

# El diseño natural de la máquina visual

**ROBERTO MORENO DÍAZ (Hijo)**

## RESUMEN

Ya en la década de los cuarenta, Norbert Wiener sugirió que las Tierras de Nadie existentes entre los grandes cuerpos del saber eran las zonas más fecundas y en las que los avances científico-técnicos tendrían lugar en el futuro. Es en esta Tierra de Nadie donde se mueve el presente artículo, con un doble interés: intentar desvelar los secretos que encierra el sistema nervioso a nivel visual en la retina y el diseño de modelos artificiales de los procesos observados aplicables a la construcción de eficientes sistemas visuales artificiales. Como resultado directo se obtendrá un criterio de óptimo “encerrado” en el diseño de las células visuales y un modelo neuronal que copia la funcionalidad de las células retinales cuyos axones forman el nervio óptico, que transporta la información visual al cerebro.

## ABSTRACT

### *The natural design of visual machinery*

*On the basis of a suggestion put forward by Norbert Wiener in the forties, namely, that the no-man's land existing between the great bodies of knowledge were the most fertile zones and those in which scientific and technological advances would take place in the future, this article seeks to reveal the secrets which shroud the nervous system as regards vision in the retina and the design of artificial models of observed processes which are applicable to the judgement would be obtained and “locked into” the design of visual cells and a neuron model that would copy the functional character of the retinal cells, whose fibres form the optic nerve that transports visual information to the brain.*

**E**l éxito en la exploración de la función neuronal y de los procesos que tanto a bajo como a alto nivel subyacen en ella depende tanto de la oportunidad de las cuestiones que sobre ella se propongan como de la calidad de las herramientas usadas para su formalización. A nivel biofísico y neuroquímico, las herramientas analíticas al uso (descripciones estadísticas de trenes de pulsos, sistemas de ecuaciones diferenciales), si bien útiles en el estudio del fenómeno neuronal aislado, se ven incompletas cuando se trata de explicar la función a niveles semánticos medios (no ya altos de representación de información) o la estructura que lleva a cabo dicha función. La necesidad de encontrar «pistas» sobre los mecanismos de computación y proceso de información que se esconden bajo la actividad neuronal registrada y sobre la «utilidad» de las estructuras que llevan a cabo dicho proceso han aportado nuevos instrumentos matemáticos a la neurociencia. En este artículo se presentan dos de ellos: la discretización de procesos de información, que complementa el concepto de computación dendrítica, y la búsqueda de estructuras óptimas que implementen funciones muy específicas, que puede proporcionar un método de clasificación de ciertos tipos de células nerviosas atendiendo a su modo de funcionamiento.

Ambos métodos fueron desarrollados originalmente en temas relacionados con estructura y función en retinas de vertebrados, si bien con las necesarias reformulaciones podrían ser aplicados a otras zonas del Sistema Nervioso.

Palabras clave: fotorreceptores, bastones, optimización, estructura, función, células ganglionares, filtros discretos, transformaciones de datos, complitud, modelización neuronal.

## EL DISEÑO NATURAL DE LA MAQUINARIA VISUAL

**E**s un viejo axioma el que la función y la estructura, en seres vivos o en subsistemas de ellos, están perfectamente acopladas. Para poder poner ejemplos del cumplimiento de dicho axioma es necesario, pues, conocer en detalle tanto la función realizada como el órgano/tejido/célula que la lleva a cabo. En los Sistemas Nerviosos no es tan fácil justificarlo pues el conocimiento sobre la función es imperfecto, muy vago o por imposibilidad experimental no relaciona claramente la causa y el efecto en el funcionamiento (la respuesta) observado de la célula y el estudio de la estructura no aporta necesariamente más luz. Veamos, sin embargo, un caso en el que sí se puede hacer con base sólida la afirmación del principio del párrafo.

En el verano de 1992 el profesor K. Nicholas Leibovic de la Universidad de Nueva York en Buffalo se encontraba ocupado tratando de ampliar el contenido de un “criterio de óptimo” que él mismo y el autor de este artículo habían desarrollado hacía algo más de un año. Dicho criterio de óptimo encapsulaba en tres sencillas ecua-

ciones la relación función-estructura de los bastones y permitía la clasificación de estas células en retinas de diversas especies. En la retina, la primera de las tres capas celulares que origina todo el mecanismo de la percepción visual es la formada por los fotorreceptores. Situados entre la capa plexiforme interna y las paredes del globo ocular, tienen como misión la transducción, es decir, la conversión de la señal luminosa en una señal de respuestas eléctricas cuya amplitud y duración dependen de la intensidad luminosa y de la frecuencia de los fotones que inciden en estas células. El empaquetamiento de los fotorreceptores, que visto de frente tiene un aspecto muy parecido al de una matriz de pixels, está “diseñado” de forma que la separación entre dos de ellos es menor que el límite de difracción producida en la pupila <sup>(1)</sup>. Dependiendo de su sensibilidad espectral, los fotorreceptores se han dividido tradicionalmente en dos grandes grupos: los conos (relacionados con la discriminación de longitudes de onda, es decir, la visión del color y la percepción en ambientes luminosos de alta intensidad) y los bastones (más especializados en facilitar la visión bajo condiciones escotópicas de iluminación, condiciones en las que la intensidad luminosa es muy baja) (Figura 1). En la naturaleza se pueden encontrar en especies diferentes todos los diseños retinales imaginables: retinas con sólo conos o bastones, retinas con ambos (dúplex), retinas con bastones y conos atrofiados. Los bastones se ha demostrado que son, en gran número de especies, muy sensibles, siendo capaces de detectar (y codificar) cuantos ais-

lados de luz, es decir, la más pequeña cantidad posible de luz, dando lugar a respuestas claramente distinguibles sobre la actividad espontánea que presentan en total oscuridad (Figura 2). El hecho de esta extrema sensibilidad puede ser utilizado para el estudio de su estructura física y responder a la pregunta de por qué, al igual que el diámetro parece estar justificado por los límites de difracción ya aludidos, está determinada su longitud y el hecho de que ésta sea prácticamente constante dentro de una especie animal. El nombre de "conos" y "bastones" viene dado por la morfología de las células. En el interior de los bastones se encuentra, embebida en unos discos que periódicamente se desgajan de una invaginación formada en la membrana celular, la rodopsina, una molécula fotosensible que es capaz de cambiar su estructura (de "cis" pasa a "trans") al ser golpeada por un fotón. Dicho cambio de estructura (que llamaremos isomerización) produce una variación en las condiciones de permeabilidad eléctrica de la célula (es decir, permite el intercambio de iones positivos y

negativos de la célula con el exterior) lo que genera una respuesta eléctrica de la misma que se transmite a la siguiente capa celular retinal: la capa de células bipolares. La rodopsina se sitúa en el Segmento Externo de la célula, la zona de la misma en la que recae efectivamente la misión de la transducción. El otro segmento, el Segmento Interno, contiene al núcleo y el resto de los orgánulos celulares.

Así, tomando en cuenta dos factores, a saber, la citada sensibilidad a cuantos aislados, y la necesidad de producir respuestas fiables que sobrepasen el nivel de ruido eléctrico de fondo en el que viven estas células y no sean falsas alarmas o isomerizaciones espontáneas del pigmento fotosensible (que producen respuestas indistinguibles de las generadas por un fotón aislado), fue posible <sup>(2)</sup> elaborar un criterio de optimización de la longitud de células visuales que "predecía" la longitud óptima para la cual se obtendría una respuesta máxima. Comparadas estas "predicciones" con las longitudes reales de células en especies como

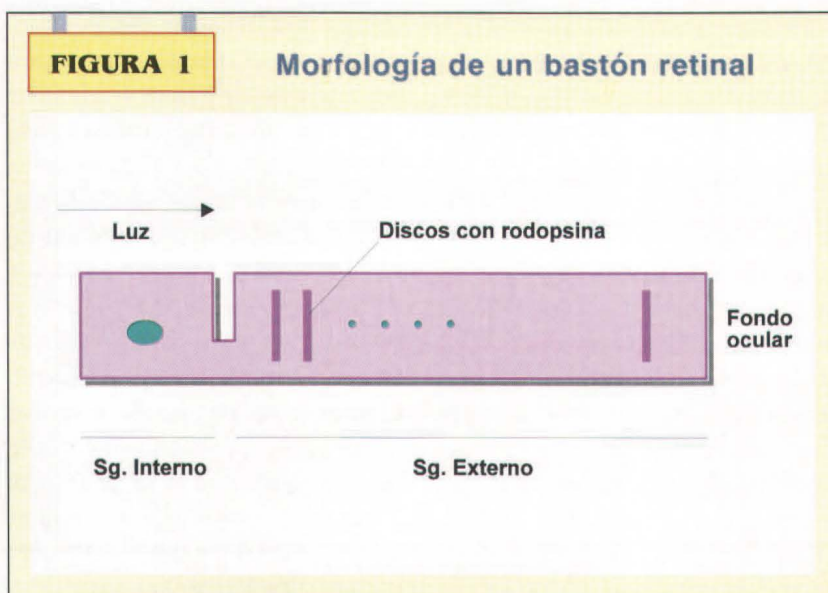
sapos, ranas, tritones, conejos, rayas y monos, se comprobó que en aquellas especies con retinas dúplex (que presentan tanto conos como bastones) los datos reales concordaban dentro de un 10% de error con los teóricos proporcionados por el criterio. En las especies que presentaban sólo bastones (cuya sensibilidad varía pues han de funcionar en todo el rango fisiológico desde intensidades bajas a muy altas) o que vivían en ambientes fóticos difusos el criterio "predecía" longitudes mucho mayores que las reales.

En esencia, y pasando por alto muchos de los detalles matemáticos, el criterio se formula del siguiente modo:

Sea la "señal de respuesta útil", o señal útil que forma la respuesta de la célula, en picoamperios, expresada como la aportación de dos sumandos, el primero:

$$(1 - e^{-as}) (1 - Ds/TL) A$$

tiene en cuenta la probabilidad de que un fotón sea absorbido al atravesar un medio, en este caso nuestra célula, de longitudes  $s$  y de densidad óptica "a" (Ley de Beer-Lambert) (primer paréntesis), de que la señal NO sea una falsa alarma (en los bastones se producen isomerizaciones espontáneas de la rodopsina de longitud temporal  $D$  cada  $T$  segundos para una longitud de segmento externo de bastón de  $L$  micras, debido a que, si bien la rodopsina es una molécula bastante estable, no lo es absolutamente) (segundo paréntesis) y viene pesado por  $A$ , la amplitud de la respuesta en microamperios, con lo cual obtenemos la respuesta excluyendo falsas alarmas.



El segundo sumando es el que tiene en cuenta el fondo ruidoso que la señal útil tiene que sobrepasar, fondo ruidoso debido, como ya quedó apuntado, a la propia actividad vital de la célula y sus vecinas. Experimentalmente se encuentra que para una longitud  $L$  se tiene una señal de media  $0$  y desviación típica  $N$ . De esta manera, para una longitud genérica  $s$ , obtenemos un fondo:

$$N_s/L$$

Así, la señal de respuesta útil,  $R$ , en función de la longitud  $s$  de bastón viene expresada como:

$$R(s) = (1 - e^{-as}) (1 - Ds/TL)$$

A-  $N_s/L \{1\}$

Esta señal ha de ser lo más clara posible para no "engañar" al siguiente nivel celular, lo que expresamos diciendo que ha de presentar un máximo, esto es,

$$dR/ds = 0 \{2\}$$

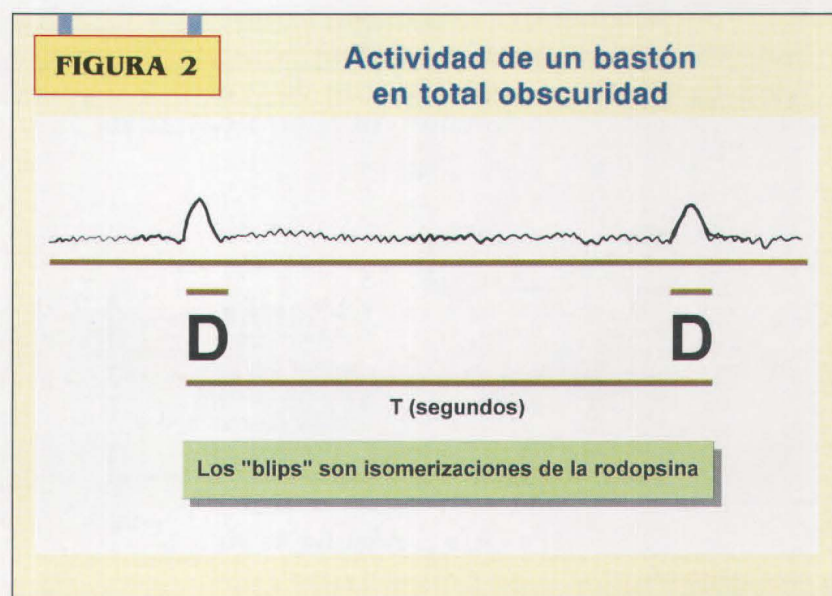
y al punto  $s$  donde se cumpla la expresión anterior,  $s_m$ , lo denominamos longitud de bastón óptima. Los parámetros,  $D, T, L, a$  y  $N$  son cantidades experimentales, existiendo un gran número de especies para las cuales se conoce su valor, de forma que es posible comprobar en ellas la bondad-utilidad del criterio así formulado.

El criterio expresado por  $\{1\}$  sólo da buenos resultados cuando es considerado en especies cuyos bastones efectivamente cumplen con las características supuestas en su formulación, e.g., detectores sensibles de luz en un ambiente ruidoso, y en estos casos  $s_m$  y la longitud real

de la célula están muy próximos. Esto ocurre así en *Rana pipiens*, en *Bufo marinus* (sapo tropical), en *Oryctolagus cuniculus* (conejo) y en *Macaca fascicularis* (macaco). Por el contrario, no dan resultados aceptables al ser consideradas las células de la *Raja erinacea* (Manta raya) y del *Necturus maculosus*, la primera por tener una retina de sólo bastones que han de trabajar en todo el rango de iluminación que, en otras especies, es barrido por conos y bastones, y el segundo por vivir en un ambiente natural de gran ruido fótico y por lo tanto no serle vital el apreciar un fotón aislado. Del mismo modo se puede afirmar que las células visuales que cumplan  $\{1\}$  y  $\{2\}$  y de las cuales no se conozca la función es previsible que actúen básicamente como detectores fiables de luz en condiciones escotópicas. En este sentido, el criterio puede ser usado como clasificador de células visuales. La estructura, que encierra la función, ya es significativa a este bajo nivel de proceso de la señal visual.

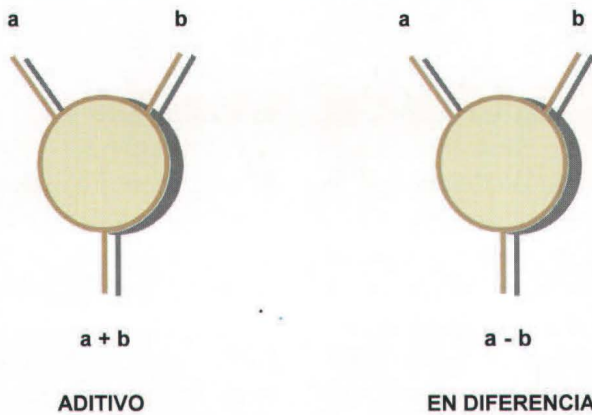
Este ejemplo de cómo se ha intentado expresar el axioma con

el que abríamos este apartado ilustra el grado de conocimiento que es necesario tener sobre una estructura (o una función) si se desea encontrar una explicación a una función (o a una estructura real) y nos da una primera pista sobre el grado de complejidad que ya en el siguiente nivel celular retiniano (las bipolares y horizontales) es previsible encontrar. En esta capa celular, la de las bipolares, la expresión de un criterio de óptimo es previsiblemente mucho más complicada, si bien actualmente no es posible si quiera decir para qué están diseñadas (al menos, no es tan fácil como en el caso de los fotorreceptores), cuál es exactamente su función. Lo que parece claro en el caso de los fotorreceptores es que el diseño evolutivo, mejorado durante miles de años, ha originado células cuya estructura y significado funcional están perfectamente unidos, obligándonos este ejemplo a ser cuidadosos cuando diseñamos modelos artificiales que queremos que encierren características naturales y que predigan comportamientos no observados de los sistemas en estudio.



**FIGURA 3**

**Dos microprocesos sencillos**



## COMPUTACIÓN EN DENDRITAS Y FILTROS DISCRETOS

El árbol dendrítico neuronal ha llamado siempre la atención de neurofisiólogos desde que Ramón y Cajal los describiera a principios de siglo. Para los neuromodeladores ha sido siempre una fuente de inspiración (y de problemas no resueltos). La idea de que gran parte de la función real neuronal tiene lugar en el campo dendrítico no es nueva <sup>(3)</sup>. Esto

junto con la observación de las ramificaciones dendríticas ha inspirado la construcción de una familia de filtros discretos denominados Filtros de Newton (4,5,6) cuyas propiedades matemáticas los hacen ser herramientas interesantes en proceso y codificación de imagen así como en modelización neuronal. No vamos a demostrar aquí dichas propiedades, si bien las explicaremos al hacer uso de ellas.

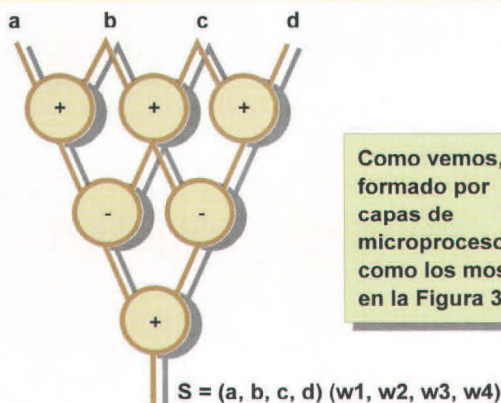
Básicamente, un Filtro de Newton es una máquina definida por capas de proceso las cuales, en su versión unidimensional más sencilla, pueden ser

de una de dos naturalezas: aditivas o en diferencias, atendiendo al tipo de operación que realizan sobre los datos de entrada (Figuras 3,4). Cuando todas las capas del filtro discreto son de la misma naturaleza tendremos un filtro puramente aditivo o puramente diferencial. Un Filtro de Newton se denota, pues, mediante el símbolo  $N(A_n, D_m)$  donde  $n$  es un número natural que especifica el número de capas aditivas de que consta el Filtro y  $m$  el número de capas en diferencia. El número total de entradas al Filtro será  $n+m+1$ . A este conjunto de entradas al filtro se le conocerá como el Campo Receptivo del filtro (o de la neurona que representa). El orden en el aparezcan las capas es indiferente a la hora de ver el proceso global que computa el filtro, es decir, las capas aditivas o en diferencias son intercambiables. Cuando sobre un conjunto de datos de entrada actúen más de un Filtro de Newton, los campos receptivos de éstos podrán solaparse, es decir, dos F. de N. distintos podrán compartir datos de entrada (Figura 5).

La acción global (es decir, el tipo de núcleo computacional que representa al Filtro) de diversos F de N puede verse en la Figura 6. Esta acción global se puede calcular directamente, sin necesidad de construir expresamente el filtro, usando un método muy parecido a la construcción del Triángulo de Pascal y que fue utilizado por Isaac Newton (de aquí le viene el nombre a esta familia de filtros) para desarrollar un método de "rebajamiento de la dignidad de un polinomio", mecanismo que hoy en día traduciríamos por interpolación polinomial. La salida de la máqui-

**FIGURA 4**

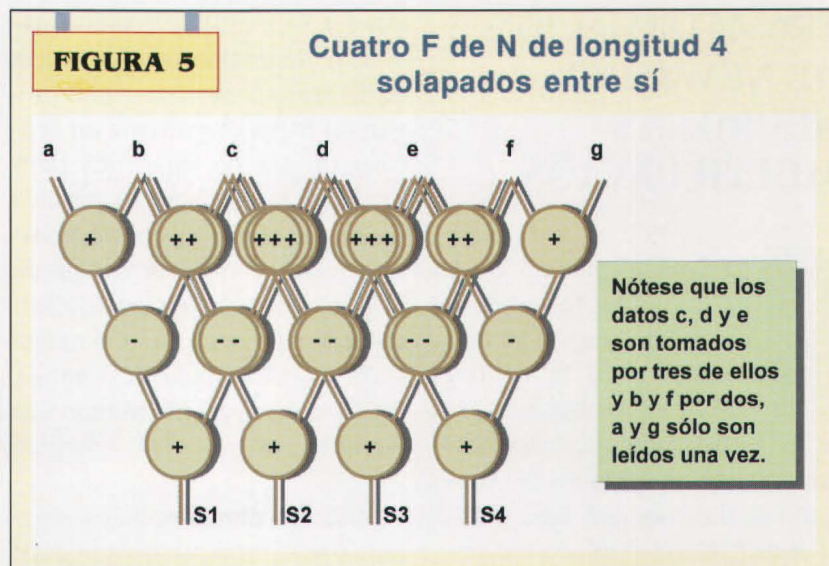
**La estructura de un Filtro de Newton de cuatro entradas**



Como vemos, formado por capas de microprocesos como los mostrados en la Figura 3.

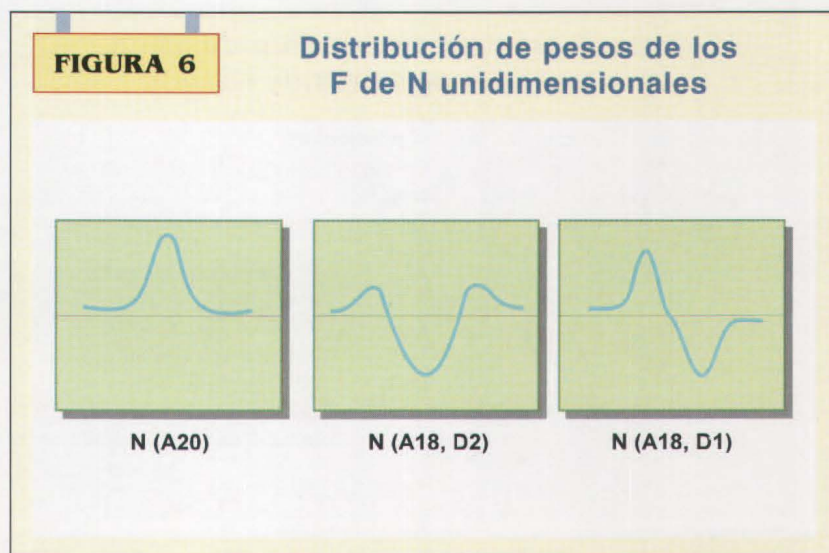
na puede representarse como un producto escalar entre un vector de pesos y el vector de entradas (en Filtros unidimensionales). Dos características son resaltables: una, la creciente complejidad del filtro conforme aumentan las capas en diferencias; dos, el notable parecido con una versión discretizada de los tipos de kernels computacionales descritos para células retinales sobre su campo receptivo, en concreto ganglionares, por la neurofisiología clásica. Estos kernels incluyen zonas concéntricas de centro ON y periferia OFF (o viceversa), varias zonas alternativamente ON y OFF, etc. Del mismo modo, la estructura de un Filtro de Newton puede utilizarse como un mecanismo “predictor” de eventos simplemente cambiando el significado de la variable unidimensional sobre la que actúan de espacial a temporal (Figura 7). Esta variación, que tiene consecuencias interesantes, no la vamos, sin embargo, a tratar aquí pues nos separaría de la idea de modelización del sistema nervioso que se quiere subrayar.

De las propiedades matemáticas de este tipo de máquinas existe una que es inmediata y que las dota de gran interés en proceso de señal. Si el Filtro de Newton tiene al menos una capa en diferencias, sea cual sea la longitud del mismo, la suma total de sus pesos es cero. Es pues casi trivial demostrar que los Filtros de Newton son filtros que presentan invarianza frente a cambios globales de la entrada (en términos visuales, frente a cambios globales de iluminación, tanto abrillantamiento como oscurecimiento el resultado de su actividad no se ve modificado). Además,



el hecho de que existan L Filtros de Newton de longitud dada, L (esto es, tres filtros de longitud tres, cuatro de cuatro y así sucesivamente) permite la definición de un nuevo tipo de transformaciones completas bidimensionales sobre campos de datos <sup>(4)</sup> y el diseño de máquinas neuron-like que las computan. Todas estas características interesantes desde el punto de vista puramente computacional se derivan de la simplicidad de la estructura con la que se construye el filtro. Como contrapartida neuronal es inmediato sugerir que las propiedades de proceso que encie-

rran (o que se les supone a) las neuronas están de algún modo encapsuladas en su propia estructura de forma que no es necesario, en un modelo dado, suponer la existencia de pesos sinápticos de un valor concreto, de otro modo difíciles de sustentar y/o justificar biofísicamente. En un modelo basado en F de N, todas las sinapsis tienen el mismo peso y contribuyen por igual, no existen datos más importantes que otros, y es la estructura de las conexiones en el árbol dendrítico el que hace la función discriminadora (o “repartidora de pesos”).



## TRANSFORMACIONES DE NEWTON Y NEURONAS MULTIFUNCIÓN

Una Transformación sobre un conjunto de datos (o campo de datos o campo receptivo de la célula) puede ser explicada como aquella operación que extrae características interesantes del conjunto de datos inicial. La definición de “interesante” de una característica depende del objetivo que se persiga. Así, una característica interesante para una transformación que tenga lugar en un ojo humano (pongamos por caso la discriminación de un determinado color como el amarillo) puede no serlo para el ojo de una abeja (más preocupado por los colores violeta, por ejemplo). Una transformación puede implicar la realización de una o más operaciones sobre los datos de entrada cuyos resultados se denominan descriptores. Si a partir de los descriptores calculados en la transformación es posible reconstruir los datos de entrada (en otras palabras si a partir de la representación neuronal retinal es posible reconstruir la imagen que

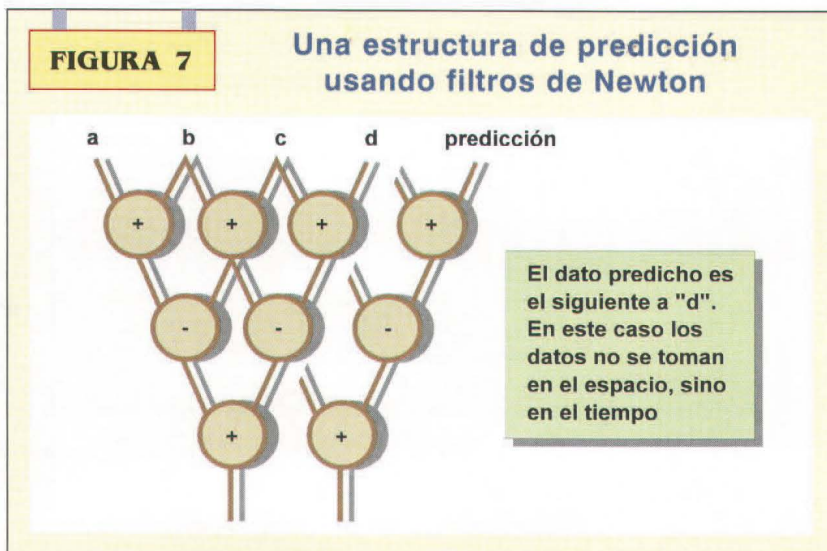
entra en el ojo) la transformación se denomina completa. Las transformaciones completas juegan un papel importante en proceso digital de imágenes pues implican la ausencia de pérdida de datos, es decir, en las transformaciones completas no se pierde información. Un ejemplo clásico de Transformación Completa es la Transformada de Fourier. Otro, las Transformadas de Hermite.

Usando el hecho ya establecido anteriormente de que dada una longitud del campo de datos de entrada (que puede representar un fragmento de la imagen retiniana) de un Filtro de Newton existen tantos filtros distintos como número de datos de entrada, podemos definir una transformación de Newton como aquella que computa todos los posibles kernels sobre un conjunto dado de entradas. Si el filtro, pongamos por caso, tiene tres entradas, la transformación correspondiente calculará tres descriptores. Si cuatro entradas, cuatro descriptores, y así sucesivamente. Al ser dichos descriptores linealmente independientes (lo que es fácil de demostrar pero no haremos aquí) la transformación

así definida es completa. La novedad que se introduce es que para calcular dicha transformación NO tenemos que cambiar de neurona (o procesador) sino sólo de signo los pesos de los microprocesos que conforman el filtro. Una sola neurona es capaz de computar todos los descriptores. Para ello es necesario, sin embargo, definir una “neurona de control” que llevará la cuenta de los descriptores calculados y los guardará en un registro de desplazamiento (Figura 8). Una vez que se haya completado un ciclo de la función de esta neurona multicalculadora, otra, con la misma estructura, sería capaz de traducir los descriptores a datos originales (en caso de que fuese interesante hacerlo, si bien esta operación inversa no tiene lugar en los sistemas nerviosos pues carece de sentido) utilizando un ciclo más de trabajo.

## NIVELES MÁSALTOS DE PROCESO NEURONAL

Conforme nos alejamos de las fronteras extremas del sistema nervioso (de los extremos sensoriales y motores) la actividad neuronal se hace más difícil de interpretar. Es muy fácil, según hemos visto, relacionar la respuesta de un fotorreceptor con la longitud de onda y el número de fotones que sobre él inciden; igual que es fácil relacionar la intensidad de la señal de un conjunto de motoneuronas con el grado de contracción de un músculo. Pero, ¿cómo se interpreta la función de una neurona de la corteza cerebral visual después de que la señal visual haya atravesado



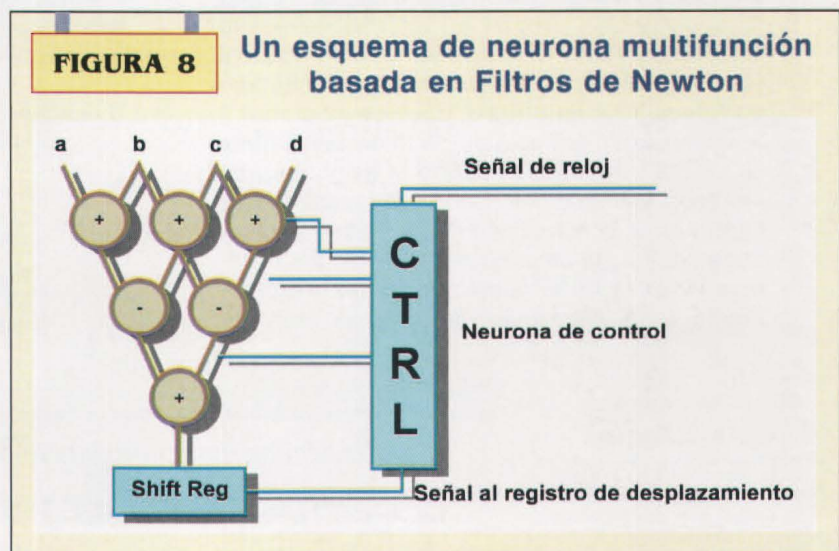
la retina, haya sido recodificada varias decenas de veces, haya sido analizada e integrada por capas diferentes de neuronas? ¿Es posible relacionar de manera inequívoca el estímulo visual que cae en la retina y la actividad de dicha célula? Sólo una vez en la historia se ha logrado relacionar de manera plausible el mundo visual de un animal con la codificación de la información que es enviada desde la retina al cerebro a través del nervio óptico: es el caso de la Rana pipiens <sup>(7)</sup>.

A lo largo del camino visual, pues, tiene lugar un dramático incremento del contenido semántico de la señal que se transmite neurona a neurona, es decir, los descriptores son, en cada nivel de proceso, más complicados, la información más elaborada y su interpretación por un observador externo mucho más difícil <sup>(8)</sup>. En esta situación, para poder entender mínimamente algunas de las características descritas por la neurofisiología es necesario introducir nuevos conceptos a la hora de modelizar la función neuronal. Entre ellos destaca, como clave, el concepto de cooperación neuronal, es decir, de las relaciones que se establecen entre los procesadores (entre las neuronas) para, dicho con lenguaje inteligible, repartirse el trabajo de extraer entre todos los mensajes que llegan aquellos que son relevantes. Introduciendo cooperación en modelos artificiales (como el ya descrito a base de Filtros de Newton) es posible diseñar sistemas en los que la pérdida de procesadores (o la "muerte" o desaparición de neuronas) no daña la actividad conjunta de la red siempre que dicha pérdida se mantenga en unos niveles no muy altos y que exista suficiente solapamiento entre los

campos receptivos de neuronas vecinas. Estos modelos ven aumentada su complejidad con la aparición de más líneas de información que comunican a las neuronas entre sí y que informan sobre el estado de trabajo de cada una a sus vecinas. Del mismo modo, la estructura funcional de cada neurona se ve aumentada, pues de procesadores meramente analíticos (procesadores que realizan una o varias operaciones expresables analíticamente) se convierten en procesadores algorítmicos (es decir, procesadores que contienen un programa que está siempre en ejecución). En este tipo de construcciones la relación entre la complejidad estructural y la sencillez funcional es mucho más clara. Cuanto más complicada es la estructura (es decir, cuantas más células tengamos y más interconectadas estén) más simple puede ser el diseño de la operación que cada una lleve a cabo. Y viceversa. Cuanta más simple sea la estructura (menos células, menos conectadas) mayor será el esfuerzo computacional que cada una haya de hacer para computar descriptores que conduzcan a una transformación interesante (sea ésta o no completa).

## CONCLUSIONES

La "Tierra de Nadie" existente entre la biofísica y neuroquímica y la teoría de la computación es el lugar en donde se mueven los intentos de formalizar y comprender la actividad, la estructura y la función neuronal real desde el punto de vista del proceso de información. Para poder avanzar en este área es necesario dotarla de elementos formales y de herramientas de expresión. Es en este sentido en que se ha movido el contenido del presente artículo, señalando al menos dos ideas fundamentales: la íntima relación que parece existir entre función y estructura en sistemas neuronales y cómo puede ser expresada esta relación mediante un criterio de diseño óptimo que implica el conocimiento exhaustivo del sistema en estudio, y la importancia que la discretización y atomización de procesos inicialmente complejos puede tener a la hora de construir modelos plausibles del comportamiento neuronal a bajo nivel computacional. De esta última idea son un buen ejemplo las





formulaciones de los Filtros de Newton.

Siguiendo esta línea de pensamiento, es conveniente replantearse en el futuro el marco formal en el que se han de inscribir las investigaciones sobre la función neuronal a más alto

nivel semántico. Nos queda aún un camino tan largo como apasionante en la investigación del cerebro y de sus subsistemas, un camino que requerirá hacer muchas paradas para revisar el equipaje matemático que llevamos, que requerirá imaginación para incorporar nuevas

ideas (previsiblemente iconoclastas) en él y visión para no tener que cargar como peso inútil, pues el exceso de equipaje se paga caro en estos casos, con métodos y modelos ya cerrados y que habiendo cumplido su función no suponen un avance.

## NOTAS

- (1) **Leibovic, K.N., Moreno-Díaz jr., R. (1992):** "Dimensions and functions of a Rod Outer Segment", Work report, Interdisciplinary group of Vision, State University of New York at Buffalo, New York, USA.
- (2) **Leibovic, K.N., Moreno-Díaz jr., R. (1991):** "Rod Outer Segments are designed for optimum photon detection", Biological Cybernetics, V62, Springer Verlag, New York.
- (3) **Simoes da Fonseca, J.L.; Barahona da Fonseca, I. (1994):** "Dendro-dendritic computation", Work report, Centro Internacional de Investigación en Ciencias de la Computación, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- (4) **Moreno-Díaz jr., R. (1993):** "Computación Paralela y Distribuida: relaciones estructuras-función en retinas", Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- (5) **Moreno-Díaz jr., R.; Correas-Suárez, B. (1994):** "Newton Filters: new CAST tools for modelling retinal systems", Proceedings of CAST94, University of Ottawa, Ottawa, Canada.
- (6) **Moreno-Díaz, R.; Moreno-Díaz jr., R.; Garcés-Guevara, S. (1995):** "Newton Transforms for Image Processing", in print.
- (7) **Lettvin, J.; Maturana, H.; McCulloch, W.S.; Pitts, W.:** "What the frogs eye tells the frogs brain", en W.S. McCulloch, Embodiments of Mind, MIT Press, Cambridge, Massachussets, 1991.
- (8) **Moreno-Díaz, R., Mira Mira, J. (1989):** "Un marco formal para interpretar la función neuronal a alto nivel", en "Biocibernética" Siglo XXI Editores, Madrid.

## BIOGRAFÍA

### Roberto Moreno Díaz

Roberto Moreno Díaz (hijo) es Licenciado en CC Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1989) y Doctor en Informática por la U.L.P.G.C. (1993). Tras una estancia predoctoral (curso 1190-91) en la Universidad del Estado de Nueva York en Buffalo, USA, se incorporó a la docencia en la Facultad de Informática de la U.L.P.G.C., en donde imparte la asignatura de Métodos Matemáticos. Su interés científico se centra en la construcción de modelos matemáticos del funcionamiento neuronal en los sistemas visuales de vertebrados, y más recientemente en el desarrollo de sistemas multime-

dia. Es autor de unos 20 artículos y trabajos de investigación publicados en revistas internacionales.

#### Dirección:

Facultad de Informática  
Edf. de Informática y Matemáticas  
Campus de Tafira  
ULPGC  
35017 Las Palmas de G.C. España.  
Tel: (928) 458757  
Fax: (928) 458760  
E-mail: moreno@edi.ulpgc.es

Este trabajo ha sido patrocinado por:  
**CEMENTOS ESPECIALES, S.A.**