

24203



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
BIOLOGÍA**

**ESTUDIO DE LOS PATRONES DE COLORACION  
EN PECES MODELADOS CON AUTOMATAS  
CELULARES**

**T E S I S**  
**PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**B I O L O G A**  
**P R E S E N T A :**  
**MARIA DEL ROCIO SALGADO CUEVAS**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**MEXICO, D. F.**

**1989**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

RESUMEN	III
INTRODUCCIÓN	IV
MORFOGÉNESIS DE PECES	1
Formación de la Cresta Neural	1
Derivados de la cresta neural	3
Migración de las células pigmentarias	3
Adhesión celular	8
Comunicación entre células	11
COLORACIÓN DE PECES	17
Generalidades	17
Características de los organelos pigmentarios	19
Melanosomas	19
Guanóforos	21
Pteridosomas	22
Lipóforos	22
Cambios en la coloración	23
Origen de los organelos pigmentarios	28
Factores que provocan la coloración	31
Alimentación	31
Control nervioso	31
Hormonas	32
Factores intracelulares	33
Cambios morfológicos	34

<b>PATRONES DE COLORACIÓN</b>	35
Un comentario previo al estudio	35
Patrones	36
Peces de agua dulce	44
Peces de agua salada	52
<b>AUTÓMATAS CELULARES</b>	58
Introducción a los Autómatas Celulares	58
Autómatas Celulares Unidimensionales	64
Diferentes clases de Autómatas Celulares	65
Reglas locales de evolución	66
Reglas totalísticas	68
Clasificación de los patrones	68
los Autómatas Celulares como modelo morfogénético	69
<b>APLICACIÓN DE LOS AUTÓMATAS CELULARES EN BIOLOGÍA</b>	71
Los Autómatas Celulares como modelo de patrones de coloración en peces	73
Resultados	85
<b>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE ESTE MODELO EN BIOLOGÍA</b>	92
<b>APÉNDICES</b>	94
<b>REFERENCIAS</b>	112

## RESUMEN

El trabajo que se presenta es en parte una recopilación bibliográfica la cual explica algunos comportamientos celulares; principalmente se enfoca a las células pigmentarias en peces.

Las células pigmentarias o cromatóforos se comunican y desplazan a diferentes zonas en donde expresan su pigmentación, y se establecen en epidermis para realizar funciones específicas, de tal manera que externamente podemos ver ciertos patrones de coloración: rayas verticales, horizontales, diagonales, puntos y manchas. Se elaboró una clasificación general de los patrones de coloración en peces, basándose en ésta se simularon los patrones, por medio de un modelo computacional de Autómatas Celulares, cuyas características y reglas se profundizan en el capítulo IV. Este modelo matemático que se ha utilizado en fenómenos físicos y ahora también en Biología, se elaboró en lenguaje de alto nivel Pascal, y simula a las células en su medio ambiente.

Se tomó una primera generación de Autómatas Celulares, que sería la simulación de las células pigmentarias cuando estas se encuentran en la cresta neural, y se dejó evolucionar hasta forman diversos patrones, posteriormente se compararon los resultados con los patrones naturales de los peces, de esto se observó que: Los Autómatas Celulares Elementales pueden modelar ciertos patrones de coloración en peces aunque no todos, esto se debe a la complejidad y variedad mostrada por las células en su ambiente natural.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de los que estudiamos Biología, es explicar los fenómenos de una forma sencilla y fácil de entender; para elaborar estudios y mostrar la veracidad de explicación que los experimentos pueden dar a un fenómeno.

No obstante, hay muchos fenómenos que no tienen una explicación concreta, ya que su misma complejidad y variabilidad de interacciones los hace muy difíciles de entender. Sin embargo, hay otros los cuales son tan maleables que fácilmente pueden quedar explicados. Para tales investigaciones se han utilizado diversos mecanismos y herramientas como los modelos, y la utilización de estos depende del fenómeno a estudiar. Algunos de estos modelos se ven limitados a explicar sólo ciertas cosas. La herramienta que se utiliza en este trabajo se le conoce con el nombre de Automatas Celulares y está respaldada principalmente por ecuaciones en diferencias. Tiene una base matemática, y funciona con reglas y características bien definidas. Con ella abstraemos de la realidad un fenómeno y tratamos de modelarlo. Con éxito se ha obtenido el modelaje de la piel de algunos mamíferos y reptiles<sup>(1,2,13,25)</sup>, aquí se van a modelar los patrones de coloración en peces por medio de los Automatas Celulares. Las interacciones para que se den estos patrones de color vienen desde que se efectúa la diferenciación morfogénica. Se tomará en cuenta las células responsables del color, su origen embriológico y su posible adquisición de los pigmentos, cómo se da la comunicación en etapas tempranas y su migración a la epidermis del pez, los organelos pigmentarios conocidos que van a propiciar los patrones por medio de su posición y su coloración. Se elaboró un cuadro que engloba en general a todos los patrones de coloración en los peces, para seguir el nivel de estudio que aquí se expone. Se presenta posteriormente lo que son los Automatas Celulares y la validez de esta herramienta como modelo en Biología.

Por lo tanto se espera que los patrones de coloración de los peces, sean modelados exitosamente por los Automatas Celulares.

## MORFOGÉNESIS DE PECES INTRODUCCIÓN

En la etapa de diferenciación, las células migran por caminos muy específicos para después mostrar en conjunto estructuras muy complejas. El modelo que se expone en este trabajo toma en cuenta a nivel de diferenciación, la comunicación celular que existe en esta etapa de desarrollo, además del número de células específicamente pigmentarias con respecto al tiempo. Porque si bien recordamos, se está modelando prepatrones que se presentan en el embrión. Es por esto que existe la necesidad de recordar cómo es la dinámica de las células pigmentarias, desde su formación hasta que llegan a epidermis.

El proceso de la fecundación activa el metabolismo del oocito, y como consecuencia de la anfimixia (unión de los pronúcleos) se inicia la siguiente etapa ontogenética que es la segmentación. Al finalizar esta etapa se inicia la gastrulación que consiste en una serie de movimientos morfo genéticos por medio de los cuales los blastómeros se deslizan sobre el vitelo en un movimiento envolvente (epibolia). Posteriormente se presenta la neurulación.

### FORMACIÓN DE LA CRESTA NEURAL

Como ya se mencionó, después del proceso de gastrulación, se inicia la formación del sistema nervioso central, el cual se origina a partir de la capa neuroectodérmica. Esta fase de neurulación, llamada así porque el evento más importante de ella es la formación del tubo neural, se inicia con el engrosamiento de las células del neuroectodermo y se continúa con una gran invaginación de ellas. Algunas células de este neuroectodermo se desprenden de él y se desplazan individualmente Fig. A.

Las células de la cresta neural inician la migración, poco después de que se cierra el tubo neural. Las células se dispersan principalmente a lo largo de dos caminos: I) lateralmente, entre el ectodermo y los somitas, e II) internamente entre el tubo neural

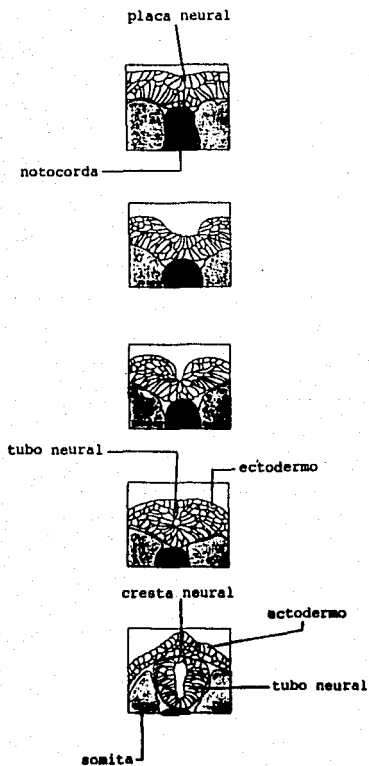


Figura A

Secciones transversales donde se muestra la formación del tubo neural en *Xenopus*



notocorda y los somitas. Fig. B.

#### DERIVADOS DE LA CRESTA NEURAL

Cuando las células migran entre el ectodermo y los somitas, la primera vía:

i) Dan lugar a las células pigmentarias de la piel,

Las células que migran por la segunda vía forman:

i) Los diversos tejidos nerviosos, células de Schwann, neuronas periféricas ganglios sensoriales, ganglio ciliar situado junto al ojo, y la cadena de ganglios simpáticos.

ii) Las células pigmentarias de los órganos más profundos.

Además, muchas células de la cresta neural se diferenciarán en células de la glía y las células de Schwann<sup>(1)</sup>, que forman las bandas de mielina de los nervios periféricos.

#### MIGRACIÓN DE LAS CÉLULAS PIGMENTARIAS

La primera ruta del camino (entre el ectodermo y los somitas), es la que más nos interesa ya que estas células van a originar las células pigmentarias de la piel, aunque también por la otra vía darán origen a las células pigmentarias de los órganos más profundos. La figura C muestra un corte transversal del tubo neural en vertebrados, y la figura D la vista de perfil de cómo las células pigmentarias se desplazan para formar prepatrones de coloración en el embrión respectivamente.

Las células de la cresta no están gobernadas por su carácter inicial, sino por su posición. Si las células de la cresta de un nivel anterior (que forman los ganglios entéricos) se cambian (injertan) a un nivel posterior, estos pasarán a formar los ganglios simpáticos en lugar de los entéricos, asimismo, si las células predestinadas a formar los ganglios simpáticos pasan al lugar de las células que

localización primitiva de las células de la cresta neural

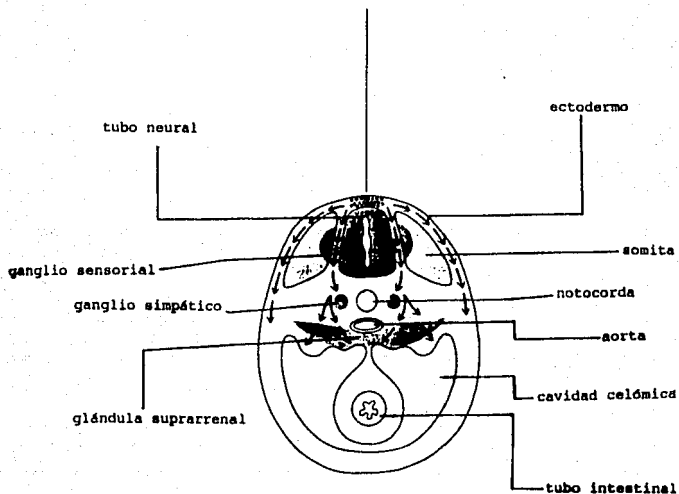


Figura B

Esquema que muestra las principales rutas de migración de las células de la cresta neural. Las células que van entre el ectodermo y los somitas, se diferenciarán en células pigmentarias, las que toman la vía profunda darán origen a las diferentes células del sistema nervioso periférico principalmente.

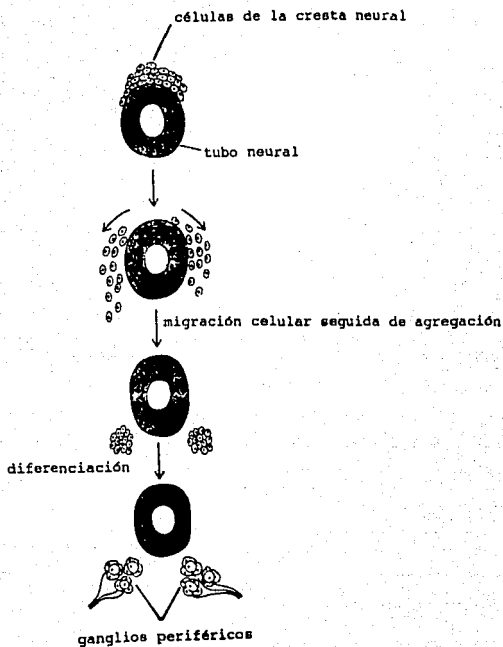


Figura C

Células de la cresta que migran lateralmente al tubo neural para diferenciarse en una gran variedad de tipos celulares.

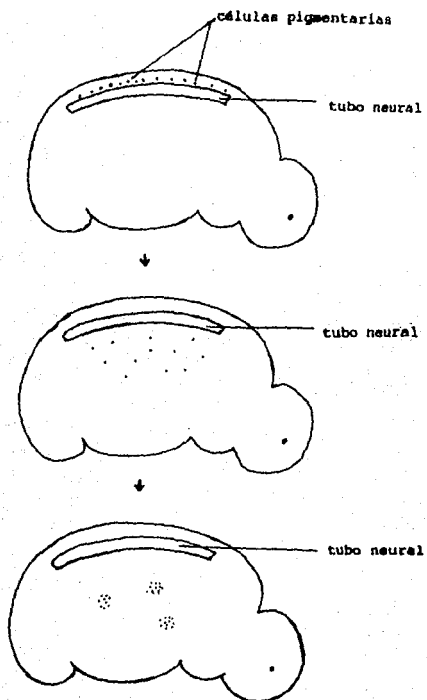


Figura D

Migración de las células pigmentarias en el embrión

formarán los ganglios entéricos, aquellas formarán los ganglios entéricos. Con eso se entiende que en ese momento las células no están predeterminadas a formar un órgano o estructura. La selectividad celular no está marcada aún.

Las células no muestran preferencia de vías. Pero ¿Cómo es que las células llegan a su destino sin perderse?, ¿Qué es lo que influye en ellas para que lleguen a su destino?. Existen propuestas de la distribución de la fibronectina<sup>(1)</sup>, fibras de colágena<sup>(37)</sup>, y los glicosaminoglicanos<sup>(1)</sup> especialmente ácido hialurónico (AA), y sulfato de condroitina. Otras moléculas que se encuentran en la Matriz extracelular (ECM) también guían a las células por su camino. Este ambiente extracelular es responsable de señalar el camino, que se ve facilitado en un ambiente celular organizado, al mismo tiempo que las células comienzan a separarse, se desplazan en grupos o aisladas para encontrar posiciones a lo largo de todo el embrión<sup>(22)</sup>, estas posiciones no son arbitrarias, alcanzan destinos específicos y en el caso de las células pigmentarias, forman modelos de pigmentación típicos. Ellas se desplazan dorsolateralmente<sup>(15)</sup> y la formación de pigmentos se lleva a cabo en un estado temprano del camino<sup>(20)</sup>. Trinkaus<sup>(36)</sup> mostró en melanocitos de *Blennius pholis*, que cuando estos se desplazan, su pigmentación no es tan marcada como cuando se establecen en forma definitiva. Las células pigmentarias en su camino van adquiriendo sus pigmentos, y cuando se establecen, su pigmentación se acentúa.

En el caso de las células pigmentarias, los patrones que den estas, será el resultado de una eliminación selectiva de las células, y estas cuando lleguen a su destino mostrarán los diversos patrones y colores, principalmente dados por una autoorganización celular.

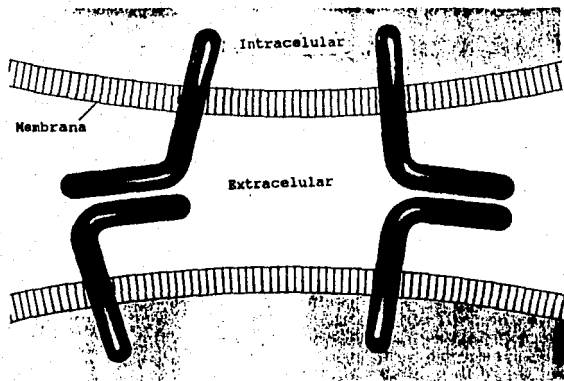
Trinkaus<sup>(36,37)</sup> trabajó con embriones de *Blennius pholis*, y observó las posiciones de las Masas Celulares Pigmentarias PCM, (Pigmented Cell Masses) sobre el vitelo. En un estado más temprano, cuando la epibolia está por completarse las PCM comienzan a ser más densamente pigmentadas y aumentan escásamente de tamaño. Cuando estas PCM migran, comienzan a teñirse de negro e incrementan su superficie de

área. El movimiento de los agregados es direccional, la causa de esto no se conoce aún.

#### ADHESIÓN CELULAR

Las Moléculas de Adhesión Celular, CAM (Cell-Adhesion Molecules) al igual que muchas otras proteínas, forman parte de la ECM, son macromoléculas que participan en la adhesión que existe entre las células. La adhesión puede ser homotípica si se trata de la unión entre células similares<sup>(9)</sup>, homofílica que se da entre moléculas similares Fig. E<sup>(9, 10)</sup>, y pueden darse uniones heterotípicas entre diferentes tipos de células por un mecanismo homofílico mediado por moléculas similares<sup>(9)</sup>. La fibronectina que es un tipo de molécula de adhesión de sustrato, SAM (Substrate-Adhesion Molecules) está directamente involucrada en la adhesión celular<sup>(8)</sup>, y se sugiere que sea una molécula puente de las células. Operacionalmente, las moléculas más importantes de las CAM son las SAM, las cuales forman parte de la Matriz extracelular.

Las CAM median las interacciones célula-célula, se distribuyen estratégicamente y cada una da un modelo característico, que se muestra en tiempo y espacio. En el desarrollo del embrión, son posiblemente responsables de los movimientos morfogénéticos. Existen gran cantidad de CAM y son muy específicas, las primeras que se identificaron fueron las N-CAM, nervio (nerve) y las L-CAM, hígado (liver). El grupo de Edelman descubrió estas dos proteínas de adhesión N-CAM y la L-CAM cuando trabajó con conejos inmunizados y observó que hay anticuerpos específicos bloqueadores de la adhesión. Él, a partir de sus estudios, propone una hipótesis que relaciona la regulación CAM con la expresión de los genes y el desarrollo de la forma animal<sup>(9)</sup>. También supone que la modulación local de la superficie celular (SAM) es un contribuyente principal de la morfogénesis. Se han identificado diversos CAM, que difieren en estructura, especificidad y modo de unión.



Tipo de adhesión Homofílica<sup>12, 101</sup>

Figura E

Edelman y sus colaboradores<sup>(10)</sup>, recientemente publicaron sus descubrimientos acerca de que las células son guiadas por señales químicas, y la eficacia de estas señales depende de las CAM. Llegó a tales conclusiones cuando siguió la formación de las plumas en el embrión de pollo. Todo se da por un proceso coordinado de movimiento celular, división y muerte de las células. Las CAM se proponen como moléculas morfóreguladoras, y las SAM podrían influenciar los eventos de migración en el embrión.

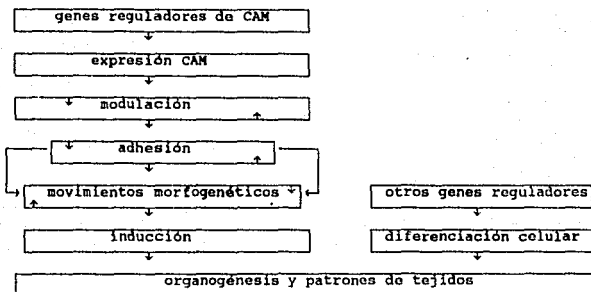
Las células de la cresta neural tienen moléculas N-CAM, además de otras en la superficie, están rodeadas por una matriz rica en fibronectina, cuando la fibronectina disminuye las N-CAM aumentan. El comportamiento de las N-CAM es muy curioso, ellas aparecen donde no se anticipa su presencia y asimismo desaparecen, esto se conjuga con la aparición y desaparición de la fibronectina<sup>(10)</sup>. A su vez la dinámica de las células de la cresta neural es pasajera, y está dada por la presencia o ausencia de fibronectina.

La adhesión célula-célula, sustrato-célula, y uniones intercelulares, parece ser mediada por familias de moléculas diferentes.

Una hipótesis mínima sobre la base molecular de la morfogénesis, debe tomar en consideración tres procesos: adhesión, movimiento y diferenciación celular.



## Regulación del movimiento morfogénico por las CAM<sup>(9)</sup>



La expresión de las CAM está controlada por un conjunto de genes, para determinar cambios dinámicos de la adhesión celular, que afecta a aquellos movimientos morfogénicos que conducen a la inducción de estructuras. Otro conjunto de genes regula la diferenciación celular, que interactúa dentro de estas estructuras para dar forma a los patrones de tejidos<sup>(9)</sup>.

## COMUNICACIÓN ENTRE CÉLULAS

En el embrión por ejemplo, se pueden transferir células de la zona que ha de formar la piel, a la zona que formará los ojos. Las células transferidas se desarrollan satisfactoriamente con su nuevo sitio adquirido, toman las características celulares de sus vecinas haciéndolas su identidad persistente. Después si son transferidas a otros lugares, permanecen sin cambiar.

Las células se mueven, hacia lugares en donde son capaces de identificarse entre sí, para dar y registrar algún tipo de señal, y

asociarse preferentemente con sus congéneres.

La comunicación también se da por uniones especializadas entre células (uniones intercelulares). Cuadro A<sup>(1)</sup>:

Cuadro A

Uniones intercelulares	
1 uniones de adherencia	2 uniones impermeables
a) desmosoma de banda	a) unión hermética
b) desmosoma puntual	b) unión septada (sólo en los invertebrados)
c) hemidesmosoma	
3 Uniones comunicantes	
a) unión de tipo hendedura	
b) sinapsis química	

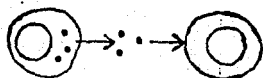
1) Las uniones de adherencia, mantienen unidas a las células de manera mecánica. El tipo principal de unión de adherencia son los desmosomas.

2) Uniones impermeables, que además de mantener unidas a las células, impiden el paso de moléculas de un compartimiento a otro, de tal manera que las moléculas no pueden pasar de una célula a otra y,

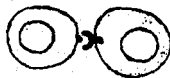
3) Uniones comunicantes, que permiten el paso de pequeñas moléculas de una célula a otra. En las uniones comunicantes se encuentran las de tipo hendedura (gap junction) y señales químicas, en esta última, las células están comunicadas de manera indirecta.

Uniones comunicantes (gap junction)

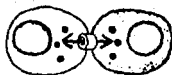
Este tipo de uniones permite que moléculas pequeñas e hidrosolubles pasen directamente desde el citoplasma de una célula al citoplasma de la otra. Además, las células en el cuerpo pueden comunicarse por medio de señales químicas que funcionan como mediadores Fig. F.



signos indirectos con secreción química



signos directos entre membrana citoplasma,  
a través de moléculas cercanas



signos directos via uniones comunicantes (gap junction)

Figura F1

Por otro lado, las células actúan como si fuesen capaces de reconocerse mutuamente y de reconocer respuestas específicas a los mensajes transmitidos por sus vecinos. Se ha encontrado apoyo para la idea de que el mensajero posiblemente sea químico (morfógeno, son señales hipotéticas, "sustancias" que involucran gradientes de concentraciones, transmitidas de célula a célula). Se cree que el primer morfógeno que ha sido identificado, es el ácido retinoico<sup>(29,30)</sup>. Estos productos, podrían proporcionar tanto las señales como los medios para unirse a las células; de una manera específica.

Se ha comprobado que:

a) Los primordios de cualquier parte a formar en la morfogénesis, tienen ácido retinoico.

b) El ácido retinoico, puede inducir estructuras extra, cuando se presenta en cantidades apropiadas. Una distribución espacial, se relaciona con una distribución en gradiente. La idea es que, las células respondan a diferentes concentraciones, y adopten caminos diferentes de diferenciación para producir la anatomía característica. Un morfógeno es así, una clase particular de factor que induce, caracterizado por la evocación de diferentes conductas celulares en diferentes concentraciones<sup>(29,30)</sup>.

La existencia de los morfógenos todavía se encuentra en discusión, el hecho de aceptar su presencia implica una probabilidad abierta al entendimiento de:

a) La activación de las células en la morfogénesis (activación química dada por gradientes de concentración).

b) Los morfógenos actúan selectivamente, y a su vez tienen inhibidores específicos que los desactiven.

No se debe olvidar que los morfógenos son sustancias químicas hipotéticas que trabajarían a concentraciones dadas, esto es, a gradientes, de tal manera que las células en un principio estarán saturadas y conforme pase el tiempo, y la concentración vaya disminuyendo, poco a poco se desactivarán.

La comunicación entre células rumbo a la epidermis es importante. Se han planteado modelos (teorías), que explican la orientación

celular. Haptotaxis, Galvanotaxis, Movimiento de Inhibición por Contacto, Quimiotaxis Etc.; y son los siguientes:

#### Haptotaxis

Es la habilidad de las células a moverse en su sustrato, por un gradiente de adhesividad establecido. Va de un gradiente menos adhesivo a uno más adhesivo<sup>(11)</sup>.

#### Galvanotaxis

El modelo explica que un campo eléctrico generado por una corriente iónica, a través de una capa epitelial puede influir el movimiento de las células. La velocidad de locomoción no se incrementa sustancialmente con un campo eléctrico. Sin embargo, la galvanotaxis es una alternativa interesante, para una migración orientada, y puede ser asociada con algunos otros mecanismos, semejantes al movimiento de inhibición de contacto<sup>(11)</sup>.

#### Movimiento de inhibición de contacto

Resulta de la parálisis local de los lamelopodios y de una subsecuente redirección de movimiento cuando dos células están en contacto. Estas células se dispersan de un lugar de alta densidad a uno de menor densidad<sup>(11)</sup>.

#### Quimiotaxis

Este es un mecanismo de dirección celular, en el cual las señales químicas se encuentran en el medio circundante, y va de un gradiente de mayor concentración, a uno de menor concentración, necesita de un gradiente estable<sup>(11)</sup>. Fig. G.

Como Observamos las interacciones celulares están mediadas tanto interna como externamente célula-célula, célula-sustrato, no se puede prescindir de ellas, asimismo de este tipo de interacciones se puede conocer la dinámica celular. Es necesario tener presente este tipo de interacciones al que Edelman hace referencia<sup>(9)</sup> ya que como estas ocurren en la naturaleza, son fundamento fuerte para su utilización en el modelo, fácilmente se pueden extrapolar a las interacciones de las células vecinas en el modelo mismo.

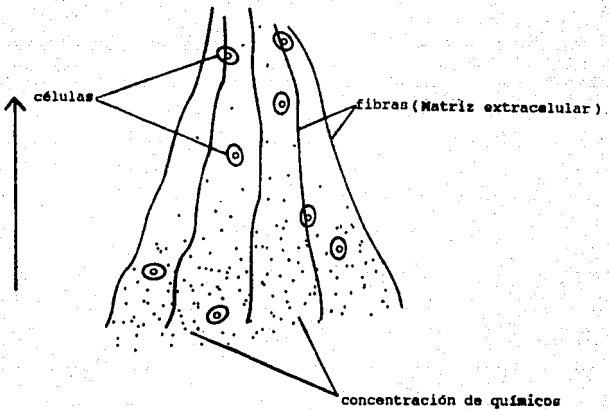


Figura G.

Dibujo esquemático que muestra la migración de células, con respecto a la concentración de químicos.

## COLORACIÓN DE PECES

### INTRODUCCIÓN

Las células pigmentarias que vienen del ectodermo y forman parte de la cresta neural, se diferencian en una variedad amplia de colores, ellas son las responsables de la coloración del pez, y dependiendo en conjunto de su posición será el patrón. Estos patrones que identificamos como rayas diagonales, verticales Etc. y que además, se explican ampliamente en el siguiente capítulo, están dados principalmente por la organización interna de las células pigmentarias que responden a diversos factores (fisiología del color). La coloración y tonalidad en la piel de los peces, está controlada por las células pigmentadas, que tienen gránulos con pigmento, y depende directamente de las posiciones relativas de estos gránulos para el patrón de color.

Este capítulo se enfocará principalmente a los tipos de gránulos pigmentarios que están en la epidermis de los peces, su interacción para formar los diferentes colores y tonos, así como el estudio del origen y formación de los diferentes gránulos y factores que intervienen en su comportamiento.

### GENERALIDADES

Los peces de vida libre, que habitan en los océanos del mundo, como las sardinas y especies afines (Clupeidae), y otros que en su juventud, viven en forma planctónica, como los lenguados (Pleuronectidae), presentan generalmente, una coloración simple que va de un vientre blanquecino, costados inferiores plateados, costados superiores y el dorso de color azul o verde iridiscente. Los cavadores de los fondos, y los peces que viven entre la vegetación acuática, tienen a menudo marcas muy contrastadas de figuras complicadas en los costados, y una coloración pálida por debajo. Las especies que frecuentan los arrecifes de coral tropicales, son los que tienen los colores más brillantes, y variados. Entre las familias que presentan colores muy llamativos se encuentran los peces cardenal (Apogonidae),

los peces angel (Chaetodontidae), los peces gallo (Labridae), las mojarras rayadas (Pomacentridae), los peces cirujano (Acanthuridae), los peces guacamaya (Scaridae), los peces cocuyo (Balistidae) y los machos de muchas percas (Percidae).

Tres clases de color predominan en los peces oceánicos: plateado en las zonas cercanas a la superficie (zona fótica); rojo en las intermedias, y violeta o negro en las profundidades, aunque cabe recalcar que en la zona fótica hay peces con patrones de color muy complejos<sup>(19)</sup>.

La coloración en los peces se debe en primer lugar a los pigmentos de la piel. Es interesante observar cómo estos pigmentos los cuales se encuentran en pequeñas bolsitas llamadas indistintamente gránulos u organelos, interaccionan y se mueven para dar tonos y matices variados. Estos gránulos que contienen el pigmento se encuentran en células especializadas llamadas "cromatóforos" que están en la dermis y algunas veces migran a la epidermis del pez. El color de fondo o aspecto se debe, a los tejidos subcutáneos, a los fluidos del cuerpo e inclusive al contenido del tubo digestivo. En otros peces, los colores varían desde brillante a opaco y enmascaran el color de fondo. El patrón básico más común en los peces, es el color claro que prevalece en la superficie ventral del cuerpo, la obscuridad en la parte dorsal y un cambio gradual de intensidad entre estos dos. Más allá de este plan general existen muchos rasgos extraordinarios en la coloración de los peces. Uno de estos es la uniformidad del color, debido ya sea a la falta o exceso del pigmento en los albinos y los negros respectivamente. Los principales pigmentos de los peces son las melaninas (la célula que contiene este pigmento se llama melanocito), y muestran colores pardo, gris o negro; los carotenoides (las células se llaman lipóforos), que dan colores amarillo, anaranjado y rojo, las flavinas, amarillas se diferencian de los carotenoides por su fluorescencia. Las guaninas (células llamadas guanóforos:leucóforos e iridóforos), con brillo metálico éstas reflejan la luz, los eritróforos, y xantóforos con colores rojo y amarillo respectivamente. También la mayor parte de la coloración en los peces ocurre debido a fenómenos físicos de reflexión de la luz.



Ya que los gránulos pigmentarios tienen una participación directa en cuanto al color, se describirá en seguida de manera general cada uno de estos.

#### CARACTERÍSTICAS DE LOS ORGANELOS PIGMENTARIOS

Se hará énfasis en lo siguiente: La célula pigmentaria tendrá un nombre diferente en lo que respecta al gránulo y pigmento mismo. En el caso de los melanocitos, la célula se llamará así, el gránulo de pigmento se llamará melanosoma y el pigmento melanina, Fig A.

##### Melanosomas

El melanocito es una célula que sintetiza un pigmento llamado melanina. El organelo que contiene este pigmento llamado melanosoma, participa con los otros cromatóforos en el rápido cambio de color de los peces, y en general de los animales, con el desplazamiento intracelular de los melanosomas.

El melanoblasto en el ciclo de vida, es el precursor del melanóforo y del melanocito. El término "melanosoma" es poco familiar y en muchos casos se usa comúnmente "gránulo de melanina". Estos son morfológicamente esféricos o elipsoidales con un promedio de diámetro de  $0.5 \mu$ . El melanosoma tiene una membrana limitante, la melanina encerrada es muy densa.

Las melaninas son compuestos altamente polimerizados derivados de la tirosina. La síntesis de melanina o melanogénesis se lleva a cabo en el melanocito, melanóforos jóvenes y posiblemente en melanóforos maduros. La célula precursora se conoce como "melanoblasto", es un estado temprano del desarrollo. La melanogénesis puede llevarse a cabo en melanóforos maduros, porque los cambios de color pueden involucrar un incremento del contenido de melanina sin el correspondiente incremento en el número de células que contienen melanina.

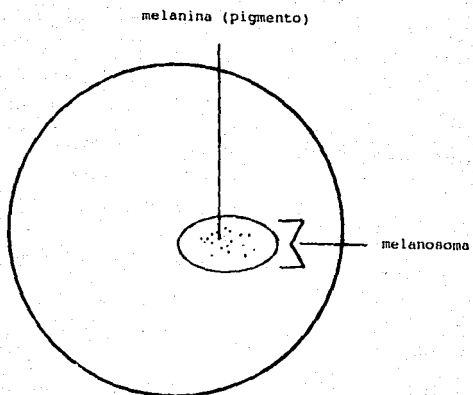
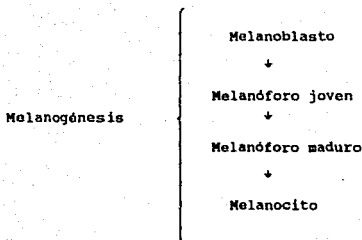


Figura A

Célula pigmentaria (melanocito)

### Maduración del melanocito



### Guanóforos

La guanina es responsable del color blanco o plateado de la dermis de los peces, los leucóforos e iridóforos que son llamadas células espejo contienen cristales de guanina, los primeros a diferencia de los segundos son pequeños cristales y pueden moverse en todo el citoplasma, mientras que los segundos son cristales grandes incapaces de moverse y usualmente están apilados en capas, estos como se observa no son organelos como tal, son placas o gránulos, en el citoplasma de estas células la guanina existe en diminutos cristales de forma granular o algunas veces en plaquetas. Así, estas células pueden llamarse guanóforos. Se ha demostrado químicamente la presencia abundante de guanina en la dermis del pez<sup>(18)</sup>. Son plaquitas muy largas  $0.07 \mu$  a  $1 \mu$  y están arregladas paralelamente una a otra en el citoplasma celular. Al menos en los iridóforos las moléculas de guanina parecen estar agregadas de manera ordenada en plaquitas individuales.

Los colores que presentan los lados y superficies ventrales de peces, son frecuentemente plateados y blancos, estas superficies son en realidad muy buenas reflectoras. La piel ventral de algunas

especies refleja más del 80% de la luz incidente. En algunos casos la dermis tiene propiedades reflejantes diferentes cuando es vista desde distintas direcciones, por ejemplo: la superficie superior de *Trachurus*, muestra diferencias: cuando es visto desde arriba se ve oscuro y desde abajo se ve azul plateado<sup>(19)</sup>.

Los peces Teleósteos tienen una capa de células reflejantes que son exteriores al *Stratum argentum*. Estudios histológicos demostraron que las plaquitas de dichas células están más o menos verticales a la superficie del agua. Aquí, las capas reflejantes provocan que el pez se vea menos. La luz reflejada por este es aproximadamente igual a la del medio<sup>(18)</sup>.

#### Pteridosomas

Las pteridinas son compuestos hidrosolubles y cercanamente relacionados a la guanina y flavina. Estos tienen pirimidina y están asociados a anillos de pirazina.

Las pteridinas con y sin color están presentes en los cromatóforos. Las drosopterinas, incluyendo drosopterina, isdrosopterina y neodrosopterina son rojas, mientras que las sepiapterinas, isosepiapterinas son amarillentas. Las leucopterinas, generalmente se dividen en dos grupos: azul o violeta fluorescente, éstas incluyen biopterina, rana-cromo 3, xantopterina e isoxantopterina<sup>(10)</sup>.

Las pteridinas coloreadas son pigmentos funcionales de ambos: xantóforos y eritróforos. Están acompañadas usualmente por un arreglo de pteridinas sin color. Aunque el papel de estas pteridinas sin color en células pigmentarias no es claro. Las pteridinas están contenidas principalmente en los pteridosomas.

#### Lipóforos

En general se piensa que todos los pigmentos amarillos y rojos de xantóforos y eritróforos tienen carotenoides. Estos compuestos hidrocarbonados altamente insaturados consisten en cadenas de átomos de carbono con estructuras de anillos a uno o ambos extremos. Además del carbono e hidrógeno, las xantofilas y otros ésteres

contienen oxígeno. En muchas especies, grandes cantidades de xantofilas incluyen taraxantina, luteína y astaxantina; mientras carotenos, principalmente  $\beta$  caroteno son menos frecuentes en la dermis.

Todos los carotenoides son insolubles en agua, pero solubles en solventes orgánicos. Se sabe que los animales no tienen la habilidad de sintetizar carotenoides, sin embargo, en peces estos pueden ser obtenidos de plantas o presas. Los pigmentos pueden ser transferidos a xantóforos o eritróforos, donde son almacenados en gran cantidad. Algunas especies tienen una enorme variedad de carotenoides, y de estos algunos son muy específicos. En los estados tempranos de diferenciación, los xantóforos no contienen carotenoides pero cuando la célula madura estos pigmentos se van acumulando en ella. Estos organelos largos de  $0.5 \mu$  de diámetro se supone que son los paquetes de almacenamiento de las pteridinas<sup>(18)</sup>. Los pigmentos amarillos y naranjas de los cromatóforos de *Serranus scriba*, son xantofilas.

#### CAMBIOS EN LA COLORACIÓN

Los cromatóforos que dan el color a los peces, son principalmente de dos tipos: melanóforos y guanóforos, Fig. B. Los cromatóforos contienen miles de organelos individuales capaces de moverse rápidamente con un movimiento bidireccional hacia el centro o periferia de la célula<sup>(6)</sup>; están ordenados por tonos y dan verdaderos colores. Los cromatóforos se localizan en la dermis de la piel, ya sea en el exterior o debajo de las escamas Fig. C, también están muchas veces establecidos en el peritoneo y a nivel profundo, alrededor del cerebro y la médula espinal. Muchos de los cambios de coloración que exhiben los peces, se deben a la migración de los pigmentos dentro de los cromatóforos, los organelos pueden dispersarse de un lado a otro en las células o concentrarse en la misma. Por esto son los diferentes cambios de color que exhiben los peces. Algunas veces hay más de un tipo de pigmento en el mismo cromatóforo. La forma más común es el melaniridosoma, o complejo de melanóforo e iridóforo.

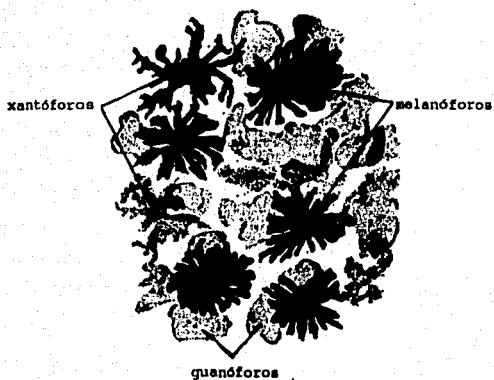


Figura B

Diferentes células pigmentarias en *Paratilichthys*

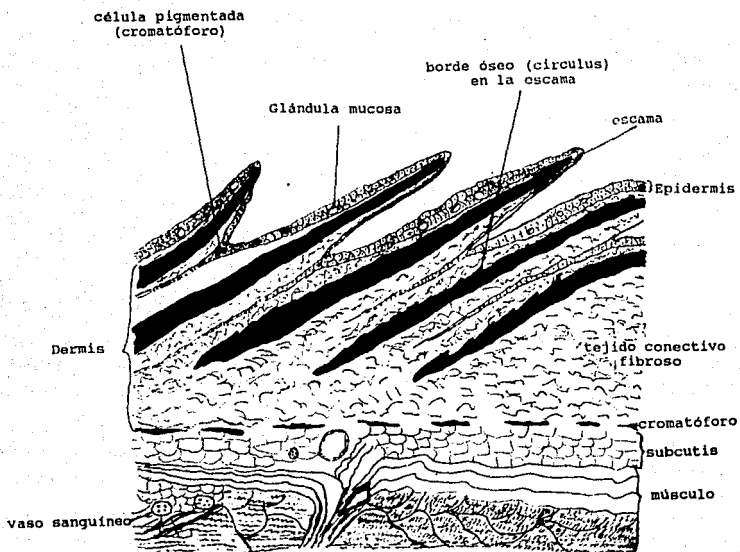


Figura C.

Sección de la piel de pez (9)

Los pigmentos de los organelos reflejan algunas longitudes de onda de luz visible y absorben otras. Los cromatóforos de acuerdo al color del pigmento de los organelos son rojo y naranja (eritróforos), amarillo (xantóforos), negro, gris o café (melanóforos), blanco metálico (leucóforos e iridóforos), y de amarillos a rojos (lipóforos). En adición a otros colores los peces exhiben otros como el verde y el café. Estos y otros tonos llegan de varias asociaciones de las tres clases básicas de cromatóforos (que son los melanocitos, iridóforos y xantóforos). Los negros y amarillos esparcidos entre sí, dan vistosos tonos verdes. Amarillo y negro forman el café, además que el naranja y azul pueden asociarse para dar el mismo color<sup>(19)</sup>. Cuadro A.

Cuadro A

Diferentes células pigmentarias

células	pigmentos	Constituyente	Color
melanocito	melanina	tirosina	café, negro o gris
Guanóforos: : leucóforos e : iridóforos	guanina	guanina	reflejos plateados blanco
Xantóforos y eritróforos	<sup>2</sup> pteridinas	carotenoides	amarillo rojo anaranjado
Lipóforos: xantóforos y eritróforos	carotenoides	carotenoides	amarillo principalmente rojo

<sup>1</sup> pequeños cristales que pueden moverse en todo el citoplasma

<sup>2</sup> cristales muy grandes incapaces de moverse y apilados en capas.

<sup>3</sup> las pteridinas coloreadas sirven actualmente como pigmentos funcionales de los lipóforos.

La coloración en los peces se debe a los esquemacromos que son colores que resultan de las configuraciones físicas, y biocromos o



pigmentos verdaderos. Los esquemacromos blancos se ven en el esqueleto, vejiga gaseosa, escamas, testículos, los colores iridiscentes, están en escamas, ojos y membranas intestinales. Los esquemacromos son también vistos en la dermis. Los biocromos incluyen carotenoides (amarillo, rojo y otros tonos), cromolipoides (amarillo y café), indigoides (azul rojo y verde), melaninas (generalmente negro a café), porfirinas y pigmentos biliares (rojo, amarillo, verde, azul y café), flavinas (amarillo con frecuencia fluorescencia verdosa), guaninas (blanco o plateado), y pteridinas (blanco, amarillo, rojo y naranja). En el Cuadro B, se especifica el tipo de pigmento, color que produce y donde se encuentran. Los carotenoides, melaninas, flavinas y guaninas se encuentran en la piel del pez. El hígado, huevos y ojos tienen carotenoides. La melanina está en el endodermo y piel. Músculo y sangre tienen porfirinas mientras que el esqueleto y la bilis tienen pigmentos biliares. Las flavinas están muy difundidas en sangre, músculo, bazo, branquias, corazón, riñones, huevos, hígado, y ojos, las purinas están en las escamas y ojos. Las pteridinas están en los ojos, sangre, hígado, riñón, y estómago.

## Cuadro B.

## Biocromos

Pigmento	Color	Dónde se encuentran
Carotenoides	amarillo, rojo y otros tonos	higado, huevos y ojos
Cromolipoides	amarillo, café	
Indigoides	azul, rojo y verde	
Melaninas	generalmente de negro a café	endodermo y piel
Porfirinas	rojo, amarillo, verde	músculo y sangre
Pigmentos biliares	azul y café	esqueleto y bilis
Flavinas	amarillo con frecuencia fluorescencia verdosa	sangre, músculo, bazo branquias, corazón, ojos riñones, huevos, higado
guaninas	blanco o plateado	escamas y ojos
Pteridinas	blanco, amarillo, rojo naranja	ojos, sangre, higado riñón, estómago

Se ha mencionado los tipos de organelos y pigmentación en peces, pero ya que este estudio se enfoca al modelaje de las células que forman el patrón en peces es importante mostrar el posible origen y como se forman estos organelos.

## ORIGEN DE LOS ORGANELOS PIGMENTARIOS

En esta sección preferentemente se llamará gránulo pigmentario para que no halla confusión con los organelos candidatos.

Se sugieren dos organelos candidatos en la célula para el origen

de los gránulos pigmentarios con una participación de ambos: el Reticulo Endoplásmico Rugoso (R. E. R.), y el Aparato de Golgi (Ap. de G.)<sup>(2)</sup>.

La hipótesis original del origen común de los gránulos de las células pigmentarias se derivó del descubrimiento de los cromatóforos en mosaico, que poseen gránulos pigmentarios de más de un tipo. Hay dos o más pigmentos diferentes en la misma célula. Un ejemplo de esta observación, es en el *Tapetum lucidum* del teleosteo *Dasyatis sabina*, donde melanosomas y plaquitas reflejantes están en la misma célula, pero en diferentes gránulos, con orígenes diferentes, este descubrimiento formó la base de la hipótesis de que los gránulos pigmentarios tienen dos posibles precursores.

Las explicaciones dadas en la siguiente sección se refuerzan en la Fig. D.

#### Melanocito

El componente estructural del melanocito es el melanosoma, que se forma por una vesícula que viene del R. E. R. y del Aparato de Golgi, hay una fusión de estos dos componentes y comienzan a formar el contenido de eumelanina del melanosoma típico en vertebrados de sangre caliente y fría.

Existe una hipótesis la cual identifica la adquisición de los pigmentos a partir de un cuerpo multivesicular. Esta hipótesis se basa en los melanosomas del pez oro que no derivan de un premelanosoma clásico, sino de este cuerpo multivesicular de origen dual. Así en la génesis de este melanosoma, el premelanosoma fibrilar es reemplazado por un cuerpo multivesicular.

#### Iridóforos

Ellos pueden seguir dos rutas, ya sea de una vesícula primordial, o que siga el proceso explicado arriba, partiendo de esta vesícula hasta llegar al cuerpo multivesicular, que después se va a diferenciar en reflejos plateados, por su tipo de depósito.

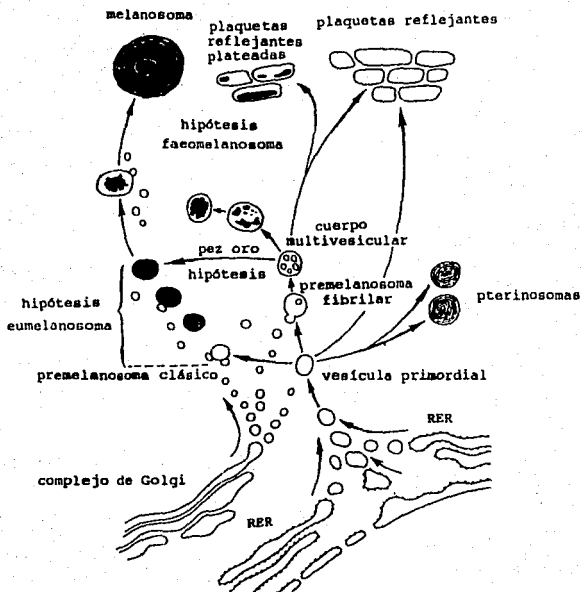


Figura D

Esquema hipotético del posible origen de los organelos pigmentarios.

### Pterinosomas

De éste, su proceso de formación es más sencillo, ya que a partir de una vesícula primordial generará los pteridosomas.

## FACTORES QUE PROVOCAN LA COLORACIÓN

### Fisiología del color

Los cambios fisiológicos del color provocan cambios externos en la coloración, producidos por modificación en la distribución de los gránulos en los cromatóforos. Semejantes cambios ocurren usualmente por el incremento o decremento en la cantidad de pigmento, o por el movimiento de los gránulos, debido a que estos migran por medio de fibras intercelulares que se contraen y se relajan. Estos cambios son causados en su mayoría por actividades de cromatóforos dermales. Estas células se encuentran en la capa más superior de la dermis. Se ha comprobado que mientras más se aumenta la temperatura del tejido, más efectiva será la manifestación de las células pigmentarias<sup>(18)</sup>.

La coloración diferente que presentan los peces se debe a muchos factores: alimentación, control nervioso, hormonas, factores intracelulares y cambios morfológicos.

### Alimentación

Se conoce que en dietas de xantaxantina, dada de manera natural o artificial, produce un color rosa en salmónidos<sup>(16)</sup>. Storebakken<sup>(23)</sup>, mostró en *Salmo gairdneri* y *Salmo salar*, la utilización de xantaxantina en las dietas de estos. La trucha arco iris *Salmo gairdneri* se pigmentó más eficientemente cuando estaba relacionada al período de comida<sup>(23)</sup>. La dieta mojada ocasiona una menor pigmentación que la seca. La relativa cantidad de astaxantina fue máxima en peces alimentados con dieta mojada.

Los pigmentos rojo, amarillo y naranja son muchas veces carotenoides que se adquirieron a través de la comida.

### Control Nervioso

Se ha demostrado la presencia de fibras nerviosas que agregan melanina, en las células; las cuales responden a estímulos

nerviosos<sup>(18)</sup>. Los movimientos de los melanosomas se deben muchas veces a un cambio de potencial de membrana que induce la agregación de melanosomas. Un sólo estímulo eléctrico a los nervios que están cerca de las células pigmentarias causa agregación de melanina discernible en los melanóforos de *Fundulus*<sup>(18)</sup>. Más de dos fibras nerviosas controlan la agregación en un melanóforo<sup>(19)</sup>. De estas observaciones se presenta la idea de que los axones que pasan cerca de los melanóforos interaccionan posiblemente para formar sinapsis, la cual libera sustancias transmisoras a intervalos, a lo largo de su longitud para controlar un número de melanóforos cercanos. Existen terminaciones nerviosas conteniendo vesículas sinápticas cerca de la superficie de los melanóforos. Se piensa que son los paquetes del transmisor dispersante de melanina<sup>(18)</sup>, mezclados con estas vesículas usuales fueron encontradas grandes vesículas granuladas en los elementos nerviosos alrededor de los melanóforos de *Lebistes*, este tipo de vesículas granuladas se sabe que son un lugar de almacenamiento para un transmisor del tipo catecolamina, estos elementos pueden ser las estructuras presinápticas de los nervios agregantes de melanina.

En muchos casos los cambios en la distribución de las plaquitas en los leucóforos, causan alteraciones en la coloración blanquecina o en la habilidad reflectiva de la piel. Estas células responden a cambios del medio es decir, en fondos oscuros, se contraen mientras que en claros se expanden. Fujii<sup>(18)</sup> encontró que los estímulos que inducen agregación de gránulos de pigmento en melanóforos usualmente producen dispersión de plaquitas de leucóforos, mientras que estímulos dispersantes de melanosomas agregan plaquitas de leucóforos, por lo tanto es posible que el transmisor químico de los nervios agregadores de melanosomas actúe como transmisor dispersante de plaquitas de leucóforos y que el transmisor dispersante de melanosomas actúe a su vez como un transmisor agregador de plaquitas de leucóforos. No hay evidencia para el control nervioso en iridóforos<sup>(18)</sup>.

#### Hormonas

Observaciones de las células pigmentarias del pez bruja *Myxine*

*glutinosa* se muestran a favor del control hormonal en ciclóstomos<sup>(18)</sup>. Se aceptó que la dispersión de los melanosomas en melanóforos de elasmobranquios, está controlada por MSH hormona dispersante de melanina (Melanine Scattering Hormone) que viene de la glándula pituitaria. Extractos de ésta glándula provoca dispersión de melanosomas, y puede inducir agregación significativa de pigmentos en los melanóforos de la dermis del pez. El origen de esta hormona puede estar en el hipotálamo.

La glándula pineal también podría estar implicada en el control de cromatóforos.

Entre las sustancias que afectan el movimiento pigmentario en cromatóforos, la hormona dispersante de melanina MSH, ha sido estudiada más detalladamente en su modo de acción, aunque la mayoría del trabajo se ha realizado en células pigmentarias de anfibios. La dispersión de melanosoma por MSH requiere la presencia de iones  $\text{Na}^+$  en el medio, la MSH podría incrementar la permeabilidad de la membrana del melanóforo al  $\text{Na}^+$ , o podría interferir con la bomba de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  del melanóforo. Cualquiera de estos efectos ocasionaría una acumulación neta de  $\text{Na}^+$  en la célula. Aunque no se ha dado una evidencia directa para la entrada de  $\text{Na}^+$  a través de la membrana del melanóforo, la acumulación podría ocasionar al mismo tiempo la entrada de agua, lo cual produce dispersión de melanina<sup>(18)</sup>.

#### Factores intracelulares

Los microtúbulos intervienen en los procesos del movimiento de los organelos pigmentarios, sin tomar en cuenta que los melanosomas se agregan en el centro de la célula o se dispersan. Estas observaciones guían al supuesto de que la función de los microtúbulos como elementos del citoesqueleto, es ayudar a mantener los cambios en el movimiento de los melanosomas. Los microtúbulos provocan una migración centripeta de los pigmentos.

Otros efectos que provocan y cambian la coloración, es la influencia de diversos iones alcalinos como el  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ba}^{++}$ , y  $\text{Sr}^{++}$ . Estos iones son efectivos en la agregación de melanosomas. En algunos casos el  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  también lo hacen. El  $\text{Li}^+$

es menos efectivo, y otros son poco potentes<sup>(18)</sup>. El  $\text{Na}^+$  es la excepción, ya que no causa agregación.

Los múltiples cambios de color que pueden tener los peces son debidos, a innumerables factores. Aquí sólo se mencionan algunos.

#### Cambios morfológicos

Muchas veces están relacionados con la fisiología del color, que son provocadas por el incremento o decremento del contenido pigmentario. En otras ocasiones estos cambios se deben a la reflexión de la luz lo que es dado principalmente por los guanóforos.



**PATRONES DE COLORACIÓN**  
**UN COMENTARIO PREVIO AL ESTUDIO**

Existen muchos patrones de coloración en peces, aquí se engloban y generalizan los más predominantes, recalcando que existen más, los cuales no entran en esta clasificación debido a su gran heterogeneidad natural, incluso esta clasificación es muy general, pero sirvió porque engloba el mayor número de patrones y además estos se pudieron modelar con los autómatas.

La gama de patrones (formas y figuras dados por los cromatóforos en la piel del pez) que presentan los peces es enorme, la complejidad para su estudio aumentaría considerablemente si se insistiera en analizar absolutamente todos los patrones que presentan los peces, incluso todos los patrones que llega a presentar un sólo pez.

En esta selección de los peces se buscó incluir a los más representativos aunque no se pretende que sea tomado como una selección sistemática.

Es indispensable tener presente lo siguiente:

1) Se consideraron algunos patrones de color y no todos. Si bien, los que se muestran en el Cuadro A, y se describen como homogéneos son muy generales, pero pueden englobar muchos patrones de peces. Lo que se pretende con este Cuadro, es abarcar los mayores patrones posibles con características definidas y que pueden ser fácilmente estudiados. Los que no están en este Cuadro, se describen como heterogéneos Cuadro B. Estos patrones, no se estudian aquí por la compleja variabilidad que presentan, sin negar que pueden ser objeto de estudio en trabajos posteriores.

2) Hay muchos peces en los cuales predomina la multiplicidad de patrones. Estos llegan a tener uno o más patrones homogéneos dentro de una gran heterogeneidad, de ser así se pueden seguir dos rutas:

I) Considerarlo dentro de este estudio porque, aunque presenta zonas mínimas de un patrón homogéneo y lo demás es heterogéneo; dentro de su heterogeneidad existe la regularidad que amerita describirlo aquí o,

II) Tomarlo como un pez irregular o sin pigmentación Cuadro B, lo

cual lo incorpora al grupo de patrones heterogéneos.

Para este trabajo se tomará la opción I, además de los patrones de peces que se ajusten al Cuadro A, excepto el II.

El estudio se basa en peces tanto de agua dulce Cuadro C, como de agua salada Cuadro D, se coloca primero su familia, nombre científico, abajo de este quién lo clasificó, enseguida la clasificación del patrón (con base en el Cuadro A), y la temperatura, luz y pH en la que viven los peces, los Cuadros C y D se colocaron aquí para mostrar que patrón de su coloración fue tomado en cuenta para su clasificación<sup>(1)</sup>.

14)

## PATRONES

### Regulares (Patrón 1)

Tienen un patrón, debe ser de igual tamaño, no importa si abarca o no todo el cuerpo; es necesaria una posición igual, ejemplo: Fig. A modelo.

### Medios Regulares (Patrón 2)

Abarca un patrón, pero de diferentes tamaños; no importa si abarca o no todo el cuerpo, tampoco su posición, ejemplo: Fig. B modelo.

### Irregulares (Patrón 3)

Puede abarcar más de dos formas de igual o diferente tamaño, ejemplo Fig. C modelo.

### Sin pigmentación (Patrón 4)

Un solo patrón, no importa el color que sea.

En las figuras A, B, y C, se dan ejemplos de los patrones del pez. Esto es variable, ya que pueden existir muchos de su tipo. Sólo se colocan estos, teniendo claro que hay muchos más.

**Cuadro A**  
**Muestra los diferentes patrones homogéneos que pueden tener los peces en este estudio**

<table style="width: 100%; border: 1px solid black;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 10%;">I</td> <td>raya(s) vertical(es) foto a</td> </tr> <tr> <td></td> <td>II</td> <td>raya(s) horizontale(s) foto b</td> </tr> <tr> <td></td> <td>III</td> <td>raya(s) diagonale(s) foto c</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">REGULARES</td> <td>IV</td> <td>punto(s) foto d</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">(Patrón 1)</td> <td>V</td> <td>moteado(s) foto e</td> </tr> <tr> <td></td> <td>VI</td> <td>mancha(s) foto f</td> </tr> </table>			I	raya(s) vertical(es) foto a		II	raya(s) horizontale(s) foto b		III	raya(s) diagonale(s) foto c	REGULARES	IV	punto(s) foto d	(Patrón 1)	V	moteado(s) foto e		VI	mancha(s) foto f	
	I	raya(s) vertical(es) foto a																		
	II	raya(s) horizontale(s) foto b																		
	III	raya(s) diagonale(s) foto c																		
REGULARES	IV	punto(s) foto d																		
(Patrón 1)	V	moteado(s) foto e																		
	VI	mancha(s) foto f																		
<table style="width: 100%; border: 1px solid black;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 10%;">VII</td> <td>Rayas verticales</td> <td rowspan="6" style="width: 10%; vertical-align: middle;">} Diferente largo (a), o ancho (b).</td> </tr> <tr> <td></td> <td>VIII</td> <td>Rayas horizontales</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Medio</td> <td>IX</td> <td>Rayas diagonales</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Regulares</td> <td>X</td> <td>Puntos</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">(Patrón 2)</td> <td>XI</td> <td>Moteados</td> </tr> <tr> <td></td> <td>XII</td> <td>Manchas</td> </tr> </table>			VII	Rayas verticales	} Diferente largo (a), o ancho (b).		VIII	Rayas horizontales	Medio	IX	Rayas diagonales	Regulares	X	Puntos	(Patrón 2)	XI	Moteados		XII	Manchas
	VII	Rayas verticales	} Diferente largo (a), o ancho (b).																	
	VIII	Rayas horizontales																		
Medio	IX	Rayas diagonales																		
Regulares	X	Puntos																		
(Patrón 2)	XI	Moteados																		
	XII	Manchas																		

**Cuadro B**  
**Muestra los patrones heterogéneos que pueden tener los peces (aquí entran todos los que no son homogéneos)**

<p>Irregulares (Patrón 3) y  sin Pigmentación (Patrón 4)  Patrones no descritos debido a que presentan una gran complejidad o a su carencia de diversidad de patrón (sin pigmentación). No entran los dos en este estudio. (ver conclusiones).</p>
--



Foto a



Foto b



Foto c



Foto d  
39

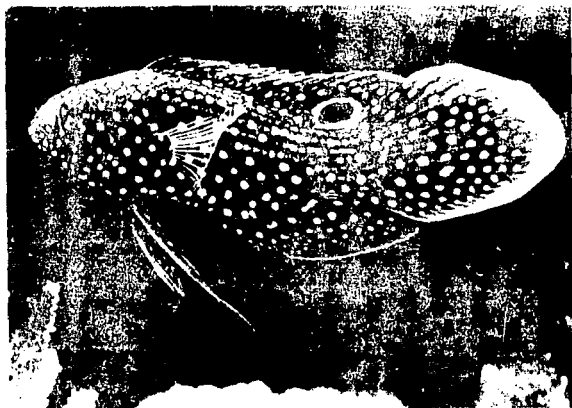
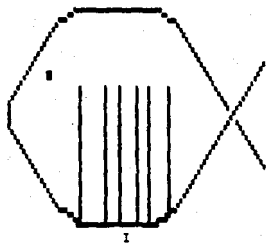


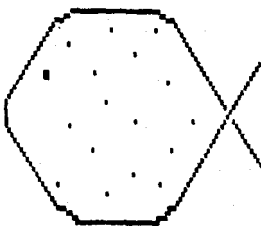
Foto e



Foto f



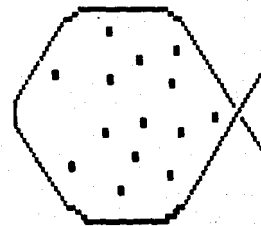
I



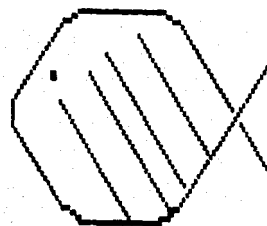
IV



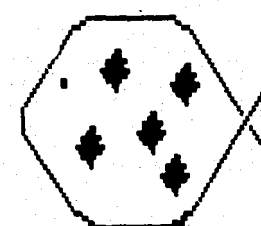
II



V



III



VI

Iguals tamaños de:

I Rayas verticales

II Rayas horizontales

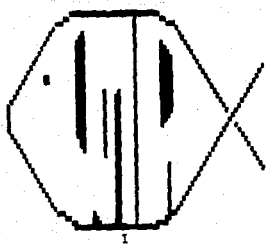
III Rayas diagonales

IV Puntos

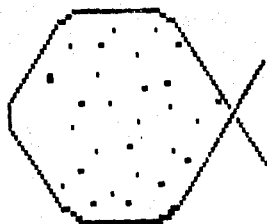
V Moteados

VI Marchas

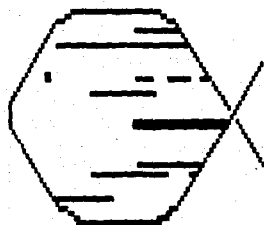
Diferentes patrones regulares de peces. Fig. A



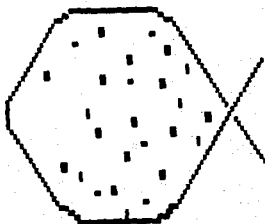
I



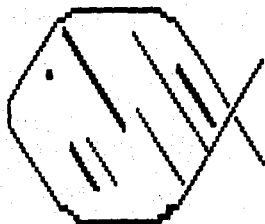
IV



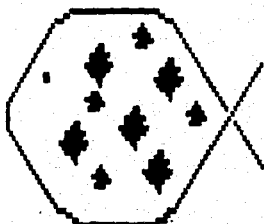
II



V



III



VI

Diferentes tamaños de:

I Rayas verticales

II Rayas horizontales

III Rayas diagonales

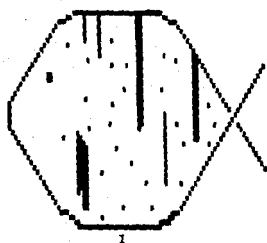
IV Puntos

V Moteados

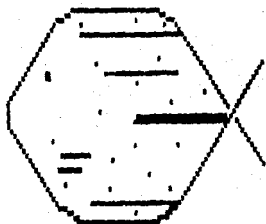
VI Manchas

Diferentes patrones medio regulares de peces. Fig. 3

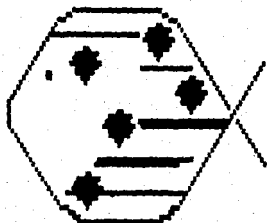




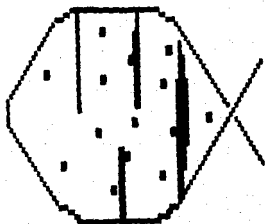
I



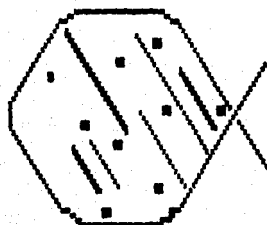
IV



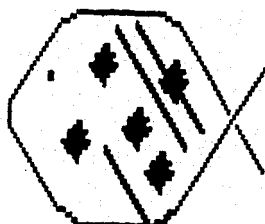
II



V



III



VI

Diferentes tamaños de:

I Rayas verticales con puntos

IV Rayas horizontales con puntos

II Rayas horizontales con manchas

V Rayas verticales con moteados

III Rayas diagonales con motes

VI Rayas diagonales con manchas

Diferentes patrones medio regulares de peces. Fig. C.

Luz  
 poca=  $\alpha$   
 media=  $\beta$   
 intensa=  $\gamma$

Cuadro C  
 PECES DE AGUA DULCE

Familia Anabantidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Colisa chuna</i> (Cuvier)	2 VIII b	21-26	$\beta$	6-8
<i>Betta splendens</i> (Regan) hembra roja	1 VI	24-28	$\beta$	6.5-7.5
<i>Colisa fasciata</i> (Bloch & Schneider)	2 VII a	24-28	$\beta$	6-8
<i>Betta splendens</i> (Regan) variedad rojo	4	24-28	$\beta$	6.5-7.5
<i>Trichogaster leeri</i> (Bleeker)	1 II	24-30	$\beta$	6.5-7.5
<i>Trichogaster microlepis</i> (Günther)	4	22-28	$\beta$	6-8

Familia: Anostomidae

Nombre científico	Patrón	Temp °C	Luz	pH
<i>Anostomus anostomus</i> (Linnaeus)	2 VIII b	24-27	$\beta$	6-7
<i>Leporinus fasciatus</i> (Bloch)	2 VII b	21-27	$\beta$	6.5-7.5
<i>Abramites microcephalus</i> (Norman)	2 VII a b	24-29	$\beta$	6-7

Familia: Apterotonidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Apterotonus albifrons</i> (Linnaeus)	4	21-28	α	6-7

Familia: Atherinidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Bedotia geyi</i> (Pellegrin)	2 VIII a b	21-26	β	6-8
<i>Melanotaenia maccullochi</i> (Ogilby)	2 VIII a b	20-24	β	6.5-7.5

Familia: Callichthyidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Callichthys callichthys</i> (Linnaeus)	2 XII a	22-26	β	6.5-7.5
<i>Corydoras aeneus</i> (Gill)	3	21-28	β	6.5-7.5

Familia: Centropomidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Chanda ranga</i> (Hamilton-Buchanan)	1 II	18-25	γ	7-7.5

Familia: Characidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Aphyocharax anisitsi</i> (Eigenmann & Kennedy)	3	20-25	$\beta$	6-7
<i>Cheilodoma axelrodi</i> (Schultz)	1 II	21-26	$\alpha$	5.5-6.5
<i>Hypessobrycon flanneus</i> (Myers)	3	18-26	$\beta$	6.5-7.5
<i>Woenkhausia oligolepis</i> (Günther)	4	22-26	$\beta$	6-6.5
<i>Hemigrammus erythrozonus</i> (Durbin)	1 II	21-26	$\beta$	6-7
<i>Hemigrammus ocellifer</i> (Steindachner)	1 VI	21-26	$\beta$	6-7

Familia: Cichlidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Cichlasoma festae</i> (Boulenger)	2 VII a b	21-26	β	6-7
<i>Cichlasoma festivum</i> (Heckel)	1 III	20-28	β	6-7
<i>Cyphotilapia frontosa</i> (Boulenger)	2 VII a b	24-27	β	7-8
<i>Aequidens curviceps</i> (Ahl)	2 VII a b	21-26	β	6-7
<i>Aequidens maronii</i> (Steindachner)	1 VI	22-26	β	6.5-7.5
<i>Hemichromis bimaculatus</i> (Gill) Lewel cichlid	2 XI a	24-26	β	5-7
<i>Aequidens pulcher</i> (Gill)	1 VI	21-26	γ	6-8
<i>Cichlasoma severum</i> (Heckel)	2 VII a b	21-26	β	6-8
<i>Labeotropheus trewavasae</i> (Fryar) Red Top zebra	4	22-27	β	7-8

Familia: Cobitidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Acanthopthalmus myersi</i> (Harry)	2 VII a b	25-27	α	6-6.5
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i> (Cantor)	2 XII a	21-25	α	6-8
<i>Botia modesta</i> (Bleeker)	4	22-26	α	6-7

Familia: Cyprinidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Brachydanio rerio</i> (Hamilton-Buchanan)	2 VIII b	18-24	γ	6-8
<i>Barbus everetti</i> (Boulenger)	2 VII a b	18-25	β	7
<i>Barbus oligolepis</i> (Bleeker)	3	18-25	β	6.5-7.5
<i>Barbus tetrazona</i> (Bleeker)	2 VII a b	21-26	γ	6-7
<i>Rasbora trilineata</i> (Steindachner)	1 II	21-26	β	6-6.5
<i>Carassius auratus</i> (Linnaeus) Telescope Veil-Tail	4	7-22	β	6-8
<i>Barbus schwanenfeldi</i> (Bleeker)	4	21-25	α	6-6.5
<i>Carassius auratus</i> (Linnaeus) híbrido	4	7-22	β	6-8
<i>Labeo bicolor</i> (Smith)	4	23-28	β	5.5-7

Familia: Cyprinodontidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Aphyosemion australe</i> (Rachow) macho híbrido	2 XI a	20-25	α	5-6
<i>Aphyosemion sjoestedtii</i> (Lönnberg)	2 VII a b	24-26	α	5-6.5
<i>Aphyosemion walkeri</i> (Boulenger) macho	2 XI a	20-25	α	6-7

Familia: Gasteropelecidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Gasteropelecus sternicla</i> (Linnaeus)	2 VIII a b	24-28	α	6.5-
<i>Carnegiella strigata</i> (Günther)	2 VIII b	24-29	α	5.5-6.5

Familia: Gobiidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Brachygnathus nunnus</i> (Hamilton-Buchanan)	2 VII a b	24-30	β	7-9

Familia: Gyrinocheilidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Gyrinocheilus aymonieri</i> (Tirant)	1 II	21-26	γ	7-7.5

Familia: Lebiasinidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Nannostomus marginatus</i> (Eigenmann)	2 VIII b	21-26	β	6.5-7.5

Familia: Lobotidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Datnioides microlepis</i> (Bleeker)	2 VII a b	21-27	β	7-8

Familia: Loricariidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Cochliodon plecostomoides</i> (Eigenmann)	2 XI a	20-27	α	6.5-7.5

Familia: Mochokidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Synodontis nigriventris</i> (David)	2 XII a	21-25	α	6-7

Familia: Poeciliidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Poecilia reticulata</i> (Peters) variedad albino, macho	4	20-25	γ	7-8
<i>Xiphophorus maculatus</i> (Günther) Mickey-Mouse platy	1 VI	21-26	γ	7-8
<i>Xiphophorus variatus</i> (Meek) variedad platy	3	20-26	γ	7.5-8.5
<i>Poecilia latipinna</i> (Le Sueur) variedad albino	4	24-28	γ	7-8

Familia: Polypteridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Calamoichthys calabaricus</i> (Smith)	4	21-26	α	6-8

Familia: Rhamphichthyidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Elgenmannia virescens</i> (Valenciennes)	2 VIII a b	21-28	α	6-7

Familia: Scatophagidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Scatophagus argus</i> (Linnaeus)	2 XI a	22-28	γ	7-9



Familia: Siluridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Kryptopterus bicirrhis</i> (Valenciennes)	1 II	18-24	β	6.5-7.5

Cuadro D  
PECES DE AGUA SALADA

Familia: Apogónidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Apogon nemapterus</i>	1 I	24-28	α	8

Familia: Balistidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Balistapus undulatus</i>	2 IX a b	24-28	γ	8
<i>Balistes bursa</i>	2 VII a b	24-26	β-γ	8
<i>Balistes carolinensis</i>	2 XII a b	18-24	γ	8

Familia: Blenniidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Blennius ocellaris</i>	3	15-21		8

Familia: Carángidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Caranx speciosus</i>	2 VII a b	22-25	γ	8

Familia: Diodontidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Diodon holacanthus</i>	2 XII a b	24-28	γ	+ de 8
<i>Diodon hystrix</i>	2 XII a b	22-28	γ	7-8

Familia: Efipidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Platax orbicularis</i>	1 I	22-27	β	6-8

Familia: Escáridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Chlorurus bicolor</i>	2 XI a b		γ	+ de 8

Familia: Escorpénidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Pterois volitans</i>	2 VII a b	24-26	γ	8.2
<i>Dendrochirus zebra</i>	2 VII a b	24-26	γ	8.2-8.6
<i>Helicolenus maderensis</i>	2 VII a b	20-22	α	+ de 8
<i>Pterois radiata</i>	2 VII a b	24-26	γ	+de 8.2
<i>Scorpaena scrofa</i>	3	17-24		+ de 8

Familia: Grámmidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Gramma loreto</i>	3	26-28	α	+ de 8

Familia: Grammistidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Grammistes sexlineatus</i>	3	24-28	α	8

Familia: Holocéntridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Holocentrus rufus</i>	2 VIII a b	23-28	no hay	+ de 8
<i>Holocentrus spinifer</i>	3	24-28	no hay	+ de 8

Familia: Lábridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Thalassoma fuscum</i>	2 XI a b	24-28	$\gamma$	+ de 8
<i>Bodianus rufus</i>	3	20-28	$\gamma$	+ de 8
<i>Coris gaimardi</i> <sup>(4)</sup>	2 VII a b	24-27	$\gamma$	+ de 8
<i>Coris julis</i> <sup>(4)</sup>	2 VIII a b	18-20	$\alpha$	8

Familia: Lutiánidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Lutjanus sebae</i>	1 I	24-28	$\beta$ - $\gamma$	+ de 8

Familia: Monocántidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Amanses pardalis</i>	2 XII a b	24-28	$\gamma$	+ de 8
<i>Chaetoderma penicilligera</i>	2 VIII a b	26	$\gamma$	8
<i>Oxymonacanthus longirostris</i>	2 XI a b	24-28	$\gamma$	8.2-8.6

Familia: Murénidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Echidna nebulosa</i>	2 VII b	22-28	$\alpha$	+ de 8
<i>Muraena helena</i>	2 XII a b	18-21	no hay	+ de 8

Familia: Ostracióndae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Ostracion lentiginosus</i>	2 XI a b	24-28	γ	+de 8.2
<i>Lactoria cornuta</i>	2 XI a b	24-30	γ	+ de 8
<i>Tetrasomus gibbosus</i>	3	25-30	β	+ de 8

Familia: Periftálmidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Periophthalmus</i>	3	26-30	γ	+ de 8

Familia: Plectorrintidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Plectorhynchus chaetodonoides</i>	2 XI a b	24-28	β	+ de 8

Familia: Plesiópidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Callopleiops altivelis</i>	2 XI a b	24-28	α	8

Familia: Pomacántidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Apolemichthys trimaculatus</i>	1 V	24-28	γ	8
<i>Euxiphops xanthometopon</i>	2 VII a b	23-29	γ	+de 8.2
<i>Pomacanthodes maculosus</i>	1 I	24-28	γ	8
<i>Gentropyge</i> (igual a <i>Holacanthus</i> )	4	24-28	γ	8

Familia: Pomacéntridae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Amphiprion perideraion</i>	1 I	24-30	γ	8.3-8.6
<i>Chromis chromis</i>	2 XI a b	17-21	α	8
<i>Dascyllus trimaculatus</i>	2 XII a b	24-28	γ	+ de 8
<i>Amphiprion bicinctus</i>	2 VII a b	24-28	γ	8.2-8.6
<i>Amphiprion ephippium</i>	1 I	25-30	γ	8.2-8.6

Familia: Pseudocromidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Pseudochromis flavivertex</i>	1 II	24-28	γ	+ de 8

Familia: Quetodóntidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Chaetodon octofasciatus</i>	2 VII b	24-25	γ	8
<i>Chaetodon collare</i>	2 VII b	24-28	γ	8
<i>Chaetodon larvatus</i>	2 IX a b	26-28	γ	8
<i>Chaetodon ocellatus</i>	2 VII b	20-26	γ	8

Familia: Serránidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Chromileptis altivelis</i>	2 XI a b	23-25	β	8
<i>Serranus aeneus</i>	2 VII a b	12-24	α	+ de 8
<i>Epinephellus alexandrinus</i>	2 VIII a b	22	α	8
<i>Epinephellus guaza</i>	2 XI a b	16-23	α	8
<i>Serranus scriba</i>	2 VII a b	18-21	β	8

Familia: Signátidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Hippocampus kuda</i>	2 X	25	$\beta-\gamma$	+ de 8
<i>Hippocampus guttulatus</i>	3	20-22	$\beta$	+ de 8
<i>Hippocampus hudsonius</i>	2 VII a b	20-24	$\beta$	+ de 8

Familia: Sijánidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Lo vulpinus</i>	2 IX a b	25-30	$\gamma$	+ de 8

Familia: Tetraodóntidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Arothron</i>	2 XI a b	24, 28-30	$\gamma$	+ de 8
<i>Arothron reticularis</i>	3	24-28	$\gamma$	+ de 8

Familia: Zánclidae

Nombre científico	Patrón	Temp. °C	Luz	pH
<i>Zanclus cornutus</i>	2 VII b	23-29	$\gamma$	8.2-8.6

Como vimos los patrones en los peces son muy variados, influyen muchos factores para que estos se den, sin embargo, por muy complejos que sean los patrones, existe una relación con el Cuadro A, por pequeña que esta sea, es decir semejanzas de clasificación, la cual se aprovecha para que pueda ser modelado. Esto se elaboró con la idea de que el mayor número de patrones fueran modelados, e incluir el menor número posible de patrones en el grupo Heterogéneo.

Los factores abióticos que se colocan en los cuadros como temperatura, luz y pH, pueden servir para analizar el modelo desde otro punto de vista diferente al de las células pigmentarias, pueden modelarse patrones con respecto a estos factores, y después compararlos entre ellos.

## AUTÓMATAS CELULARES

### INTRODUCCIÓN A LOS AUTÓMATAS CELULARES

Debido a la necesidad de entender muchos procesos biológicos que ocurren en la naturaleza, los sistemas biológicos han sido objeto de muchos estudios, incluso se han utilizado modelos para diversos fenómenos. Uno de estos modelos son los Automatas Celulares (AC). Este capítulo da una breve explicación de los mismos, profundizando en los Automatas Celulares Elementales o Unidimensionales, usado indistintamente (ACE). Se mostrará la validez que tiene esta herramienta, por la forma en que modela los patrones de coloración.

Los AC son un modelo de fácil adaptación, pueden trabajarse a mano o en la computadora, preferible esta última por la rapidez de los resultados, estos autómatas dentro de sus características pueden asumir varios estados, sólo se toman dos cero o uno, no pigmentadas y pigmentadas respectivamente, podrían tomarse más, pero sería necesario utilizar colores, el color representativo del autómatas quizá no lo sea para el patrón del pez en la naturaleza. En la computadora se pueden obtener sólo ciertos colores, y utilizando tarjetas podrían obtenerse más incluso tonos, este valor cualitativo sería muy somero para querer extrapolarlo a los colores y tonos naturales de los patrones de coloración en peces. En algún trabajo posterior podrían ser utilizadas estas variedades de colores que ofrecen las tarjetas de la computadora para dinámicas celulares distinguiéndolas por colores.

En 1948 Von Neumann<sup>(21, 23)</sup>, trabajó en la formalización matemática de las computadoras actuales y fue el iniciador de los sistemas dinámicos, llevó a cabo un proyecto muy ambicioso: Mostrar que fenómenos tan complejos como la vida, supervivencia, reproducción y evolución de formas de organización complejas, podían ser reducidas en principio a la dinámica de fenómenos idénticos más primitivos, capaces de interactuar y mantener su identidad. En otras palabras, Von Neumann intentó probar la posibilidad de que una máquina fuese autorreproducible como las células. Tal máquina, dadas ciertas instrucciones, debía construir un duplicado exacto de sí misma. A su

vez, estas dos máquinas debían poder autorreproducirse de la misma manera, creando un duplicado exacto de ellas mismas. Y así sucesivamente. De esta manera es como empieza la historia de la teoría de los Automatas Celulares o AC los cuales son esencialmente sistemas computacionales <sup>(23)</sup>.

Por su parte, Stanislaw M. Ulam, amigo de Von Neumann y también iniciador de los sistemas dinámicos, mostró la posibilidad de representar estas máquinas de una manera mucho más elegante y abstracta. La representación usada para la demostración de Von Neumann consistió simplemente de lo que actualmente se llama un "espacio celular uniforme", esto es equivalente a un tablero de ajedrez, en donde cada celda o escaque del tablero (que también se le llama célula), puede tener un número finito de estados o valores, incluyendo un valor indefinido (vacío), y un número finito de celdas adyacentes que pueden influir sobre el estado de otras celdas. El patrón de cambios en los estados de cada celda está dado por una regla de transición local, es decir, que afecta sólo a cierta vecindad de celdas, las cuales van cambiando a través del tiempo en unidades discretas de esto. Esta regla se aplica a cada una de las celdas. Estas simbolizan la parte básica de un Automata de estados finitos y da una configuración de células pigmentadas y células no pigmentadas en este caso, que representa un modelo de la máquina autorreproducible. En muchos casos, para hacer el modelo manejable, se considera que cada celda pueda tener sólo dos posibles valores: 0 (cero) y 1 (uno), no pigmentadas y pigmentadas respectivamente. Otra restricción es la de trabajar en una sola dimensión, reduciendo un poco la complejidad de las teorías, sin embargo, estas restricciones no tienen porqué generalizarse para toda la teoría de Automatas Celulares.

Un concepto equivalente de la máquina autorreproducible es la máquina de Turing, nombrada así por su inventor, el matemático británico A. M. Turing fundador de la ciencia moderna computacional, la cual consiste en una máquina capaz de ejecutar cualquier cálculo. Von Neumann introdujo este concepto, y fue capaz de mostrar el constructor universal.



La noción de AC se basa en las siguientes ideas y definiciones:

I) Los AC consisten en una línea de celdas o sitios cada uno con un valor cero (0) o uno (1). Estos valores se actualizan en una secuencia de tiempos discretos, para dar un gran número de elementos idénticos con un comportamiento individual muy simple pero capaces de mostrar comportamientos extremadamente complejos en conjunto. Pueden utilizarse como modelos para simular el comportamiento de diversos sistemas complejos que aparecen en la naturaleza y que se caracterizan por poseer un número grande de componentes iguales con interacciones locales entre ellos.

Esto se puede explicar en términos de la siguiente ecuación:

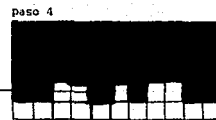
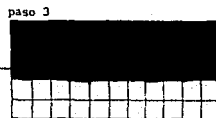
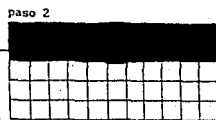
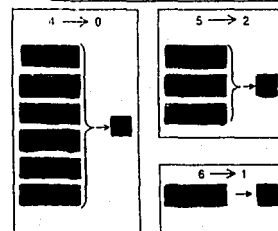
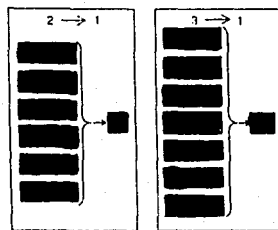
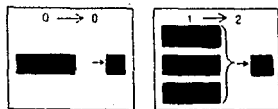
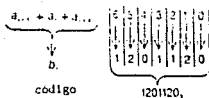
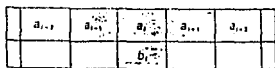
$$a'_i = F(a_{i-1}, a_i, a_{i+1})$$

donde,  $a'_i$  corresponde al  $i$ -ésimo sitio al tiempo  $T$ ,  $F$  = especifica la combinación de la regla de propagación a usar,  $a_{i-1}$  al vecino de la izquierda  $a_i$  al vecino directamente implicado, y  $a_{i+1}$  al vecino de la derecha.

El que la celda se presente de cierta manera, dependerá de la regla de evolución y de la generación pasada, específicamente de  $a_{i-1}$ ,  $a_i$ ,  $a_{i+1}$  es decir: de sus tres vecinos inmediatos. Fig. A.

La base matemática de la mayoría de los modelos convencionales, en este caso AC de un fenómeno natural como la que se da en este trabajo son las ecuaciones diferenciales. Un autómata se explica en estos términos, tal ecuación establece la relación entre ciertas cantidades y sus velocidades de cambio.

II) Las interacciones entre los elementos "celdas" o "sitios" son de corto alcance, es decir solamente interactúan aquellos elementos considerados como "vecinos cercanos".



En los autómatas celulares se encuentran unos modelos más sencillos que recogen los rasgos esenciales de múltiples sistemas naturales. El autómata celular unidimensional consta de una línea de células, mostradas en el diagrama como cuadros coloreados, cada célula puede tomar cierto número de valores, representados por colores diferentes. El autómata celular se desarrolla en una serie de pasos, indicados aquí en una secuencia de filas de cuadros que avanzan de arriba a abajo. A cada paso, los valores de todas las células se actualizan conforme a una regla predeterminada. En el caso aquí ilustrado, la regla específica es el nuevo valor de una célula en función de la suma de su valor anterior y del valor previo de sus vecinas inmediatas. Esas reglas vienen adecuadamente especificadas por códigos definidos como lo muestra el diagrama; el subíndice 3 indica que cada célula toma uno de los tres valores posibles.

Figura A

III) El espacio es discreto, este consiste en una red discreta de sitios.

IV) El tiempo es discreto, el valor de cada una de las celdas se actualiza en una secuencia de tiempos discretos.

V) Estados discretos, cada una de las células tiene un número finito de posibles valores (0, 1).

VI) Existen reglas de evolución (por propiedad para los AC se utilizará el cambio que existe; como regla de evolución) que relacionan los valores de cada uno de los sitios en un determinado tiempo con los valores de la vecindad de este sitio en tiempos anteriores. Esta regla es uniforme (homogénea) en el tiempo y en el espacio y por tanto, la evolución es totalmente determinista.

VII) En casi todos los casos la evolución de todos los Automatas es irreversible y sus trayectorias en el espacio de configuración se fusionan después de cierto tiempo. Lo anterior permite la aparición de comportamientos de "autoorganización" en algunos tipos de AC es decir, la aparición de estados "estructurados" partiendo de estados iniciales sin ninguna estructura.

VIII) Actualización sincrónica, todos los valores se actualizan sincrónicamente, cada uno depende del valor previo de las células vecinas.

IX) Regla determinista, cada uno de los valores celulares se actualiza de acuerdo a una regla fija determinista.

X) Regla espacial local, cada uno de los sitios del Automata depende sólo de los valores de los vecinos que están inmediatamente a la izquierda, derecha e inmediato superior a él.

**Definiciones:**

1) Sitio del Automata o "Espacio celular" .- Es una rejilla finita n-dimensional regular y uniforme que contiene una variable discreta en cada sitio.

2) "Evolución temporal".- La base temporal del sistema es sincrónica con etapas de tiempo discretas. En cada una de estas etapas temporales queda definida una generación de sitios.

3) "Regla entre vecinos cercanos".- la relación está definida a través de una lista finita de los sitios que son vecinos cercanos a un sitio determinado. Esta regla define también, la forma y extensión de las vecindades a considerar.

4) "Base del Automata".- Se define como el número de estados posibles en los que se puede encontrar cada uno de los diferentes sitios del sistema. Este número es discreto y por lo general también finito.

5) "Regla de evolución" .- A cada uno de los sitios de la generación que aparece en el tiempo T, esta regla le asigna el valor a tomar como una función de su propio estado y de los estados de los sitios vecinos cercanos en etapas de tiempo anteriores es decir, como función de los valores de los sitios de la vecindad. La generación que aparece en el tiempo T, está formada por los valores que toman todos los sitios a través de la regla de evolución

6) "Configuración inicial".- Está formada por los estados iniciales de todos los sitios del Automata.

7) "Dimensionalidad del Automata Celular" .- Es el número de variables que se consideran en el estudio del fenómeno.

El conjunto de mecanismos matemáticos se estudian mejor en sistemas cuya construcción sea de la máxima sencillez posible.

Cualquier sistema que satisfaga ecuaciones diferenciales puede ser aproximado por un AC a través de la introducción de diferencias finitas y de variables discretas.

Los Automatas Celulares han sido aplicados a muchos fenómenos, entre los que se encuentran: Sistemas discretos, interacciones célula-célula y modelos de color en animales, aspectos discretos de morfogénesis, así entonces, las similitudes entre el comportamiento de los Automatas Celulares y muchos sistemas biológicos, físicos, químicos es altamente sugerente en sus posibles aplicaciones directas.

#### AUTÓMATAS CELULARES UNIDIMENSIONALES

Los Automatas Celulares en una dimensión son un modelo matemático para representar sistemas naturales dinámicos complejos, conteniendo un gran número de componentes idénticos en donde exista interacciones entre ellos. Esto puede representarse como una matriz de sitios o celdas en una dimensión, cada celda con la posibilidad de tener un conjunto finito de posibles valores. Los valores en cada uno de estos sitios (o celdas), se desenvuelven sincrónicamente en pasos discretos de tiempo de acuerdo a cierta regla de transición, la cual se aplica a cada sitio de la matriz unidimensional. La regla de transición está dada por los valores previos de una vecindad de sitios alrededor del sitio que nos ocupa en ese momento, la regla de transición se aplica a cada sitio.

Puede verse entonces que los conceptos de espacio y tiempo en los Automatas Celulares se discretizan, al igual que los valores que puede tener cada sitio se encuentran dentro de un conjunto de valores discretos.

Los Automatas Celulares que se consideran en este trabajo son los Automatas en una dimensión, en donde cada sitio dentro del arreglo de éstos sólo puede tomar dos posibles valores: 0 y 1, y sólo pueden ser sitios que se encuentran a la izquierda, derecha e inmediatamente arriba del sitio de interés. Además de que la primera generación es

una hilera de Automatas o células que en cierto tiempo evoluciona. A estos Automatas los llamaremos formalmente Automatas Celulares elementales ACE, o Automatas Celulares Unidimensionales ACU.

Uno de los casos más simples de Automatas son con dependencia temporal de solamente una etapa y vecindades de tres sitios ( $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$ ), el cual tiene tres posibles valores y el número de arreglos posibles para este tipo de AC es, ocho  $2^3 = 8$ . La regla de evolución asignará un valor a cada una de las ocho posibles combinaciones de tres vecindades de valores, si damos un orden fijo a estas vecindades podremos designar la regla de evolución a través de la combinación binaria de ocho dígitos compuesta por los valores que se le asignan a cada una de las diferentes vecindades de valores de sitios. Si vemos estas vecindades, como un número en base dos y ordenamos las combinaciones de menor a mayor, un ejemplo sería la sucesión binaria 10010110. Esta representación binaria de las reglas de evolución tiene un equivalente en el sistema decimal, y es simplemente, la conversión del número binario al sistema decimal. Así, esta regla podrá ser denotada como la regla número 150. Las reglas de AC construidas de esta manera son llamadas reglas locales.

Como en los ACE sólo tenemos ocho posibles combinaciones de tres valores de sitios, entonces tendremos  $2^8 = 256$  reglas posibles de evolución, es decir tendremos 256 ordenaciones diferentes con la repetición de dos elementos, la base del Automata.

#### DIFERENTES CLASES DE AUTÓMATAS CELULARES UNIDIMENSIONALES

Existen diferentes clases de Automatas Celulares, los cuales se han clasificado de acuerdo a su comportamiento. Según Wolfram<sup>(39)</sup>, presentan propiedades cualitativas similares y se pueden clasificar en cuatro grandes clases de acuerdo a su nivel de predicción en su evolución (ver apéndice para las reglas).

Así entonces los Automatas de clase uno, desaparecen con el tiempo independientemente de su estado base o configuración inicial, además de que tienen un estado homogéneo espacial. Algunos ejemplos de

las reglas locales que pertenecen a este grupo son la número: 0, 32, 128, 160. Los de clase dos involucran un tamaño finito fijo, y son una secuencia simple de estados o estructuras periódicas. Algunos ejemplos de las reglas locales pertenecientes a esta clase de ACE son las reglas número: 50, 94, 178. En los Automatas de clase tres, crecen indefinidamente a una velocidad fija. En este caso, una configuración inicial dada al azar conduce a un comportamiento caótico aperiódico (extraño). El comportamiento de estos ACE consiste en no ser periódico. Las perturbaciones en el estado inicial de la evolución se propagan infinitamente pero con una velocidad fija. Algunos ejemplos de las reglas locales de esta clase son: 18, 22, 54, 90, 126, 146, 150 y 182. Por último, los de clase cuatro, crecen y se contraen irregularmente, son estructuras localizadas complicadas, algunas se propagan. Para estos Automatas no es posible predecir su evolución. Fig. B.

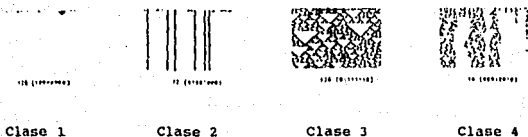


Fig. B.

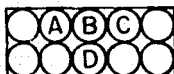
#### REGLAS LOCALES DE EVOLUCIÓN

Supongamos un AC unidimensional de base dos, los vecinos cercanos del sitio  $i$  son los sitios que le son contiguos, tanto a la izquierda como a la derecha, el valor del sitio  $i$  depende de los valores de tres sitios en una etapa temporal anterior, como los sitios solamente pueden tomar dos valores y la vecindad consta de tres sitios, entonces tenemos ocho posibles ordenaciones con repetición de dos elementos tomados de tres en tres. Estas ordenaciones son: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 y 111. La ilustración de la regla se muestra en la siguiente tabla:

$i-1$ en $t$	$i$ en $t$	$i+1$ en $t$	$i$ en $t+1$
0	0	0	$0 + 0 + 0 = 0$ bit menos significativo
0	0	1	$0 + 0 + 1 = 1$
0	1	0	$0 + 1 + 0 = 1$
0	1	1	$0 + 1 + 1 = 0$
1	0	0	$1 + 0 + 0 = 1$
1	0	1	$1 + 0 + 1 = 0$
1	1	0	$1 + 1 + 0 = 0$
1	1	1	$1 + 1 + 1 = 1$ bit más significativo

En este caso la configuración inicial será una hilera de ceros y unos, es decir, una hilera de sitios con estados iniciales de valores uno o cero. Con la evolución temporal del sistema, esta hilera inicial dará origen a otra hilera diferente. Cada una de estas hileras representa un estado particular del sistema en modelación. Si se considera a la hilera de sitios como una cadena circular compuesta de sitios que ha sido rota en alguno de sus eslabones, entonces a los sitios de los extremos les corresponderá como vecino faltante el sitio en el extremo opuesto. Estas condiciones de frontera han sido llamadas condiciones de frontera circulares o condiciones periódicas. Algunas condiciones de frontera alternativas son asignar a los sitios extremos, el valor uno y cero alternativamente o mantener el valor inicial durante toda la simulación.

Cabe señalar que se puede clasificar también a los Automatas con el tipo de rejilla cuadrada "C" o triangular "T" Fig. C.



"C"



"T"

Fig. C



## REGLAS TOTALÍSTICAS

En las diferentes combinaciones en las reglas de los AC, es importante la posición específica de cada uno de los valores del sitio dentro de las vecindades, por lo que el valor que toma la combinación 110 puede ser diferente al valor que toma la combinación 011 o al valor que toma la combinación 101 en tanto que cada una de estas vecindades puede producir un valor diferente al sitio central en la evolución temporal. Sin embargo, existe otra forma de concebir a las reglas de los AC. La manera de construir la regla llamada totalística es la siguiente: sumamos los valores de todos y de cada uno de los sitios que forman cada una de las diferentes vecindades y a partir de estas sumas clasificamos a las diferentes sucesiones de valores (vecindades). En el caso de los ACE con red rectangular tenemos ocho posibles sucesiones de valores: 111, 110, 101, 100, 011, 010, 001 y 000 que tienen las siguientes sumas 3, 2, 2, 1, 2, 1, 1 y 0 respectivamente, entonces las vecindades de igual suma son equivalentes, es decir: las vecindades 110, 101 y 011, por un lado, y las vecindades 100, 010 y 001, por otro lado toman el mismo valor. En este caso tenemos cuatro posibles sumas: 3, 2, 1 y 0, por tanto para especificar las reglas de evolución solamente se necesitan cuatro dígitos binarios. Es claro que el conjunto de las reglas totalísticas forma un subconjunto de las reglas locales. Sin embargo, se ha encontrado que cada uno de los tipos de comportamientos dinámicos encontrados hasta el momento en los AC con reglas locales se presentan también en los AC con reglas totalísticas. En el caso de los ACE el número de las reglas totalísticas es de  $2^4 = 16$ , lo cual reduce considerablemente el número de reglas a estudiar.

## CLASIFICACIÓN DE PATRONES

Los AC se han utilizado para modelar diversos fenómenos de naturaleza morfogénica y en particular los patrones de coloración en

la piel de algunos animales. Se ha propuesto que bajo ciertas condiciones, los Autómatas Celulares interactúan y generan patrones de coloración semejantes a los generados por las células pigmentarias o cromatóforos, es decir, tales patrones de coloración podrían seguir dinámicas semejantes a las que se presentan por los cromatóforos en la piel el pez. Si esta idea se acepta, se tendrá que ser capaz de identificar con los Autómatas Celulares patrones semejantes a los generados en la naturaleza, sin embargo el número de AC y de patrones puede llegar a ser muy grande. Para el caso de los AC que se están manejando, el número llega a 256 patrones que serían distintos entre sí, pero hay algunos con similitudes, aún así es necesario contar con una clasificación que agrupe a aquellos patrones "semejantes" y que pueda indicar cuales y que tanto son "similares" entre sí.

#### LOS AUTÓMATAS CELULARES COMO MODELO MORFOGENÉTICO

Se proponen modelos de simulación por computadora, que se acercan a las características reales de los patrones en peces. Se Considerará un número pequeño de células que se acomodan inicialmente en una secuencia lineal, donde se podrá definir su estado 0 ó 1, y con las reglas mencionadas se dejará evolucionar para observar a través del paso del tiempo como se comporta su patrón. Cabe destacar que las relaciones discretas célula-célula con interacciones Homotípicas, Homofílicas y Heterotípicas, y que se retoman en la siguiente sección son necesarias. Todos los organismos tienen aspectos discretos (los organismos están contruidos por células), la división y multiplicación de las células incluye un crecimiento clonal, los Autómatas Celulares tratan de asemejar esto. Cuadro A.

Cuadro A

Homologías de las células con los Automatas Celulares Elementales

Homologías	Células	Automatas Celulares
comunicación	vecinos cercanos y lejanos	en este caso sólo vecinos cercanos
tiempo	discreto	discreto
espacio	discreto	discreto
estados posibles	finito	finito (0, 1)
autorreproducción	si	si
evolución	si	si hay casi siempre irreversible
estado actual	depende de las demás y de ella	depende de las demás
cantidad	pocas o muchas células	pocos o muchos autómatas

Como se ha observado los ACE, son un modelo que toma en cuenta las relaciones celulares para poder asemejar un patrón. Mientras este modelo tome más relaciones celulares en cuenta será mucho más versátil modelando patrones.

Si se observa en el apéndice los autómatas de Wolfram, existe una diferencia amplia entre todos ellos, de los cuales algunos no se presentan en la naturaleza, por ejemplo: En la tabla II las reglas 22, 60, 110, 122, 146. Otros que si se parecen mucho y serian por ejemplo: Tabla II reglas 1, 2, 6, 26, 27, 45, 72, 76, 105, 140. No se espera en este trabajo que se modelen todos los patrones naturales de peces, pero que si se acerquen lo más posible a estos.

## APLICACIÓN DE LOS AUTÓMATAS CELULARES EN BIOLOGÍA

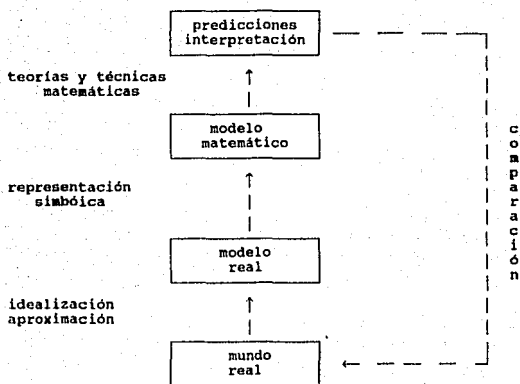
El empleo de nuevos métodos y técnicas para la explicación de muchos fenómenos se da en modelos. Un modelo representativo será aquél que pueda reproducir el comportamiento del fenómeno real. Con esto se puede dividir el modelo, debido a su aplicación en dos grandes grupos: Los reales o materiales, y los simbólicos o abstractos<sup>(27)</sup> Fig. A.

Los AC como ya se observó, tratan de asemejar en un momento específico a las células pigmentarias, pero el modelo posee características propias que le impiden tomar en cuenta todas las interacciones celulares naturales.

Los Autómatas Celulares son modelos que se han utilizado biológicamente para simular fenómenos. Con una forma simplista de manejo se abstrae la realidad por medio de los Autómatas y se observa qué puede obtener el modelo y qué no.

Este modelo generaliza la dinámica celular pigmentaria, pasándolo de una tridimensionalidad celular a una dimensión, además las interacciones celulares se reducen en el modelo a estado, espacio y tiempo<sup>(9, 10)</sup>.

Mediante estas abstracciones se obtienen características esenciales del fenómeno. Una vez elegidos los parámetros trascendentes que, en el caso de los cromatóforos responsables de los patrones de coloración en peces, es la comunicación, reproducción, el espacio, estado y el tiempo que ocupen las células, se expresa todo en términos simbólicos. Es importante tener presente que los Autómatas se adaptan con base a las necesidades mismas del fenómeno, teniendo siempre presente la naturaleza misma de este. Sólo con esto el éxito de simulación por el modelo se logrará, de otra manera se llegará a la falacia de lo modelado.



Proceso de construcción de un modelo matemático, los recuadros representan estados definidos en la metodología de la elaboración y las líneas con flechas indican los procesos y la dirección en que se dan<sup>(27)</sup>.

Fig. A

Gracias a la aplicación de los AC en muchas áreas, y los resultados exitosos que han mostrado, ha sido posible crear líneas de investigación como Biología Teórica, que abren el campo para una interpretación y valoración mayor del fenómeno. Incluso exponer el problema mediante metodologías diferentes que reforzarían los resultados experimentales.

Así en Biología, sabemos que utilizando el método científico, podemos llegar a una discusión y conclusiones, partiendo de los resultados, y una de las mejores herramientas que se utilizan es la estadística. Muchas áreas afines a la Biología, muestran herramientas que pueden explicar con la misma validez un fenómeno como lo explican los resultados de laboratorio.

La dinámica interna y externa que presentan los sistemas biológicos, es el principal obstáculo para poder expresarlos mediante Automatas. Para esto se analiza qué es lo que pueden y no pueden explicar los Automatas, y la relación que hay y no hay con la realidad.

#### LOS AUTÓMATAS CELULARES COMO MODELO DE PATRONES DE COLORACIÓN EN PECES

La necesidad de crear nuevos métodos y técnicas para la explicación de muchos fenómenos es indispensable. Por tal motivo, se han puesto a disposición de la misma ciencia, herramientas útiles para entender fenómenos que suceden en ella. El modelo de Automatas Celulares, es una herramienta que tiene las mismas posibilidades de ser útil como modelo al igual que muchas otras. Con esto no se quiere decir que al momento de usar los Automatas, el conocimiento del fenómeno que simula es completo. Este modelo se ve limitado por interacciones propias que ocurren en la naturaleza; pero toma en cuenta muchas situaciones que ocurren en la misma. A continuación se

muestra lo que toma en cuenta el modelo:

Qué toma en cuenta el modelo

#### Espacio discreto

Especifica el lugar donde se encuentra la célula. Como en el modelo se utilizan casillas o escaques, cada casilla corresponde a un número de célula, es decir si tenemos una primera generación de 50 células, se tendrán 50 casillas.

#### Estados discretos

El posible estado que tenga la célula en un momento específico. En el caso del modelo sólo serán dos estados posibles, cero y uno.

#### Tiempo discreto

El número de generaciones Celulares que se producen en el tiempo: La primera generación es la responsable directa de originar la segunda, esta a su vez originará a una tercera y así sucesivamente. Todas siguiendo una regla preestablecida de comportamiento, de la cual se hablará más adelante.

En los capítulos anteriores se ha hablado ya de donde provienen los cromatóforos, como posiblemente adquieren sus pigmentos, relación interna y externa que tienen las células, los cromatóforos que hay, cómo se dan los colores y por lo tanto los patrones en los peces. La elaboración de una clasificación general de los patrones de coloración, y una breve explicación de lo que son los Autómatas. Toca en esta sección retomar todo esto, y aplicarlo de la siguiente manera:

Si bien recordamos, las células de la cresta neural son las que van a originar a los cromatóforos, estas células se desplazan, y en este desplazamiento van formando prepatrones, y llegan después a la dermis. Desde antes establecen una comunicación estrecha que va a ver entre célula-célula por una unión de tipo comunicante, además se da otro tipo de comunicación, que es por gradiente químico. También

las células tienen interacciones dadas por fuerzas celulares y macromoleculares, estas últimas se encuentran en la superficie de las membranas de las células. Las interacciones pueden ser con células o moléculas iguales homotípicas HOF, u homofílicas HOF respectivamente, y células o moléculas diferentes, heterotípicas HET o heterofílicas HEF, respectivamente<sup>(9, 10)</sup>. Las interacciones microscópicas que tengan los cromatóforos, se van a reflejar de manera macroscópica, lo que será un indicador visual de los patrones de color en peces. Estos son los tipos de interacciones celulares y macromoleculares que se toma en cuenta para expresar en el modelo la posible dinámica celular pigmentaria.

Una célula será potencialmente capaz de hacer mitosis y dar dos células, a su vez estas se vuelven a dividir y se obtienen cuatro, y así sucesivamente. Quiere decir que a partir de una célula se obtiene un número finito de células. Extrapolándolo a los autómatas, muestra que en una hilera de células con un número conocido de ellas, de la primera generación se van a obtener varias generaciones después de un tiempo dado. Todas van a ser descendientes de células con dos características esencialmente diferentes que se toman en cuenta en este trabajo: pigmentadas, o no pigmentadas. Para este modelo se parte de que una célula se encuentra en un estado, y puede fijarse. Así es que si tenemos un número pequeño de células, estas se acomodan en una hilera que representará la primera generación de células o autómatas. Cuando estas células ya están acomodadas se fijan, y serán las responsables directas de la expresión de una nueva generación de células, es decir tres células, en el caso de red rectangular o autómatas originarán a una célula o autómatas. De tal manera que cada célula que se origine, será el resultado de sus células inmediatas superiores cercanas vecinos cercanos, estas a su vez, también se quedarán estáticas y darán otra generación, y así sucesivamente hasta observar el modelo del Autómata Celular. Cabe hacer notar que el Autómata es estático y no tiene la posibilidad de que pueda cambiar su patrón, pero simula al patrón natural en un momento de vida del individuo. Además hay que recordar que los peces



muestran una simetría bilateral, y el modelo es aplicable a ambos lados.

Entre células hay interacciones de corto alcance, un ejemplo clásico de interacción HOT sería aquella en la cual las células son iguales Fig. B:



Fig. B

En el modelo nosotros lo veríamos como uno-uno o cero-cero; el acomodo no importa, siempre y cuando los números sean iguales y vecinos, es aplicable a cualquier regla.

Un tipo de interacción HOF es aquella en la cual las moléculas son iguales Fig. C:

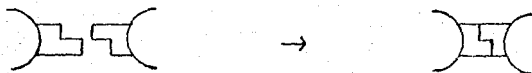


Fig. C

El tipo de macromoléculas que se presentan tienen interacciones fuertes, y ya en el modelo se pueden interpretar como las interacciones en las reglas cuando hay vecinos iguales cero-cero o uno-uno, semejante que en el tipo HOT a diferencia de este, que en el tipo HOF las macromoléculas no se pueden ver. Puede ser que la regla sea  $111 \rightarrow 0$  ¿Como tres células pigmentadas, dan una no pigmentada? En este caso se interpreta como interacciones HOT con moléculas HEF (son moléculas diferentes), en este tipo existen interacciones débiles Fig. D:

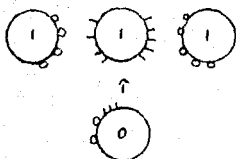


Fig. D

En la última que sería de tipo HET, las células son diferentes  
Fig. E:



Fig. E

Las interacciones como ejemplo, serían cero-uno, o uno-cero, aquí aunque hay una interacción HET, la célula resultante tendrá una relación HOT o en su caso HOF con cualquiera de las células que la originó. Para ampliar esta argumentación, en el esquema de la Fig. H, se coloca una regla de red triangular cualquiera, y se explica su interacción más detallada.

Por lo tanto, tomando hasta este momento todo lo anterior, supongamos que el siguiente esquema corresponde a las células que salieron de cresta neural y se van desplazando o van empujando a las generaciones siguientes. Además se toma en cuenta que existen las interacciones ya mencionadas. Se coloca un esquema de un embrión y una hilera de Automatas o células, representando a diferentes tiempos el camino de ellas. Además se recuerda que no todas las células que salen de la cresta neural se diferenciarán en células pigmentadas, habrá células no pigmentadas, que también se representan aquí Fig. F:

- >No pigmentada (cero)
- >Pigmentada (uno)

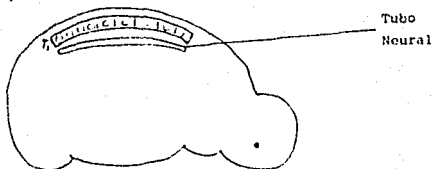


Fig. F

Aquí se muestra una segunda generación, han cambiado en el tiempo las células. La línea punteada especifica la generación anterior y la hilera de células representa la evolución que se da por las reglas de las combinaciones posibles de vecinos cercanos. Debido a las interacciones con sus vecinas, pueden cambiar de estado, incluso en espacio. Cada una de estas expresa comunicación con las más cercanas Fig. G:

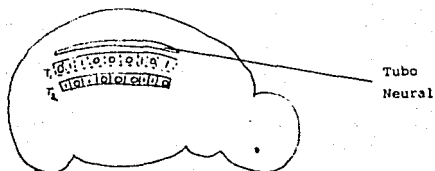


Fig. G

Existe selección celular y muchas de ellas mueren, pero también muchas llegan a reproducirse. si se siguiera en el tiempo estas generaciones de Autómatas, se observaría cómo el patrón de color se va

generando; sería algo semejante a lo que se muestra en los resultados. Es decir, estas células o cromatóforos se van acomodando en la epidermis formando prepatrones (antes de los patrones definitivos), o premodelos.

Estas células o autómatas tienen una relación estrecha entre las vecinas, de tal manera que dependiendo de su estado influenciarán el estado de un nuevo autómata. Como observamos existe una relación intrínseca entre células, este tipo de relación se puede interpretar biológicamente con el modelo en la figura, en donde se colocan las interacciones que hay en cada caso y está expresado en una malla triangular:

Interacción HET, con macromoléculas HOF

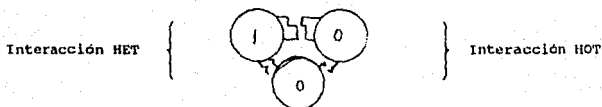


Fig. H

En seguida se dan dos ejemplos de la interpretación de interacciones macromoleculares en el modelo, con vecinos cercanos y en malla triangular, también se exponen las posibles combinaciones de la regla, como ejemplo se coloca una primera generación con el acomodo de los Autómatas Celulares al gusto y después la evolución generada del Autómata a mano.

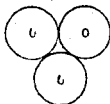
La primera regla que se va a generar es la siguiente:

- 1\* 00→0
- 2\* 01→1
- 3\* 10→1
- 4\* 11→0

Las combinaciones 01, 10 son iguales porque van a dar origen al mismo autómata (1), a su vez las combinaciones 00, 11 aunque son diferentes precursores, tendrán un mismo sucesor que es el cero (0).

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

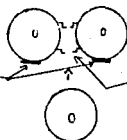
La primera combinación  $00 \rightarrow 0$ , en el modelo se interpreta de la siguiente manera:



Y la interpretación con interacciones macromoleculares es así:

Interacción tipo HOF

En esta región no se encuentran macromoléculas, la célula sucesora tendrá que reconocer su ambiente



Interacciones fuertes tipo HOF

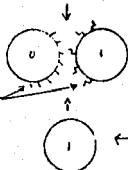
En la segunda combinación, el modelo se presenta así:



Y macromoleculamente sería de la siguiente forma:

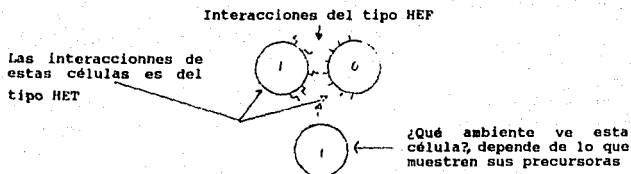
Existen interacciones débiles de tipo HEF

La interacción de las células precursoras es del tipo HET

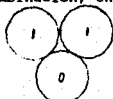


El ambiente que hay en las células precursoras es del tipo interacciones débiles, de tal manera que esto influenciará las interacciones que tengan con el autómata sucesor

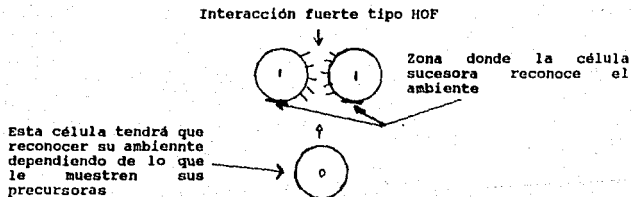
En la tercera combinación sucede algo similar a lo anterior



En la cuarta y última combinación, en el modelo lo veríamos así:



Si observamos las células precursoras son iguales, sin embargo dan lugar a un autómata diferente, que macromolecularmente se interpreta así:

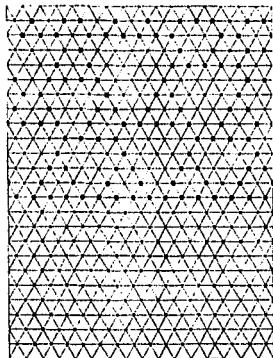


La regla general puede condensarse, puesto que la 2ª y 3ª combinaciones se repiten, la regla condensada quedaría así:

Regla (010)

El primer cero es de la interacción 00, el uno de las interacciones 01, 10 y el cero de la interacción 11.

En la siguiente figura la primera línea significa la primera generación que consta de 16 autómatas que se generaron en un tiempo de 23. Se observa el patrón a que da origen esta regla:



Otros casos posibles:

Regla (100)

00→1

01 → 0

10 → 0

11→0

$$\begin{array}{c} 00 \\ \oplus\oplus \\ \hline 1 \end{array}$$

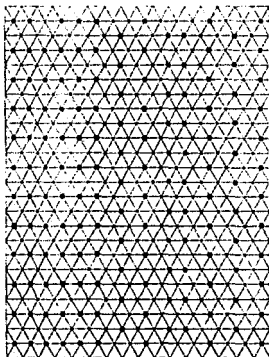
$$\begin{array}{c} 01 \\ \oplus \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} 10 \\ \oplus \\ \hline 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} 11 \\ \oplus\oplus \\ \hline 0 \end{array}$$

En este otro ejemplo la célula sucesora generada por las combinaciones 01, 10 pueden mostrar afinidad a cierta célula precursora, en el caso de la combinación 10 la célula sucesora muestra afinidad al uno, y en la combinación 01 la célula sucesora muestra afinidad al uno. En realidad estas células sucesoras muestran afinidad a las mismas células precursoras. Por el hecho de que haya células sucesoras con mayor afinidad a alguna célula precursora, puede cambiar el patrón.

Autómatas Celulares que se generan con estas combinaciones:





Regla (110)

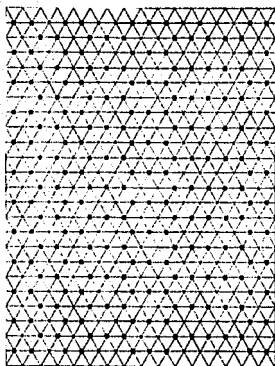
00→1

01→1

10→1

11→0

Autómatas Celulares que se generan con estas combinaciones:



Los Automatas se elaboraron a mano y en computadora todos son de red rectangular. Se coloca una foto del pez y su correspondiente Automata. La foto del pez se coloca a manera de ejemplo, porque bien entran los peces con igual patrón, arriba se coloca su nombre científico y abajo del autómata a mano se colocan los nombres científicos posibles de peces que entran en este patrón. El AC tiene 50 células iniciales que representa la primera generación de células, las cuales evolucionaron en un tiempo de 40 generaciones. El programa de Automatas, se elaboró como ayuda para la identificación de los patrones. Se anexa en el apéndice, está en lenguaje de alto nivel, Turbo tres, Pascal, y se incluyen comentarios para un mejor seguimiento del mismo.

#### RESULTADOS

##### Patron A

##### Rayas verticales

La regla utilizada en este patrón es la siguiente:

000-1	100-0
001-1	101-0
010-1	110-0
011-1	111-0

La primera generación se colocó de tal manera que quedaron células pigmentadas y células no pigmentadas alternadas una a una, para obtener este patrón, las reglas que se utilizan son las 010-1 y la 101-0, porque como el patrón inicial es constante no es necesario utilizar otro tipo de reglas más que las mencionadas arriba. En este caso se puede interpretar las reglas 010-1 y 101-0 como interacciones heterotípicas, el tipo de AC que se muestra aquí es de clase dos.

### Patrón B

#### Rayas horizontales

Las correspondientes combinaciones a este patrón son:

000→1	100→1
001→1	101→0
010→0	110→0
011→0	111→0

La primera generación todas son células no pigmentadas (cero), excepto la número 50 que es célula pigmentada, por su evolución es de clase dos. Las reglas importantes en este patrón son las 000→1, 001→1, 010→0, 100→1 y 111→0. Aquí se encuentran los tres tipos interacciones, Homofílicas, Homotípicas y Heterotípicas.

### Patrón C

#### Rayas diagonales

La regla es:

000→1	100→1
001→1	101→0
010→1	110→0
011→0	111→0

El tipo de evolución del autómata es de clase tres. Se muestra una secuencia de células pigmentadas y células no pigmentadas, nueve pigmentadas, ocho no pigmentadas. Las reglas importantes son: 000→1, 001→1, 011→0, 100→1, 110→0, 111→0. Se dan aquí los tres tipos de interacciones, Homotípicas, Homofílicas y Heterotípicas.

### Patrón D

#### Manchas

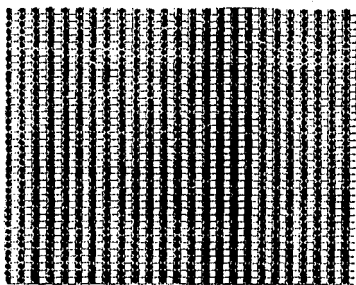
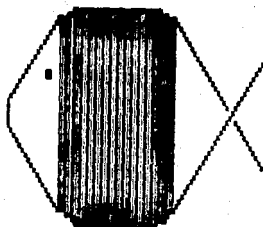
Las correspondientes combinaciones son:

000→0	100→1
001→1	101→0

010→0      110→1  
011→1      111→0

La primera generación es la siguiente: La célula uno, de la seis a la 13, la 21, de la 29-31, de la 41-46 y la 49. Todas estas son pigmentadas y las que no se mencionaron no lo son, la evolución del autómata que se presenta es de clase dos. en este caso, se utilizan todas las reglas con interacciones Homotípicas, Homofilicas y Heterotípicas.

*Zebrasoma veliferum*



*Apogon nemapterus*

*Platax orbicularis*

*Lutjanus sebae*

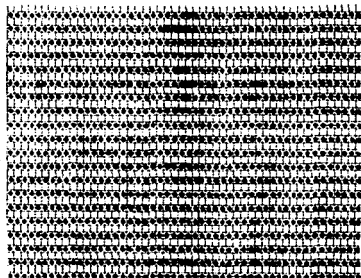
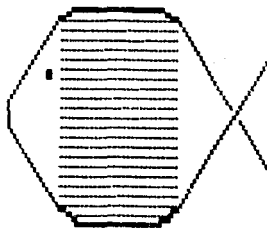
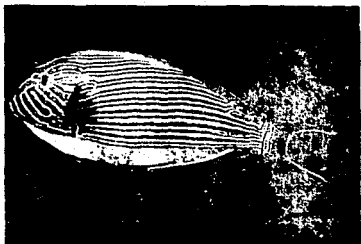
*Pomacanthodes maculosus*

*Amphiprion perideraion*

*Amphiprion ephippium*

Patrón A

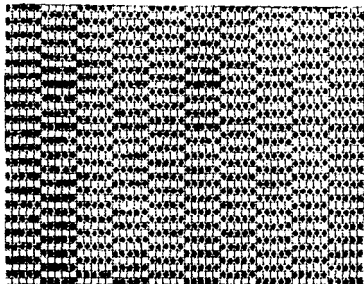
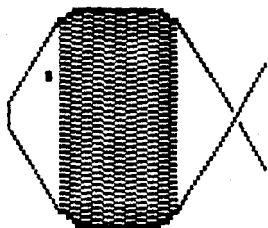
*Acanthartus lineatus*



- Trichogaster leeri*
- Changara*
- Cheirodon axelrodi*
- Hemigrammus erythrozonus*
- Rasbora trilineata*
- Gyrinocheilus aymonieri*
- Kryptopterus bicirrhus*
- Pseudochromis flavivertex*

Patrón B

*Pomacanthodes imperator*



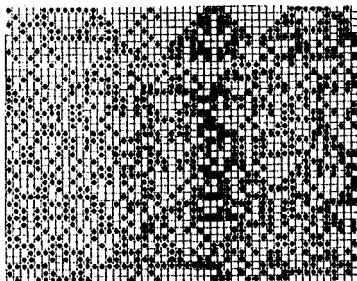
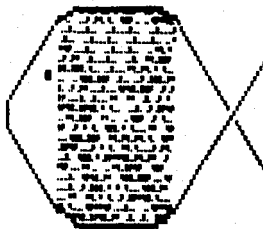
*Cichilosoma festivum*

*Balistapus undulatus*

*Lo vulpinus*

Patrón C

*Misgurnus anguillicaudatus*



*Betta splendens*

*Callichthys callichthys*

*Hemigrammus ocellifer*

*Aequidens maronii*

*Aequidens pulcher*

*Misgurnus anguillicaudatus*

Patrón D



## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE ESTE MODELO EN BIOLOGÍA

La comunicación que se da en las células es imprescindible, de manera que va a ser una de las responsables directas de que las células lleguen a su destino sin perderse.

Cuando las células llegan a epidermis, se acomodan y se pueden observar los patrones característicos de los peces. Los Autómatas Celulares se acomodan de tal manera que pueden simular a los patrones naturales.

Los Autómatas Celulares pueden ser no solo una herramienta útil en la investigación de problemas biológicos y físicos, también pueden servir como un elemento de peso para ciertas demostraciones en matemáticas.

Este modelo es capaz de exhibir algunos comportamientos complejos similares a los que se observan en diversos fenómenos naturales. Debido a las variadas propiedades que poseen, pueden ser útiles para modelar problemas en Biología. Un modelo basado en Autómatas Celulares puede reproducir algunos aspectos de la hipótesis de información posicional y puede revelar, a través de sus propiedades de los Autómatas Celulares, algunas del fenómeno morfogénico mismo.

La complejidad y variedad presentada por los Autómatas es muy grande. De estos no todos los expuestos en este trabajo sirven como modelo de patrones de coloración en peces. Si bien es reconocido las semejanzas existentes de los Autómatas a las células; las primeras no tendrán siempre la elasticidad de ser representantes de las segundas, esto dado simplemente por su complejidad natural. Además, recordando que este estudio no expresa los patrones irregulares o sin coloración, por la complejidad de formas del primero, y falta de coloración del segundo. Dentro de la clasificación que se elaboró en este trabajo, los patrones más abundantes en la muestra fueron los de rayas verticales de diferente largo y ancho, y el grupo de patrones heterogéneos y sin pigmentación. Con lo que respecta a las rayas verticales de diferente largo y ancho, las reglas de ACE con vecinos

cercanos se aproximaron sólo a éstos ya que no fue posible lograr diferentes largos. El grupo de patrones heterogéneos que tiene una gran variabilidad de patrones de coloración en la muestra, si se quisieran estudiar estos patrones tendría que ser un mayor desglose de éstos, con respecto a los que se presentan en la clasificación de éste trabajo. Por último no tienen mayor relevancia tratar de modelar un patrón que es homogéneo totalmente como en el caso de los patrones sin pigmentación.

Los cambios en los patrones de coloración generados por los Automatas Celulares, están relacionados con los tipos de reglas, además del acomodo de la primera generación del Automata Celular.

El modelo no explica en ningún momento, la migración en esencia tan complicada. Lo que hace es mostrar la comunicación entre células vecinas y como estas influyen en una nueva célula.

Los Automatas Celulares como modelo global, han tenido éxito en el modelaje de patrones de color en algunos reptiles y mamíferos. Observamos en este trabajo que también sirven para modelar los patrones de coloración en los peces. No todos los Automatas Celulares Unidimensionales pueden modelar los patrones, debido a la complejidad que se presenta en la naturaleza.

Se enfatiza que la Biología es tan amplia que puede estar relacionada interdisciplinariamente con otras ciencias. Se hace notar aquí solo una aplicación del modelo a un fenómeno natural. Si bien lo modelado es sencillo, el modelo también lo es, y se puede complicar tanto como se desee, de tal forma que se podría tomar en cuenta factores internos y externos que afectan a la coloración del pez.

Este trabajo muestra la necesidad de que en Biología se utilicen modelos para interpretar, o incluso poder explicar fenómenos en ella.

## APÉNDICES

Tabla I

Se presentan todas las reglas de los Automatas Celulares (256), se coloca el número de regla en decimal y en seguida su correspondiente en binario

Tabla II

Se presentan algunas reglas de los Automatas Celulares de clase uno, dos y tres, con dos estados posibles 0 y 1 con probabilidad de  $1/2$ . La primera generación de 80 sitios ha sido puesta azarosamente con condiciones de frontera periódicas, y se ha dejado correr hasta el tiempo de 60 generaciones para observar los resultados. Se pone abajo del Automata primero la regla en decimal y entre parentesis en binario<sup>(42)</sup>

Ejemplos de los Automatas de clase uno son las reglas: 18, 22, 30, 60, 90, 126, 146; los de clase dos son: 4, 12, 36, 44, 72, 76 etc.; y los de clase tres son: 9, 14, 15, 35, 51, 178, 184.

Tabla III

Muestra los Automatas Celulares cuando se cambia solo un punto de la primera generación y se deja evolucionar. Entre paréntesis está el número de regla en binario y a la izquierda está el número de regla en decimal<sup>(42)</sup>.

## PROGRAMA

En el programa que se presenta a continuación, se exponen las instrucciones del modelo de Automatas Celulares donde se indica lo que hace a través de comentarios. Se muestra también si es red triangular o rectangular y de cuantos vecinos depende.

Se da la opción de escoger el número de células de la primera generación, y cuantas generaciones (tiempo) debe de hacer.

Además de que la continuidad de vecindad se mantiene de la primera célula hasta la última como si fuera una cadena. Son periódicos.

Tabla I

Dec	Binario	Dec	Binario	Dec	Binario
0	00000000	51	00110011	102	01100110
1	00000001	52	00110100	103	01100111
2	00000010	53	00110101	104	01101000
3	00000011	54	00110110	105	01101001
4	00000100	55	00110111	106	01101010
5	00000101	56	00111000	107	01101011
6	00000110	57	00111001	108	01101100
7	00000111	58	00111010	109	01101101
8	00001000	59	00111011	110	01101110
9	00001001	60	00111100	111	01101111
10	00001010	61	00111101	112	01110000
11	00001011	62	00111110	113	01110001
12	00001100	63	00111111	114	01110010
13	00001101	64	01000000	115	01110011
14	00001110	65	01000001	116	01110100
15	00001111	66	01000010	117	01110101
16	00010000	67	01000011	118	01110110
17	00010001	68	01000100	119	01110111
18	00010010	69	01000101	120	01110000
19	00010011	70	01000110	121	01110001
20	00010100	71	01000111	122	01110100
21	00010101	72	01001000	123	01110101
22	00010110	73	01001001	124	01111100
23	00010111	74	01001010	125	01111101
24	00011000	75	01001100	126	01111110
25	00011001	76	01001101	127	01111111
26	00011010	77	01001110	128	10000000
27	00011011	78	01001111	129	10000001
28	00011100	79	01001111	130	10000010
29	00011101	80	01010000	131	10000011
30	00011110	81	01010001	132	10000100
31	00011111	82	01010010	133	10000101
32	00100000	83	01010011	134	10000110
33	00100001	84	01010100	135	10000111
34	00100010	85	01010101	136	10001000
35	00100011	86	01010110	137	10001001
36	00100100	87	01010111	138	10001010
37	00100101	88	01011000	139	10001011
38	00100110	89	01011001	140	10001100
39	00100111	90	01011010	141	10001101
40	00101000	91	01011011	142	10001110
41	00101001	92	01011100	143	10001111
42	00101010	93	01011101	144	10010000
43	00101011	94	01011110	145	10010001
44	00101100	95	01011111	146	10010010
45	00101101	96	01100000	147	10010011
46	00101110	97	01100001	148	10010100
47	00101111	98	01100010	149	10010101
48	00110000	99	01100011	150	10010110
49	00110001	100	01100100	151	10010111
50	00110010	101	01100101	152	10011000

Dec	Binario
153	10011001
154	10011010
155	10011011
156	10011100
157	10011101
158	10011110
159	10011111
160	10100000
161	10100001
162	10100010
163	10100011
164	10100100
165	10100101
166	10100110
167	10101010
168	10101000
169	10101001
170	10101010
171	10101011
172	10101100
173	10101101
174	10101110
175	10101111
176	10110000
177	10110001
178	10110010
179	10110011
180	10110100
181	10110101
182	10110110
183	10110111
184	10111000
185	10111001
186	10111010
187	10111011
188	10111100
189	10111101
190	10111110
191	10111111
192	11000000
193	11000001
194	11000010
195	11000011
196	11000100
197	11000101
198	11000110
199	11000111
200	11001000
201	11001001
202	11001010
203	11001011

Dec	Binario
204	11001100
205	11001101
206	11001110
207	11001111
208	11010000
209	11010001
210	11010010
211	11010011
212	11010100
213	11010101
214	11010110
215	11010111
216	11011000
217	11011001
218	11011010
219	11011011
220	11011100
221	11011101
222	11011110
223	11011111
224	11100000
225	11100001
226	11100010
227	11100011
228	11100100
229	11100101
230	11100110
231	11100111
232	11101000
233	11101001
234	11101010
235	11101011
236	11101100
237	11101101
238	11101110
239	11101111
240	11110000
241	11110001
242	11110010
243	11110011
244	11110100
245	11110101
246	11110110
247	11110111
248	11111000
249	11111001
250	11111010
251	11111011
252	11111100
253	11111101
254	11111110

Dec	Binario
255	11111111

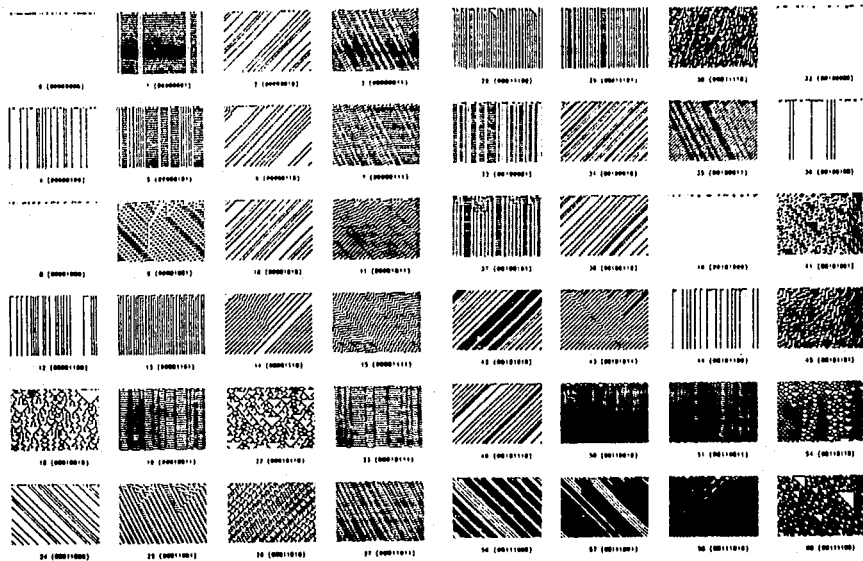


Tabla II

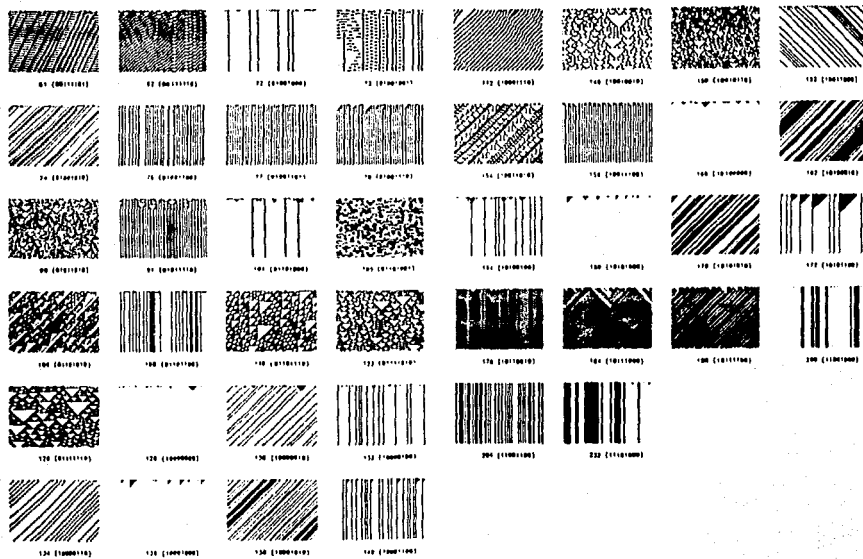


Tabla II

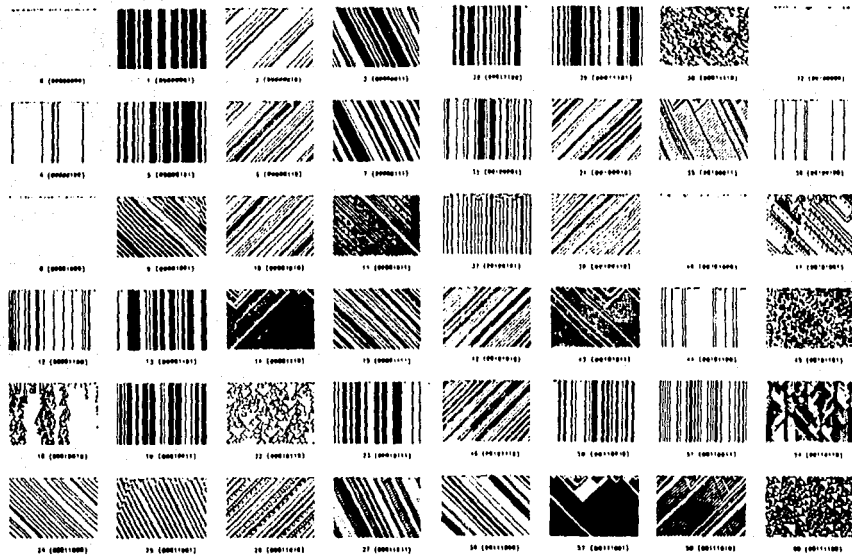


Tabla III



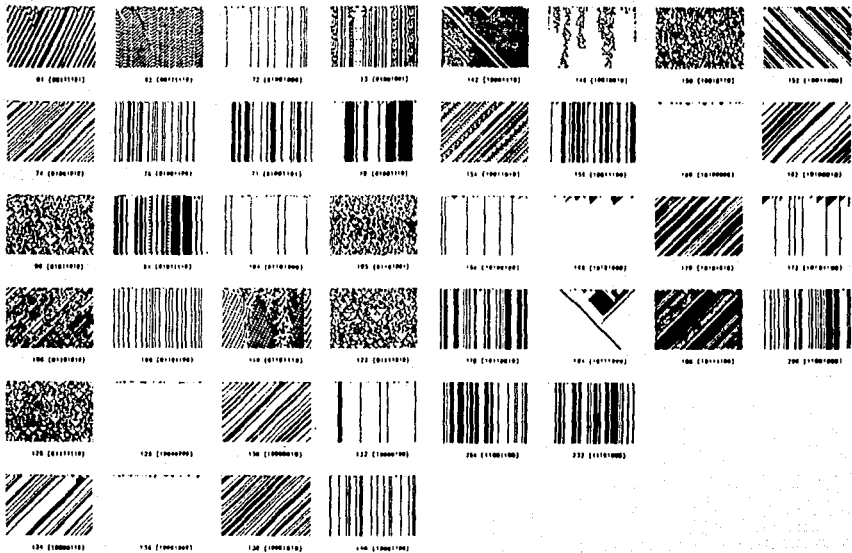


Table 111

Program patrones;

!

#### SIMULACIÓN DE LOS PATRONES EN PECES

Se ha hecho ya, un breve recordatorio de donde provienen los cromatóforos como se comunican y migran, cuál es el posible origen de sus pigmentos, y como interactúan entre ellos para dar diferentes tonos y colores, cómo son los patrones de color en general y la clasificación de ellos para hacer más factible su estudio. Teniendo el conocimiento de lo que son los Automatas Celulares se ha ideado un método de trabajo para la aplicación de los autómatas a los patrones de coloración en peces en el cual se van a tomar pocos autómatas, simulando que son pocas células en el ambiente de diferenciación.

A las células se les va a dar tiempo para evolucionar, tomando en cuenta la regla de vecinos cercanos que se explicó en el capítulo IV. Para esto se elaboró el siguiente programa que obedece estas características. Tiene relación con sus vecinos cercanos y por lo tanto se da una comunicación con ellos, los autómatas se reproducen (mitosis) y dependiendo de sus vecinos será el nuevo autómata o célula. Puesto que se están manejando células pigmentadas "cromatóforos" y si recordamos los autómatas pueden tener dos posibles estados (0,1) en este trabajo; el autómata que se marque con cero, será una célula no pigmentada, y con uno una célula pigmentada. También se toma en cuenta en el programa los extremos como la cadena que se rompe pero tiene continuidad, como ya se mencionó en el capítulo IV. El programa nos da la opción de escoger si se quiere una red rectangular o triangular (ver capítulo IV), y si la primera generación se quiere al azar o al gusto. En esta parte cabe enfatizar que es conveniente escogerla al gusto porque así mete los valores deseados y se tiene un mejor control del autómata, si se escogiera al azar, posiblemente el patrón sería muy parecido al del pez, pero no se se sabría como fue la primera generación, y por lo tanto, si se quisiera volver a reproducir el mismo patrón sería una probabilidad muy baja de que se diera, y más aún, si la primera generación se compone de muchos autómatas ya que aumentando estos, las combinaciones aumentan.

El programa también da la opción de escoger cuántos autómatas o células de la primera generación se desea. El máximo que se puede meter son 639 que es el mapeo máximo de ancho que da la pantalla de la

computadora. La pregunta siguiente es con respecto al número de generaciones que se desea en este caso también hay una restricción que es de 199, el máximo de mapeo de la pantalla a lo largo. En este caso se puede adaptar para que sean arriba de 199, pero no se hizo porque el patrón de un pez puede estudiarse con el mapeo de una pantalla o hasta menos, de nada serviría que nos diera generaciones y generaciones puesto que no se van a utilizar.

Terminando las preguntas aparecen las combinaciones posibles de los vecinos cercanos. Esto si se escogió red rectangular aparecen ocho posibles combinaciones y si es red triangular cuatro posibles combinaciones (está con detalle en el capítulo IV). En las cuales se pueden meter ceros y unos y que el programa define como no pigmentadas y pigmentadas respectivamente. Incluso de antemano cuando se escoge la primera generación al gusto aparecen todas como no pigmentadas y se puede variar como se desee.

}

```
Const (Se declaran las constantes el cual las generaciones va a
ser el máximo de generaciones en el tiempo que haga el
autómata y es de 199, que corresponde al largo de la
pantalla. Y células ser el máximo de autómatas de la
primera generación que es de 639, ancho de la pantalla.
Con estas dimensiones en los ejes y, x si se utilizan los
máximos 199 y 639 el autómata aparecer en toda la
pantalla.
```

```
generaciones : Integer = 199;
{máximo de elementos a lo largo de la pantalla.
}
celulas      : Integer = 639;
{máximo de elementos a lo ancho de la pantalla.
}
```

```
Type (Se muestra todas las características de las variables a
usar en el programa.
```

```
cadena = String [80];
```

(Se va a utilizar el el procedimiento preguntas y es para los letreros.

```
)  
patron_rectangular = Array [0..1, 0..1, 0..1] Of Integer;  
{Aquí se define el posible valor de cero o uno para los vecinos  
de la izquierda, el inmediato superior y la derecha.  
}
```

```
patron_triangular = Array [0..1, 0..1] Of Integer;  
{Aquí se define el posible valor de cero o uno para los vecinos  
de la izquierda y la derecha.  
}
```

```
Var {Aquí están todas las variables que se van a utilizar en  
el programa.
```

```
)  
x, y, error : Byte;  
i, j, k : Integer;  
car, op1, op2, op3, op4 : Char;  
estados : Array [0..639] Of Byte;  
vecinos1 : patron_rectangular;  
vecinos2 : patron_triangular;
```

```
Procedure preguntas; {En este procedimiento se elaboran todas las  
preguntas concernientes a las características  
del autómata.  
}
```

```
Procedure alternativas (x, y : Byte; mensaje, opciones : cadena;  
Var car : Char);
```

```
Var  
conjunto : Set Of Char;  
Begin  
GotoXY (x, y); Write (mensaje);  
TextColor (LightCyan + Blink); Write (opciones);  
conjunto := [opciones [1]]+[opciones {Length (opciones)}];  
Repeat  
Read (Kbd, car);  
car := UpCase (car);
```

```

Until car In conjunto;
GotoXY (x, y + 1);
TextMode;
If car = opciones [1] Then
write (Copy (mensaje, Pos ('?', mensaje) + 1, Pos
      ('o', mensaje) - Pos ('?', mensaje)))
Else
write (Copy (mensaje, Pos ('o ', mensaje) + 2, Length
      (mensaje) - Pos ('o ', mensaje)))
End;

Begin
ClrScr;  {Borra pantalla
        }
alternativas (1, 1, '(Que tipo de red quieres?
                  Rectangular o Triangular ', 'R/T', op1);
{En la posición 1, 1 de la pantalla, pregunta, tomándolo como
opción uno.
}
alternativas (1, 4, '(Que entrada quieres?
                  Aleatoria o Gusto ', 'A/G', op3);
{En la posición 1, 4 de la pantalla, pregunta, tomándolo como
opción tres.
}
WriteLn; {Salta renglón.
        }
WriteLn; {Salta renglón.
        }
Write ('(Cuántas células de la primera generación quieres?');
x := WhereX; y := WhereY;
Repeat  {Toma el valor de la pregunta (Cuántas células
        de la primera generación quieres? Si es un número
        diferente del rango 1-639 o una letra, se enciende
        un sonido, borra lo escrito y espera nuevamente,
        hasta que la variable sea motida correctamente,
        y pasa a lo siguiente.
        }
($I-) ReadLn (celulas); ($I+)

```

```

error := IOResult;
If (celulas < 0) Or (celulas > 639) Or (error <> 0) Then
  Begin
    GotoXY (x, y); ClrEol;
    Write (^C)
  End
Until (error = 0) And (celulas > 0) And (celulas < 640);
WriteLn: {Salta renglón
}
WriteLn: {Salta renglón
}
Write ('(Cuántas generaciones quieres? ');
x := WhereX; y := WhereY;
Repeat
{$I-} ReadLn (generaciones); {$I+}
error := IOResult;
If Not (generaciones In [0..199]) Or (error <> 0) Then
  Begin
    GotoXY (x, y); ClrEol;
    Write (^C)
  End
Until (error = 0) And (generaciones In [0..199])
End;
Procedure patrones_rectangular;

Var
  i, j, k, error : Byte;
  x, y           : Byte;

Begin
  WriteLn: {Salta renglón.
}
  WriteLn: {Salta renglón.
}
  For i := 0 To 1 Do
    For j := 0 To 1 Do
      For k := 0 To 1 Do
        Repeat

```

```

x := WhereX; y := WhereY; ClrEOL;
Write ('Celula ',i,j,k,Char(26));
($I-) Read (vecinos1 [i, j, k]); ($I+)
error := IOResult;
If Not (vecinos1 [i, j, k] In [0..1])
  Or (error <> 0) Then
  Begin
    GotoXY (x, y); ClrEol;
    Write (^G)
  End
Else
  If vecinos1 [i, j, k] = 1 Then
    Begin
      GotoXY (WhereX - 2, WhereY); ClrEol;
      WriteLn (' Pigmetada ');
      WriteLn ('          ',Char(31));
      (Coloca una flechita hacia abajo
      apuntando un uno
      )
      WriteLn ('          1')
      (Escribe un uno
      )
    End
  Else
    Begin
      GotoXY (WhereX - 2, WhereY); ClrEol;
      WriteLn (' No Pigmetad ');
      WriteLn ('          ',Char(31));
      (Coloca una flechita hacia abajo
      apuntando un cero
      )
      WriteLn ('          0')
      (Escribe un cero
      )
    End
  Until (error = 0) And (vecinos1 [i, j, k] In [0..1])
End;

```

Procedure patrones\_triangular;

Var

i, j, error : Byte;  
x, y : Byte;

Begin

WriteLn; {Salta renglón.  
}  
WriteLn; {Salta renglón.  
}

For i := 0 To 1 Do

For j := 0 To 1 Do

Repeat

x := WhereX; y := WhereY; ClrEOL;

Write ('Celula ',i,j,Char(26));

(\$I-) Read (vecinos2 [i, j]); (\$I+)

error := IOResult;

If Not (vecinos2 [i, j] In [0..1])

Or (error <> 0) Then

Begin

GotoXY (x, y); ClrEol;

Write ('G')

End

Else

If vecinos2 [i, j] = 1 Then

Begin

GotoXY (WhereX - 2, WhereY); ClrEol;

WriteLn (' Pigmata ');

WriteLn (' ',Char(31));

WriteLn (' 1')

End

Else

Begin

GotoXY (WhereX - 2, WhereY); ClrEol;

WriteLn (' No Pigmata ');

WriteLn (' ',Char(31));



```

                WriteLn ('      0')
            End
        Until (error = 0) And (vecinos2 [i, j] In {0..1})
    End;

```

```

Procedure primera_generacion;

```

```

    Var
        xi, yi : Integer;
        llave : Boolean;
    Begin
        FillChar (estados, SizeOf (estados), 0);
        If op3 = 'G' Then
            (Cuando la opción tres "op3", en el procedimiento de
             preguntas es igual a "G" gusto
            )
        Begin
            xi := celulas div 2; yi := 1;
            GotoXY (1, 25);
            Write('<Ins> C l. Pig. <Del> C l. no Pig.
                <Esc> Termina Mueve ', Char (26), '
                Cel: ', xi:3);
            Plot (xi, yi, 1);
            Repeat
                Repeat
                    llave := False;
                    Read (Kbd, car);
                    If (car = #27) And KeyPressed Then
                        Begin
                            Read (Kbd, car);
                            llave := True;
                        End
                    Else
                        If (car = #27) Or (car = ^I) Then
                            llave := True;
                    Until (car In {'K', 'M', 'R', 'S', 'G', 'O',
                                #27, ^I}) And llave;
                    Case car Of
                        'K', 'M', 'G', 'O', ^I

```

```

: Begin
  Plot (xi, yi, 0);
  Case car Of
    'K' : If xi = 0 Then
      xi := celulas
    Else
      xi := xi - 1;
    'M' : If xi = celulas Then
      xi := 0
    Else
      xi := xi + 1;
    'G' : xi := 0;
    'O' : xi := celulas;
    ^I : xi := (xi + 10) Mod celulas;
  End;
  GotoXY (73, 25); Write (xi:3);
  Plot (xi, yi, 1)
End;
'R' : Begin
  Plot (xi, yi - 1, 1);
  estados [xi] := 1
End;
'S' : Begin
  Plot (xi, yi - 1, 0);
  estados [xi] := 0
End;
End
Until car = #27
End
Else
Begin
  Randomize;
  For i := 0 To celulas Do
  Begin
    estados [i] := Random (2);
    Plot (i, 0, estados [i])
  End
End
End

```

End;

Procedure calcula; (Este procedimiento calcula el autómata que se haya elegido y elabora las generaciones con respecto a la primera generación y a la elección de vecindades de células pigmentadas o no pigmentadas.

)

Begin

If op1 = 'R' Then

For j := 1 To generaciones Do

Begin

estados [0] := vecinos1 [estados [celulas],

estados [0], estados [1]];

estados [celulas] := vecinos1 [estados [celulas - 1],

estados [celulas], estados [0]];

For i := 1 To celulas - 1 Do

estados [i] := vecinos1 [estados [i-1],

estados [i], estados [i + 1]];

For i := 1 To celulas Do

Plot (i, j, estados [i])

End

Else

For j := 1 To generaciones Do

Begin

estados [0] := vecinos2 [estados [celulas],

estados [0]];

For i := 1 To celulas Do

estados [i] := vecinos2 [estados [i-1],

estados [i]];

For i := 1 To celulas Do

Plot (i, j, estados [i])

End;

Read (Kbd, car);

End;

Begin (PROGRAMA PRINCIPAL

)

```
preguntas;  
{Llama al procedimiento preguntas  
}  
If opl = 'R' Then  
{Si opción uno "opl", es igual a "R" entra el procedimiento  
}  
    patrones_rectangular  
Else  
    patrones_triangular;  
HiRes;  
{Entra a modo gráfico  
}  
primera_generacion;  
{Llama al procedimiento primera_generacion  
}  
calcula;  
{Llama al procedimiento calcula  
}  
TextMode  
{Entra a modo texto  
}  
End.
```

#### REFERENCIAS

- <sup>(1)</sup> Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Watson, J. D. (1987). Biología Molecular de la Célula. Omega. España.
- <sup>(2)</sup> Bagnara, Joseph, T., Matsumoto, J., Ferris, W., Frost, S. K., Turner, W. A. Jr., Tchen, T. T. T., Taylor, J. D. (1979). Common origin of pigment cells. Science.. Vol. 203 (2): 410-415.
- <sup>(3)</sup> Bianchini, F., Bruno, S., Krapp, F., Rossi, A. C. (1981). Guía de peces y plantas de acuario. Grijalbo. México. pp: 127-228.
- <sup>(4)</sup> Bianchini, F., Bruno, S., Krapp, F., Rossi, A. C. (1981). Guía de peces y plantas de acuario. Grijalbo. México. pp: 169-170.
- <sup>(5)</sup> Bronner-Fraser, M. (1986). On the Guidance of Neural Crest Migration: Latex Beads as Probes of Surface-Substratum Interactions. Amer. Zool.. 26: 555-558.
- <sup>(6)</sup> Clark, T. G., Rosenbaum, J. L. (1984). Energy requirements for pigment aggregation in Fundulus melanophores. Cell Motility. 4: 431-441.
- <sup>(7)</sup> Cocho, G., Rius, J. L. (1989). Discrete aspects of morphogenesis and gene dynamics. talk at Waddington Memorial Conference papers. February.
- <sup>(8)</sup> Curtis, A. (1987). Cell activation and adhesion. J. of Cell. Sci.. 87: 609-611.
- <sup>(9)</sup> Edelman, G. M. (1984). Base molecular de la forma animal. Inv. y Cie.. 93: 74-86.

- <sup>(10)</sup> Edelman, G. M. (1989). Topobiology. Sci. Ame.. 260 (5): 44-52.
- <sup>(11)</sup> Erickson, Carol A. (1985). Control of Directional Migration of Avian and Murine Neural Crest.. Exp. Biol. and Med. 10, pp: 194-208.
- <sup>(12)</sup> G. Cocho, R. Pérez-Pascual, J. L. Rius (1987). Discretos Systems, cell-cell Interactions and Color Pattern of Animals, I. conflicting Dynamics and Pattern Formation. J. Theor. Biol.. 125: 419-435.
- <sup>(13)</sup> G. Cocho, R. Pérez-Pascual, J. L. Rius (1987). Discretos Systems, cell-cell Interactions and Color Pattern of Animals, II. Clonal Theory and Cellular Automata. J. Theor. Biol.. 125: 437-447.
- <sup>(14)</sup> Gosse, S. P. (1982). Freshwater Aquarum Fish a color guide. Hippocrema Books inc. New York. USA. pp: 1-144.
- <sup>(15)</sup> Guillery, G. and Bronner-Fraser, M. (1986). An in vitro assay for neural crest cell migration through the somites. J. Embryol. exp. morph.. 98: 85-97.
- <sup>(16)</sup> Harris, L. E. (1984). Effects of a broodfish diet fortified with canthaxanthin on female fecundity and egg color. Aquaculture. 43:179-183.
- <sup>(17)</sup> Henning, E. H., Löfberg (1984). Xanthophores in chromatophore groups of the premigratory neural crest initiate pigment pattern of the axolotl larva. Roux's Arch. Dev. Biol.. 193: 357-369.
- <sup>(18)</sup> Hoar and Randall (1969). Fish Physiology. Vol. III Riozo, Fujii. "Cromatophores and pigments" ACADEMIC PRESS New York. USA. pp: 307-353.

- <sup>(19)</sup> Lagler, K. F. (1984). Ictiología. AGT EDITOR. México. pp: 111-114.
- <sup>(20)</sup> Lamers, C. H. J., Rombout, J. W. H. M., Timmermas, L. P. M. (1981). An experimental study on neural crest migration in *Barbus conchonius* (Cyprinidae: Teleostei), with special reference to the origin theof enteroendocrine cells. J. Embryol. exp. Morph.. 62: 309-323.
- <sup>(21)</sup> López, M. M. C. (1988). Autómatas Celulares Unidimensionales. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. UNAM. México.
- <sup>(22)</sup> Michaelson, J. (1987). Cell Selection in Development. Biol. Rev.. 62: 116-131.
- <sup>(23)</sup> Miramontes, V. O. (1988). Algunos aspectos de la teoría de autómatas celulares y sus aplicaciones en Biofísica. Tesis profesional. Física. Facultad de Ciencias. UNAM.
- <sup>(24)</sup> Moscona, A. A. (1961). Como se asocian las células."La célula viva". Sci. Ame.. septiembre.
- <sup>(25)</sup> Murray, J. D. (1988). How the Leopard Gets its spots. Sci. Ame.. 258 (3): 62-69.
- <sup>(26)</sup> Odell, G. M., Oster, P. G., Alberch., Burnside, B.. (1981). The mechanical basis of morphogenesis. Dev. Biol.. 85: 446-462.
- <sup>(27)</sup> Picones, M. A. (1982). Modelos Matemáticos para Biología. Naturaleza. 6: 292-297.
- <sup>(28)</sup> Ruiz Marcos Antonio (1987). Modelos Matemáticos en Biología. Inv. y Cie.. junio: 99-108.

- <sup>(29)</sup> Slack, J. M. W. (1987) We have a morphogen. Nature. 327 (6123): 551-554.
- <sup>(30)</sup> Slack, J. M. W. (1987). Morphogenetic gradients past and present. Bloch. Sci. 12 (5): 200-204.
- <sup>(31)</sup> Staehelin, L. A. y E. Hull, B. (1978). Uniones intercelulares. Inv. y Cie.. 22: 76-86.
- <sup>(32)</sup> Storebakken, T., Foss, P., Austreng, E., Llaaen-Jensen, S. (1985). Vol. II Epimerization studies with astaxanthin in Atlantic Salmon. Aqualculture. 44: 259-269.
- <sup>(33)</sup> Storebakken, T., Foss, P., Huse, I., Wandsvik, A., Berg, L. T. (1986). III Utilizacion de canthaxanthin from dry and wet diets by Atlantic Salmon, Rainbow trout and Aquaculture. 51: 245-255.
- <sup>(34)</sup> Thiery, J. P. (1984). Mechanisms of cell migration in the vertebrate embryo. Cell. Dif.. 15: 1-15.
- <sup>(35)</sup> Thorogood, P. and Wood, A. (1987). Analysis of in vivo cell movement using transparent tissue systems. J. Cell. Sci. Suppl.. 8: 195-413.
- <sup>(36)</sup> Trinkaus, J. P. (1988). Directional Cell Movement During Early Development of the Teleost blennius pholis: I. Formation of Epithelial Cell Clusters and Their Pattern and Mechanism of Movement. The J. of Exp. Zool.. 245: 157-186.
- <sup>(37)</sup> Trinkaus, J. P. (1988). Directional Cell Movement During Early Development of the Teleost blennius pholis: II Transformation of the Cells of Epithelial Clusters in to Dendritic Melanocytes Their Dissociation From Each



Other, and Their Migration to and Invasion of the Pectoral Fin Buds. The J. of Exp. Zool.. 248: 55-72.

- (38) Tucker, R. P. (1986). The role of glycosaminoglycans in anuran pigment cell migration. J. Embryol. exp. Morph.. 92: 145-164.
- (39) Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. Nature. 311 (4):419-424.
- (40) Wolfram, S. (1984). Programación en ciencias y matemáticas. Inv. y Cie.. 98: 124-138.
- (41) Wolfram, S. (1984). Computation Theory of Cellular Automata. Commun. Math. Phys.. 96: 15-57.
- (42) Wolfram, S. (1984). Universality and complexity in cellular automata. Physica. 10D: 1-35.
- (43) Wolfram, S. (1986). Theory and Applications of cellular automata. World Scientific. USA. pp: 1-5.
- (44) Young, D. A. (1984). A local Activator-Inhibitor Model of Vertebrate Skin Patterns. Math. Biosciences. 72 (51): 320-327.