_j - \bar{X}_n)^2$	$F_j(x_j - \bar{X}_n)^2$
		$n = \sum_{j=1}^r F_j =$		$\sum_{j=1}^r F_j x_j =$		$\sum_{j=1}^r F_j(x_j - \bar{X}_n)^2 =$

Media =
 Mediana =
 Moda =
 Desviación típica =

Ello permite establecer si puede admitirse la existencia de algún tipo de dependencia funcional entre las dos variables aleatorias. Una de las posibles dependencias es la lineal:

$$Y = b.X + a$$

Se define un coeficiente que toma valores entre -1 y $+1$, de forma que, cuanto más próximo a 1 sea, mayor es la dependencia lineal entre las variables aleatorias, siendo ésta nula cuando el coeficiente es cero. Este coeficiente se conoce por el nombre de *coeficiente de correlación lineal*. A partir de la muestra y de forma análoga a lo expuesto anteriormente para los parámetros muestrales, se puede estimar dicho coeficiente mediante la expresión:

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left[\left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\left(n \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

Obtención de coeficientes de correlación

Considerando por separado hombres y mujeres, se estudiará 1) la correlación entre el peso y la estatura, 2) entre la fuerza de presión de ambas manos. Previamente, y para cada caso, deberá rellenarse la tabla siguiente.

Coméntense los resultados obtenidos.

Comparación de poblaciones para un carácter cualitativo

Así como los caracteres *cuantitativos* vienen representados por *variables aleatorias continuas*, en el caso de los *caracteres cualitativos* se trata de *variables aleatorias discretas*, es decir, el número de valores que toma la variable es finito o numerable.

Un ejemplo de esto último lo constituye el sistema AB0: la variabilidad se reduce a 4 posibilidades (A, B, AB, 0).

Se utilizarán los resultados obtenidos en el estudio de variabilidad para el sistema AB0 para comparar la muestra de estudiantes considerada con la población española.

Los porcentajes de los grupos AB0 en España, obtenidos a partir del estudio de una muestra muy grande, son los siguientes:

A: 46,142 % B: 8,359 % AB: 3,541 % 0: 41,954 %

	X_i	Y_i	X_i^2	Y_i^2	$X_i Y_i$		X_i	Y_i	X_i^2	Y_i^2	$X_i Y_i$
1						23					
2						24					
3						25					
4						26					
5						27					
6						28					
7						29					
8						30					
9						31					
10						32					
11						33					
12						34					
13						35					
14						.					
15						.					
16						.					
17						.					
18						.					
19						.					
20						.					
21							$\Sigma x_i =$	$\Sigma y_i =$	$\Sigma x_i^2 =$	$\Sigma y_i^2 =$	$\Sigma x_i Y_i =$
22											

En primer lugar se hallarán cuáles serían las frecuencias esperadas para la muestra de estudiantes y después las compararemos con las obtenidas, mediante la prueba de X^2 .

VII. LA GENÉTICA EVOLUTIVA. EJERCICIOS PRÁCTICOS.

Debido a la generalidad que implica el tema se podrían incluir aquí algunos aspectos tratados ya en capítulos anteriores. De hecho cualquier polimorfismo genético detectado en una población natural (el mismo polimorfismo de las larvas de *Pieris brassicae* o el de las hembras de la *Colias crocea*) es susceptible de ser utilizado para ilustrar la enseñanza de la genética evolutiva y conceptos tales como selección, mutación, deriva, etc., etc. Pero no solamente los polimorfismos de las poblaciones naturales pueden ilustrar este aspecto de la genética.

Hay otras facetas, distintas, como por ejemplo todos los experimentos, relativamente sencillos, de competencia intra e interespecífica que pueden establecerse en un laboratorio y que servirán, si son adecuadamente elementales, de ilustración a conceptos tales como frecuencias génicas, selección, presión de selección, etc. Finalmente la utilización de agentes mutágenos (o de productos naturales previamente irradiados) nos permitirá tratar directísimamente de la materia y sus efectos. De modo que los ejercicios prácticos que convienen al enunciado de este capítulo puede hacerse coincidir en alguna de las siguientes tres categorías:

1. **Estudio experimental de polimorfismos de poblaciones naturales.**
2. **Estudio experimental en condiciones de laboratorio de relaciones de competencia.**
3. **Estudio de la mutación.**

1. Estudio experimental de polimorfismos de poblaciones naturales

Las necesidades del curso y de los alumnos, la conveniencia de insistir en un aspecto y no en otros son los factores que deberían guiarnos a la hora de escoger el polimorfismo más adecuado para utilizar como material de trabajo (a veces, sobretudo si se ha insistido prácticamente en otros aspectos de la genética, con proceder a la cría de algunas especies polimórficas, o atender a un polimorfismo que —aunque no necesariamente solo genético— tienda hacia una variación más continua: el tamaño de los frutos (en cacahuete o en cualquier otra especie) el tamaño de estructuras susceptibles de grandes variaciones (como, por ejemplo, las «astas» del ciervo volante) o de tamaño más fijo, etc., etc. Aquí se incluye solamente un ejemplo de polimorfismo en vegetales cuyo estudio implica una cierta manipulación química: el polimorfismo respecto a la cianogénesis que presentan bastantes pratenses comunes; y se incluye también un clásico: el polimorfismo del diseño cromático de la concha del caracol de los huertos y del caracol de bosque *Cepeae hortensis* y *Cepeae nemoralis* que a pesar de ser mucho menos esquemático y más complicado de lo que muchas veces se pretende no deja de ser adecuado.



Figura 45. *Lotus corniculatus*.

Estudio del polimorfismo en torno a la capacidad cianogénica

Algunas especies entre ellas varias papilionáceas pratenses absolutamente comunes, como son el cuernecillo *Lotus corniculatus*, el cuernecillo de mar *Lotus creticus* y el trébol blanco *Trifolium repens*, (véase figura 45) entre otras,

presentan en sus poblaciones naturales una variabilidad consistente en que algunos individuos son capaces de fabricar ácido cianhídrico y otros no. Esta capacidad viene determinada por dos pares de alelos dominantes. En cada loci el alelo dominante favorece la síntesis y el recesivo la impide. Uno de los dominantes organiza, de hecho, la síntesis de los glucósidos cianogénicos, que son realmente los precursores del ácido cianhídrico, mientras que el otro dominante codifica para la síntesis del enzima que hidroliza a tales glucósidos en ácido cianhídrico (tal como puede verse de forma más detallada en el protocolo del alumno. De hecho las plantas no presentan ácido cianhídrico pues aunque contengan glucósidos cianogénicos y enzimas, estos normalmente no se hallan en contacto físico, y sólo lo hacen cuando las hojas son dañadas (vide protocolo del alumno).

Este polimorfismo es muy corriente en las poblaciones naturales y ciertamente en su mantenimiento debe influir —aunque no ha sido estudiado en profundidad— el gánado y en general los herbívoros. Existe además una clina en el sentido de que la altitud (y por tanto la temperatura) comporta un aumento de la frecuencia de individuos cianogénicos.

A continuación se inserta un protocolo para la realización de esta observación de *laboratorio* (a partir de muestras recolectadas en el campo). En dicho protocolo aplicable como se ha dicho a varias especies deberá, pues, sustituirse X por la especie en cuestión y en consecuencia incluir en el apartado 1. una breve descripción de la misma.

ESTUDIO DEL POLIMORFISMO RESPECTO A LA CIANOGENESIS EN X

1. Descripción de la especie

(véase texto pág. 148)

2. Descripción del polimorfismo

Algunos individuos de las poblaciones naturales de X presentan la capacidad de sintetizar ácido cianhídrico. La capacidad de síntesis viene determinada por la presencia de los alelos dominantes de dos loci distintos: Ac del locus 1 y Li del locus 2. El alelo Ac determina la producción de dos glucósidos cianogénicos: la linamarina y la lotoaustralina. El alelo Li determina la producción del enzima linamarasa que es capaz de hidrolizar los glucósidos, en cuya hidrólisis se produce ácido cianhídrico. En circunstancias normales, sin embargo, los glucósidos y la linamarasa no entran en contacto en el interior de la célula —por hallarse en compartimentos separados— y la cianogénesis no se produce. Solamente tiene lugar cuando la planta es dañada.

genotipos incapaces de sintetizar ácido cianhídrico	genotipos capaces de sintetizar ácido cianhídrico
AcAcLiLi AcAcLili AcacLiLi AcacLili	Acaclili AcAclili acacLili acaclili

3. Mantenimiento del polimorfismo

Este polimorfismo está muy extendido y de hecho muchas poblaciones naturales son, realmente, polimórficas. Por lo que se sabe la altitud, influye existiendo una clina de la cianogénesis de forma que ésta decrece en las poblaciones que crecen a menor altitud... Es muy posible, sin embargo, que de hecho, el factor explicativo de esta clina sea la temperatura. También el ganado (y los herbívoros en general) deben tender a ejercer una presión de selección que favorecería la persistencia de las formas cianogénicas.

4. Identificación de las cianogénicas y no cianogénicas:

- A. El picrato sódico en presencia de ácido cianhídrico vira de color, desde el amarillo original hasta rojo ladrillo; esta relación es la que usamos como prueba de identificación. Para ello debemos preparar una *solución de ácido pícrico*: partir de 1,1 g de ácido pícrico en 100 ml de agua mezclados con 1,4 de bicarbonato sódico en otros 100 ml de agua. Con esta solución se empapa *papel de filtro*, el cual una vez seco se corta a tiras (a modo de papel tornasol) que usaremos como indicadores. Para las titulaciones necesitamos, además:
- B. Una *solución de glucósidos cianogénicos* (que se habrá preparado previamente a partir de plantas AcLi o Acli identificables tal como se indica más abajo). Las hojas de estas plantas se calientan unos 10-15 min. a 100° para desnaturalizar al enzima, si lo hubiere, luego se muelen en un mortero, se filtra con lana de vidrio y se conserva la disolución en la nevera) que conserva así su actividad un máximo de 48 horas).

Identificación de los tipos:

- a) se coloca una hoja (por muestra) y en tubos separados se muele con algo de tolueno y agua, en arena. Se tapa a continuación el tubo sujetando el tapón una tira de papel indicador sin que moje en el líquido. Se etiquetan los tubos.
- b) Las muestras así dispuestas se colocan en la estufa a, aproximadamente, 37° C, pero no más.

- c) A las dos horas se hace una primera lectura. Todos aquellos tubos cuyo indicador haya virado a rojo contienen hojas de individuos cianogénicos: AcLi. Se mantienen en la estufa todos los demás.
- d) A las 24 horas se procede a una segunda lectura. Los que en esta segunda lectura han virado a rojo deben clasificarse Acli pues carecen de enzima pero poseen los glucósidos cianogénicos (que de forma espontánea, aunque lenta, se hidrolizan por sí mismos: propiedad que nos sirve de diagnóstico).
- e) A todos los restantes tubos (los que no han virado) se les añade 1/2 cc de solución de glucósidos cianogénicos y se mantienen en la estufa.
- f) Después de otras dos horas se procede a una tercera y última lectura; aquellos tubos e) que han virado los etiquetaremos acLi pues el virado es demostrativo de la presencia de enzima. Los demás son dobles recesivos: acaclili.

5. Anotación de los resultados

Primera lectura:

Segunda lectura:

Tercera lectura:

RESULTADOS GLOBALES
Individuo AcLi
Individuo acLi
Individuo Acli
Individuos acaclili

ESTUDIO DEL POLIMORFISMO DE *CEPAEA NEMORALIS* Y *CEPAEA HORTENSIS*.

Como es sabido ambas especies presentan un acusado polimorfismo que afecta al color y dibujo de la concha. Son caracteres variables el color de fondo, el número y la amplitud de las bandas, así como otras características de rango menor como la pigmentación del reborde que rodea el orificio de entrada. (En la figura 46 están representadas algunas conchas que difieren por el número de bandas, mientras que la figura 47 es una fotografía de un conjunto de conchas procedentes de una única población.

En una primera aproximación al estudio de tal polimorfismo, y así quedó reflejado en las publicaciones de la época, se pretendió que este polimorfismo

—variable de una población a otra— era explicable casi por completo aludiendo a la deriva genética. Estudios posteriores acerca del comportamiento de aves depredadoras de tales moluscos —los tordos entre ellas— permitieron reconocer diferencias en la presión de selección que tales aves ejercen sobre los distintos morfos. De ahí se pasó al otro extremo de pretender zanjar la cuestión atribuyendo a la selección natural la explicación del polimorfismo.

Lo cierto es, sin embargo, que a medida que se han ido estudiando nuevos datos y nuevas poblaciones lejos de confirmarse las antiguas hipótesis —de la deriva genética o de la selección— han ido apareciendo más y más variables en juego: se ha podido ver como el número de genes implicados es relativamente grande, como la selección —indudable— que ejercen las aves depredadoras no es uniforme sino que los distintos morfos pueden ser seleccionados con unos coeficientes de selección fluctuantes en función de la estación climática y en función de las mismas frecuencias génicas. Se han reconocido además, efectos fisiológicos supernumerarios en algunos de los genes que controlan el polimorfismo de tal forma que mientras alguno tiende a conferir una pequeña ventaja selectiva a una determinada temperatura su alelo es más ventajoso a temperaturas ligeramente superiores lo que podría encajar muy bien con la diversidad de microclimas existentes en el interior del «habitat» ocupado por la población.

Además, y por si fuera poco, se ha podido constatar que a gran escala existe una cierta distribución, de segundo orden, podríamos decir, del polimorfismo de modo que las poblaciones de una determinada zona tienden a ser más comunes o parecidas entre sí que con otras de áreas geográficas más alejadas de modo que incluso entre estas últimas y aquellas pueden existir algunos morfos distintos.

En realidad, lejos de complicar «innecesariamente» las cosas y de hacer que *Cepaea* deje de ser el ejemplo paradigmático de selección natural que se pretendió era, todos estos descubrimientos contribuyen a poner en nuestras manos un valioso instrumento o ejemplo real de una situación de polimorfismo y de selección como las miles de situaciones parecidas que realmente deben darse en la naturaleza; situaciones complejas en las que intervienen numerosos factores y en las que el equilibrio depende de interacciones múltiples.

Así las cosas, ¿qué se puede hacer en el laboratorio con *Cepaea*? A mi modo de ver, la respuesta es tan simple como: *estudiar* y *observar*. Se puede, llanamente, aprender a estudiar una situación compleja, lo que quiere decir observar con detenimiento. Aprender a observar en profundidad puede ser realmente una buena lección y a veces —guiados por el meritorio afán de cuantificar y de enseñar a cuantificar los fenómenos— olvidamos que la naturaleza no siempre es tan esquemática como quisiéramos pretender. La lección de *Cepaea* vendría, pues, en este sentido; frente a situaciones como la del melanismo industrial de *Biston betularia* o la de la anemia falciforme y la hemoglobina S que, para ser paradigmáticas, siempre contarán con el handicap de ser demasiado simples.

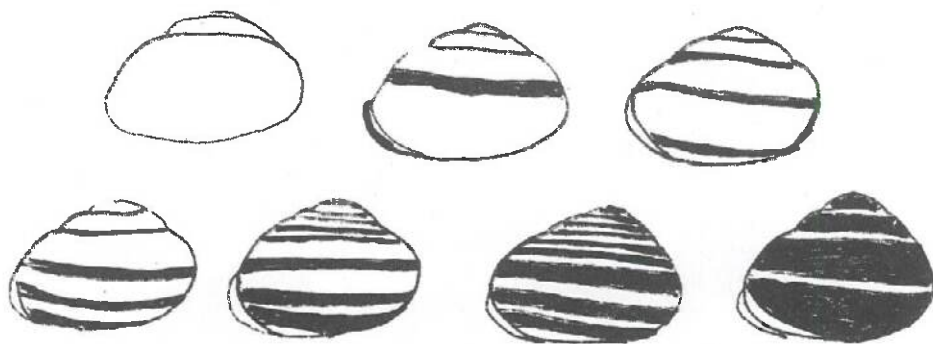


Figura 46. Individuos polimórficos (procedentes de una misma población) de *Cepaea nemoralis*. Aproximadamente a su tamaño natural. Arriba y de izquierda a derecha: sin bandas, con una banda y dos bandas; abajo, y de izquierda a derecha: tres bandas, cuatro bandas, cinco bandas y una forma en la que las bandas superiores e inferiores son tan anchas que se han juntado con un resultado de dos bandas muy anchas.

Por tanto, la situación de *Cepaea* se ofrecerá a los alumnos, como se ha dicho, para que la observen y la estudien. Ciertamente cualquier dato adicional puede ser, sin embargo, muy enriquecedor. No cabe duda que un paseo por el campo, la recogida de individuos en su medio natural, la observación del mismo, la posibilidad de encontrar un yunque o «cementerio» de *Cepaea* y de recoger y observar los restos de conchas serán muy formativos.

Pero incluso en el caso de no poder ofrecer a los alumnos nada de lo anterior, un par de colecciones de conchas de *Cepaea* tomadas de dos poblaciones distintas (colecciones que reflejarán las proporciones de los tipos en cada una de las poblaciones) bastan para presentar este interesante caso de estudio. Se trata de un ejercicio bien simple, y sin embargo, bien recomendable. El guión-protocolo que se incluye más adelante es específico para este tipo de observación y contiene, fundamentalmente, una explicación para el alumno del polimorfismo de *Cepaea* (descripción y mecanismos de mantenimiento).

En realidad el polimorfismo mejor estudiado es el de *C. nemoralis*, aunque *C. hortensis* presenta un tipo de variación muy parecido —si bien sus poblaciones son, por lo general, algo más homogéneas. En la práctica por tanto ambas especies son mucho más frecuentes a partir de una cierta —aunque modesta— altura, y, en general, *C. hortensis* tiene un área de distribución mayor y suele ser bastante más frecuente. Algunos detalles concretos acerca de este polimorfismo, necesarios para su observación no han sido mencionados expresamente porque se contienen en el protocolo del alumno:



Figura 47. Conchas de *Cepaea hortensis* procedentes de una única población.

POLIMORFISMO DE LOS CARACOLES CEPAEA PROTOCOLO PRÁCTICO.

1. Descripción del polimorfismo:

Cepaea nemoralis y *Cepaea hortensis* son dos especies muy próximas de caracol terrestre (en realidad se distinguen por detalles nimios y, externamente, son francamente parecidos) aunque en nuestro país *C. hortensis* es bastante más común que *C. nemoralis*. Ambas especies presentan un complicado polimorfismo genético que afecta al color y al dibujo de su concha. En *Cepaea nemoralis*, por ejemplo (en *C. hortensis* la situación es parecida) el color de fondo puede ser marrón, amarillo o rosado, lo cual es debido a varios alelos de un mismo gen (gen 1). En realidad el gen 1 posee 6 alelos distintos: 1 para marrón, 3 para rosa y 2 para amarillo; marrón domina sobre los distintos alelos rosa, y estos a su vez sobre cualquiera de los amarillo. Como los 3 rosa y los 2 amarillo son, respectivamente, muy parecidos entre sí la situación puede esquematizarse así (en base a 3 alelos):

a ⁺	a ^r	a
marrón	rosa	amarillo

Además, la concha de *Cepaea* puede presentar o puede no presentar bandas oscuras. Este hecho es también hereditario y viene determinado por dos alelos de otro gen (gen 2): «sin bandas» es dominante sobre «con bandas»,

b ⁺	b
----------------	---

El número de estas bandas también puede variar (de 1 a 5); variación que siendo también hereditaria está controlada por los alelos de otros dos genes (genes 3 y 4). También la amplitud de las bandas está sujeta a variación, de forma que pueden ser más amplias o más estrechas; carácter que es también hereditario y controlado por los alelos de un quinto locus (gen 5).

Finalmente también puede variar (pigmentada o no pigmentada) la tonalidad del reborde existente alrededor de la abertura del caparazón.

2. Mantenimiento del polimorfismo

En realidad, ambas especies (más *C. nemoralis* que *C. hortensis*) muestran poblaciones muy variadas, en las que suelen coexistir en todo momento varios tipos. En principio se pensó que esta variación (que es de carácter distinto de una población a otra) era debida fundamentalmente a la *deriva genética*.

Pero pronto se vio que parte de la variación era explicable por *selección natural* y que la situación, en general, no era tan sencilla como podía parecer.

Los agentes responsables de la selección son, en este caso, los tordos (y otras especies de aves) que se alimentan entre otras cosas de caracoles del género *Cepaea*. Estas aves tienen la costumbre de —una vez apresado el caracol— llevarlo hasta un lugar próximo sito en su territorio en el que poseen su propio *yunque*, una piedra sobre la que rompen el caparazón del caracol pudiendo así engullir el contenido del mismo. Estos lugares son identificables por la abundancia de restos de conchas que en ellos se encuentran.

Si las aves se alimentan de algún tipo particular de *Cepaea* podría saberse analizando la proporción de restos de uno y otro tipo presentes alrededor de tales yunques.

Y, efectivamente, tales análisis revelan ciertas preferencias de las aves que dependen del hábitat. De una gran cantidad de tales análisis efectuados en distintos hábitats y a lo largo de distintas épocas del año se obtiene una conclusión, por encima de las demás: los depredadores tienden a comer aquellos caracoles que destacan del medio. Así en bosques con escaso sotobosque o en terrenos abiertos las conchas con bandas representan —para sus portadores— una desventaja; en cambio en los bosques con abundante sotobosque las conchas lisas son las que presentan desventaja.

El color de fondo de la concha también es seleccionado en función del hábitat, pero en este caso influye un *factor estacional*. Durante el invierno y comienzos de primavera las conchas marrones y rosadas están favorecidas y en cambio durante la primavera y el verano son las conchas amarillas las más favorecidas (Hay que tener en cuenta que la concha amarilla cuando está ocupada por el animal toma un color verdoso). Hay que notar sin embargo, que estos estudios han sido llevados a cabo, principalmente, en lugares de Francia y Gran Bretaña en donde el clima es distinto al nuestro. Esta influencia estacional muy probablemente exista también aquí, aunque no ha sido estudiada con

tanta profundidad pero tendrá —probablemente— el mismo ritmo en la montaña, pero no en las zonas bajas de clima más mediterráneo donde el ritmo estará adelantado (recuérdese que los campos verdean desde febrero y que el verano mediterráneo es seco y sin verdor).

Sea como sea este *factor estacional* actuará manteniendo el polimorfismo de la población ya que en una época son unos individuos los seleccionados y en otra época otros distintos.

Además existen otros factores (algo complicados y difíciles de resumir) que hacen que algunos genes de los que controlan el color de la concha tengan además *efectos fisiológicos* de modo que se sabe que algunos de estos genes son ventajosos a temperaturas más bajas y un inconveniente a temperaturas más elevadas mientras que otros alelos suyos se comportan de modo inverso. Dentro de una población (y por supuesto de una población a otra) pueden existir pequeñas diferencias de temperatura que actúan también, de acuerdo con estos *efectos fisiológicos*, manteniendo el polimorfismo.

Por si fuera poco se ha podido comprobar que las aves pueden aprender a reconocer el diseño de concha más abundante de forma que los diseños raros pueden escapar no porque no sean vistos sino porque no son reconocidos como alimento usual. Ciertamente a este tipo de selección se la puede catalogar de *selección dependiente de las frecuencias génicas*. Las clases raras y favorecidas irán incrementando su frecuencia a medida que desaparezcan los individuos más comunes que serán comidos, de tal forma que aquellos cada vez serán menos raros hasta que pueden pasar a convertirse en el tipo común, situación en la que actuará sobre ellos la selección de los depredadores. Como puede verse también este factor actúa manteniendo el polimorfismo.

A gran escala se ha observado también un polimorfismo consistente en que las poblaciones vecinas que habitan un área tienden a tener más similitud entre sí que con otras poblaciones más alejadas. Por el momento se sabe muy poco de los mecanismos que puedan explicar esta distribución.

Estamos pues todavía lejos de poder explicar toda la variación inter e intrapoblacional en *Cepaea*; sin embargo la interacción de factores como la *degradación*, la *variación estacional*, el *control genético múltiple*, las *diferencias fisiológicas*, los *efectos de las frecuencias génicas*, nos proporcionan un buen ejemplo de lo que en la realidad debe ocurrir. Es decir, probablemente *Cepaea* sea un ejemplo más o menos conocido (o intuido) similar a otros muchos casos reales de los que desconocemos total o parcialmente los mecanismos y, a veces, incluso, los efectos.

3. Observación del polimorfismo. Identificación de tipos. Clasificación de las poblaciones.

Con las poblaciones-muestra se trata ahora de proceder en la práctica a identificar los distintos tipos de conchas que existen en ambas poblaciones. Para ello será útil cumplimentar el presente cuadro:

	Nº individuos.	Frecuencia
POBLACIÓN I		
fenotipo 1 color fondo. (descripción bandas, nº y grosor.		
fenotipo 2 (descripción: idem		
fenotipo 3 (idem)		
POBLACIÓN II		
fenotipo 1 color fondo. (descripción bandas, nº y grosor.		
fenotipo 2 (idem)		
fenotipo 3 (idem)		

4. *Comparación de las poblaciones.*

Compárense ahora las frecuencias de las distintas clases en ambas poblaciones. Dígase si pueden considerarse o no homogéneas, y en base a qué criterio. Podremos ayudarnos para ello de una tabla de contingencia.

2. Estudio experimental en condiciones de laboratorio de relaciones de competencia.

La genética de poblaciones ha popularizado, en biología, el término caja de poblaciones para referirse a un cultivo masivo —que puede albergar algunos miles de individuos— en el interior de un recipiente, generalmente paralelepédico, de metacrilato o de otro material, por lo general, transparente (el término se utiliza también a veces, para referirse únicamente al continente).

Hasta cierto punto puede considerarse que una caja de poblaciones repite, aunque de forma bastante simplificada, las condiciones naturales, puesto que permite mantener poblaciones grandes y con imbricación de generaciones.

En estas cajas de poblaciones es posible estudiar la competencia entre dos fenotipos de una misma especie o selección «natural» intraespecífica y también la selección «natural» interespecífica entre formas pertenecientes a especies distintas. Todos los casos que se proponen a continuación están bien estudiados teóricamente (y prácticamente) y existen —por tanto— abundantes referencias bibliográficas que en algunos casos pueden ser de utilidad. En general suele observarse una fluctuación (principalmente durante las primeras generaciones) de las frecuencias iniciales y una cierta selección dependiente de las frecuencias génicas (específicas, en el caso de la selección interespecífica) que parece ser —por lo menos en algunos casos— la responsable del mantenimiento del equilibrio.

Un modelo de procedimiento puede ser el que se indicaba en «Prácticas de Biología».

Utilícense cajas a ser posible grandes (40 x 40 x 60 cms.) y establezca en ellas distintas situaciones; cada grupo de alumnos cuidará y observará una caja de poblaciones.

Situación inicial; funde algunas de las siguientes cajas:

Selección intraespecífica

- a normal *versus* sepia
- normal *versus* ebony
- b normal *versus* white
- normal *versus* yellow

Selección interespecífica

- a *D. melanogaster* *versus* *D. immigrans*
- D. melanogaster* *versus* *D. pseudoobscura*

Inicie tres cajas de cada tipo, con frecuencias génicas: $p = q = 0,5$; $p = 0,2$ y $q = 0,8$; y $p = 0,8$; $q = 0,2$, respectivamente. Inicie la caja con un número elevado de individuos (100 hembras fecundadas de cada tipo en el primer caso, y 40 y 160, respectivamente, en el 2º y 3º).

Renueve un par de veces por semana algún recipiente de alimento de la caja; el número de recipientes debe ser el suficiente para que el ritmo de renovación de éstos permita el desarrollo completo de las *Drosophila*.

Cada 20 o 30 días (pero a intervalos regulares) realice un muestreo de por lo menos 200 individuos, mediante un subcionador (al que para mayor comodidad se conecta con un aspirador); recuéntense los genotipos y calcúlense las frecuencias génicas. Tenga en cuenta que para los caracteres ligados al sexo, las hembras pueden presentar los genotipos:

	A_1A_1	A_1A_2	A_2A_2
con frecuencias	P	H	Q
mientras que los machos son:			
	A_1	o	A_2
con frecuencias	R	o	S

Suponiendo que la población está en equilibrio, en este caso el cálculo de las frecuencias génicas es:

$$p = 1/3 (2P + H + R)$$

Si se desconoce el volumen de la población que albergan las cajas, puede calcularse de la siguiente manera: con el aspirador tome una muestra de unos 200 individuos, etericelos y márkelos, al binocular, con un pequeño punto de color en el tórax, utilizando para ello un pincel de un solo pelo; introdúzcalos de nuevo en la caja. Al cabo de dos horas (para dar tiempo a que alcancen una actividad totalmente normal), vuelva a tomar otra cantidad similar, y cuente cuántos de estos había tomado la primera vez (individuos marcados y recapturados).

El tamaño de la población será:

$$N = \frac{N_1 \times N_2}{N_3}$$

en donde N es el tamaño de la población; N_1 , el número de individuos tomados la primera vez (marcados); N_2 , el número de individuos tomados la segunda vez, y N_3 el número de individuos tomados de nuevo (marcados y recapturados).

De igual modo puede aplicarse una selección *artificial* consciente, eliminando en cada generación una parte, o todos, de los individuos de un cierto fenotipo de forma que se les impida contribuir a la formación de la generación siguiente. En este caso se puede proceder también tal como se indicaba en «Prácticas de Biología»; es decir, si se trata de proceder a seleccionar contra un dominante, o contra un recesivo:

Coloque en un frasco de cultivo 20 individuos (10 machos y 10 hembras) resultado del cruzamiento de una cepa normal por otra sepia; vaya descartando los padres a medida que observe crecimiento; y utilice como progenitores para la siguiente generación 10 machos y 10 hembras vírgenes de tipo normal. En cada generación anote los individuos de ambos genotipos y calcule las frecuencias génicas como en el caso anterior. *(Se trata por tanto de ir eliminando los individuos de fenotipo mutante)*. Es conveniente analizar el máximo posible de generaciones.

Haga exactamente lo mismo con un cruzamiento entre una cepa normal y otra Bar.

En todos los casos los datos se recogerán periódicamente y en el protocolo práctico para los alumnos se incluirán tablas parecidas a estas:

CAJA DE POBLACIONES								
Descripción del modelo de competencia: (normal vs. sepia, etc.)								
Muestras		Clases		Frecuencias				
		Total	Genotipo I	Genotipo II	Genotípicas		Génicas	
					G I	G II	G I	G II
I	(fecha...)							
II	(fecha...)							
III	(fecha...)							
IV	(fecha...)							
V	(fecha...)							

Y además indicaciones para calcular las frecuencias genotípicas (o específicas) y las frecuencias génicas (si procede).

Además se indicará también la conveniencia de representar en una gráfica la evolución de las frecuencias con el tiempo y la de buscar posibles modelos teóricos que puedan explicar esta evolución.

-En «Prácticas de Biología» señalaba junto a estas indicaciones sobre la selección «natural» y artificial inter o intraespecífica la manera de llevar a cabo otro experimento «clásico» con *Drosophila*: el estudio del comportamiento sexual y el llamado aislamiento reproductor (dificultad para aparearse, o para ser aceptado para aparearse) que presentan los machos (o las hembras) de fenotipo (o de especie) diferente. Se trata de otra posibilidad complementaria al tema, que, en todo caso, puede consultarse allí o en cualquier manual de laboratorio de *Drosophila*.

3. Estudio de la mutación

Es evidente que el estudio de la mutación es, por sí solo, de especial interés por un gran número de razones. Aunque fuera tan solo por el actual aumento del riesgo de irradiación al que estamos expuestos principalmente por agentes como las radiaciones gamma, los rayos X o diversos mutágenos químicos; aunque fuera tan solo por este motivo, decía, ya compensaría sobradamente para hacer del estudio de la mutación y de sus consecuencias un apartado diferenciado dentro del estudio de la genética.

Para el profesor, sin embargo, el problema central radica —a mi modo de ver— en cómo demostrar fehacientemente en la práctica tales consecuencias en condiciones de total seguridad para sí y para sus alumnos.

Por el momento las dos vías más frecuentes para conseguirlo son la utilización de *Drosophila* irradiadas con rayos X y la utilización de semillas vegetales irradiadas con rayos gamma.

Por lo que respecta al primer caso, la irradiación de *Drosophila* con rayos X lo más usual suele ser utilizar para ello un aparato de Rayos X de uso clínico (de los de consulta privada, o clínicos). La persona responsable de dicho aparato fácilmente podrá calcular la distancia y el tiempo de irradiación para de acuerdo con nuestras indicaciones conseguir las dosis precisas. Para nuestro caso las dosis más comúnmente empleadas son de 3.000, 4.000 y 5.000 roentgens, respectivamente, para 3 grupos distintos de machos; un cuarto grupo de estos permanecerá sin irradiar y servirá del control. Existe también la posibilidad de irradiar las moscas en el laboratorio si se dispone de un aparato de rayos X especial para laboratorio (existen aparatos especialmente diseñados con este fin, con extremas medidas de seguridad y que pueden adquirirse —entre otros lugares— en los grandes suministradores de material biológico; son aparatos, repitámoslo, especialmente seguros, de pequeño tamaño, y relativamente, bastante económicos).

La técnica de detección de las mutaciones se basa en la utilización de una cepa especial de *Drosophila*, la llamada *Müller-5* que presenta marcadores del cromosoma X juntamente con genes que impiden la recombinación del mismo y hacen que se herede en bloque; de modo que —como puede verse en el protocolo del alumno y en la tabla— todas las mutaciones acaecidas en el cromosoma X (y solamente las acaecidas en este) pueden detectarse en los machos de la F_2 .

En la práctica se procederá como sigue: una vez irradiados los machos (para ello los habremos colocado en el interior de unas cápsulas de gelatina de las usadas en farmacia a partir de cada grupo se efectuarán cruzamientos con hembras (vírgenes) Müller-5. De la progenie, la F_1 , se obtendrá por autofecundación, la F_2 (las distintas F_2 , más exactamente) serán las que, una vez eliminados los padres se entregarán a los alumnos para su contaje. Es conveniente que los alumnos sigan en la medida de lo posible todos los pasos previos relacionados con la irradiación y que dispongan para el contaje de algunas F_2 de cada uno de los 4 tipos. El protocolo para los alumnos será del tipo del siguiente:

ESTUDIO Y DETECCIÓN, MEDIANTE EL USO DE LA CEPA MÜLLER-5 DE LAS MUTACIONES PRODUCIDAS EN *D. MELANOGASTER* POR LOS RAYOS X. PROTOCOLO PRÁCTICO.

1. Introducción

Cada día va siendo más larga la lista conocida de sustancias mutágenas, es decir, que inducen mutaciones del material hereditario con el consiguiente peligro sobre el propio organismo (mutantes cancerígenos) o sobre su descendencia (gametos afectados que producen desarrollo defectuoso o letalidad). Entre los mutágenos más importantes, por la duración de sus efectos, o por los riesgos de su utilización o fabricación se cuentan las radiaciones nucleares y ciertos gases tóxicos que se fabrican con fines bélicos. Los rayos X son un importante agente mutágeno, de trascendencia menor, dada su utilización restringida, pero que solamente deberían utilizarse cuando el beneficio terapéutico o profiláctico esperado es razonablemente mayor que el riesgo que comporta su uso. Esta práctica consiste en la detección y cálculo de la frecuencia de las mutaciones inducidas en el cromosoma X de *D. melanogaster* como consecuencia de la exposición de dichas moscas a los rayos X. Se averigua solamente la presencia de mutaciones inducidas en el cromosoma X porque, debido al estado hemizigótico de los machos, son más fáciles de detectar. Para su detección se efectúan cruzamientos de las moscas irradiadas con otras portadoras de cromosomas X llamados «Müller-5» (cepa Müller-5), que presentan el gen *Bar*, y el *white apricot*, e inversiones que impiden la recombinación con otros X.

Las moscas que vamos a utilizar proceden de un cruzamiento entre machos irradiados con rayos X y hembras Müller-5. Las F_2 , generación que debe analizarse, proceden de una F_1 , que, en cada caso, se autofecundó.

Los machos irradiados pertenecen a cuatro categorías:

- I. machos irradiados con una dosis de 3.000 r
- II. machos irradiados con una dosis de 4.000 r
- III. machos irradiados con una dosis de 5.000 r
- IV. machos no irradiados. Control.

2. Recogida de datos

Cada grupo de alumnos dispone de unos 10 tubos de F_2 del tipo I, 10 del tipo II, 10 del tipo III y 10 del tipo IV. Estos tubos de F_2 contienen, cada uno, la proge-
nie de *una hembra* de la F_1 (el protocolo contiene una reproducción del esque-
ma de la tabla. Los datos se tabularán según el siguiente cuadro:

Cuadro de la F_2

	machos normales	machos Muller-5	machos con mut. morfol.	conclusión
tubo nº 1				
tubo nº 2				
tubo nº 3				
tubo nº 4				
tubo nº 5				
tubo nº 6				

Se empleará un cuadro para cada uno de los cuatro tipos (I, II, III y IV) de machos utilizados.

3. Frecuencia de mutación

Se representarán las frecuencias de letales, semiletales, y mutantes fenotí-
picos observados, a las distintas dosis. Constrúyase una gráfica de la frecuen-
cia de mutación en función de la dosis empleada.

Utilización de semillas irradiadas

El otro método de estudio se basa en la utilización de semillas vegetales pre-
viamente irradiadas.

Diversas casas comerciales ofrecen en su catálogo semillas irradiadas con
radiaciones gamma. Las principales especies de las que pueden obtenerse
semillas así tratadas son: tomate, avena, maíz, trigo, guisante, girasol, judía...

Este material resulta muy adecuado en primer lugar porque tales semillas
irradiadas no son en absoluto radioactivas y pueden manejarse con toda segu-

ridad. En segundo lugar porque entre las semillas ofrecidas hay un abanico muy amplio de dosis recibidas —desde 5 a 100 Krad de radiación—, de forma que puede estudiarse muy bien el efecto dosis/frecuencia de mutación.

En tercer lugar porque permiten cálculos cuantitativos simples e inmediatos. Puestas a germinar las semillas pueden observarse muy directamente la letalidad de la radiación por el cálculo de la frecuencia de germinación en relación con la dosis (los resultados son espectaculares).

En cuarto lugar porque permiten observar anomalías citogenéticas (entre ellas: deleciones, inversiones, cromosomas dicéntricos, acéntricos, micronúcleos en telofase, etc., etc.) producidas por la radiación.

También porque permite observar anomalías morfológicas en la plántula.

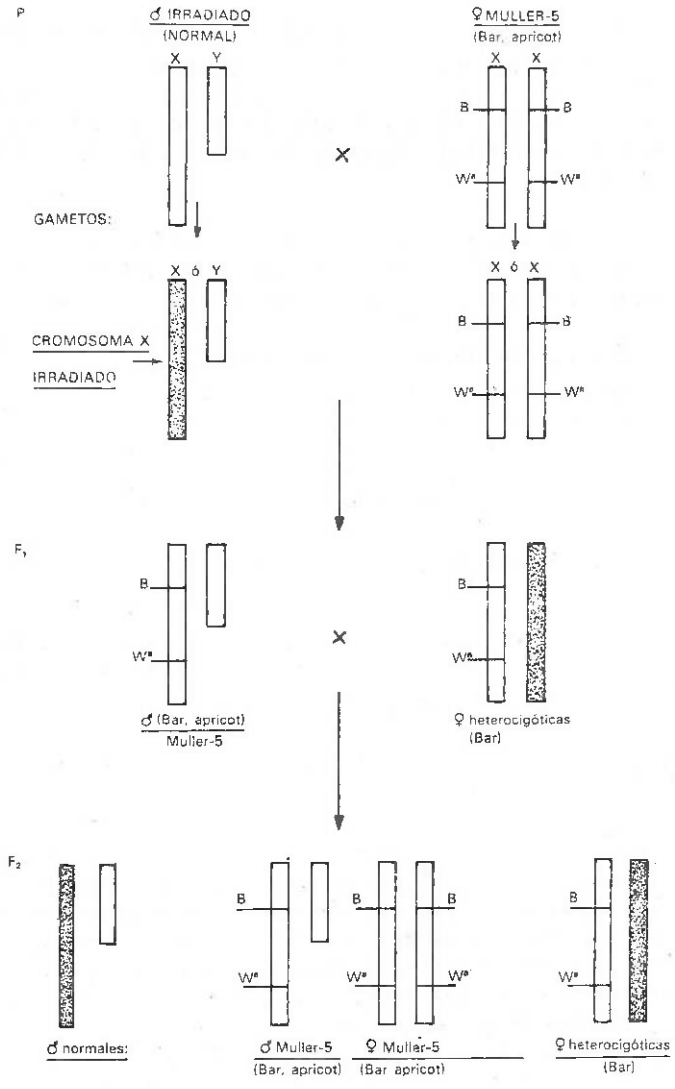
Y además porque es un material de uso inmediato (sin apenas manipulación al cabo de unas 2/3 semanas de puestas a germinar ofrecen resultados) relativamente «económico». Aunque resulta lo menos fácil de aplicar, por el tiempo que implica, estas semillas pueden cultivarse hasta la fase adulta de modo que en las plantas adultas pueden observarse las anomalías producidas por la irradiación (entre estas anomalías las más frecuentes suelen ser el albinismo, la variegación y el enanismo).

Una vez recibidas las semillas se colocarán a germinar en cápsulas de Petri convenientemente etiquetadas de acuerdo con las dosis de radiación recibidas. A las 2/3 semanas puede iniciarse el trabajo, con un protocolo para el alumno, suponiendo que se manejen semillas control y semillas irradiadas con 5, 10, 25, 50 y 100 Krad, del tipo del siguiente:

1. ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LOS RAYOS EN SEMILLAS IRRADIADAS DE TOMATE. PROTOCOLO PRÁCTICO.

Ciertas sustancias químicas, y las radiaciones ionizantes como son los rayos gamma o los rayos X producen mutaciones en el material hereditario. Estas mutaciones son, por lo general, deletéreas (de efectos perniciosos) y pueden detectarse por las anomalías que ocasionan a varios niveles: cromosómico, fisiológico, morfológico, etc. o simplemente cuando en efecto es drástico por la letalidad producida. En esta práctica estudiaremos los efectos producidos por las radiaciones gamma sobre semillas de tomate en distintas dosis:

el lote I de semillas fue irradiado con 5 Krad
el lote II de semillas fue irradiado con 10 Krad
el lote III de semillas fue irradiado con 25 Krad
el lote IV de semillas fue irradiado con 50 Krad
el lote V de semillas fue irradiado con 100 Krad
el lote VI no fue irradiado. Servirá de control.



- 1° Si el X es portador de alguna mutación letal no nacerán.
- 2° Si lo es de una semiletal nacerán sólo la mitad ó menos.
- 3° Si es portador de algún mutante recesivo de expresión morfológica, éste se manifestará.
- 4° Si no ha sufrido daño habrá tantos normales como Muller-5.

TABLA. Estudio de las mutaciones inducidas en *Drosophila melanogaster*, mediante la utilización de la cepa Müller-5; esquema del cruzamiento y representación gráfica de la transmisión hereditaria del cromosoma X irradiado.

2. ESTUDIO DE LA LETALIDAD EN FUNCIÓN DE LA TASA DE GERMINACIÓN.

Si observamos que en un grupo de semillas irradiadas la proporción de las que germinan con respecto al total es menor que en el control podemos concluir que la radiación ha afectado esta tasa de germinación (la ha afectado porque ha matado o ha hecho inviables algunos embriones). Esto es precisamente lo que vamos a hacer.

Se trata de representarlo gráficamente: en abcisas representaremos las dosis y en ordenadas el logaritmo del cociente de la germinabilidad obtenida en cada dosis con respecto a la germinabilidad del control,

si llamamos g_i a la germinabilidad relativa del lote i ,

$$g_i = \log \frac{\text{germinabilidad lote } i}{\text{germinabilidad control}}$$

$$(\text{germinabilidad} = \frac{\text{n}^\circ \text{ semillas germinadas}}{\text{n}^\circ \text{ semillas puestas a germinar}})$$

Muchas veces se utiliza el parámetro DL_{50} o *dosis de radiación que disminuye la germinabilidad al 50 %* (con respecto al control). A partir de la gráfica realizada anteriormente se puede obtener este DL_{50} .

3. ESTUDIO DE LOS EFECTOS CITOGENÉTICOS.

La letalidad de las mutaciones viene producida porque afectan al material hereditario causándole anomalías (mutaciones) que pueden ser génicas o cromosómicas. Las anomalías cromosómicas pueden visualizarse al microscopio, de tal modo que si cortamos una raicilla —como si fuéramos a estudiar la mitosis— podremos ver en las células en división los cromosomas, entre los cuales —y sobre todo entre las raicillas de las plántulas que han recibido mayor radiación— no es raro encontrar roturas cromosómicas que causan deleciones, inversiones y traslocaciones; cromosomas dicéntricos (con dos centrómeros) que dan lugar a «puentes» durante la anafase; cromosomas acéntricos, que no se orientan durante la anafase y pueden dar lugar a «micronúcleos» en la telofase, etc.

Son precisamente estas anomalías las responsables de muchos de estos embriones sean inviables. (Aquí se incluirá un protocolo —idéntico al de la mitosis— para obtener preparaciones temporales en squash de los cortes transversales de las raicillas).

Observación al microscopio. Se observará al microscopio y se consultará con el profesor todas las supuestas anomalías cromosómicas que se observan. Se dibujarán y anotarán.

4.° ESTUDIO DE LOS EFECTOS MORFOLÓGICOS.

Una vez las plántulas crecidas (al cabo de unos días de efectuados los anteriores apartados) para lo cual se habrán colocado las semillas germinadas en tiestos apropiados se observará su aspecto y se anotará cualquier diferencia morfológica (de color, de vigor, etc., etc.) que se observe entre las plántulas procedentes de las semillas control y las originadas a partir de semillas irradiadas. Además se anotará la frecuencia de anomalías en función de la dosis de radiación recibida.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, G.E.C. (1971), *The life history and genetics of Coprinus lagopus*. Philip Harris Biol. Ltd. Avon.
- de AZEVEDO, J.L. y S.O.P. da COSTA (1973). *Exercícios práticos de Genética*. Companhia Editora Nacional, São Paulo.
- BABCOCK, E.B. y J.L. COLLINS (1968). *Genetics Laboratory Manual*. Dubuque. Iowa.
- CERDA, E. y S. TORRES (1979) *Biosíntesis de carotenos en Phycomices*, en «Avances de la Bioquímica en España». Fundación Juan March. Madrid.
- CUELLO, J. y otros (1978) *Prácticas de Biología*. Fontalba. Barcelona.
- CUELLO, J. (1980) *Materiales acerca... de recursos didácticos para la enseñanza de la biología...* Revista de Bachillerato, nº 15, p. 68.
- DARLINGTON, C.D. y A.D. BRADSHAW. (1963) *Teaching genetics in School and University*. Oliver and Boyd. Edimburgo.
- DARLINGTON, C.D. y L.P. LA COUR (1966). *The handling of chromosomes*. Londres.
- DELBRÜRH, M. y E. CERDA (1977) «*El comportamiento de Phycomices*», en «Genética microbiana». Alhambra. Madrid.
- DEMEREK, M. y B.P. KAUFMANN (1963) *Drosophila guide*. Carnegie Institution. Washington.
- DIXON, A. (1977) *Useful adresses for Biologists*. The Association for Science Education. Londres.
- GARDINER, B.O.C. (1977). *The Large white Butterfly*. Philip Harris Biological Ltd. Avon.
- GARDNER, E.J. (1962) *Genetics. Laboratory Exercices*. Burgess Publis. Comp. Minneapolis.
- HARRIS, R.H. (1962) *Experiments in Genetics*. Burgess Publ. Comp. Minneapolis.
- HASKELL, G. Y.A.B. WILLS (1968) *Primer of chromosome practice*. Oliver and Boyd. Edimburgo.
- HASKINS, P. (1977) *Using Tribolium for Practical Genetics*. Philip Harris Biological Ltd. Avon.
- HAWK, J.A. y otros (1976) *Demonstrating mitosis and meiosis*. The American Biology Teacher 38 (2): 105.

- HAWK, J.A. y otros (1980) *Teaching Principles of Linkage and Gene Mapping with the Tomato* en *The American Biology Teacher*, 42:1.
- HEAD, J.J. (1975) *Student's collection of electron micrographs*. Arnold. Londres.
- HERZKOWITZ, I.H. (1960). *Study guide and workbook in genetics*. New York.
- HOSTE, R. (1968) *The use of tribolium beetles for class practical work in Genetics*, en *Journal of Biological Education* 2 (4): 365-372.
- HURRY, S.W. (1975) *The microstructure of cells*. Open University. Londres.
- ISHIHARA, S. *Test for colour blindness* («tablas de Ishihara») Kanehara Shupan. Co. Ltd. Tokyo.
- JOUBE DE LA BARREDA, N. (1974) *Genética: ejercicios de laboratorio*. E.T.S.I. Agrónomos, Univ. Politécnica. Madrid (ed. ciclostil.).
- MERTENS, T.R. (1971) *Teaching Mendel's Second Law*, en *Journal of Heredity* 62 (1): 48.
- MIRALLES, K. (1977) *La herencia en el hombre*. Alhambra. Madrid.
- MOREL, P. (1971) *La antropología física*. Eudeba, Buenos Aires.
- NEUFFER, M.G. y otros (1968) *The mutants of maize*. Crop Science Society of America. New York.
- NUEZ, F. (1975) *Prácticas de citogenética y mejora genética*. E.T.S.I. Agrónomos, Univ. Polit. de Valencia (ed. ciclostil.).
- OLIVIER, G. (1960). *Pratique anthropologique*. Vigot, París.
- SHORROCKS, B. (1972) *Drosophila*. Ginn and Co. Ltd. Londres.
- SOKOLOFF, A. (1966) *The genetics of Tribolium and related species*. Academic Press. New York.
- STANSFIELD, W.D. (1971) *Teoría y problemas de genética*. McGraw-Hill, México.
- STRICKBERGER, M.W. (1962) *Experiments in genetics with Drosophila*. John Wiley and Sons, New York.
- VALLS, A. (1975) *Seroantropología de la población española*, en *Revista de la Universidad Complutense de Madrid* XXIV (97).
- WINCHESTER, A.M. (1968) *Genetics laboratory manual*. Iowa.

ANEXO I

REVISTAS

Las siguientes revistas educativas, la mayoría de las cuales están especializadas en didáctica de la biología suelen albergar en sus páginas artículos acerca de la didáctica de la genética y materias afines:

The American Biology Teacher

Publicación de la National Association of Biology Teachers de EEUU. (11250 Roger Bacon Drive; Virginia, 22090).

Biología

Publicación del Consejo Nacional para la enseñanza de la Biología de México. (Apartado Postal 14 - 740 México-14 D.F.).

Journal of Biological Education

Publicación del Institute of Biology de Londres. (41 Queen's Gate. Londres SW7).

School Science Review

Publicación de la Association for Science Education (College Lane, Hartfield, Herts. Gran Bretaña).

Turtrox News

Publicación de la compañía General Biological Inc. (8200 South Hayne Avenue, Chicago, Illinois 60620 USA).

ANEXO II

DIRECCIONES DE INTERÉS

A continuación se relacionan las direcciones postales de algunas entidades y casas comerciales, en el extranjero, en donde proveerse de materiales y organismos para la didáctica de la genética.

Philip Harris Biological Ltd.

Lynn Lane
Shenstone
Staffs WS 14 DEE Gran Bretaña.
Amplísimo catálogo.

T. Gerrard and Co.

Registered Office
Gerrard House
Worthing Road
East Preston
West Sussex BN16 1AS G.B.

Catálogo similar al anterior. Esta firma junto con las dos siguientes forman un único trust comercial.

A. Gallekamp and Co. Ltd.

Registered Office
PO Box 290 Technico House
Christopher Street
London EC29 2ER G.B.

Catálogo similar a los anteriores. A su vez es distribuidora de **Carolina Biological Supply Co.** en el Reino Unido (como también de **Macmillan Science Co. Inc —Turtox Products—**).

Griffin and George Ltd.

Registered Office
285 Ealing Road
Alperton, Wembley
Middlesex HAO IHJ G.B.

Catálogo similar a los anteriores. Distribuida también por Técnicaisa.

Carolina Biological Supply Co.

Burlington
North Carolina
Gastone
Oregon, USA.

Catálogo similar a los anteriores. Distribuido en G.B. por el grupo Gallekamp.

R.N. Baxter

16 Bective Road
Forest Gate
E7 ODP London G.B.
Entomología.

Butterfly Farm Ltd.

Bilsington, Ashford
Kent, G.B.

Especímenes vivos y preservados; huevos, larvas, pupas y adultos de numerosos tipos de insectos. Material entomológico, pósters, etcétera.

Chelsea Physic Garden

Royal Hospital Road
London SW3 4HS G.B.
Plantas.

Chiltern Herb Farms Ltd.

Springwood Enterprises
Brickland Common, Tring
Herts G.B.
Plantas.

Commonwealth Mycological Institute

Ferry Lane
Kew, Surrey TW9 3AF G.B.
Cultivos de hongos.

Cook A.

The Anton, 8 Beachwood Drive,
Eaton, Congleton, Chesire CW12 2NQ G.B.
Anfibios y reptiles.

Culture Centre for Algae and Protozoa

36 Store's Way
Cambridge CB3 0DT G.B.
Cultivos.

E.W. Coombs Ltd.

25 Finsbury Road
Strood
Kent ME2 4SU G.B.
Dietas para aves y pequeños mamíferos.

Department of Genetics

Cold Spring Harbor
Long Island
Drosófilas.

E. Dixon and Sons Ltd.

Crane Mead
Ware
Herts G.B.
Dietas para aves y pequeños mamíferos.

Double -A- Farms Ltd.

Bentham Lane, Earlswood
Warwicks B4 5JN G.B.
Variedad de huevos fecundados.

Drosophila Stock Center I

Dr. E.B. Lewis
Division of Biology
California Institute of Technology
Pasadena, California 91109 USA
Drosófilas

Drosophila Stock Center II

Dr. Iewin I. Oster
Department of Biology
Bowling Green State University
Bowling Green, Ohio 43402 USA
Drosófilas.

Educational and Scientific Plastics

Holmethorpe Avenue
Homethorpe Redill
Surrey G.B.
Modelos en plástico para la enseñanza de la biología.

Earlswood Water Gardens

165 Wood Lane, Earlswood
Warwicks B4 5JN G.B.
Organismos de agua dulce.

Freswater Biological Association

Supply Department, The Ferry House
Far Sawley, Ambleside
Westmoreland LA22 0LP G.B.
Organismos de agua dulce.

Gammaseed

19 Royal Oak Drive, Bishop Wood
Staffs ST19 9AN G.B.
Semillas irradiadas.

Insects International

10 Francis Road
St. Pauls Cray, Orpington
Kent BR5 3LZ G.B.
Entomología.

Larujon Locust Suppliers

c/o Welsh Mountain Zoo.
Colwyn Bay, Noth Wales G.B.
Langostas y saltamontes.

London Bait Co.

Orchard View Farm.
Personage Lane, North Cray
Sidcup, Kent DA14 5EZ G.B.
Invertebrados.

Marine Biological Association of the G.B.

The Laboratory
Citadel Hill
Plymouth G.B.

Especímenes marinos.

Medical Wire and Equipment Co. (Bath) Ltd.

Potley, Corsham
Wilts G.B.

Medios de cultivo para microbiología.

Microbiological Supplies

P.O. Box Tunbridge Wlls.
Kent TN1 1S7 G.B.

Medios de cultivo para microbiología.

Mycological Ref. Lab.

London School of Hygiene and Tropical Medicine
Keppell Street (Gower Street)
London WC1 G.B.

Hongos patógenos.

National Collection of Dairy Organisms

National Institute for Research in Dairying
Shinfield, Reading RG2 9A7 G.B.

Microorganismos.

National Collection of Industrial Bacteria

Torrey Research Station
P.O. Box 31, 135 Abbey Road
Aberdeen AB9 8DG G.B.

Microorganismos.

National Collection of Types Cultures

Central Public Health Laboratory
Colindals Avenue
London NW9 5HT G.B.
Microorganismos

National Collection of Yeast Culture

Brewing Industry Research Foundation
Lytell Ball, Nutfield, Redhill
Surrey RH1 4HY G.B.

Especímenes de levaduras no patógenas.

Northern Media Supply Co. Ltd.

Crosslands Lane, Newport Road
North Cave, Brough
Yorks HU15 2PG

Medios de cultivo para microbiología.

Office pour l'Information Entomologique

B.P. 121
78003 Versailles Cedex Francia
Insectos.

Pilsbury's Ltd.

21 Prior Lane, Edgbaston
Birmingham B5 7UG G.B.

Dietas para aves y pequeños mamíferos.

Practical Plant Genetics

18 Harsford Road
Rustington
Sussex BN16 2QE G.B.

Semillas.

Shandon Southern Products

95/96 Chadwich Road
Ashmoor Industrial State
Runcorn, Cheshire WA7 1PR G.B.

Moluscos.

Ravensden Zoological Co. Ltd.

Hollington, Kimbolton Road
Bedford BF3 1SR G.B.

Especímenes congelados (y vivos).

Type Culture Collection
for **Drosophila** Species
Istituto di Genética
Via S. Epifanio 14
Pavia Italia

INDICE

CAPITULO I. Objetivos y programación de la enseñanza de la genética.	7
Objetivos básicos.	8
Análisis conceptual.	9
Objetivos operativos.	9
Desarrollo conceptual.	10
CAPITULO II. Estudio de la reproducción celular y de los cromosomas.	15
Protocolo práctico de la mitosis.	18
Observación.	18
Protocolo práctico de la meiosis.	20
Protocolo práctico de la observación de cromosomas gigantes.	21
CAPITULO III. Experimentos con microorganismos.	35
<i>Sordaria fimicola</i>	36
<i>Coprinus lagopus</i>	40
Ciclo fisiológico de <i>Coprinus lagopus</i>	41
Experimentos con <i>Phycomices</i>	50
CAPITULO IV. El trabajo experimental con vegetales superiores.	53
Cruzamientos simulados con semillas.	54
	179

Utilización de mazorcas de maíz, preparadas ex-profeso.	58
Cruzamientos con variedades seleccionadas y estudio de cruzamientos preparados de antemano.	65
Estudio de resultados de cruzamientos preparados de antemano en semillas en germinación; observación de caracteres hereditarios en la plántula.	65
Estudio de la segregación en polen.	66
Estudio de la variabilidad continua.	71
CAPITULO V. El trabajo experimental con animales superiores.	79
Los organismos clásicos.	83
<i>Drosophila</i>	85
<i>Tribolium</i>	99
Ratón.	107
Capítulo VI. Estudio experimental de la genética humana.	111
Los resultados obtenibles: un análisis.	112
Protocolos prácticos.	125
CAPITULO VII. La genética evolutiva. Ejercicios prácticos.	147
Estudio experimental de polimorfismos de poblaciones naturales.	148
Estudio experimental en condiciones de laboratorio de relaciones de competencia.	158
Estudio de la mutación.	161
Bibliografía.	169
Anexo I. <i>Revistas</i>	171
Anexo II. <i>Direcciones de interés</i>	173



publicacions
edicions
universitat
de barcelona

