

Evolució Bacteriana 2.0

Josep M. Llorc i Planchadell

Abril de 1994

1. ESPECIFICACIONS GENERALS
2. REQUERIMENTS I INSTAL·LACIÓ
3. DESCRIPCIÓ BIOLÒGICA
 - 3.1. Introducció general
 - 3.2. Característiques del model
 - 3.3. Els gens
 - 3.4. Limitacions del model
4. UTILITZACIÓ DEL PROGRAMA
 - 4.1. Introducció
 - 4.2. L'entorn de treball
 - 4.3. Les finestres d'Evolució bacteriana
 - 4.4. Les finestres de diàleg
 - 4.5. Les finestres de confirmació
 - 4.6. Les finestres de missatges
 - 4.7. El sistema d'ajuda
 - 4.8. Elecció del cromosoma
 - 4.9. La finestra de les soques bacterianes
 - 4.10. La finestra d'informació ambiental
 - 4.11. La finestra d'informació general
 - 4.12. La línia d'estat
 - 4.13. La barra de menús i les seves opcions
 - 4.14. La finestra de demografia
 - 4.15. La finestra de fòssils
 - 4.16. La finestra de genealogia
 - 4.17. La finestra de mutacions
 - 4.18. La representació gràfica de la població
5. GUIA DEL PROFESSOR
 - 5.1. Introducció
 - 5.2. Continguts
 - 5.3. Objectius
 - 5.4. Activitats d'ensenyament-aprenentatge
 - 5.5. Criteris i activitats per a l'avaluació
 - 5.6. Temporització
 - 5.7. Orientacions per a la intervenció pedagògica
6. GUIONS DE L'ALUMNE
 - 6.1. Creixement d'una població bacteriana
 - 6.2. Les mutacions
 - 6.3. Evolució per selecció natural
 - 6.4. Reproducció sexual i velocitat evolutiva
 - 6.5. Antibiótics i resistència
 - 6.6. Efectes de la llum ultraviolada sobre els éssers vius
7. AVALUACIÓ DEL PROGRAMA
 - 7.1. Resultats obtinguts per l'autor
 - 7.2. On adreçar els dubtes i suggeriments

8. BIBLIOGRAFIA

1. ESPECIFICACIONS GENERALS

1.1. Nom del programa

Evolució bacteriana 2.0.

1.2. Autor

Josep M. Llort i Planchadell

1.3. Àrea o assignatura

Ciències experimentals: Biologia

1.4. Nivell educatiu

COU

Batxillerat

1.5. Inserció curricular

Genètica bacteriana

Evolució

1.6. Relació dels fitxers del programa

El programa Evolució bacteriana 2.0. està format pels fitxers següents:

EVOBAC2.EXE: fitxer executable del programa.

E2AJUDA.HLP: fitxer que conté la informació del sistema d'ajuda.

A més, en el cas que desem alguna simulació per poder continuar-la posteriorment, això es farà en un fitxer amb el nom lliurement triat per l'usuari. L'extensió per defecte d'aquests fitxers és EVB.

2. REQUERIMENTS I INSTAL·LACIÓ

2.1. Requeriments de maquinari

Ordinador IBM PC, XT, AT o compatible, amb 512 Kb de memòria RAM i placa gràfica CGA, EGA o VGA.

Per tal de treure el màxim pròfit d'Evolució bacteriana, és important que disposeu d'un monitor en color.

Podeu instal·lar el programa al disc dur o bé executar-lo directament des del disquet.

Encara que podeu controlar totalment el programa a través del teclat, també podeu utilitzar un ratolí del tipus Microsoft compatible.

2.2. Requeriments de programari

Sistema operatiu MS-DOS versió 3.0. o posterior.

2.3. Instal·lació del programa

Execució del programa des del disquet

El fitxer executable d'Evolució bacteriana 2.0. és el programa Evobac2.exe. Per tant, per executar Evolució bacteriana des del disquet, heu de situar-vos al directori del disquet, teclejar Evobac2 i prémer retorn.

Instal·lació del programa al disc dur

El programa es distribueix en un disquet de 5 1/4 polzades i baixa densitat. La instal·lació del programa al disc dur del vostre ordinador és automàtica. Introduïu el disquet a la unitat de 5 1/4 del vostre ordinador, activeu aquesta unitat (donant l'ordre A: o B:), teclegeu

INSTAL ↵

i seguiu les instruccions que us donarà el programa instal·lador.

Execució del programa des del disc dur

Només cal entrar al directori corresponent i cridar el programa Evobac2.exe. El programa instal·lador crea l'arxiu EVOBAC.BAT al directori C:\BATS que permet també accedir al programa.

3. DESCRIPCIÓ BIOLÒGICA

3.1. Introducció general

Evolució bacteriana és una simulació biològica pensada amb finalitat educativa. Amb la utilització d'aquest programa, seguint els guions didàctics que l'acompanyen, volem facilitar l'aprenentatge significatiu de conceptes com la capacitat reproductora dels éssers vius, l'origen i l'aleatorietat de les mutacions, l'evolució per selecció natural, l'adquisició de resistència als antibiòtics o els efectes biològics de la llum ultraviolada.

La forma més normal de reproducció entre els bacteris és la divisió cel·lular simple, amb la qual una cèl·lula mare es converteix en dues cèl·lules filles. Amb la repetició d'aquest procés de reproducció asexual, un sol bacteri origina un clon o soca de descendents. Totes les cèl·lules de la soca són genèticament idèntiques entre elles i respecte al seu avantpassat comú.

Algunes vegades un bacteri pateix una mutació, un canvi accidental en la seva informació genètica. Aquest bacteri donarà lloc, per divisions successives, a un nou clon de cèl·lules genèticament idèntiques entre elles, però diferents de les altres soques.

Un altre fenomen que pot produir un nou clon és la conjugació, una forma de sexualitat bacteriana. Durant la conjugació dues cèl·lules entren en contacte; una d'elles rep material genètic de l'altra i es produeix una recombinació que originarà un cromosoma mixt.

En aquest programa no veiem els bacteris individuals, sinó que visualitzem les soques existents a la població. Cada soca és representada a la pantalla pel seu nom, pel nombre de bacteris que la formen i pel seu cromosoma, indicant l'estat dels seus gens mitjançant un codi de colors.

Els bacteris viuen en un medi ambient determinat amb el qual interaccionen contínuament. Aquesta interacció inclou la captura de nutrients i el contacte amb antibiòtics, radiacions o substàncies tòxiques.

En el programa Evolució bacteriana les cèl·lules viuen en un ambient artificial que l'usuari pot modificar. Aquest ambient artificial inclou nutrients variats, radiació ultraviolada i diversos antibiòtics. La interacció dels bacteris amb aquest ambient es realitza en funció de les seves característiques genètiques, de manera que les soques millor adaptades es multipliquen i les pitjor adaptades es redueixen i desapareixen.

3.2. Característiques del model

Els éssers vius, incloent-hi els "senzills" bacteris, constitueixen realitats enormement complexes. Si voleu simular aquesta realitat és totalment imprescindible simplificar-la i crear un model que la representi.

Les principals característiques del model utilitzat per construir Evolució bacteriana són les següents:

Temps

Dividim el temps en unitats discretes anomenades cicles. Un cicle correspon aproximadament al temps de generació, o temps que tarda a duplicar-se una població bacteriana en condicions òptimes (Brock 1976). El temps de generació en la majoria dels bacteris varia entre 10 i 60 minuts, essent a *Escherichia coli* d'uns 20 minuts. A Evolució bacteriana un cicle dura fraccions de segon, encara que podeu aturar la simulació entre cicles tantes vegades com vulgueu.

Cromosoma bacterià

Els bacteris d'Evolució bacteriana tenen cromosomes que contenen fins a quinze gens, de localització i funció constant; el nombre exacte de gens és seleccionat per l'usuari. No es té en compte l'existència de plàsmids ni elements genètics transponibles.

Gens

Només poden adoptar tres estats o formes al·lèliques. Per als gens de tactismes aquests estats són "inactiu", "tactisme positiu" i "tactisme negatiu". Els altres gens poden estar en forma "inactiva" i en dues formes actives diferents.

Ambient

El nivell de nutrients i dels altres factors ambientals és constant al principi de cada cicle, encara que podeu modificar aquestes constants. La situació és semblant a la d'un cultiu continu en el qual en cada cicle es renovés el medi de cultiu però es conservessin totes les cèl·lules que viuen en ell.

Nutrició

Els bacteris simulats al programa són organismes heteròtrofs quimiorganòtrofs. Això vol dir que obtenen el carboni de molècules orgàniques i l'energia de reaccions d'oxidació-reducció amb substàncies orgàniques que actuen com a donadors d'electrons (Lehninger 1978).

Concretament aquests bacteris necessiten per viure i reproduir-se aminoàcids, bases nitrogenades i una font d'energia (que també pot ser una d'aquestes dues substàncies). Tots aquests nutrients són directament presents al medi en quantitats que podeu modificar. També es poden obtenir, si es posseeixen els gens necessaris, hidrolitzant proteïnes, àcids nuclèics o polisacàrids.

Evidentment, com més bacteris hi hagi menys nutrients pot aconseguir cada un d'ells. Si el nivell de nutrients per cèl·lula és menor que un determinat llindar, les cèl·lules comencen a morir. Si és més gran que un altre llindar més alt, els bacteris comencen a reproduir-se.

Reproducció

El temps de generació és d'un cicle. Això vol dir que, en condicions òptimes, un bacteri tarda un cicle en créixer i en dividir-se en dos.

Mort

Les cèl·lules només poden morir per inanició, per haver patit una mutació letal o per l'acció d'antibiòtics o de la radiació ultraviolada.

Mutació

El nombre de mutacions de cada cicle es determina aleatòriament. Aquest nombre depèn de la quantitat de cèl·lules i de la radiació ultraviolada present al medi. Els bacteris que experimentaran mutació, el gen que mutarà i el nou valor d'aquest gen també són determinats aleatòriament. Tanmateix, podeu suprimir l'aparició de mutacions modificant una opció del menú.

Conjugació

El nombre de recombinants depèn de la quantitat de cèl·lules. Els dos bacteris recombinants, el punt de trencament del cromosoma i la longitud del segment recombinat són determinats aleatòriament. També podeu suprimir les conjugacions modificant una opció del menú.

3.3. Els gens

En el programa Evolució bacteriana hi ha un total de quinze gens que poden intervenir en la simulació. La selecció dels gens participants la realitzareu directament vosaltres al començament del programa. Tot seguit descriurem breument cada un d'aquests gens:

Síntesi d'ARN

Aquest gen conté la informació necessària per a la síntesi de l'enzim "ARN polimerasa", que realitza la síntesi d'ARN. És imprescindible per a la vida bacteriana, i per això es troba en estat actiu (blau clar) al començament de l'evolució. Les mutacions que canviïn el seu estat a inactiu (color gris) seran letals i provocaran la mort del bacteri que les pateixi.

La forma més freqüent de l'ARN polimerasa bacteriana és sensible a l'antibiòtic rifampicina, que així inhibeix la transcripció en moltes cèl·lules procariotes. Algunes varietats mutants d'aquest gen continuen essent funcionals i deixen de ser sensibles a la rifampicina (Hammond 1980). A Evolució bacteriana hem simulat aquesta forma de resistència amb els mutants de color blau fosc.

Ribosoma 30s

Permet la síntesi de la subunitat menor del ribosoma bacterià (realment formada per diferents proteïnes i ARNr).

Els ribosomes funcionals són imprescindibles per a la vida i, per això, aquest gen també es troba en estat actiu al principi de la simulació. Evidentment les mutacions que canviïn el seu estat a inactiu seran letals.

Els antibiòtics estreptomicina i tetraciclina, entre altres, inactiven la subunitat 30s dels ribosomes bacterians. Algunes mutacions modifiquen aquesta subunitat sense que perdi la seva activitat i es tornen resistents a l'estreptomicina (Hammond 1980). Els mutants blau fosc d'aquest gen simulen aquesta forma de resistència a Evolució bacteriana.

Degradació midó

Aquest gen produeix un enzim amilasa que és excretat, hidrolitza el midó ambiental i obté glucosa. Després, el bacteri pot absorbir i aprofitar aquesta glucosa.

Síntesi d'aminoàcids

Aquest gen permet sintetitzar aminoàcids partint de precursors orgànics.

Degradació proteïnes

Aquest gen produeix enzims proteases que són excretats i permeten hidrolitzar les proteïnes del medi, transformant-les en aminoàcids. Aquests aminoàcids poden ser absorbits i aprofitats per les cèl·lules.

Síntesi de bases nitrogenades

Aquest gen permet sintetitzar purines i pirimidines, les bases nitrogenades dels àcids nucleics, partint de precursors orgànics.

Degradació d'àcids nucleics

Aquest gen produeix enzims nucleases que són excretats, hidrolitzen els àcids nucleics del medi i els converteix en els seus components bàsics. Les bases nitrogenades resultants poden ser absorbides i aprofitades pel bacteri.

Tactisme a la llum UV

Si aquest gen presenta color verd, produeix tactisme positiu a la radiació ultraviolada i si presenta color vermell, produeix tactisme negatiu a aquest tipus de llum.

Tactisme a la glucosa

Aquest gen pot produir tactisme positiu o negatiu a la glucosa.

Tactisme als aminoàcids

Produeix tactisme positiu o negatiu als aminoàcids.

Tactisme a les bases nitrogenades

El producte d'aquest gen ocasiona tactisme positiu o negatiu a les bases nitrogenades.

Resistència al cloramfenicol

Aquest gen produeix l'enzim cloramfenicol acetil transferasa, que acetila el cloramfenicol inactivant-lo (Hammond 1980). El programa té en compte dues formes actives del gen amb diferents eficiències.

Resistència a la penicil·lina

L'expressió d'aquest gen produeix enzims penicil·lases que hidrolitzen l'anell beta-lactàmic de les penicil·lines, inactivant-les (Pumarola 1984). Evolució bacteriana permet dues formes actives d'aquest gen amb eficàcies diferents.

Resistència a la tetraciclina

El producte d'aquest gen bloqueja el transport de tetraciclina a l'interior de la cèl·lula i impedeix l'acció de l'antibiòtic (Hammond 1980). El programa Evolució bacteriana admet dues formes actives d'aquest gen amb diferents eficàcies.

3.4. Limitacions del model

El model seguit per construir Evolució bacteriana simula raonablement bé el creixement d'una població bacteriana i diferents processos ecològics i evolutius, com la competència entre clons o l'evolució per selecció natural. Tanmateix, aquest model té limitacions (moltes d'elles ja esmentades) que el professor ha de tenir en compte per tal d'evitar que els seus alumnes adquireixin conceptes erronis.

El principal d'aquests errors és l'aparent finalisme de l'evolució. Per cada ambient els bacteris simulats evolucionen fins a un estat final de perfecció insuperable. Pel que sabem, això no és el que s'esdevé en l'evolució real. Els éssers vius no evolucionen cap a un ideal distant. Així mateix, tampoc existeix un estat evolutivament perfecte.

Per tant, recomanem al professor que estigui especialment atent a l'aparició d'aquest concepte erroni en els estudiants. Eventualment, pot ser interessant realitzar les activitats descrites en el capítol de superació de preconceptes erronis.

4. UTILITZACIÓ DEL PROGRAMA

4.1. Introducció

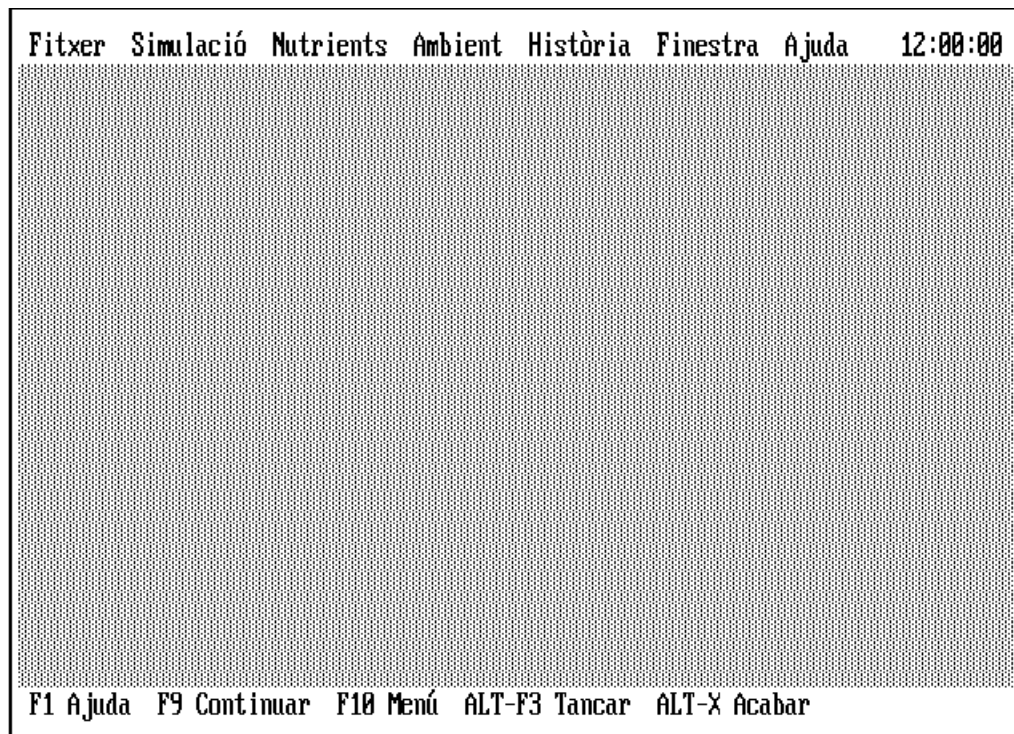
En escriure Evolució bacteriana hem intentat de facilitar la interacció de l'usuari amb el programa. Per aquest motiu el programa conté, entre altres elements, menús desplegables, finestres sobreposades i mòbils, finestres de diàleg, botons, suport del ratolí o un sistema d'ajuda relativa al context.

Evolució bacteriana 2.0. ha estat dissenyat seguint l'estàndard comú d'arquitectura d'usuari (CUA) d'IBM. Els elements del programa (menús, finestres, etc.) es controlen de la mateixa manera que els altres programes que segueixen el mateix estàndard (entre ells, l'editor de Turbo Pascal 6.0.).

La manera més fàcil i ràpida d'interaccionar amb el programa és la utilització d'un ratolí. En qualsevol cas, també podem prescindir d'aquest perifèric i utilitzar el teclat.

4.2. L'entorn de treball

Després d'acabar la presentació, visualitzareu per pantalla l'entorn de treball. En aquest entorn la pantalla es divideix en tres parts principals:



- La barra de menús. Ocupa la línia superior de la pantalla i permet accedir als menús d'Evolució bacteriana.
- La superfície de treball. Comprèn la major part de la pantalla i es troba inicialment coberta per una trama puntejada. A sobre d'ella poden aparèixer finestres de diferents tipus.
- La línia d'estat. Ocupa la línia inferior de la pantalla i recorda algunes de les opcions més importants del programa. A més, en obrir algun menú, informa breument sobre l'opció activa en aquell moment.

4.3. Les finestres d'Evolució bacteriana

Les finestres són regions rectangulars de la superfície de treball que mostren informació a l'usuari o li permeten modificar diferents aspectes de la simulació.

Totes les finestres són formades per aquests elements:



Un rectangle exterior marca els límits de la finestra i la separa de la resta de la superfície de treball. A prop del cantó superior esquerre del rectangle hi ha, a totes les finestres que es puguin tancar, una icona rectangular [■]. La selecció d'aquesta icona amb el botó esquerre del ratolí tanca la finestra (això també es pot fer prement la combinació de tecles alt-f3 o la tecla esc). La línia superior del rectangle també conté el títol de la finestra. Finalment, al seu interior hi ha un text i, segons el

tipus de finestra, pot haver-hi botons o altres tipus de controls.

La superfície de treball pot contenir moltes finestres obertes, però només una d'elles, la finestra activa, permet la interacció amb l'usuari. La finestra activa es mostra ressaltada, com si estigués situada damunt les altres finestres, i envoltada per un marge doble.

El menú de Finestra permet realitzar fàcilment moltes operacions útils amb les finestres: tancar-les, moure-les, ampliar-les, canviar de finestra activa, etc.

Al programa Evolució bacteriana hi ha diverses classes de finestres, cadascuna d'elles especialitzada per una funció específica. Així, tenim les finestres de diàleg, les finestres de confirmació, les finestres de text o les finestres de missatges.

4.4. Les finestres de diàleg

Les finestres de diàleg són finestres que donen informació a l'usuari i li permeten modificar alguns aspectes de la simulació.

L'aspecte d'una finestra de diàleg és semblant al següent:

[.] Aminoàcids

Quantitat

() Nulla

() Escassa

(*) Moderada

() Abundant

() Super abundant

D'acord Cancel·lar

Les finestres de diàleg tenen diverses zones actives. La que hem reproduït a dalt té dos botons i una sèrie de controls tipus ràdio (anomenats així perquè només pot estar activa una de les seves opcions, com les ràdios dels cotxes). La manera més

fàcil de manipular-les és utilitzant el ratolí. Heu de clicar damunt les opcions que trieu i, finalment, seleccionar el botó **D'acord**. El botó **Cancel·lar** tanca la finestra sense alterar la situació inicial.

Si no teniu instal·lat cap ratolí, haureu d'utilitzar el teclat. La tecla tabulador permet canviar de zona activa. Podeu canviar els controls tipus ràdio de la zona activa amb els cursors i la barra espaiadora. Finalment, heu de convertir en zona activa el botó triat i seleccionar-lo prement retorn.

4.5. Les finestres de confirmació

Les finestres de confirmació són una classe de finestres que s'utilitzen per informar-vos que esteu a punt de realitzar alguna acció irreversible (per exemple, sortir del programa) i demanar la vostra conformitat.



Si voleu continuar amb l'acció, heu de seleccionar el botó **Sí** amb el ratolí o bé prémer la tecla s.

Si no voleu realitzar aquesta acció, heu de seleccionar el botó **No** amb el ratolí o prémer la tecla n o bé tancar la finestra.

4.6. Les finestres de missatges

Les finestres de missatges us avisen en cas que hi hagi algun esdeveniment important. Per exemple, mutacions, conjugacions o extincions.



Un cop llegit el missatge, haureu de tancar la finestra. Això ho podeu fer de moltes maneres:

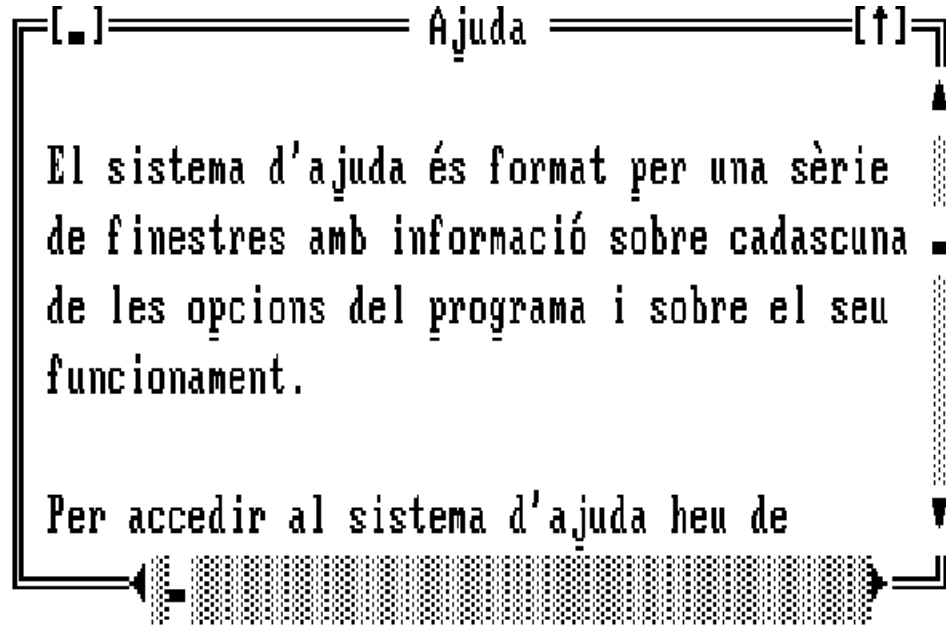
- Prement la tecla retorn (premeu el botó **D'acord**).
- Prement la tecla o (lletra ressaltada del botó **D'acord**).
- Prement simultàniament la combinació de tecles alt-f3.
- Clicant damunt el botó o damunt la icona rectangular que es troba a prop del cantó superior esquerre de la finestra.

4.7. El sistema d'ajuda

Evolució bacteriana 2.0. disposa d'un sistema d'ajuda referida al context, amb referències encreuades i un índex general. Aquest sistema d'ajuda pot ser utilitzat per aprendre el funcionament del programa o, senzillament, per aclarir-ne dubtes o per obtenir-hi informació complementària.

L'accés al sistema d'ajuda es realitza mitjançant la tecla f1, premuda al teclat o seleccionada amb el ratolí a la línia d'estat. També podeu utilitzar el menú **Ajuda** per consultar tres aspectes especialment importants: 1) com utilitzar el sistema d'ajuda, 2) què és Evolució bacteriana i 3) l'índex del sistema d'ajuda.

Després d'obrir una finestra d'ajuda, podeu realitzar algunes accions amb ella:



- Ampliar la finestra. Prement la tecla f5 o clicant amb el ratolí damunt la icona en forma de fletxa que es troba al marc de la finestra, a prop del cantó superior esquerre.
- Moure el text de l'interior de la finestra per llegir-lo tot. Prement les tecles dels cursors o clicant amb el ratolí damunt les fletxes dels marges dret i inferior de la finestra.
- Moure la finestra d'ajuda. Clicant amb el ratolí damunt el cantó superior dret de la finestra i, sense deixar-lo anar, moure'l arrossegant la finestra fins a la posició desitjada.
- Seleccionar una referència encreuada per consultar un aspecte relacionat. Les referències encreuades apareixen dins el text de la finestra, ressaltades amb un color més brillant. Amb el teclat les referències encreuades se seleccionen circularment prement el tabulador i, un cop seleccionada la referència que vulgueu, cal activar-la prement retorn. Amb el ratolí només cal clicar dos cops seguits damunt la referència en qüestió.
- Sortir del sistema d'ajuda tancant la finestra. Prement les tecles esc o alt-f3 o bé clicant damunt la icona quadrada que es troba al marge de la finestra, a prop del cantó superior esquerre.

4.8. Elecció del cromosoma

Després de la presentació, el programa construeix l'entorn de treball i obre la finestra d'elecció de cromosoma. Aquesta finestra permet triar els gens que participaran a la simulació.

Elecció de cromosoma

Cromosoma

☒ Senzill

☐ Nutrició

☐ Antibiòtics

☐ Ambient

☐ Tots els gens

☐ Tria dels gens

D'acord

Els gens corresponents a cada opció són els següents:

- Cromosoma senzill: Síntesi d'ARN, Tactisme a la llum ultraviolada, Tactisme a la glucosa, Tactisme als aminoàcids, Tactisme a les bases nitrogenades i Resistència a la penicil·lina.
- Cromosoma nutrició: Degradació de midó, Degradació de proteïnes, Degradació d'àcids nuclèics, Tactisme a la glucosa, Tactisme als aminoàcids i Tactisme a les bases nitrogenades.
- Cromosoma antibiòtics: Síntesi d'ARN, Ribosoma 30s, Resistència al cloramfenicol, Resistència a la penicil·lina i Resistència a la tetraciclina.
- Cromosoma ambient: Síntesi d'ARN, Ribosoma 30s, Tactisme a la llum ultraviolada, Tactisme a la glucosa, Tactisme als aminoàcids, Tactisme a les bases nitrogenades, Resistència al cloramfenicol, Resistència a la penicil·lina i Resistència a la tetraciclina.
- Tots els gens: Síntesi d'ARN, Ribosoma 30s, Degradació de midó, Síntesi d'aminoàcids, Degradació de proteïnes, Síntesi de bases nitrogenades, Degradació d'àcids nuclèics, Tactisme a la llum ultraviolada, Tactisme a la glucosa, Tactisme als aminoàcids, Tactisme a les bases nitrogenades, Resistència al cloramfenicol, Resistència a la penicil·lina i Resistència a la tetraciclina.
- Tria dels gens: podeu triar els gens directament a la finestra d'elecció de gens. Podeu utilitzar el ratolí o el teclat en les finestres d'elecció de cromosoma i d'elecció de gens. En qualsevol cas, heu de seguir el procés següent:
- Activació del cromosoma o dels gens desitjats: trieu l'opció desitjada amb les

fletxes dels cursors o amb el punter del ratolí i activeu-la (X) prement la barra espaiadora o el botó esquerre del ratolí.

- Finalitzar la selecció: Cliqueu damunt el botó **D'Acord** o bé premeu la tecla retorn.

4.9. La finestra de les soques bacterianes

La finestra de les soques bacterianes és un tipus especial de finestra de text que no podeu tancar, moure o ampliar. Tanmateix, podeu seleccionar-la de diverses maneres (clicant-hi al damunt, prement la combinació de tecles alt-1 o prement f6 fins a activar-la). En el moment en què la finestra estigui seleccionada la veureu ressaltada i amb el marc dibuixat en línia doble.

Aquesta finestra és, sens dubte, un component essencial d'Evolució bacteriana, perquè ens mostra tots els bacteris de la simulació agrupats en soques o clons, formats per cèl·lules genèticament idèntiques.

Soques bacterianes							1
Soca	Població	Sínte. ARN	Tacti. UV.	Tacti. gluco.	Tacti. amino.	Tacti. ba.n.	Resis. penic.
M94B	1.482.531						
R128A	73.967						
R130A	6.277						
M136C	695						

Dins la finestra, les dues línies superiors formen la capçalera. Aquesta capçalera permet situar la informació de la part principal de la finestra, que es troba a sota, separada per una línia horitzontal.

A la part principal de la finestra, cada soca bacteriana ocupa una línia horitzontal. D'esquerra a dreta trobareu la informació següent:

- El nom de la soca. Format pel prefix M (de Mutació) o R (de Recombinació) seguit del número del cicle en el qual es va originar la soca i per una lletra que

permet distingir les mutacions sorgides al mateix cicle.

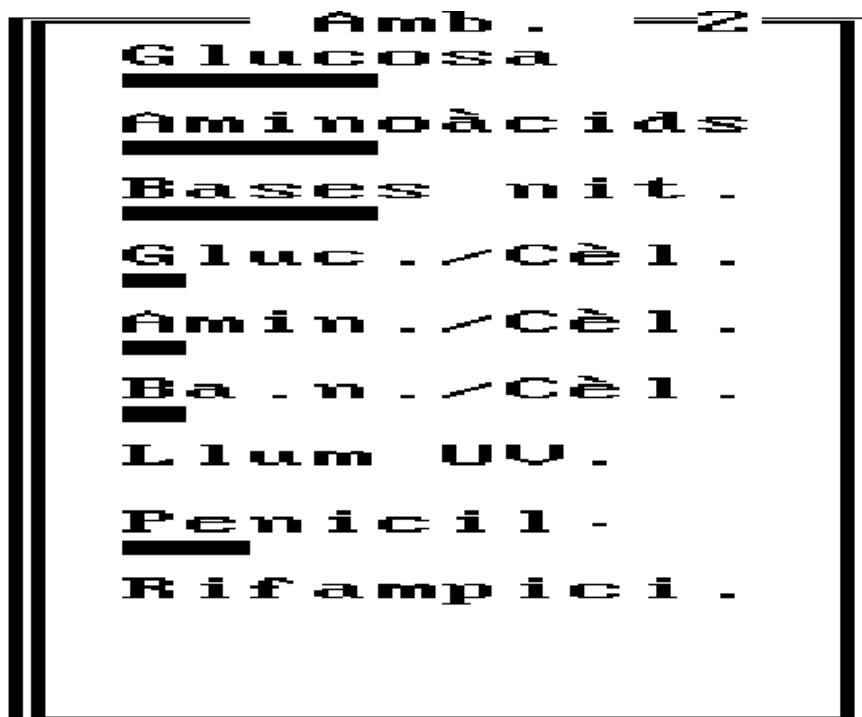
- La població del clon. Indica quants bacteris d'aquesta varietat hi ha actualment a la simulació.
- El cromosoma de la soca. Totes les cèl·lules de la soca són genèticament idèntiques, ja que s'han format per reproducció asexual, i per això totes tenen els mateixos gens. Cada gen ocupa un segment del cromosoma amb la capçalera indicant el seu nom abreuiat i seguint el codi de colors següent:
 - Color gris. Gen inactiu que no produeix cap efecte.
 - Color marró. Gen actiu que produeix l'efecte indicat pel seu nom.
 - Color groc. Una altra forma de gen actiu que pot ser més eficient.
 - Color verd. Gen que provoca tactisme positiu a l'estímul indicat pel seu nom.
 - Color vermell. Gen que provoca tactisme negatiu a l'estímul corresponent.

Si el nombre de clons existents és més gran que el que cap a la finestra de les soques, en podeu veure la resta activant la finestra i prement els cursors amunt i avall.

4.10. La finestra d'informació ambiental

La finestra d'informació ambiental és un altre tipus de finestra de text, semblant a la finestra de les soques, que tampoc podeu tancar, moure o ampliar. Nogensmenys, podeu seleccionar-la prement la combinació de tecles alt-2 o clicant-hi al damunt.

Aquesta finestra, que ocupa l'extrem esquerre de la superfície de treball, també és un component fonamental d'Evolució bacteriana, perquè ens mostra els nivells dels nutrients i altres factors ambientals que intervenen en la simulació.



La magnitud d'aquests factors es representa en forma de gràfics de barres horitzontals sota el seu nom. Com més llarg és el gràfic de barres més alta és la quantitat del factor a l'ambient. Evidentment, si sota un factor no apareix cap barra horitzontal, això vol dir que no n'hi ha gens a l'ambient.

Els nutrients es representen de dues maneres: en forma de quantitat absoluta i en forma de quantitat per cèl·lula. La quantitat absoluta es pot modificar mitjançant el menú Nutrients, mentre la quantitat per cèl·lula depèn també de la població bacteriana total.

Els gràfics de barres es mostren en color, suggerint l'efecte que el factor ambiental té sobre els bacteris. De més a menys desfavorable, aquests colors són vermell, magenta, marró, groc i verd.

Si el nombre de factors ambientals és més gran que el que cap a la finestra, podem veure'n la resta activant la finestra i prement els cursors amunt i avall.

4.11. La finestra d'informació general

La finestra d'informació general es troba situada a la part inferior de la superfície de treball i indica en tot moment les dades fonamentals de la simulació:

- La quantitat de cicles que han passat des que heu començat la simulació.
- La diversitat, o sigui, el nombre de soques diferents que existeixen actualment.

- La població bacteriana total, obtinguda sumant les poblacions actuals de totes les soques.
- El nombre de varietats que formen el registre fòssil.

Informació general				
Cicle	402	8 soques	5.942.138 bacteris	15 fòssils

4.12. La línia d'estat

La línia d'estat ocupa la línia inferior de la pantalla, a sota de la superfície de treball.

La línia d'estat recorda algunes de les opcions més importants del programa. A més, quan obriu algun menú, informa breument sobre l'opció activa en aquell moment.

Les opcions de la línia d'estat es poden activar de dues maneres:

- Prement la tecla indicada al costat de l'opció. Per exemple, la tecla f1 obre el sistema d'ajuda.
- Clicant el botó esquerre del ratolí damunt la zona ocupada per l'opció a la línia d'estat.

4.13. La barra de menús i les seves opcions

Situada a la part superior de la pantalla, la barra de menús permet accedir a tots els menús d'Evolució bacteriana i a les seves opcions.

Hi ha més d'una manera d'obrir un menú d'Evolució bacteriana:

- Amb el ratolí: clicant el botó esquerre del ratolí damunt el nom del menú.

- Amb el teclat: prement la tecla f10, activant el menú desitjat amb les tecles de navegació fletxa dreta i fletxa esquerra i obrint el menú prement la tecla retorn.
- Amb el teclat de manera abreujada: prement simultàniament la tecla alt i la tecla corresponent a la lletra ressaltada del menú. Per exemple, per obrir el menú Nutrients heu de prémer la tecla alt i, sense deixar-la, prémer la lletra N.

Un cop obert el menú, també podeu activar l'opció que vulgueu de les maneres següents:

- Amb el ratolí: clicant el botó esquerre del ratolí damunt el nom de l'opció.
- Amb el teclat: seleccionant l'opció desitjada amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i activant-la prement retorn.
- Amb el teclat de manera abreujada: prement la tecla corresponent a la lletra ressaltada de l'opció.

Algunes opcions del menú es poden seleccionar directament a la línia d'estat o prement tecles especials. És el cas de l'opció **Sortir** del menú **Fitxer**, que s'activa prement la combinació de tecles alt-X.

Les opcions dels menús d'Evolució bacteriana són les següents:

MENÚ FITXER

Conté les opcions:

- **Recuperar.** Permet recuperar una simulació anteriorment enregistrada al disc. Si activeu aquesta opció, s'obrirà una finestra de diàleg que conté una línia d'entrada per al nom del fitxer, una llista amb els fitxers del directori actiu, informació del fitxer seleccionat i els botons **Obrir** i **Cancel·lar**.
- **Desar.** Permet enregistrar al disc la situació actual de la simulació. Si activeu aquesta opció, s'obrirà una finestra de diàleg que permet seleccionar un nom per al fitxer on desareu la simulació.
- **Canviar directori.** Obre una finestra de diàleg que permet canviar el directori actiu. Aquest directori actiu serà el triat per defecte a les opcions **Recuperar** i **Salvar**.
- **Accedir al DOS.** Permet deixar temporalment el programa per realitzar alguna ordre del DOS o, fins i tot, executar un altre programa. Per tornar a Evolució bacteriana heu de teclejar `exit` i prémer la tecla retorn.
- **Tornar a començar.** Permet començar una altra simulació amb els mateixos gens que la simulació actual. En començar una nova simulació es perdrà tota la informació de la simulació actual. Per això, l'opció obre una finestra de confirmació.
- **Canviar cromosoma.** Comença una nova simulació canviant els gens actius. En fer-ho es perdrà tota la informació de la simulació actual. Per això, l'opció activa una finestra de confirmació.
- **Acabar.** Finalitza el treball amb Evolució bacteriana i surt al sistema operatiu. En sortir al DOS es perd tota la informació de la simulació actual. Per això, abans s'obre una finestra de confirmació.

MENÚ SIMULACIÓ

Conté les opcions següents:

- **Continuar.** Aquesta opció, que també podeu seleccionar a la línia d'estat o bé prement directament la tecla f9, fa avançar la simulació a la fase següent del cicle.
- **Condicions.** Amb aquesta opció podeu canviar els principals paràmetres que afecten la simulació. Aquests paràmetres, que poden estar activats o inhibits, són la selecció, la mutació, la conjugació i la reproducció sincronitzada. En seleccionar l'opció s'obrirà una finestra de diàleg amb controls tipus ràdio per als paràmetres que hem esmentat.
Aquesta finestra de diàleg es pot manipular directament amb el ratolí. El control amb el teclat es realitza de la manera següent:
 - Canvi de la zona activa (ressaltada) amb la tecla tabulador.
 - Selecció d'un control de la zona activa amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall.
 - Canvi d'estat del control seleccionat amb la barra espaiadora.
 - Tancar la finestra fent els canvis seleccionats amb les tecles retorn o la tecla O.
 - Tancar la finestra sense fer cap canvi prement la tecla C.
- **Pauses.** Obre una finestra de diàleg amb controls tipus ràdio que permeten controlar el ritme de la simulació triant una de les opcions següents:
 - Sense pauses (la simulació s'executarà de manera continua, fins que activeu el menú).
 - Només missatges (la simulació només s'aturarà quan hagi de mostrar un missatge).
 - Amb pauses (la simulació s'atura després de cada esdeveniment, almenys una vegada en cada cicle).
- **Missatges.** Aquesta opció obre una finestra de diàleg que permet decidir quins missatges es visualitzaran per pantalla quan l'opció **Pauses** d'aquest menú ho permeti. Els tres tipus de missatges, que per defecte es troben activats, són els de mutació, extinció i conjugació.
- **So.** Obre una finestra de diàleg amb controls tipus ràdio que permeten activar o desactivar els efectes sonors durant la simulació.

MENÚ NUTRIENTS

Permet modificar la concentració al medi dels nutrients utilitzables pels bacteris de la simulació. Aquesta modificació es realitza mitjançant finestres de diàleg i es reflecteix immediatament a la finestra d'informació ambiental. El menú conté les opcions següents:

- **Glucosa.** Es pot utilitzar com a font de carboni o d'energia.
- **Midó.** Polisacàrid de reserva típic dels vegetals. Es tracta d'un polímer de glucosa i pot ser utilitzat com a font d'aquesta glucosa pels bacteris amb els enzims necessaris.
- **Aminoàcids.** Es tracta d'un nutrient essencial que només els bacteris amb els enzims necessaris poden sintetitzar. A més, es poden utilitzar com a font de carboni o energia.

- **Proteïnes.** Són polímers d'aminoàcids. Es poden utilitzar com a font d'aquests aminoàcids pels bacteris amb els enzims necessaris.
- **Bases nitrogenades.** Es tracta d'un altre nutrient essencial que només poden sintetitzar els bacteris amb els gens necessaris. A més, es poden utilitzar com a font de carboni o d'energia.
- **Àcids nucleics.** Són polímers de nucleòtids i, per tant, contenen bases nitrogenades. Poden ser utilitzats com a font d'aquestes pels bacteris amb els enzims necessaris.

MENÚ AMBIENT

Permet modificar la concentració al medi dels factors ambientals no nutritius presents a la simulació. Aquesta modificació es realitza mitjançant finestres de diàleg i es reflecteix immediatament a la finestra d'informació ambiental. Conté les opcions següents:

- **Ultraviolada.** La llum ultraviolada danya l'ADN. Per això mata els bacteris i augmenta la taxa de mutació dels supervivents.
- **Cloramfenicol.** Antibiòtic inhibidor de la síntesi de proteïnes.
- **Estreptomicina.** Antibiòtic que interfereix la síntesi de proteïnes, perquè s'uneix a la proteïna p10 de la subunitat 30s dels ribosomes bacterians.
- **Penicil·lina.** Antibiòtic que interfereix la síntesi de peptidoglicà, el principal component de la paret cel·lular bacteriana.
- **Rifampicina.** Antibiòtic que inhibeix la transcripció, unint-se a l'enzim RNA polimerasa.
- **Tetraciclina.** Antibiòtic que inhibeix la síntesi de proteïnes.

MENÚ HISTÒRIA

Aquest menú agrupa les opcions que permeten recordar els principals incidents evolutius esdeveniguts a la simulació. Conté les opcions següents:

- **Demografia.** Obre a la superfície de treball una finestra de demografia. Permet consultar la població total i el nombre de mutacions de cicles passats.
- **Fòssils.** Aquesta opció obre una finestra de fòssils. Permet visualitzar totes les soques bacterianes d'importància evolutiva, encara que actualment ja s'hagin extingit.
- **Genealogia.** Obre a la superfície de treball una finestra de genealogia. Aquesta finestra mostra un arbre genealògic que connecta les soques del registre fòssil.
- **Mutacions.** Aquesta opció obre una finestra de mutacions en la superfície de treball. És molt útil per determinar la naturalesa aleatòria o preadaptativa de les mutacions.
- **Gràfica població.** Esborra la pantalla, canvia al mode gràfic detectat i representa gràficament la població bacteriana total en funció del temps (cicles). És útil per observar el creixement exponencial, típic dels primers cicles i la dinàmica poblacional durant l'evolució i segons els factors ambientals.

MENÚ FINESTRA

Agrupa les ordres que permeten tancar, moure, ampliar o realitzar altres accions amb les finestres. Les seves opcions són les següents:

- **Dimensionar/Moure.** Permet canviar la mida o la posició de la finestra activa.
- **Zoom.** Amplia (o redueix fins a la seva mida original) la finestra activa.
- **Mosaic.** Reordena les finestres mòbils disposant-les com si fossin les rajoles d'un mosaic que cobreix tota la superfície de treball.
- **Cascada.** Reordena les finestres mòbils disposant-les de manera solapada.
- **Següent.** Activa la finestra següent de la superfície de treball.
- **Anterior.** Activa la finestra anterior de la superfície de treball.
- **Tancar.** Tanca la finestra activa eliminant-la de la superfície de treball.

MENÚ AJUDA

Aquest menú conté opcions que permeten obtenir ajuda o informació. Conté les opcions següents:

- **Ajuda sobre ajuda.** Informa del funcionament del sistema d'ajuda.
- **Evolució bacteriana.** Mostra les característiques principals del programa.
- **Índex d'ajuda.** Accedeix directament a l'índex general del sistema d'ajuda.
- **Sobre.** Obre una finestra de missatges que presenta el nom del programa, el seu autor i l'any en què ha estat creat.
- **Calculadora.** Obre una finestra que conté una calculadora amb la qual podeu fer operacions de suma, resta, multiplicació i divisió. Aquesta calculadora es pot utilitzar a través del teclat o el ratolí, clicant amb el seu botó esquerre damunt la tecla corresponent. La calculadora s'ha inclòs al programa per tal de facilitar el càlcul de la taxa de mutació.

A l'extrem dret de la barra de menús hi ha un rellotge digital. Hem d'advertir que l'hora marcada en aquest rellotge serà correcta només si el rellotge intern de l'ordinador ha estat actualitzat.

4.14. La finestra de demografia

La finestra de demografia és una finestra de text que mostra les principals dades demogràfiques des que heu començat la simulació, amb una memòria màxima de 1.000 cicles. Les dades que mostra per cada cicle són, d'esquerra a dreta:

- El número del cicle corresponent.
- La població bacteriana total.
- La població total acumulada (des del cicle 0).
- El nombre de mutacions esdevingudes durant aquell cicle.
- Les mutacions totals acumulades.

Les poblacions i mutacions acumulades s'han afegit per tal de facilitar el càlcul de la taxa de mutació.

Demografia					4=[↑]
Cicle	Població	P. acumulada	Mutacions	M. acumulades	▲
0	1	1	0	0	
1	2	3	0	0	
2	4	7	0	0	
3	8	15	0	0	
4	16	31	0	0	
5	32	63	0	0	▼

La finestra de demografia es pot moure, redimensionar, ampliar o tancar. A més, les tecles de navegació fletxa amunt, fletxa avall, avpàg, repàg, inici i fi permeten consultar les dades de tots els cicles.

4.15. La finestra de fòssils

La finestra de fòssils és una finestra de text que recorda les soques més significatives de tot el procés evolutiu, incloses les que ja s'han extingit. Cada varietat fòssil ocupa una línia horitzontal de la finestra, mostrant d'esquerra a dreta la informació següent:

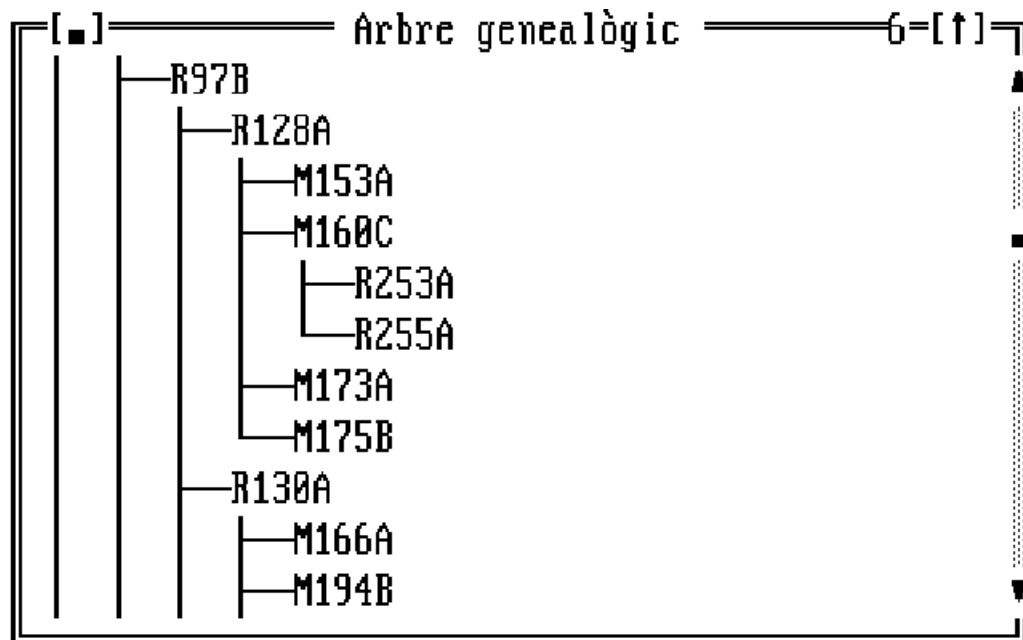
- Nom de la soca. També informa del cicle que va néixer i de si es va originar per mutació (M) o per conjugació (R).
- Cicle que es va extingir, en el seu cas.
- Cromosoma característic de la varietat.
- Progenitors de la soca. Si s'ha originat per mutació hi figurarà una sola varietat progenitora, mentre que si s'ha originat per conjugació hi figuraran dos progenitors.

[.]		Registre fòssil					5=[↑]
		Sínte.	Tacti.	Tacti.	Tacti.	Tacti.	Resis.
Soca	Extin.	ARN	UV.	gluco.	amino.	ba.ni.	penic.
		Progenitors					
M0	147						
M24A	167						M0
M36A	165						M0
R105A	210						M36A i M24A
M143C	323						R105A

La finestra de fòssils es pot moure, redimensionar, ampliar o tancar. A més, les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall permeten consultar les dades de totes les soques del registre fòssil.

4.16. La finestra de genealogia

La finestra de genealogia és una finestra de text que mostra un arbre genealògic, connectant les soques del registre fòssil amb els seus respectius progenitors i descendents.



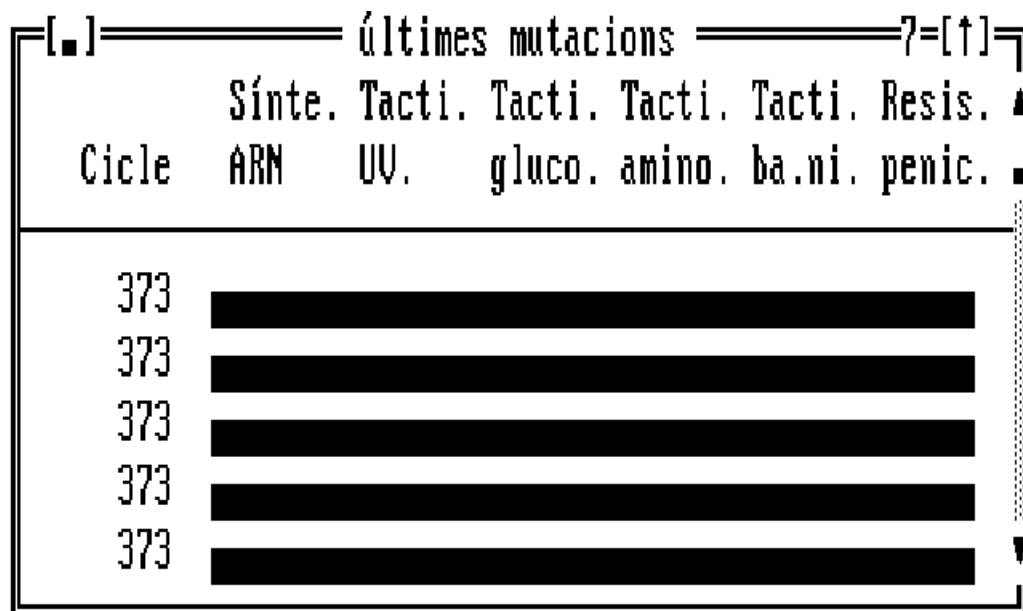
Els noms de les varietats es mostren en dos colors: marró per a les soques extintes i verd per a les que encara mantinguin algun bacteri viu. Les varietats es troben connectades amb els seus descendents a través de línies que es dirigeixen cap avall i cap a la dreta.

La finestra de Genealogia es pot moure, redimensionar, ampliar o tancar. A més, les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall permeten visualitzar tot l'arbre si no hi cap tot sencer a la finestra.

4.17. La finestra de mutacions

La finestra de mutacions és una finestra de text que recorda els cinquanta darrers mutants visualitzats a la simulació. Cada mutació ocupa una línia horitzontal de la finestra, mostrant d'esquerra a dreta les dades següents:

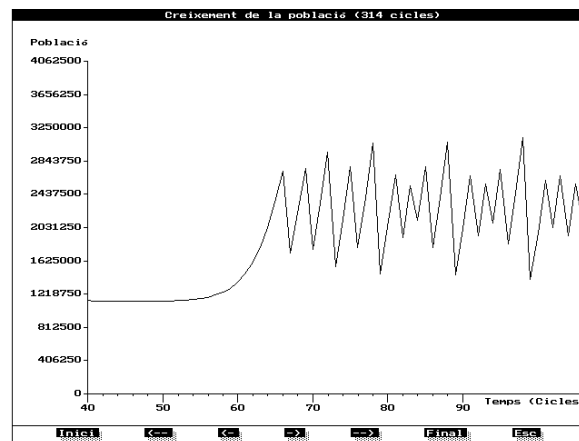
- Cicle en què s'ha esdevingut la mutació.
- Cromosoma del bacteri mutant. Tots els gens s'indiquen en color gris menys el que ha patit la mutació, que es mostra en el color corresponent al seu nou valor.



La finestra de mutacions es pot moure, redimensionar, ampliar o tancar. A més les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall permeten veure tots els mutants.

4.18. La representació gràfica de la població

Per representar gràficament la població, Evolució bacteriana abandona temporalment el mode text i obre el mode gràfic de més resolució entre els detectats al maquinari. El programa suporta, entre d'altres, els modes CGA 640 x 200 amb 2 colors, EGA 640 x 350 amb 16 colors i VGA 640 x 480 amb 16 colors. Per això l'aspecte d'aquesta gràfica pot canviar segons l'ordinador que executi el programa.



La gràfica representa la població bacteriana total en funció del temps (en cicles). S'ha de tenir en compte que el programa calcula automàticament l'escala de l'eix Y (Població) per tal de que hi càpiga el màxim valor absolut. Això pot fer que el mateix segment de la gràfica, consultat en moments diferents, pugui variar el seu aspecte a causa d'un canvi d'escala vertical.

La representació gràfica de la població és molt útil per tal d'identificar els principals fenòmens evolutius: creixement o decreixement exponencial, fase estacionària, oscil·lacions causades per la reproducció sincronitzada, substitucions de la soca predominant per una altra de més ben adaptada o canvis en la població causats per modificacions ambientals.

La part inferior de la pantalla sempre mostra totes les opcions disponibles en forma de botons. Aquests botons poden ser activats mitjançant el teclat o bé directament amb el ratolí. D'aquesta manera podem consultar tots els segments de la gràfica o tornar a l'entorn integrat de treball, en mode text (tecla esc).

5. GUIA DEL PROFESSOR

5.1. Introducció

Evolució bacteriana és una simulació de l'evolució d'una població de bacteris per selecció natural.

Els factors ambientals del programa es poden modificar lliurement. Això permet la simulació d'experiments no realitzables als centres de secundària, ja que requeririen un entrenament previ i una quantitat excessiva de temps, de materials i de diners.

Per tant, la utilització d'Evolució bacteriana permet que els estudiants dissenyin hipòtesis i recullin i processin dades per tal de comprovar aquestes hipòtesis. D'aquesta manera es facilita la construcció personal i activa dels seus coneixements.

Hem de tenir en compte que el concepte d'evolució per selecció natural és realment molt complex. No podem pretendre que els estudiants, manipulant lliurement aquesta simulació, arribin ells sols a construir-lo. El sistema d'ensenyament-aprenentatge utilitzat i recomanat per l'autor inclou breus explicacions magistrals, activitats de lectura, resposta a qüestions amb discussió general i realització de simulacions amb Evolució bacteriana, seguint els guions didàctics inclosos en aquest manual.

Pel que fa als nivells educatius que podrien utilitzar Evolució bacteriana, per entendre la simulació cal que l'alumne hagi superat alguns preconceptes erronis bastant estesos (com la generació espontània), ha de disposar d'organitzadors previs conceptualment correctes, ha d'utilitzar habilitats pròpies del pensament formal i ha de vèncer alguns obstacles conceptuals (imaginar-se uns bacteris que no es veuen).

Per això, creiem que Evolució bacteriana pot ser utilitzat profitosament a partir de COU o del seu equivalent en el batxillerat. Per cursos anteriors aconsellàrem la realització d'altres activitats d'aprenentatge.

5.2. Continguts

5.2.1. Fets, conceptes i sistemes conceptuals

El concepte fonamental que hem de tractar, el d'evolució per selecció natural, és realment complex. Es van necessitar molts anys i aportacions revolucionàries de persones com Linnée, Lamarck, Malthus, Darwin o Wallace perquè s'arribés a formular aquesta teoria. Com molt bé exposen Mayr o Dawkins, fins i tot avui moltes persones cultes especialitzades en camps diferents a la biologia, no la comprenen (Mayr 1978, Dawkins 1988).

Creiem que per aconseguir un aprenentatge significatiu de la teoria sintètica o neodarwiniana (Mayr 1978, Ayala 1978) hem de tractar els conceptes següents:

- Capacitat reproductora dels éssers vius.
- Mutació. Caràcter aleatori de les mutacions.
- Recombinació gènica durant la reproducció sexual. Caràcter aleatori de les recombinacions produïdes.
- Variabilitat en les poblacions biològiques. Origen aleatori d'aquesta variabilitat.
- Limitació dels recursos alimentaris. No hi ha prou aliment per a tots els éssers vius que neixen.
- Competència dels éssers vius per l'aliment.
- Selecció natural. En aquesta competència tenen una probabilitat més gran de sobreviure els individus més ben adaptats a l'ambient. Aquests són els que sobreviuen, es reproduïxen i transmeten els seus gens a les generacions següents.
- Evolució filètica o microevolució. L'acció continuada de la selecció natural produeix un canvi gradual en l'espècie i produeix una adaptació creixent en l'ambient.
- Característiques intermèdies entre l'atzar i el dirigisme de l'evolució per selecció natural. Les mutacions són aleatòries, però la selecció natural és dirigida per l'ambient i no té res d'aleatori.

Per altra banda, com a aplicació dels coneixements adquirits, i si es treballa la unitat didàctica corresponent, els alumnes poden estudiar els fets següents:

- Augment de la velocitat evolutiva gràcies a la recombinació genètica.
- Adquisició de resistència als antibiòtics.
- Efectes mutàgens i letals de la llum ultraviolada.

5.2.2. Procediments

- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Construcció d'hipòtesis.

- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.
- Comprovació d'hipòtesis.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant terminologia adequada.
- Càlcul d'una taxa de mutació.

5.3. Objectius

En finalitzar el treball amb el programa Evolució bacteriana, l'alumne ha de ser capaç de:

- Recordar que els éssers vius tenen una enorme capacitat reproductora.
- Recordar que les mutacions són canvis genètics aleatoris.
- Explicar el mecanisme de l'evolució per selecció natural.
- Aplicar la teoria de l'evolució per selecció natural en la resolució de problemes evolutius senzills.

5.4. Activitats d'ensenyament-aprenentatge

Ja hem indicat a la introducció que el concepte d'evolució per selecció natural és massa complex per intentar abordar-lo només amb una simulació per ordinador, per bona que aquesta fos. A més del treball amb Evolució bacteriana, l'autor utilitza les activitats següents:

- Explicació magistral dels antecedents de les teories evolutives, els contextos històrics de Lamarck, Darwin, Weismann o la teoria sintètica i les proves de l'evolució.
- Resolució de les activitats dissenyades per Ramon Grau sobre Lamarck, Darwin, Weismann i la teoria sintètica (Grau 1992).

Posteriorment, els estudiants treballen amb el programa Evolució bacteriana. Les sessions de treball que sempre realitzen, les que considerem més importants, són les següents:

- Creixement d'una població bacteriana.
- Les mutacions.
- Evolució per selecció natural.

Les altres sessions incloses dins aquest manual són opcionals: la seva realització depèn del temps disponible i dels objectius concrets que cada professor es pugui marcar. Personalment, si les haguéssim d'ordenar de més a menys interessants, triaríem l'ordenació següent:

- Antibiótics i resistència.
- Efectes de la llum ultraviolada sobre els éssers vius.
- Reproducció sexual i velocitat evolutiva.

Segons els resultats de les avaluacions predictiva i formativa, també poden dedicar-se sessions específiques per a la superació de preconceptes erronis, utilitzant sessions magistrals, activitats de lectura o resolució de qüestions, individualment o en grups.

5.5. Criteris i activitats per a l'avaluació

L'avaluació no ha de limitar-se a valorar l'assoliment dels objectius per part de cada alumne. A més, és molt interessant que s'avalui el mètode d'ensenyament-aprenentatge utilitzat. Aquest tipus d'avaluació ha dirigit moltes de les darreres millores del programa Evolució bacteriana.

Una avaluació integral ha de preveure una avaluació predictiva o inicial, una avaluació formativa i una avaluació sumativa.

L'avaluació inicial serveix per disposar d'un punt de referència per valorar l'evolució dels estudiants i per detectar els seus preconceptes.

Hi ha moltes maneres de realitzar aquesta avaluació inicial. L'elecció pot dependre de les preferències del professor i del temps disponible.

Una possibilitat que dona molta informació fiable, però que requereix bastant de temps, és la resolució d'un qüestionari basat en preguntes obertes. Aquestes preguntes ens donen més informació sobre les concepcions prèvies si plantegen un problema real, en lloc de demanar una definició o una exposició teòrica.

Una altra possibilitat menys fiable, però que requereix menys temps, es basa en preguntes de resposta objectiva. És molt important que les opcions corresponguin als principals preconceptes detectats en els estudiants, si pot ser amb les seves mateixes paraules, que la correcció intenti detectar aquests preconceptes i no limitar-se a posar una nota numèrica.

L'avaluació formativa pot estar basada en les respostes dels alumnes als guions de treball i en l'observació directa per part del professor.

L'avaluació sumativa es pot realitzar amb preguntes del tipus de les que han sortit durant el curs 1992-1993 a la Selectivitat. Aquest tipus de preguntes es basen en la interpretació de fenòmens en el seu context real i creiem que són preferibles a les d'exposició teòrica.

Independentment de la seva utilització per posar notes, l'avaluació sumativa pot ser útil per comparar-la amb l'avaluació inicial i així poder valorar l'èxit en l'assoliment dels objectius proposats. Per això, sovint hem utilitzat les mateixes preguntes de l'avaluació inicial, un cop acabats els exàmens i sense previ avís.

5.6. Temporització

La temporització aconsellada per l'autor per a les sessions de treball amb Evolució bacteriana és la següent:

- Creixement d'una població bacteriana (1 hora i mitja).
- Les mutacions (1 hora i mitja).

- Evolució per selecció natural (1 hora).
- Reproducció sexual i velocitat evolutiva (1 hora).
- Antibiótics i resistència (1 hora).
- Efectes de la llum ultraviolada sobre els éssers vius (1 hora).

5.7. Orientacions per a la intervenció pedagògica

5.7.1. De caràcter general

Els principis didàctics en què es basa la nostra proposta d'utilització del programa Evolució bacteriana 2.0. són els següents:

Aprenentatge significatiu

Els estudiants no s'han de limitar a memoritzar els conceptes que aprenguin; sobretot han de comprendre aquests conceptes i ser capaços d'utilitzar-los per resoldre problemes, abordar situacions noves o efectuar aprenentatges nous. Per això s'ha d'atribuir significat al material objecte d'aprenentatge, establir vincles entre el que s'aprèn i el que ja se sap i revisar i modificar esquemes de coneixement anteriors (Coll i Solé 1989).

Preconceptes

Fa uns anys es creia que la ment de l'alumne durant l'aprenentatge era com un dipòsit buit que s'anava omplint amb les idees exposades pel professor. Avui aquesta idea ha estat totalment superada: sabem que les persones inicien un aprenentatge basant-se en el que ja saben, en els seus conceptes previs. Aquests preconceptes estan basats en les seves experiències prèvies. Moltes vegades no coincideixen amb la ciència escolar, però expliquen satisfactòriament bé situacions quotidianes, per la qual cosa és difícil provocar el seu canvi (Driver 1989). Molts errors conceptuals són deguts precisament a aquestes idees prèvies (Gil 1983).

Un estudi realitzat per l'autor (Llort 1991) suggereix que alguns alumnes arrossegueu greus errors conceptuals, com la creença en la generació espontània o l'atribució de vida als àtoms. Una bona estratègia didàctica ha d'intentar fer explícits aquests preconceptes erronis i provocar un canvi conceptual.

A més, hem de tenir en compte que existeix un cert paral·lelisme entre l'evolució històrica d'una ciència i l'adquisició de les idees corresponents pels alumnes (Gil 1983). El naixement de la teoria de l'evolució necessita alguns conceptes previs, com una edat considerable del planeta Terra o la jerarquització en la classificació dels éssers vius. Si l'alumne no ha adquirit aquests conceptes, els hem d'ensenyar abans d'abordar el problema evolutiu.

5.7.2. Superació dels preconceptes erronis

Només un aprenentatge significatiu pot superar els conceptes erronis previs. Sembla que hi ha dues formes efectives d'aconseguir aquest objectiu:

- Aprenentatge per transmissió verbal. És el més utilitzat i, en diferents ocasions, l'únic aplicable. Perquè sigui realment efectiu no s'ha de limitar a un discurs del professor sinó que ha d'incloure temps per tal que els alumnes treballin els conceptes i un bon mecanisme de retroalimentació.
- Descobriment guiat pel professor. No s'ha de confondre amb el descobriment inductiu i autònom que va estar de moda fa uns anys i va fracassar totalment (Gil 1983). El descobriment guiat pel professor es basa, principalment, en fer que grups d'alumnes emetin hipòtesis i les comprovin. El professor guia aquest procés intentant provocar conflictes cognoscitius entre les idees prèvies i els resultats obtinguts, per tal d'afavorir el canvi conceptual (Gil 1983).

Tot seguit explicarem breument algunes activitats dirigides a superar els principals preconceptes erronis que hem detectat sobre evolució.

Generació espontània

La creença en aquesta teoria no es limita als clàssics, com Aristòtil sinó que es troba present en molts dels nostres alumnes (Llort 1991). Per tal de superar-la proposo:

- La repetició per part dels alumnes dels experiments de Redi sobre la generació espontània de cucs a la carn (Giordan 1988, De Kruif 1986). Suggerim que els alumnes emetin hipòtesis i dissenyin l'experiment, sota la supervisió del professor.
- Estudi dels experiments d'Spallanzani i de Pasteur (De Kruif 1986), que descartaren la generació espontània dels bacteris.

Edat de la Terra

L'evolució necessita molt de temps per poder produir resultats. Si acceptéssim literalment la cronologia de la gènesi el món tindria uns sis mil anys i l'evolució de les espècies no s'hauria pogut realitzar. L'edat actual de la Terra s'estima en uns quatre mil cinc-cents milions d'anys i la de la vida, com a mínim, en uns mil cinc-cents milions d'anys. Per tal que els estudiants acceptin aquestes cronologies proposem:

- Estudi de les estimacions sobre l'edat de la Terra basades en la lentitud dels processos geològics.
- Estudi de les datacions realitzades amb isòtops radiactius (vegeu per exemple Moorbath 1977).

Grups d'éssers vius amb característiques comunes

El tipus de classificació habitualment acceptada pels éssers vius no només compleix els requisits matemàtics que tota bona classificació ha d'acceptar sinó que, a més, és una classificació natural. Això vol dir que coneixent el grup al qual pertany un ésser viu podem fer moltes prediccions interessants sobre ell (Mosterín 1978). Aquesta classificació és fortament jerarquitzada: les espècies s'agrupen en gèneres, els

gèneres en famílies, les famílies en ordres, les ordres en classes, etc. Aquesta jerarquització s'explica molt bé suposant que és resultat de l'evolució. Les espècies del mateix gènere s'assemblen tant perquè són descendents recents d'un mateix avantpassat. Fins i tot una escola de taxònoms, el cladisme, pretén que la sistemàtica ha de basar-se totalment en la història evolutiva (Janvier 1980).

Concepte de fòssil

Plini considerava que els fòssils eren minerals de forma extravagant, en els quals "la natura imitava els animals i les plantes". Aquesta creença fou generalment acceptada fins al segle XVI, quan va començar a estendre's l'opinió que eren restes d'antics éssers vius (Giordan 1988).

Els teòlegs interpretaren els fòssils com a restes del diluvi universal (Giordan 1988). Aquesta opinió va ser abandonada gràcies a les aportacions de Lyell, que va introduir l'actualisme geològic.

L'estudi dels fòssils demostra que els éssers vius que poblaven la Terra eren diferents a cada època. Aquest és un dels fonaments bàsics de les teories evolutives.

Fixisme o evolucionisme

La idea de l'evolució és present, de manera més o menys clara, en la majoria dels alumnes. Els que encara mantinguin idees fixistes haurien de treballar sobre les proves clàssiques de l'evolució: els fòssils, l'embriologia comparada, les proves bioquímiques, la selecció artificial, etc.

Creacionisme

Opinem que la creença que l'Univers fou creat per Deu és totalment respectable. Nogensmenys, el creacionisme radical, en el sentit de defensar literalment la cronologia de la gènesi o la intervenció directa de Deu en la creació de cada espècie, no pot pretendre actualment l'estatut de teoria científica. L'enorme quantitat de proves a favor de l'evolució fan que aquest creacionisme radical sigui tan anticientífic com explicar el moviment dels cossos basant-se en una contínua intervenció sobrenatural.

Capacitat de creixement de les poblacions

Els alumnes que encara no comprenguin l'enorme potencial demogràfic dels éssers vius poden comprovar les seves hipòtesis amb els primers cicles dels programa Evolució bacteriana, utilitzant el guió corresponent inclòs dins d'aquest manual.

Herència dels caràcters adquirits

Aquesta creença és habitualment coneguda com a *lamarckisme*, però no va ser introduïda per Lamarck. Aquest autor es limità a recollir l'opinió general de la seva època (Mayr 1978) que encara avui comparteixen moltes persones poc informades

biològicament.

Per superar aquest concepte proposem treballar amb els alumnes l'experiment de Weismann que, poc temps després del seu naixement, tallà la cua a una família de ratolins durant 22 generacions. Malgrat això, cap ratolí va nèixer sense cua (Giordan 1988). Una activitat molt interessant sobre aquest tema ha estat publicada per Ramon Grau (Grau 1992).

A més, els coneixements actuals sobre transmissió de la informació genètica són incompatibles amb l'herència dels caràcters adquirits (Strickberger 1978).

Aleatorietat de les mutacions

Una forma de persistència del lamarckisme és la de considerar que les mutacions són postadaptatives. Així, l'exposició de mosques al DDT provocaria mutacions especialment dirigides a proporcionar resistència al DDT. Per als alumnes que no creguin en l'aleatorietat de les mutacions proposem els treballs següents:

- Evidència de l'aleatorietat de les mutacions a *Drosophila* o al blat de moro (Strickberger 1978).
- Estudi dels experiments de Delbruck i Luria i de Lederberg amb bacteris (Strickberger 1978).
- Treball amb el programa Evolució bacteriana, seguint el guió de l'activitat Mutacions, inclòs dins d'aquest manual.

Constància de les freqüències gèniques

Un error en aquest concepte pot ser subsanat treballant la llei de Hardy-Weinberg (Strickberger 1978).

Acció de la selecció natural

Us recomanem que treballeu aquest concepte fonamental de la teoria neodarwiniana amb el guió de treball inclòs dins d'aquest manual.

Finalisme

El finalisme o teleologia suposa que els éssers vius evolucionen seguint un programa preestablert a causa d'una tendència interna o impuls cap a la perfecció (Mayr 1978), per tal que l'espècie sobrevisqui, etc. Alguns dels aspectes que es poden treballar per refutar aquesta teoria són els següents:

- Els finalistes no han pogut proposar cap mecanisme natural que expliqui la teleologia que defensen (Mayr 1978).
- Els nostres coneixements sobre biologia molecular són totalment contraris a qualsevol mecanisme d'aquesta mena (Mayr 1978).
- L'estudi dels fòssils demostra que la tendència evolutiva dels caràcters corporals, com la mida del cos, és "incoherent, ja que canvia de direcció repetidament i, a vegades, fins i tot s'inverteix" (Mayr 1978).
- Si l'home és el producte més gran de l'evolució, res no pot haver-se originat

després d'ell. Existeixen molts paràsits humans que no poden viure a cap altre hoste i que, per tant, han de ser posteriors a ell. Així, el propòsit de l'evolució passaria a ser el d'originar els organismes que produeixen la verola, la gonorrea o la sida (Weisz 1978).

Comunitat de descendència

Segons aquest postulat de Darwin, els éssers vius que pertanyen al mateix grup s'assemblen perquè són descendents d'un avantpassat comú. Així, totes les aus serien descendents d'una única espècie d'au ancestral. Si ens remuntem en el temps, s'obtingria una sola espècie primigènia, un origen únic de la vida (Mayr 1978).

La força d'aquest postulat es troba en el seu enorme poder explicatiu. La comunitat de descendència permet explicar la jerarquització observada en la classificació dels éssers vius i les semblances anatòmiques o fisiològiques (Mayr 1978). Per altra banda, recentment s'han realitzat molts estudis comparatius de seqüències de proteïnes i d'ADN. Els arbres genealògics obtinguts per ordinador, com el del citocrom c (Lehninger 1978) són una prova posterior de la comunitat de descendència.

La idea de la comunitat de descendència és acceptada avui per la pràctica totalitat dels científics (Mayr 1978). Només alguns insisteixen en excloure els éssers humans d'aquest origen comú, una postura que va en contra d'un gran nombre de proves.

5.7.3. Creixement d'una població bacteriana

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, cromosoma, gen, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, ARN, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, llum ultraviolada, tactisme, penicil·lina.

Objectius

- Recordar que els éssers vius tenen una enorme capacitat reproductora.

Continguts

- Capacitat reproductora dels éssers vius.
- Limitació dels recursos alimentaris. No hi ha prou aliment per a tots els éssers vius que neixen.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Construcció d'hipòtesis.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.

- Comprovació d'hipòtesis.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant terminologia adequada.

Comentari de la simulació

Per tal que l'alumne pugui realitzar profitosament aquesta activitat, és necessari que compregui els aspectes bàsics del programa. Per aconseguir-ho es pot utilitzar el darrer full del guió "L'entorn de treball d'Evolució bacteriana", i les seccions corresponents d'aquest manual o el sistema d'ajuda del propi programa, junt amb explicacions del professor.

Introducció. Intentem fer aflorar els preconceptes dels estudiants sobre la capacitat de creixement dels éssers vius, utilitzant-los per construir una hipòtesi.

- 3) Triem el cromosoma senzill per la seva simplicitat, encara que altres preseleccions podrien servir-nos igualment.
- 5) i 6) Volem simplificar la simulació al màxim, eliminant els factors que podrien distreure l'atenció de l'alumne. Per això desactivem les mutacions (que seran introduïdes en la unitat didàctica següent) i la reproducció sincronitzada (que produiria oscil·lacions en la població).
- 8), 9) i 10) Passats sis cicles podem apreciar un creixement exponencial, amb resultats encara poc espectaculars. És convenient que els alumnes consultin la gràfica de la població i que n'obtinguin una còpia sobre el paper.
- 12) Passats onze cicles els efectes del creixement exponencial comencen a ser més evidents. És interessant obtenir una nova gràfica de la població i comparar-la amb l'anterior.
- 14) Passats 18 cicles les conseqüències del creixement exponencial són evidents. La comparació amb les gràfiques anteriors mostra com la població creix a un ritme cada vegada més ràpid.
- 15) La funció que descriu el creixement de la població és $P = p_1 \cdot 2^t$.

Essent:

P: Població a l'instant t.

p_1 : Població inicial.

t: Nombre de cicles transcorreguts.

p_1 era igual a 1. Per tant, en el nostre cas la funció serà realment $P = 2^t$.

Així, passats 30 cicles, tindríem 2^{30} bacteris (aproximadament 10^9).
Passats 600 cicles tindríem 2^{600} bacteris (aproximadament 10^{180}).

Per tant, els descendents del nostre únic bacteri inicial tardarien uns pocs dies en omplir tot l'Univers.

- 17) Els alumnes han d'arribar a la conclusió que els éssers vius tenen una enorme capacitat reproductora. Possiblement molt més gran del que s'imaginaven anteriorment.
- 18) A la simulació veiem que la població bacteriana no segueix creixent indefinidament. Ja hem vist que si el creixement hagués continuat, aviat haurien omplert tot l'Univers. Realment la població bacteriana s'estabilitza.
- 19) Examinant la finestra d'ambient s'observa que el nivell per cèl·lula dels tres nutrients bàsics és ara molt baix. Glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades eren fàcilment obtinguts pels bacteris al principi de la simulació i, en canvi, ara són difícils d'aconseguir. Per això podem plantejar la hipòtesi que l'aturada en el creixement es produeix per l'escassetat d'aquests tres nutrients.
- 20) Aquesta hipòtesi es pot comprovar anant al menú Nutrients i canviant la quantitat de glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades. Si n'augmentem el nivell veurem que la població creix fins que l'augment de nutrients és compensat per l'augment de la població. Si en disminuïm el nivell veurem que la població minva de manera relacionada.

Hem de tenir en compte que els tres nutrients (glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades) actuen com a factors limitants. Per tant, l'increment de nivell de només un o dos d'ells no provocarà un gran augment de la població. En canvi, la disminució d'un d'ells produirà una disminució de la població.

Els altres factors ambientals es poden descartar perquè no han estat presents a la simulació en cap moment.

Punt 21. En el model seguit a la simulació, els bacteris requereixen aminoàcids, bases nitrogenades i una font de carboni (que pot ser qualsevol dels tres nutrients). Per tant, els tres nutrients són aprofitats pels bacteris, però només els aminoàcids i les bases nitrogenades són essencials.

5.7.4. Les mutacions

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, cromosoma, gen, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, ARN, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, llum ultraviolada, tactisme, penicil·lina, mutació,

taxa de mutació, adaptació.

Objectius

- Recordar que les mutacions són canvis genètics aleatoris.

Continguts

- Mutació. Caràcter aleatori de les mutacions.
- Variabilitat en les poblacions biològiques. Origen aleatori d'aquesta variabilitat.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.
- Comprovació d'hipòtesis.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant la terminologia adequada.
- Càlcul d'una taxa de mutació.

Comentari de la simulació

Recordem que, per tal que els alumnes treguin profit del seu treball amb el programa, n'han d'entendre el funcionament. Si heu realitzat la sessió de treball sobre el creixement exponencial, aquest aspecte no ha de presentar problemes. En qualsevol cas, recordeu que podeu consultar el sistema d'ajuda del programa.

En aquesta simulació es plantegen dues hipòtesis bàsiques sobre l'origen de les mutacions:

- Les mutacions són postadaptatives.
- Les mutacions són aleatòries.

El model seguit a Evolució bacteriana suposa que les mutacions són aleatòries. Les proves que suporten aquesta teoria, majoritàriament acceptada, han estat detallades a la secció "Aleatorietat de les mutacions" del capítol dedicat a la superació de preconceptes erronis.

Introducció. Situem breument el tema de les mutacions i plantegem les dues hipòtesis bàsiques sobre el seu origen.

- 2) Triem el cromosoma senzill perquè té un nombre suficient de gens per observar mutacions de diferents tipus.
- 4) Desactivem les conjugacions per evitar interferències d'aquest procés. La reproducció sincronitzada és inhibida per eliminar les fluctuacions de població que podrien dificultar el càlcul de la taxa de mutació.
- 6) La mutació produirà una nova soca bacteriana amb un nom format pel prefix M (Mutació), el número del cicle en què s'ha produït i una lletra per

distingir les soques originades al mateix cicle. La finestra d'informació indicarà que un bacteri M0 (soca progenitora) ha mutat per originar un nou clon. Hem d'insistir en el fet que la mutació és un esdeveniment extraordinari, perquè el normal és que les cèl·lules filles siguin genèticament idèntiques a la mare. A més, els alumnes han d'adonar-se que el nou cromosoma és idèntic al del progenitor menys en un gen.

- 7) i 8) Presentem les opcions Demografia i Mutacions del menú Història, que seran molt útils per enregistrar els esdeveniments anteriors i per comprendre què ha passat.
- 10) Demanem trenta mutacions perquè aquesta és una quantitat amb un cert valor estadístic. Els alumnes han d'analitzar ara les dades i obtenir una taxa de mutació.

En principi, la taxa de mutació generada pel programa és de 10^{-7} mutacions per bacteri i gen. Com treballem amb 6 gens hauríem d'obtenir una taxa de $6 \cdot 10^{-7}$. Tanmateix, algunes mutacions no canvien l'al·lel gènic (són silencioses) i per això, la taxa de mutació observada ha de ser propera a $3,6 \cdot 10^{-7}$.

- 11) Intentem fer aflorar els preconceptes dels estudiants per tal de facilitar, en cas necessari, la seva contrastació i superació.
- 12) i 13) L'alumne ha de ser capaç de predir els resultats de l'experiment que esperàriem segons cada hipòtesi. Un nombre molt baix de mutacions no seria significatiu i per això, en demanem al menys 20 (seria millor obtenir-ne més).
- 14) Els estudiants han d'analitzar les seves dades i extreure'n conclusions.

Ha de quedar clar que les mutacions són aleatòries. Els mutants resistents a la penicil·lina hauran aparegut aproximadament amb la mateixa freqüència en els dos medis. Aquesta freqüència haurà estat semblant a la dels altres gens.

En l'ambient amb penicil·lina arriben a predominar els bacteris resistents perquè aquests sobreviuen millor en aquell medi, no perquè hi hagi més mutacions per provocar resistència.

5.7.5. Evolució per selecció natural

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, cromosoma, gen, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, ARN, glucosa,

aminoàcids, bases nitrogenades, llum ultraviolada, tactisme, penicil·lina, mutació, adaptació.

Objectius

- Explicar el mecanisme de l'evolució per selecció natural.
- Aplicar la teoria de l'evolució per selecció natural en la resolució de problemes evolutius senzills.

Continguts

- Variabilitat en les poblacions biològiques. Origen aleatori d'aquesta variabilitat.
- Limitació dels recursos alimentaris.
- Competència dels éssers vius per l'aliment.
- Selecció natural.
- Evolució filètica o microevolució.
- Característiques intermèdies entre l'atzar i el dirigisme de l'evolució per selecció natural.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant terminologia adequada.

Comentari de la simulació

En començar aquesta simulació suposem que els alumnes ja han realitzat les dues simulacions anteriors o bé activitats semblants. Per tant, l'alumne ha de saber que:

- Els éssers vius tenen una enorme capacitat reproductora.
- La falta d'aliment limita el creixement de la població.
- Les mutacions són aleatòries i produeixen un augment de la variabilitat de la població.

També és convenient que l'estudiant estigui familiaritzat amb el programa. En qualsevol cas, recordem que es pot utilitzar el sistema d'ajuda d'Evolució bacteriana.

Introducció. Recordem breument els conceptes més importants que hem vist a les simulacions anteriors i que necessitem per desenvolupar aquesta activitat.

- 4) Desactivem les conjugacions per tal de simplificar el procés. En una activitat específica tractarem sobre el paper evolutiu de la reproducció sexual. També desactivem la reproducció sincronitzada per no complicar la simulació amb les seves oscil·lacions de població típiques.
- 6) Recordem un altre cop el creixement exponencial típic dels éssers vius.
- 7) També recordem que l'escassetat d'aliments limita aquest creixement potencial.

- 8) Insistim en el fet que les mutacions són aleatòries.
- 9) i 10) Veiem que algunes varietats proliferen mentre altres desapareixen. Les que proliferen són les més ben adaptades a l'ambient. Així, les que s'adapten millor a l'escassetat d'aliments (tactismes positius a la glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades) es multipliquen fins a substituir les altres.

Un aspecte que pot cridar l'atenció és que en els primers estadis evolutius els mutants amb tactisme positiu a la glucosa proliferen menys que els que tenen tactisme positiu a bases nitrogenades o aminoàcids. Això passa perquè les bases nitrogenades i els aminoàcids també es poden utilitzar com a font d'energia, mentre la glucosa, en aquesta simulació, no pot ser convertida en els altres nutrients essencials.

- 11) Les soques predominants van canviant fins arribar a la situació més adaptada permesa pel programa. Hem de tenir en compte que en realitat el procés evolutiu continuaria de manera indefinida.
- 12) L'estudi acurat d'aquestes opcions permet comprendre millor què ha passat.
- 13) Les espècies evolucionen. L'evolució és impulsada per la selecció natural, que actua sobre la variabilitat originada per mutacions a l'atzar.
- 14) i 15) Amb radiació ultraviolada escassa se seleccionen els clons amb tactisme negatiu a la llum ultraviolada.
- 16) Amb penicil·lina moderada se seleccionen les soques resistents. Veiem que l'adquisició de resistència a la penicil·lina és un fenomen gradual, que a Evolució bacteriana consta de dos passos.

Comparant aquesta situació amb l'anterior veiem un exemple de divergència adaptativa. Ambients diferents produeixen evolucions diferents.

Limitacions de la simulació. En aquesta simulació, a causa de la limitació en el nombre de gens i d'al·lels de cada gen, tots els grups hauran obtingut, amb el mateix ambient, la mateixa varietat predominant. A la realitat, sense aquestes limitacions, haurien obtingut resultats semblants, però no idèntics (convergència adaptativa).

Observació addicional. Alguns alumnes descobriran, després de consultar la gràfica de la població, que la quantitat total de bacteris ha anat augmentant durant l'evolució. Això passa per l'augment d'adaptació.

5.7.6. Reproducció sexual i velocitat evolutiva

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, adaptació, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, mutació, tactisme, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, midó, proteïnes, àcids nucleics, recombinació, conjugació.

Objectius

- Aplicar la teoria de l'evolució per selecció natural en la resolució de problemes evolutius senzills.

Continguts

- Recombinació gènica durant la reproducció sexual. Caràcter aleatori de les recombinacions produïdes.
- Variabilitat en les poblacions biològiques. Origen aleatori d'aquesta variabilitat.
- Selecció natural.
- Evolució filètica o microevolució.
- Augment de la velocitat evolutiva gràcies a la recombinació genètica.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant la terminologia adequada.

Comentari de la simulació

Abans de realitzar aquesta activitat és convenient haver fet l'anterior, dedicada a la selecció natural. També és necessari saber què són la conjugació i la recombinació. Evidentment, serà convenient conèixer el funcionament del programa Evolució bacteriana.

Bàsicament, el que farem serà contrastar la hipòtesi que la reproducció sexual accelera l'evolució, ja que augmenta la variabilitat. Per tant, permet sobreviure millor als organismes que la presenten, perquè facilita la seva adaptació.

- 2) Necessitem un cromosoma amb diferents gens per poder observar els avantatges de les recombinacions.
- 4) Començarem fent una simulació de control. Per això desactivem les conjugacions. També inhibim les pauses i el so perquè suposem que l'alumne ja coneix amb detall com funciona l'evolució i només volem saber el temps que es tarda en arribar a la màxima adaptació permesa pel programa.
- 6) Obtenim dades per poder comparar-les amb l'altra simulació.

- 7) Ara comprovarem la nostra hipòtesi. Realitzarem el mateix experiment, però permetent la conjugació.
- 8) Anotarem les mateixes dades que en la simulació control per poder-les comparar. Recordem que ara l'arbre genealògic obtingut serà incomplet. Seria molt convenient completar-lo manualment amb el segon progenitor de les soques recombinants, escrit a la finestra dels fòssils.
- 9) Normalment observarem un nombre més gran de varietats en el registre fòssil de la simulació amb reproducció sexual activada.
- 10) Generalment l'evolució serà més ràpida a la simulació amb conjugació. L'augment de variabilitat produïda permet una acció més efectiva de la selecció natural.
- 11) La reproducció sexual, tal com hem vist en el cas de la conjugació bacteriana, n'accelera l'evolució i l'adaptació. Tanmateix hem de tenir en compte que aquest tipus de reproducció també pot tenir altres avantatges.

5.7.7. Antibiotics i resistència

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, ARN, ribosoma, antibiòtic, cloramfenicol, estreptomicina, penicil·lina, rifampicina, tetraciclina, resistència als antibiòtics.

Objectius

- Recordar que les mutacions són canvis genètics aleatoris.
- Explicar el mecanisme de l'evolució per selecció natural.
- Aplicar la teoria de l'evolució per selecció natural en la resolució de problemes evolutius senzills.

Continguts

- Adquisició de resistència als antibiòtics.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Construcció d'hipòtesis.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.
- Comprovació d'hipòtesis.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant la terminologia adequada.

Comentari de la simulació

És molt convenient haver realitzat la simulació de l'evolució per selecció natural. Això també proporcionaria un coneixement inicial del programa.

- 2) En aquesta simulació només utilitzarem els gens relacionats amb la resistència als antibiòtics.
- 4) Tornem a observar el creixement exponencial de la població bacteriana.
- 6) Les hipòtesis proposades han de ser comprovables utilitzant el programa Evolució bacteriana.
- 7) Les dues primeres hipòtesis corresponen a preconceptes erronis molt comuns. La tercera hipòtesi és la que acceptem com a correcta.
- 8) Si s'introdueixen els antibiòtics en grans quantitats o simultàniament, el més probable serà que morin tots els bacteris abans que puguin aparèixer resistències.
- 9) Ha de resultar confirmada la hipòtesi que els bacteris sensibles són eliminats més ràpidament que els resistents. Les altres dues hipòtesis proposades al guió poden ser fàcilment falsejades. Aquests resultats han de ser els mateixos amb tots els antibiòtics.
- 10) Les formes de resistència són
 - Cloramfenicol. Gradual.
 - Estreptomicina. Sòbta.
 - Penicil·lina. Gradual.
 - Rifampicina. Sòbta.
 - Tetraciclina. Gradual.
- 11) Es pot obtenir informació consultant el sistema d'ajuda del programa. Podria ser interessant aprofitar la motivació que suposa la realització de la simulació per tal que els alumnes estudiessin el tema amb bibliografia. Aquí exposarem un breu resum del mecanisme d'acció de cada antibiòtic i del sistema de resistència:
 - Cloramfenicol. Inhibeix la síntesi de proteïnes. La resistència és provocada per la producció de l'enzim cloramfenicol acetiltransferasa.
 - Estreptomicina. Interfereix la síntesi de proteïnes. La resistència és provocada per una mutació a la subunitat 30s dels ribosomes bacterians.
 - Penicil·lina. Inhibeix la síntesi de peptidoglicà, component fonamental de la paret cel·lular bacteriana. La resistència és provocada per la producció d'enzims penicil·lases.
 - Rifampicina. Inhibeix la transcripció. La resistència és originada per una modificació de l'RNA polimerasa.
 - Tetraciclina. Inhibeix la síntesi de proteïnes. La resistència és

provocada pel bloqueig del mecanisme que la transporta a l'interior del bacteri.

- 12) Serà més difícil que apareguin resistents, entre altres casos, si:
 - S'utilitzen inicialment dosis altes.
 - S'utilitzen diversos antibiòtics al mateix temps.

5.7.8. Efectes de la llum ultraviolada sobre els éssers vius

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, taxa de mutació, tactisme, llum ultraviolada.

Objectius

- Aplicar la teoria de l'evolució per selecció natural en la resolució de problemes evolutius senzills.

Continguts

- Efectes mutàgens i letals de la llum ultraviolada.
- Utilització de l'ordinador com a eina científica.
- Realització de simulacions d'experiments científics.
- Construcció d'hipòtesis.
- Observació i recollida de dades de la simulació d'un procés experimental.
- Interpretació de gràfiques i taules de dades.
- Comprovació d'hipòtesis.
- Expressió escrita de qüestions científiques, emprant la terminologia adequada.

Comentari de la simulació

És molt convenient que els alumnes hagin realitzat anteriorment la pràctica d'evolució per selecció natural. A més, això els hauria permès d'aprendre el funcionament del programa.

- 2) Triem el cromosoma senzill perquè conté el gen que ara ens interessa, el de tactisme a la llum ultraviolada.
- 4) Tornem a veure el creixement exponencial.
- 6) Les hipòtesis proposades han de ser comprovables utilitzant el programa Evolució bacteriana.
- 7) S'han d'acceptar les hipòtesis següents:
 - La llum ultraviolada augmenta la taxa de mutació.

- La llum ultraviolada mata els bacteris.
- La llum ultraviolada en grans quantitats és un bon desinfectant.

Per altra banda, han de ser rebutjades les hipòtesis:

- La llum ultraviolada disminueix la taxa de mutació.
- La llum ultraviolada provoca l'aparició de mutants amb tactisme negatiu a ella (augmenta igualment la taxa de totes les mutacions).
- Tots els bacteris exposats a la llum ultraviolada adquireixen tactisme negatiu a ella (el que s'esdevé és que són seleccionats els que tenen tactisme negatiu).

- 8) Aprofitem la motivació produïda per la simulació per fer que els alumnes busquin informació suplementària a la bibliografia. També s'hi pot trobar informació al sistema d'ajuda del programa.

6. GUIONS DE L'ALUMNE

6.1. Creixement d'una població bacteriana

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, cromosoma, gen, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, ARN, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, tactisme, llum ultraviolada, penicil·lina.

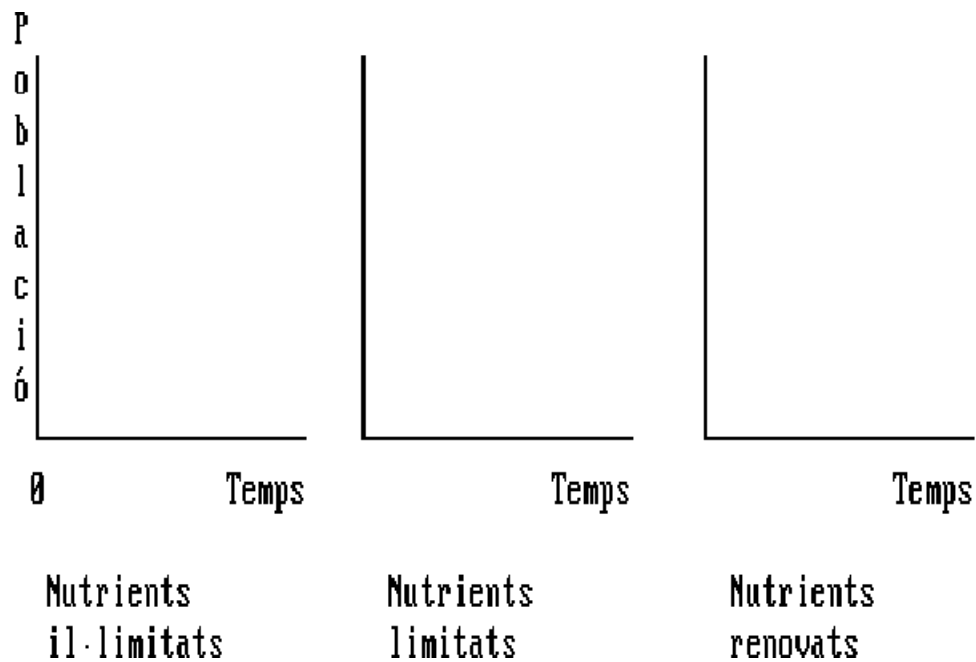
Introducció

Ja sabeu que una de les característiques típiques dels éssers vius és la seva capacitat de reproducció. A més, els éssers vius poden morir per diverses causes; per exemple, per trobar-se en un medi hostil (massa fred, massa calent...), per falta d'aliment, per l'atac de depredadors o paràsits i alguns, com els humans, de vells (això no els passa als bacteris!).

La reproducció i la mort dels éssers vius fan que les seves poblacions puguin variar amb el temps. Imagineu tres poblacions de bacteris en les condicions següents:

- a) Nutrients i espai il·limitats. Sense depredadors, paràsits ni factors nocius.
- b) Igual que l'anterior, però amb els nutrients limitats.
- c) Igual que l'anterior, però en cada cicle es renova l'aliment, en quantitats constants.

Intenteu predir la variació de les tres poblacions, dibuixant sengles gràfiques on representeu la població bacteriana en funció del temps.



Aquesta simulació es basa en el tercer supòsit: en cada cicle es renova totalment l'aliment en una quantitat fixa. Així podreu comprovar la hipòtesi que heu portat a terme.

Descripció de la simulació

- 1) Engueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per executar el programa Evolució bacteriana. Si teniu algun dubte sobre el seu funcionament, amb la tecla f1 podeu accedir al sistema d'ajuda que us informarà sobre els aspectes que vulgueu.
- 2) El primer que veureu serà la presentació, que s'acaba si premeu una tecla o cliqueu el botó esquerre del ratolí. Després s'obrirà la finestra de selecció de cromosoma.
- 3) Trieu el cromosoma senzill. Aquesta és l'opció activa per defecte, per tant, només cal que premeu la tecla retorn o que seleccioneu el botó **D'acord** amb el ratolí. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Síntesi d'ARN.
 - Tactisme a la llum ultraviolada.
 - Tactisme a la glucosa
 - Tactisme als aminoàcids.
 - Tactisme a les bases nitrogenades.
 - Resistència a la penicil·lina.

- 4) Som a l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que veieu en ella. Recordeu que la tecla f1 us condueix al sistema d'ajuda. En qualsevol cas, explicarem breument el contingut d'aquesta pantalla.

L'entorn de treball d'evolució bacteriana

La pantalla de l'entorn de treball es divideix en tres parts: la barra de menús, la superfície de treball i la línia d'estat.

- *La línia superior conté la barra de menús, on es troben tots els menús d'Evolució bacteriana. Podeu accedir a aquests menús prement la tecla f10 o bé prement simultàniament la tecla alt i la lletra ressaltada del menú que heu triat (per exemple, alt-N obre el menú **Nutrients**). També podeu obrir un menú directament amb el ratolí, si el teniu instal·lat.*
- *La línia inferior és la línia d'estat i recorda les tecles d'algunes comandes importants. A més, en obrir algun menú, informa breument sobre les seves opcions. Les comandes de la línia d'estat poden ser seleccionades amb el teclat o directament amb el ratolí.*
- *La superfície de treball ocupa la resta de la pantalla. Aquí es situaran les diferents finestres del programa, les quals poden ser seleccionades i modificades accedint al menú **Finestra**. Durant la simulació hi ha tres finestres que estan sempre obertes:*
 - *Finestra de les soques bacterianes (1). A sota de la capçalera (que ocupa les dues files superiors), cada línia horitzontal representa una soca o varietat bacteriana. Tots els membres de la soca són genèticament idèntics, perquè s'han originat per reproducció asexual. D'esquerra a dreta podeu veure el nom de la soca, el nombre de bacteris que la formen i el cromosoma bacterià, amb els gens representats pel codi de colors següent:*
 - *Color gris. Gen inactiu que no produeix cap efecte.*
 - *Color marró. Gen actiu que produeix l'efecte indicat pel seu nom (a la capçalera).*
 - *Color groc. Una altra forma de gen actiu, que pot ser més eficient.*
 - *Color verd. Gen que produeix tactisme positiu a l'estímul indicat pel seu nom.*
 - *Color vermell. Gen que produeix tactisme negatiu a l'estímul corresponent.*
 - *Finestra d'informació ambiental (2). Informa de la magnitud dels principals factors ambientals, mitjançant gràfics de barres horitzontals. Els nutrients es representen de dues maneres: en forma de quantitat total i com a nutrients per bacteri. Heu de tenir en compte que aquests nutrients es renoven en cada cicle.*
 - *Finestra d'informació general (3). Informa del cicle en què us*

trobeu, la població bacteriana total, el nombre de soques i la quantitat de fòssils existents.

- 5) Anem a modificar un parell de circumstàncies del programa: obriu el menú **Simulació**, per fer-ho podeu seguir dos camins. El més llarg consisteix a prémer f10, que us situarà en la barra de menús, seleccionar el menú **Simulació** amb les tecles de navegació i obrir-lo prement retorn. El camí més curt consisteix a prémer simultàniament la combinació de tecles alt-S.
- 6) Seleccioneu l'opció **Condicions** amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i premeu la tecla retorn. Premeu la tecla tabulador fins a seleccionar com a zona activa (ressaltada) les mutacions i desactiveu-les (Tecla I). Seleccioneu ara la reproducció sincronitzada i deixeu-la igualment inhibida. Cliqueu el botó **D'acord** (tecla retorn).
- 7) Cada vegada que premeu la tecla f9 avançareu un cicle. Un cicle simbolitza el temps que tarden els bacteris a dividir-se, normalment de 10 a 60 minuts. Observeu com canvia el nombre de bacteris de la soca M0 i el comptador de cicles de la finestra inferior. Observeu també el nivell de nutrients (glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades) a la finestra de la dreta. Anoteu la població total de cada cicle fins que n'hagin transcorregut sis.
- 8) Ara fóra interessant que representéssiu gràficament les dades que heu anat anotant, però el programa Evolució bacteriana us ho pot fer: obriu el menú **Història**, recordeu que podeu seguir dos camins. El més llarg consisteix a prémer f10, que us situarà a la barra de menús, seleccionar el menú **Història** amb les tecles de navegació i obrir-lo prement retorn. El camí més curt consisteix a prémer simultàniament la combinació de tecles alt-H.
- 9) Seleccioneu l'opció **Demografia** amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i premeu la tecla retorn. A la pantalla veureu una finestra amb la població total de bacteris de cada cicle. Amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall podeu desplaçar els cicles i veure'n la població. Aquestes poblacions han de ser les mateixes que teniu anotades. Un cop ho hagueu comprovat, tanqueu la finestra (combinació de tecles alt-f3).
- 10) Torneu a obrir el menú **Història**, seleccioneu l'opció **Gràfica Població** amb les tecles de navegació i premeu la tecla retorn. Visualitzareu per pantalla una representació gràfica de la població bacteriana en funció del temps. Observeu-la fins que la compregueu i copieu-la aquí sota. ¿Quina forma té la gràfica? ¿Com varia la població bacteriana en funció del temps?
- 11) Premeu la tecla esc per tornar a l'entorn de treball de la simulació.
- 12) Continueu anotant les poblacions totals fins que arribeu al cicle 11. Observeu com varia el nombre de bacteris. Recordeu que sempre que vulgueu podeu anar al menú i consultar les poblacions dels cicles passats amb l'opció **Demografia** i la gràfica de l'opció **Gràfica Població**.

- 13) Continueu executant el programa i anotant les poblacions bacterianes respectives fins que arribeu al cicle 18. El temps de generació en molts bacteris és d'uns 20 minuts, pel que 18 cicles equivaldrien a unes sis hores reals.
- 14) Torneu al menú i consulteu l'opció **Gràfica Població**. Estudieu detingudament la gràfica i les dades que heu apuntat. Copieu la gràfica aquí sota. Compareu els cicles inicials d'aquesta gràfica i la que havíeu fet al cicle 6. Tenen la mateixa forma? Per què?
- 15) Amb les dades que heu anotat podeu obtenir la funció que descriu el creixement d'una població bacteriana. Utilitzeu aquesta funció per calcular quants bacteris hi hauria en 30 cicles (unes 10 hores reals) i en 600 cicles (uns 8 dies).
- 16) Això és el que podríeu obtenir en pocs dies a partir d'un sol bacteri. Per fer una comparació, els científics creuen que a tot l'univers hi ha uns 10^{100} àtoms.
- 17) Després d'aquesta experiència, ¿com qualificaríeu la capacitat reproductora dels bacteris?

¿Crèieu el mateix abans de començar aquesta simulació?
- 18) Continueu executant el programa i anotant les corresponents poblacions totals durant 20 cicles més.
 - ¿Segueix creixent el nombre de bacteris tal i com havíeu previst?
 - ¿Què passaria si hagués continuat aquest creixement?
 - Què és el que passa realment?
- 19) Plantejeu hipòtesis que expliquin l'aturada en el creixement. Indiqueu clarament en cada hipòtesi quins factors creieu que han produït aquesta aturada.
- 20) Comproveu les vostres hipòtesis canviant el nivell dels factors ambientals del programa. Podeu fer-ho accedint als menús **Nutrients** i **Ambient**. Expliqueu els resultats d'aquests experiments i les conclusions que n'heu obtingut.
- 21) En aquesta simulació intervenen tres classes de nutrients (glucosa, aminoàcids i bases nitrogenades). ¿Són tots ells aprofitats pels bacteris? Quins d'ells són essencials? Comproveu-ho modificant els seus nivells a la simulació i observant-ne les conseqüències.

6.2. Les mutacions

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, cromosoma, gen, divisió cel·lular, nutrició cel·lular, ARN, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, llum ultraviolada, tactisme, penicil·lina, mutació, taxa de mutació, adaptació.

Introducció

Els microbiòlegs han observat que els bacteris s'adapten ràpidament als canvis ambientals. Així, si els exposem a nous antibiòtics, passat un temps els mutants resistents predominen en la població. ¿Com s'originen aquestes mutacions?

Durant la història de la biologia s'han plantejat dues hipòtesis alternatives sobre la seva aparició:

- Les mutacions són postadaptatives. Un medi ambient determinat provoca mutacions per adaptar l'organisme a aquell medi.
- Les mutacions són aleatòries (preadaptatives). Es produeixen totalment a l'atzar. La selecció natural només tria les mutacions adaptatives, sense produir-les.

Anem a contrastar aquestes hipòtesis mitjançant una simulació amb l'ordinador.

Descripció de la simulació

- 1) Engegueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per iniciar el programa Evolució bacteriana. Recordeu que la tecla f1 us condueix al sistema d'ajuda.
- 2) Trieu el cromosoma senzill. Aquesta és l'opció activa per defecte, per tant, només cal que premeu la tecla retorn o que cliqueu el botó **D'acord**. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Síntesi d'ARN.
 - Tactisme a la llum ultraviolada.
 - Tactisme a la glucosa
 - Tactisme als aminoàcids.
 - Tactisme a les bases nitrogenades.
 - Resistència a la penicil·lina.
- 3) Som a l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que hi observeu. Recordeu que la tecla f1 us condueix al sistema d'ajuda.
- 4) Modifiqueu dues circumstàncies del programa. Obriu el menú **Simulació**,

prement simultàniament les tecles alt-s. Seleccioneu l'opció **Condicions** amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i premeu la tecla retorn. Premeu la tecla tabulador fins a triar com a zona activa (ressaltada) les conjugacions i desactiveu-les (tecla I). Inhibiu de la mateixa manera la reproducció sincronitzada. Finalment, cliqueu el botó **D'acord** (tecla retorn).

- 5) Cada vegada que premeu la tecla f9 avançareu un cicle. Un cicle simbolitza el temps que tarden els bacteris a dividir-se, normalment de 10 a 60 minuts. Observeu com canvien la població de la soca M0 i el comptador de cicles de la finestra inferior.
- 6) Continueu passant cicles lentament, prement cada vegada la tecla f9, fins que s'esdevingui una mutació. En aquest moment visualitzareu per pantalla una nova soca i una finestra d'informació. Podeu comprovar que el cromosoma del nou clon és idèntic al del seu progenitor menys en el valor d'un gen. Observeu que el nom d'aquesta soca està format pel prefix M (de Mutació), el número del cicle en què s'ha originat i una lletra (que permet distingir les mutacions del mateix cicle). Quan hagueu comprès què ha passat, premeu la tecla retorn per continuar la simulació.
- 7) Recordeu una opció del programa que us podrà ser bastant útil. Ja sabeu que l'ordinador us informa de les mutacions i de la població total de cada cicle. A més, també emmagatzema a la seva memòria el nombre de mutacions i la població dels cicles passats. L'opció **Demografia** del menú **Història** permet visualitzar aquestes dades. Recordeu que per accedir-hi heu de prémer alhora les tecles alt-h, seleccionar l'opció **Demografia** amb les tecles de navegació i prémer la tecla retorn. Recordeu també que amb les tecles fletxa amunt i fletxa avall podeu desplaçar els cicles i visualitzar la població i les mutacions de tots ells.
- 8) Una altra opció que us podrà ajudar molt és l'opció **Mutacions** del menú **Història**. Activeu-la i visualitzareu una nova finestra (amb el número 7), la qual recorda els últims mutants (fins a 50), i indica en quin cicle han aparegut i el gen que han mutat. Aquest gen mutat es mostra amb el color del seu nou valor, mentre la resta del cromosoma apareix en color blau cel.
- 9) Amb tantes finestres, la superfície de treball començarà a semblar una taula de despatx desordenada. Per poder treballar a gust podeu fer el següent:
 - Activar la finestra que vulgueu prement simultàniament la tecla alt i la tecla corresponent al seu número (per exemple, alt-1 activa la finestra de les soques bacterianes).
 - Tancar les finestres que no utilitzeu (les tres primeres no es poden tancar) i obrir-les després, quan les torneu a necessitar.
 - Utilitzar les opcions del menú **Finestra**, amb les quals podeu moure les finestres, canviar-hi la mida, ampliar-les o distribuir-les per la superfície de treball (excepte les tres primeres, que són fixes).
- 10) Ja heu vist que les mutacions són un fenomen rar: heu hagut d'esperar que hi

hagués molts bacteris per observar-ne una! ¿Amb quina freqüència es presenten? Això és el que mesura la taxa de mutació.

Taxa de mutació

Què és la taxa de mutació?

La taxa de mutació indica la velocitat a la qual es produeixen les mutacions.

La taxa de mutació pot expressar-se, segons convingui, en:

- a) Mutacions/Cèl·lula*
- b) Mutacions en un gen/Cèl·lula*

En tots els casos, la taxa de mutació es refereix a les mutacions en un cicle cel·lular.

Com es mesura la taxa de mutació?

Per calcular la taxa de mutació per cèl·lula hauríeu d'aplicar la fórmula:

$$\text{Taxa M.} = \frac{\text{Nombre total de mutacions}}{\text{Nombre total de cèl·lules}}$$

Si en cada cicle hi ha poques mutacions, el millor és treure la mitjana de les taxes de diversos cicles. En aquest cas, la fórmula seria:

$$\text{Taxa M.} = \frac{\text{Suma de les mutacions de tots els cicles}}{\text{Suma de les poblacions de tots els cicles}}$$

Quan s'hagin produït al menys 30 mutacions, calculeu la taxa de mutació d'aquests bacteris. Per fer-ho podeu utilitzar l'opció **Demografia** del menú **Història** i la calculadora del menú **Ajuda**. Anoteu aquí el valor que heu obtingut. ¿Els companys que treballen amb altres ordinadors han obtingut valors semblants als que heu obtingut vosaltres?

- 11) Ara que ja heu calculat una taxa de mutació, ¿recordeu les dues hipòtesis de la introducció? ¿La mutació és provocada pel medi per tal de millorar l'adaptació o bé apareix aleatòriament, sense saber si serà adaptativa? Escriuiu aquí la vostra opinió.
- 12) Per tal de posar a prova aquestes dues hipòtesis realitzareu una investigació amb el programa. El que heu de fer és observar quins mutants apareixen en dues condicions diferents, sense penicil·lina al medi i amb un nivell escàs de penicil·lina. Per a cada ambient haureu d'obtenir, com a mínim, 20 mutants.

- 13) Quins resultats cal esperar segons cada hipòtesi?
- 14) Anoteu els resultats i analitzeu-los. ¿Quina de les hipòtesis inicials els explica millor? ¿Quina conclusió traieu sobre les mutacions?

6.3. Evolució per selecció natural

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, tactisme, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, llum ultraviolada, penicil·lina.

Introducció

Ja sabeu que els éssers vius tenen una enorme capacitat reproductora i que la falta d'aliment els impedeix multiplicar-se indefinidament. També sabeu que amb una certa freqüència es produeixen mutacions aleatòries i que això augmenta la variabilitat de les poblacions. Ara comprovareu com aquests factors i alguns més permeten l'evolució de les espècies.

Descripció de la simulació

- 1) Engegueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per executar el programa Evolució bacteriana. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'Ajuda.
- 2) Trieu el cromosoma senzill. Aquesta és l'opció activa per defecte, per tant, només cal que premeu la tecla retorn o que cliqueu el botó **D'acord**. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Síntesi d'ARN.
 - Tactisme a la llum ultraviolada.
 - Tactisme a la glucosa
 - Tactisme als aminoàcids.
 - Tactisme a les bases nitrogenades.
 - Resistència a la penicil·lina.
- 3) Sou a l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que hi observeu. Recordeu que la tecla f1 us condueix al sistema d'ajuda.
- 4) Modifiqueu un parell de circumstàncies del programa; obriu el menú **Simulació**, prement simultàniament alt-s. Seleccioneu l'opció **Condicions** amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i premeu la tecla

retorn. Seleccioneu conjugacions amb la tecla tabulador i desactiveu-les (tecla I). Inhibiu igualment la reproducció sincronitzada i premeu el botó **D'acord** (tecla retorn).

- 5) Cada cop que premeu la tecla f9 avançareu un cicle. Observeu que en fer-ho canvien el nombre de bacteris de la soca M0 i el comptador de cicles de la finestra inferior.
- 6) Continueu executant el programa fins que arribeu al cicle 18. Fins ara els bacteris s'han reproduït a tota velocitat, seguint una corba exponencial, ja que no hi ha res que limiti la seva reproducció. Recordeu que podeu visualitzar la gràfica d'aquest creixement seleccionant l'opció **Gràfica Població** del menú **Història**.
- 7) Seguiu executant el programa durant uns deu cicles més. Ara la població bacteriana s'ha estancat. ¿Recordeu què és el que deturava el creixement anterior?
- 8) Possiblement s'haurà produït alguna mutació, originant noves soques. ¿Recordeu si aquestes mutacions són postadaptatives o aleatòries?
- 9) D'aquesta manera s'originen nous clons de cèl·lules. Això produeix una variabilitat en la població bacteriana. ¿Estan igualment ben adaptades totes aquestes soques? ¿Què creieu que passarà amb cadascuna d'elles?
- 10) Deixeu transcórrer alguns cicles més fins a comprovar les vostres prediccions. ¿Han estat confirmades per la simulació?
- 11) Arribarà un moment en què predomini la soca més ben adaptada a aquest ambient que permet el programa. Quins gens té aquesta soca?
- 12) Per entendre millor el que ha passat és convenient que consulteu dues opcions del menú **Història**:
 - L'opció **Fòssils** conté el nom, el cicle en què s'ha extingit, el cromosoma i les soques progenitores de les varietats que han estat més importants en el procés evolutiu.
 - L'opció **Genealogia** mostra un arbre genealògic, connectant les varietats del registre fòssil amb els seus ancestres i descendents.
- 13) ¿La població bacteriana ha restat estàtica o ha evolucionat?

Què és el que impulsa aquest procés?
- 14) Torneu al menú i canvieu les condicions del medi a radiació ultraviolada escassa. Què creieu que passarà?
- 15) Expliqueu què ha passat realment.

- 16) Quan predomini la soca més ben adaptada que permeti el programa, canvieu les condicions a penicil·lina escassa. Què creieu que passarà?

Què ha passat realment?

Si els ambients són diferents, els organismes evolucionen en direccions també diferents. Aquest fenomen s'anomena *divergència adaptativa*.

Observació important

En aquesta pràctica heu vist simulada l'acció de la selecció natural que ha produït una evolució adaptativa en l'ambient. Tanmateix, aquesta simulació té unes limitacions que heu de conèixer:

- L'evolució real es produeix amb molts més gens, que poden adoptar moltíssimes formes diferents. A més, poden aparèixer nous gens que en modifiquin totalment el procés.
- L'ambient real és molt més ric i complex que el d'aquesta simulació.

Aquests i altres factors fan que:

- L'evolució no s'aturi mai. No hi ha cap espècie amb una adaptació perfecta.
- El nombre de possibles formes evolutives sigui il·limitat. És pràcticament impossible que dos processos evolutius donin exactament el mateix resultat.

6.4. Reproducció sexual i velocitat evolutiva

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, tactisme, glucosa, aminoàcids, bases nitrogenades, recombinació, conjugació.

Introducció

Els bacteris normalment es reproduïxen de forma asexual, per simple divisió cel·lular. Tanmateix, algunes vegades realitzen una forma de reproducció sexual anomenada *conjugació*. En ella dos bacteris recombinen els seus cromosomes fins a obtenir-ne un de nou, que conté un segment de cada progenitor. El punt de trencament de la recombinació és aleatori.

En aquesta simulació intentarem veure quins avantatges treuen els bacteris de les conjugacions i, en general, per què molts éssers vius es reproduïxen sexualment.

Descripció de la simulació

- 1) Engegueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per executar el programa Evolució bacteriana. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.
- 2) Trieu el cromosoma de nutrició. Per fer-ho només cal que premeu la lletra N i, a continuació, la tecla retorn o bé seleccioneu l'opció **Nutrició** amb el ratolí i després cliqueu el botó **D'acord**. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Degradació de midó.
 - Degradació d'aminoàcids.
 - Degradació de proteïnes.
 - Síntesi de bases nitrogenades.
 - Degradació d'àcids nucleics.
 - Tactisme a la glucosa
 - Tactisme als aminoàcids.
 - Tactisme a les bases nitrogenades.
- 3) Sou a l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que hi observeu. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.
- 4) Modifiqueu algunes circumstàncies del programa: obriu el menú **Simulació** prement simultàniament les tecles alt-s. Seleccioneu l'opció **Condicions** amb les tecles de navegació fletxa amunt i fletxa avall i premeu la tecla retorn. Seleccioneu les conjugacions amb la tecla tabulador i desactiveu-les (tecla I). Cliqueu el botó **D'acord** (tecla retorn). Inhibiu després les pauses i el so, en el mateix menú **Simulació**.
- 5) La simulació s'executarà a tota velocitat. Recordeu que podeu aturar-la quan vulgueu prement la tecla f10, que activarà la barra de menús. La tecla esc continuarà l'evolució.
- 6) Seguiu executant el programa fins que predomini la soca més adaptada possible. Anoteu el cicle en què ha sorgit aquesta soca (el número que forma part del seu nom). Consulteu les opcions **Fòssils** i **Genealogia** per comprendre millor el que ha passat. Copieu la informació que us ofereixen aquestes opcions.
- 7) Inicieu una altra simulació amb el mateix cromosoma (opció **Tornar a començar** del menú **Fitxer**). Aquesta vegada deixeu activada la recombinació, però inhibiu les pauses i el so.
- 8) Executeu el programa fins que predomini la soca més adaptada possible. Igual que abans, anoteu el cicle en què ha sorgit aquesta soca. Consulteu les opcions **Fòssils** i **Genealogia** i copieu la informació que ofereixen. Recordeu que haureu de completar l'arbre genealògic amb el segon progenitor que apareix al registre fòssil. Això permet veure els progenitors

de les soques recombinants i el cromosoma resultant.

- 9) ¿Hi ha hagut la mateixa diversitat (nombre de varietats) en els dos casos? (Consulteu els registres fòssils.)
- 10) ¿Heu tardat el mateix nombre de cicles en arribar a la mateixa situació? ¿En quin cas l'evolució ha estat més ràpida? Per què?
- 11) Expliqueu algun avantatge d'una espècie pel fet de tenir reproducció sexual.

6.5. Antibiòtics i resistència

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, ARN, ribosoma, antibiòtic, cloramfenicol, estreptomicina, penicil·lina, rifampicina, tetraciclina, resistència als antibiòtics.

Introducció

Des que Fleming va descobrir la penicil·lina, els antibiòtics han adquirit una importància decisiva per al tractament de les malalties bacterianes. Desgraciadament, després de la introducció d'un antibiòtic, comencen a aparèixer diverses soques bacterianes més o menys resistents a ell. En aquesta pràctica intentarem descobrir com s'originen aquestes resistències i la millor forma de retardar la seva aparició.

Descripció de la simulació

- 1) Engueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per executar el programa Evolució bacteriana. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.
- 2) Trieu el cromosoma d'Antibiòtics. Per fer-ho només cal que premeu la lletra A i després la tecla retorn o bé que seleccioneu amb el ratolí l'opció **Antibiòtics** i després cliqueu el botó **D'acord**. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Síntesi d'ARN.
 - Ribosoma 30s.
 - Resistència al cloramfenicol.
 - Resistència a la penicil·lina.
 - Resistència a la tetraciclina.
- 3) Us trobeu en l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar

examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que hi observeu. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.

- 4) Cada cop que premeu la tecla f9 avançareu un cicle. Un cicle simbolitza el temps que tarden els bacteris a dividir-se, normalment de 10 a 60 minuts. Observeu com canvia el nombre de bacteris de la soca M0 i el comptador de cicles de la part inferior.
- 5) Continueu executant la simulació fins que s'acabi la fase de creixement exponencial de la població. En aquest moment començareu a introduir antibiòtics en el medi, de forma controlada, per tal d'estudiar els efectes que això té en l'evolució dels bacteris.
- 6) Escriviu les hipòtesis que se us acudeixin sobre l'adquisició de resistència als antibiòtics per part dels bacteris. Aquestes hipòtesis han de ser comprovables utilitzant el programa Evolució bacteriana.
- 7) Si no les heu plantejades, afegiu aquestes hipòtesis a la vostra llista:
 - Els bacteris que han estat en contacte amb un antibiòtic es converteixen en resistents.
 - El contacte amb l'antibiòtic provoca l'aparició de mutacions que confereixen resistència contra ell.
 - Els bacteris sensibles són eliminats més ràpidament que els resistents.
- 8) Comproveu les vostres hipòtesis introduint un antibiòtic en el medi en quantitat escassa. Després feu el mateix amb els altres antibiòtics.
- 9) ¿Quines de les vostres hipòtesis han superat amb èxit la simulació? ¿Passa el mateix amb tots els antibiòtics?
- 10) En alguns casos, la resistència a un antibiòtic s'adquireix de forma sobtada i absoluta, mentre que en d'altres, s'adquireix de forma gradual. Indiqueu quina classe de resistència observeu en els antibiòtics del programa.
- 11) Investigueu com actuen aquests antibiòtics i quins són els mecanismes que produeixen resistència.
- 12) Podeu plantejar altres hipòtesis sobre l'aparició de resistències, referents a les dosis utilitzades o a la utilització conjunta de diversos antibiòtics. Dissenyeu simulacions experimentals que permetin comprovar-les i anoteu els resultats obtinguts.

6.6. Efectes de la llum ultraviolada sobre els éssers vius

Material de laboratori

Ordinadors compatibles IBM PC, programa Evolució bacteriana 2.0.

Coneixements previs

Bacteri, gen, cromosoma, mutació, taxa de mutació, tactisme, llum ultraviolada.

Introducció

La llum ultraviolada és un tipus de radiació electromagnètica de longitud d'ona més curta que la llum visible. Forma part de la llum del Sol i, encara que és filtrada per la capa d'ozó de l'atmosfera, és la responsable de l'enfosquiment de la pell exposada al Sol.

En aquesta simulació comprovareu alguns efectes de la llum ultraviolada sobre els bacteris.

Descripció de la simulació

- 1) Engueu l'ordinador i seguiu les instruccions del professor per executar el programa Evolució bacteriana. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.
- 2) Trieu el cromosoma senzill. Aquesta és l'opció activa per defecte, per tant, només cal que premeu la tecla retorn o que cliqueu botó **D'acord** amb el ratolí. Aquest cromosoma contindrà els gens següents:
 - Síntesi d'ARN.
 - Tactisme a la llum ultraviolada.
 - Tactisme a la glucosa
 - Tactisme als aminoàcids.
 - Tactisme a les bases nitrogenades.
 - Resistència a la penicil·lina.
- 3) Us trobeu en l'entorn de treball del programa. L'ordinador esperarà pacientment que premeu qualsevol tecla, així que abans de continuar examineu amb calma el contingut de la pantalla fins a comprendre tot el que hi observeu. Recordeu que la tecla f1 condueix al sistema d'ajuda.
- 4) Cada cop que premeu la tecla f9 avançareu un cicle. Un cicle simbolitza el temps que tarden els bacteris a dividir-se, normalment de 10 a 60 minuts. Observeu com canvia el nombre de bacteris de la soca M0 i el comptador de cicles de la part inferior.
- 5) Continueu executant la simulació fins que s'acabi la fase de creixement exponencial de la població. En aquest moment començareu a introduir llum ultraviolada en el medi, de forma controlada, per tal d'estudiar els efectes que això té en l'evolució dels bacteris.
- 6) Dissenyeu simulacions per tal de comprovar les hipòtesis següents i d'altres que se us acudeixin i siguin comprovables.

- La llum ultraviolada disminueix la taxa de mutació.
 - La llum ultraviolada augmenta la taxa de mutació.
 - La llum ultraviolada mata els bacteris.
 - La llum ultraviolada en grans quantitats és un bon desinfectant.
 - La llum ultraviolada provoca l'aparició de mutants amb tactisme negatiu a ella.
 - Tots els bacteris exposats a la llum ultraviolada adquireixen tactisme negatiu a ella.
- 7) Anoteu els resultats que heu obtingut per totes les hipòtesis que heu comprovat.
- 8) Busqueu informació en llibres de genètica o microbiologia sobre la forma en què actua la llum ultraviolada i sobre els efectes que té en els éssers humans.

7. AVALUACIÓ DEL PROGRAMA

7.1. Resultats obtinguts per l'autor

Des que vaig crear la primera versió d'Evolució bacteriana, fa més de sis anys (Llort 1988), l'he anat utilitzant amb els meus alumnes. L'avaluació del programa m'ha permès de tenir una idea sobre el seu camp d'aplicació i la seva eficàcia, detectar errors i punts susceptibles de millora i aprendre sobre els pre-conceptes evolutius dels estudiants i el canvi conceptual.

Aquestes avaluacions i els seus resultats han estat comunicades a diversos congressos didàctics (Llort 1989, 1992a, 1993). Aquí les resumiré breument.

Durant el curs 1987-88 vaig utilitzar la versió inicial del programa (Llort 1988) amb els meus alumnes de COU i vaig avaluar-la basant-me en l'observació i en l'anàlisi de les respostes a les preguntes dels exàmens. D'aquesta avaluació vaig obtenir conclusions molt encoratjadores (Llort 1989) i em permeté detectar varis aspectes millorables.

Durant el curs 1990-91 vaig utilitzar la segona versió del programa (Llort 1992b) i vaig avaluar-la basant-me en un qüestionari que recollia les opinions dels alumnes i en una prova tipus test, utilitzada com a exploració inicial i com a exploració final (Llort 1992a).

Pel que fa a les opinions dels estudiants, aquests van valorar molt positivament el programa, sobretot els seus aspectes didàctics. La valoració per a la majoria dels aspectes va ser entre bona i molt bona. Així, la majoria dels estudiants que hi van treballar creien que l'aprenentatge amb Evolució bacteriana era més agradable i efectiu que la utilització del mètode magistral.

Pel que fa a la prova tipus test, després d'haver fet un processament estadístic

rigorós, les notes de la prova final van ser significativament superiors a les de l'exploració inicial. A més, vaig comprovar que els conceptes que més milloraven eren els tractats de manera doble, utilitzant classes teòriques i simulacions amb l'ordinador.

Durant el curs 1991-92 vaig realitzar una nova avaluació del programa, basant-me en un qüestionari de preguntes obertes (Llort 1993) utilitzat com a avaluació inicial i final. Les respostes van ser processades utilitzant xarxes sistèmiques i posteriorment categoritzades.

A l'exploració final vaig observar una millora considerable en els conceptes evolutius dels estudiants a totes les qüestions. Inicialment els estudiants corresponen majoritàriament als perfils "Primitiu" i "Lamarckià". Després de seguir el mètode d'aprenentatge utilitzat, els perfils predominants van ser els "Darwinians". Per comparar, aquests resultats van ser molt millors que els descrits anteriorment per María Pilar Jiménez, en alumnes de segon curs de Ciències Biològiques (Jiménez 1989). Cal tenir en compte que aquesta autora només va avaluar els alumnes, sense haver intervingut.

Durant els cursos 1992-93 i 1993-94 he utilitzat la versió actual d'Evolució bacteriana i he seguit avaluant el programa. Els resultats d'aquesta avaluació, encara no publicats, són almenys tan bons com els de les versions anteriors.

7.2. On adreçar els dubtes i suggeriments

L'autor agrairà les comunicacions sobre aspectes diversos del programa, sobretot pel que fa a errors detectats, suggeriments de millora, avaluació de la utilització del programa i dels seus guions didàctics o dubtes sobre el seu funcionament.

L'adreça per posar-vos en contacte amb l'autor és la següent:

Josep M. Llort i Planchadell
IB Gabriel Ferrater
Partida Monterols s/n
43206 - REUS

8. BIBLIOGRAFIA

AYALA, Francisco J. 1978. *Mecanismos de la evolución*. "Investigación y Ciencia" núm. 26, nov. 78, pàgs. 18-33.

BROCK, Thomas D. 1976. *Biología de los microorganismos*. Ed. Omega.

COLL, César i Solé, Isabel. 1989. *Aprendizaje significativo y ayuda pedagógica*. "Cuadernos de Pedagogía" núm. 168, pàgs. 16-20.

- DAWKINS, Richard. 1988. *El relojero ciego*. Ed. Labor.
- De KRUIF, Paul. 1986. *Cazadores de microbios*. Ed. Salvat, Col·lecció Biblioteca científica núm. 35.
- DRIVER, Rosalind i altres. 1989. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Ed. MEC i Morata.
- GIL, Daniel. 1983. *Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias*. "Enseñanza de las Ciencias" pàgs. 26-33.
- GIORDAN, André i altres. 1988. *Conceptos de Biología 2*. Capítol 4. MEC i Ed. Labor.
- GRAU, Ramon. 1992. *Evolució i canvi conceptual: l'anàlisi dels textos científico-històrics com a estratègia didàctica*. Llibre d'actes del 3r Simposi sobre l'Ensenyament de les Ciències Naturals a Girona. Ed. Eumo.
- HAMMOND, S. M. i LAMBERT, P. A. 1980. *Antibióticos y acción antimicrobiana*. Ed. Omega, col·lecció Cuadernos de Biología.
- JANVIER, P. i al. 1980. *Le cladisme*. La Recherche 11, pàgs. 1396-1406.
- LEHNINGER, Albert L. 1978. *Bioquímica*. Ed. Omega.
- LLORT, Josep M. 1988. *Evolució*. Ed. Programa d'Informàtica Educativa de la Generalitat de Catalunya.
- LLORT, Josep M. 1989. *Ensenyament assistit per ordinador del mecanisme de l'evolució per selecció natural*. II Simposi sobre l'Ensenyament de les Ciències Naturals. Tarragona.
- LLORT, Josep M. 1991. *Conceptos previos en alumnos de Ciencias Naturales de primero de BUP*. I Simposio sobre la Docencia de las Ciencias Experimentales. Madrid.
- LLORT, Josep M. 1992. *Avaluació del programa d'ordinador Evolució bacteriana*. 3r Simposi sobre l'Ensenyament de les Ciències Naturals a Girona.
- LLORT, Josep M. 1992. *Evolución bacteriana*. Ed. Ministerio de Educación y Ciencia, Serie Software educativo para el aula.
- LLORT, Josep M. 1993. *El programa Evolución bacteriana: Evaluación de una actividad de aprendizaje asistida por ordenador*. IV Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias y de las Matemáticas, Barcelona.
- MAYR, Ernst. 1978. *La evolución*. "Investigación y Ciencia" núm. 26, nov. 78, pàgs. 6-16.

MOSTERIN, Jesús. 1978. *La estructura de los conceptos científicos*.
"Investigación y Ciencia" núm .16, pàgs. 82-93.

MOORBATH, Stephen. 1977. *Las rocas más antiguas y la acreción de los continentes*. "Investigación y Ciencia" núm. 8, pàgs 66-80.

PUMAROLA, A. i altres. 1984. *Microbiología y parasitología médica*. Ed. Salvat.

STRICKBERGER, Monroe W. 1978. *Genética*. Ed. Omega.

WEISZ, Paul B. 1978. *La ciencia de la zoología*. Ed. Omega.