

# PRÓTESIS DE RETINA INNOVACIÓN PARA EL FUTURO

GELACIO CASTILLO C.,  
DANIEL Y. ESPINOSA G.,  
EDUARDO A. ARROYO L.,  
EVILA L. SALAZAR O

Las prótesis de retina han presentado un gran desafío para las empresas desarrolladoras más destacadas en el mundo, debido a tres razones muy poderosas:

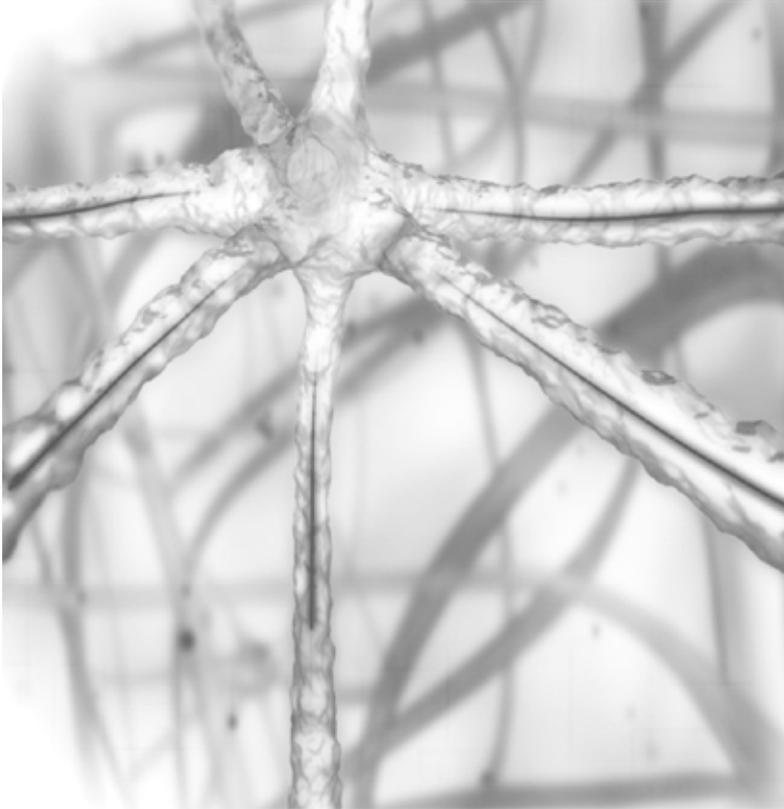
- Actualmente, existe una demanda relativamente baja, debido a que los implantes llegan a tener costos muy elevados que impiden a los empresarios recuperar su inversión (factibilidad comercial).
- Deben ofrecer portabilidad al paciente y no causar molestias o alteraciones en el sistema nervioso (compatibilidad biológica).
- Los procesadores usados para las prótesis deben ser suficientemente pequeños para posibilitar su inserción al interior del ojo.

Sin embargo, la reducción del tamaño requiere incrementar la eficiencia en el desempeño de los dispositivos y ello, a su vez, implica buscar paradigmas de procesamiento mucho más parecidos a los procesos naturales de las neuronas que, además, permitan una menor cantidad de transistores por neurona.

**U**no de los más grandes retos de la tecnología es implementar dispositivos con procesadores eficientes, que lleven a cabo operaciones cada vez más parecidas a las que tienen lugar en seres vivos.

De acuerdo con la Organización Mundial de Salud (OMS), en el mundo hay alrededor de 285 millones de personas con discapacidad visual.<sup>1</sup> Una solución parcial a esos padecimientos podría ser la aplicación de implantes artificiales, por medio de los cuales sería posible reducir las listas de personas en espera de órganos visuales donados; pues, una de las misiones de estos procesadores es llevar a cabo operaciones analógicas muy parecidas a las de los órganos involucrados en la función de ver, compensando, de forma parcial, la discapacidad. Lo que no es una tarea fácil, pues demanda la colaboración de equipos de trabajo abocados al proyecto y muchos recursos, tanto públicos como privados; pero, sin duda, los resultados serán vistos y disfrutados por las generaciones del futuro. Actualmente, empresas desarrolladoras se encuentran invirtiendo recursos con el propósito de producir implantes para rehabilitación visual y prótesis retinales; lamentablemente, debido a su política de difusión —que es restringida—, estas acciones no son muy conocidas, ya que algunas de las empresas no publican sus resultados.





Un gran reto de la tecnología es implementar dispositivos con procesadores eficientes cada vez más parecidos a los seres vivos; en consecuencia, es necesario proponer diseños de procesadores neuronales inteligentes

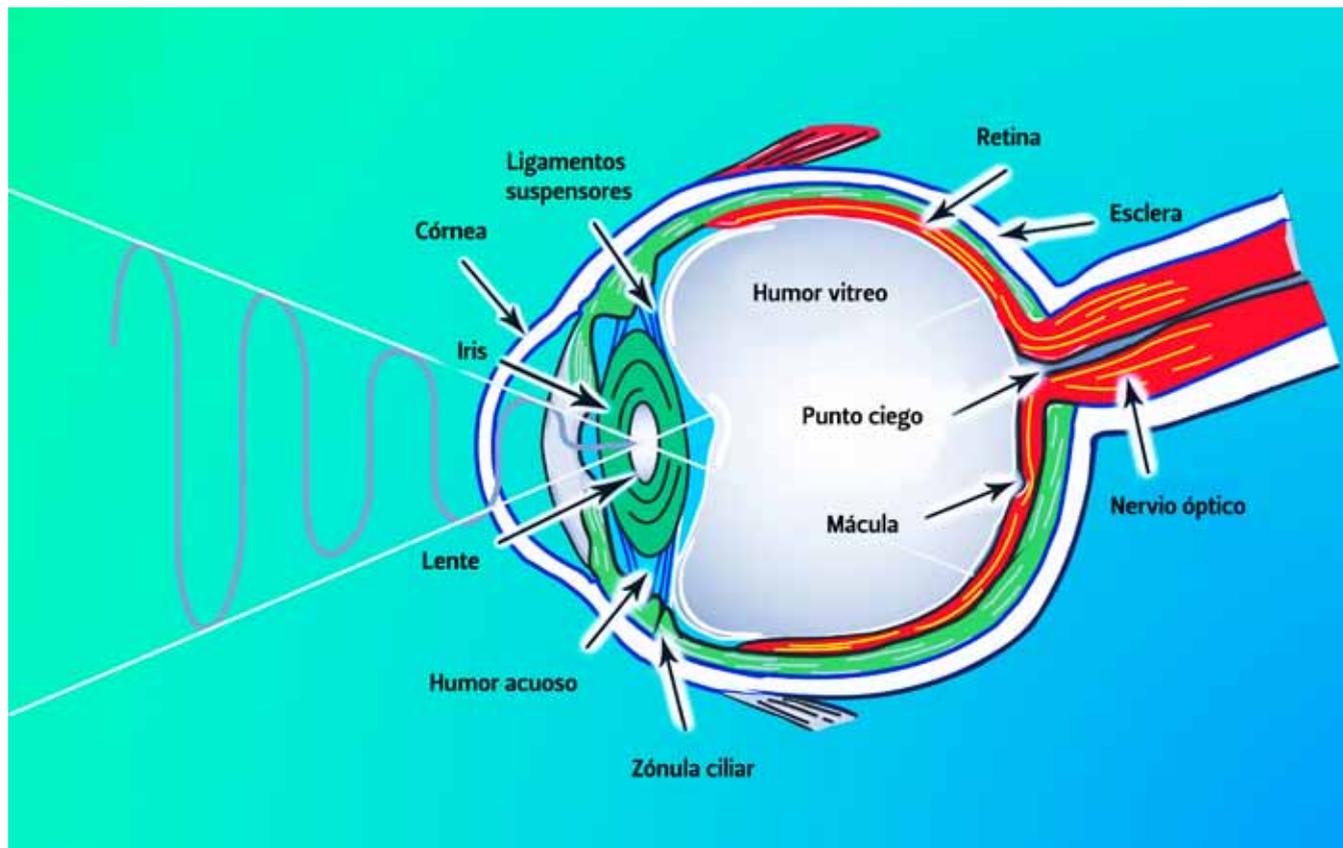
Son muy pocos los trabajos expuestos a la comunidad a través de revistas científicas, con propuestas para la obtención de prótesis de retina; la mayoría de los cuales se basa en procesamiento digital y muy pocos se abocan a desarrollar procesamiento analógico. Esto se debe principalmente a que la tendencia generalizada entre diseñadores y fabricantes se basa en realizar operaciones matemáticas precisas en formato digital (ejemplo de ello son la mayoría de los dispositivos comercialmente conocidos), desde los *gadgets* hasta las propias computadoras. Bajo este contexto, parecería un absurdo proponer procesamiento analógico.

Los procesadores biológicos, eventualmente, serán usados, en el futuro, para confeccionar prótesis y conducir la correspondiente rehabilitación en diversos problemas de salud; sin embargo, su campo de mayor difusión se encuentra en aplicaciones de máquinas inteligentes como satélites, máquinas aplicadas a diversos tipos de rehabilitación, robots, etcétera.

### ESCOM, INSTITUCIÓN DE VANGUARDIA

La Escuela Superior de Cómputo, del Instituto Politécnico Nacional, es una institución de vanguardia en la que, recientemente, ha surgido el interés por establecer una línea de investigación enfocada al estudio de sistemas neuronales artificiales, basados en la observación de los sistemas biológicos; y como punto de partida se ha seleccionado el estudio de la retina para:

- Analizar detenidamente sus características y procesos neuronales, con el fin de conocer ampliamente la respuesta de las neuronas ante el estímulo de la luz.
- Diseñar algoritmos de procesamiento biológico (analógico-digital) que permitan proponer prótesis visuales factibles de ser implementadas sobre *chips* de silicio.



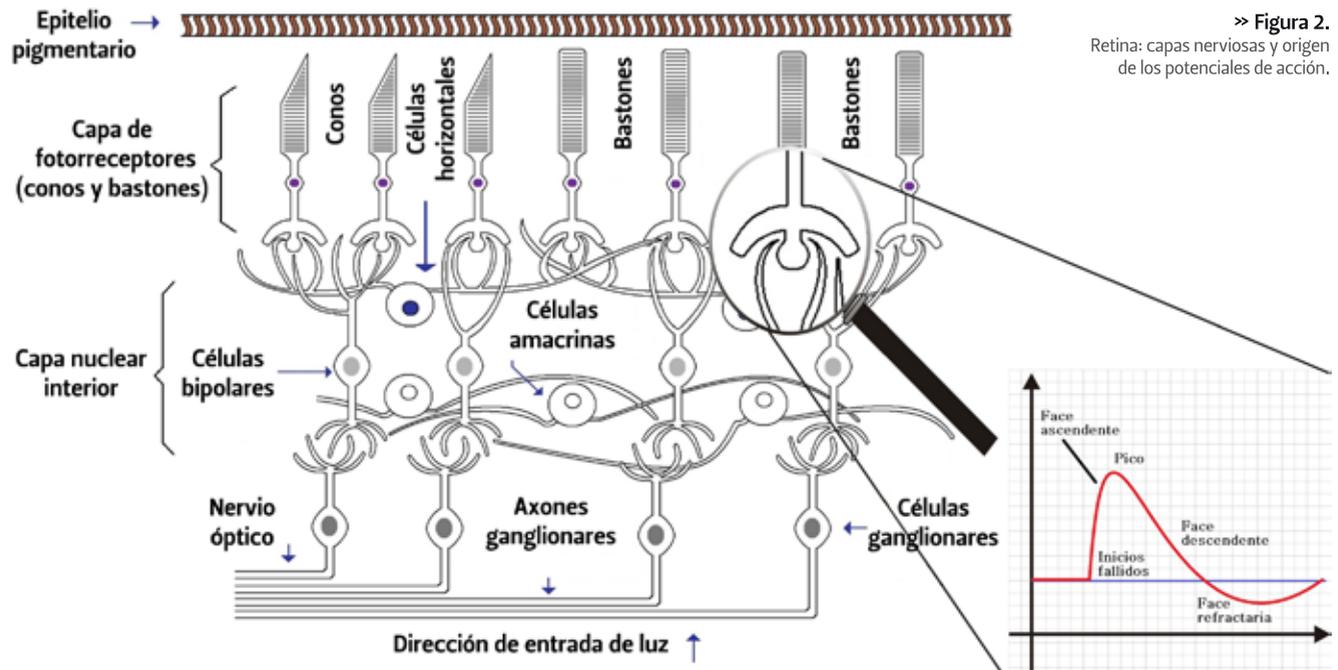
» **Figura 1.**  
Sección transversal del ojo, mostrando la ubicación de la retina.

## ARQUITECTURA DE LA RETINA

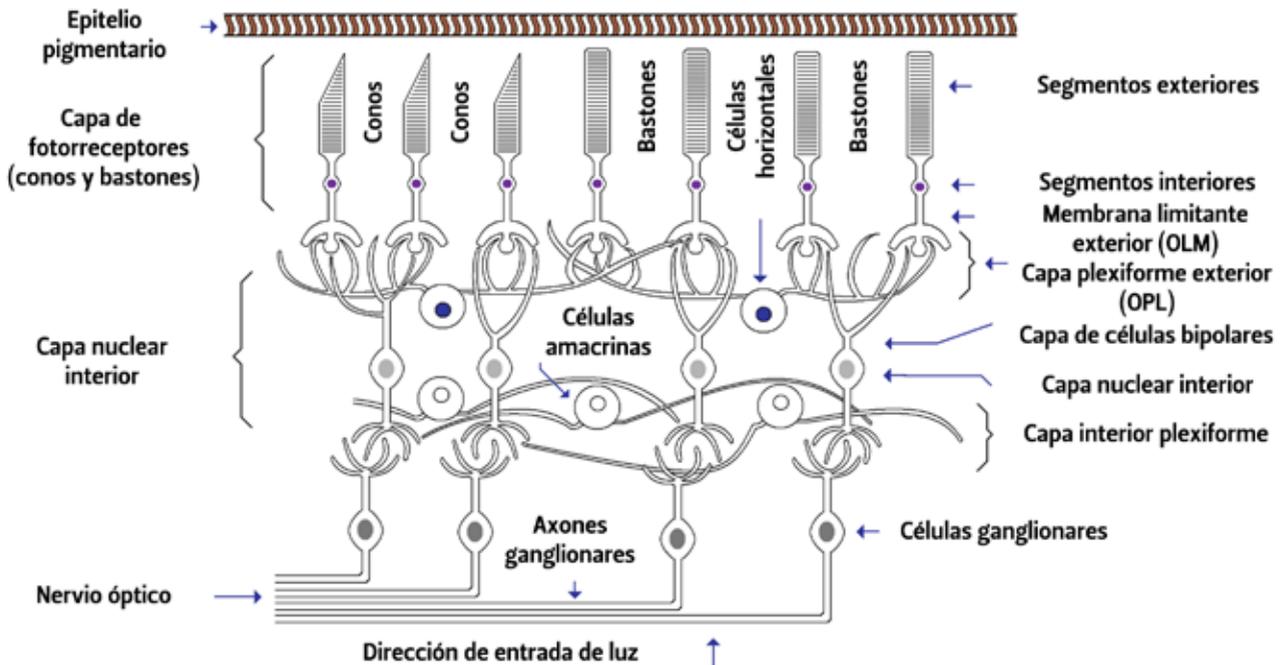
La retina es una capa neuronal ubicada en la parte posterior del globo ocular (figura 1), cuya función es convertir la imagen luminosa —que llega desde el exterior del ojo— en señales electroquímicas, las cuales son codificadas y enviadas, a través del nervio óptico, a centros superiores de procesamiento en el sistema visual (cuerpo lateral geniculado y corteza visual, figura 2). Dicha capa está formada por dos tipos de fotorreceptores (conos y bastones), cuya función es convertir la energía luminosa en impulsos eléctricos, llamados *potenciales de acción*; es decir: la retina es un preprocesador que prepara la señal (figura 3, en la que también se muestran las capas nerviosas). Transforma la luz en impulsos eléctricos codificados, que se envían al cerebro (corteza visual) a través del nervio óptico, y el cerebro decodifica (interpreta) estos mensajes, convirtiéndolos en las imágenes que *vemos*.

## CAMPOS RECEPTIVOS

La unidad básica de procesamiento, en todo el sistema visual, se llama *campo receptivo* y está formado por células nerviosas (en la retina, son fotorreceptores: células horizontales, amacrinas, bipolares y ganglionares). Un campo receptivo está compuesto por dos regiones circulares concéntricas: la región central —o simplemente *centro*— y la anular exterior o *contorno del campo receptivo*. Aunque, en los *centros superiores de procesamiento* del sistema visual (cuerpo lateral geniculado y la corteza visual, figura 2), la topología de un campo receptivo puede ser elíptica y/o rectangular, en la retina predomina la forma circular.

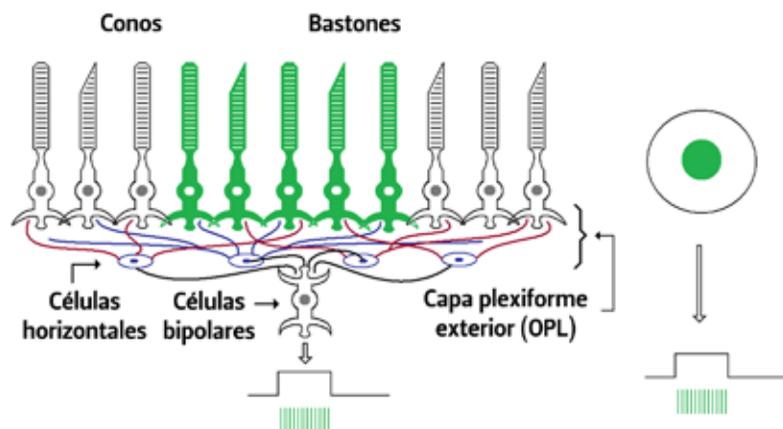


» Figura 2.  
Retina: capas nerviosas y origen de los potenciales de acción.



» Figura 3.  
Centros de procesamiento en el sistema visual humano.

- **Campo receptivo asociado a una célula bipolar:** la primera capa nerviosa que tiene asociado un campo receptivo está formada por las células bipolares y su campo receptivo está formado por fotorreceptores y células horizontales; entre éstas y las células bipolares, tiene lugar un conjunto de interacciones llamadas *sinapsis*; como resultado de las cuales, la célula bipolar emite una respuesta a través de su terminal de salida llamada *axón*.



>> **Figura 4.**  
Campo receptivo de una célula bipolar.

Todas las células que hacen posible la respuesta en una célula bipolar son las que forman su campo receptivo (figura 4). Esta arquitectura se replica a lo largo del sistema visual.

- **Campo receptivo asociado a una célula ganglionar:** la siguiente etapa en la cadena queda formada por los axones de las células bipolares y las células amacriñas. Procesos inhibitorios y/o excitatorios toman lugar entre estas células, las cuales forman la *capa interior plexiforme* y, como resultado, se emite una señal a través del axón de la célula ganglionar. El conjunto de células bipolares y células amacriñas que intervienen para producir la respuesta de una célula ganglionar forma el campo receptivo de dicha neurona; de hecho, el nervio óptico está formado por los axones ganglionares.

## PROCESAMIENTO ANALÓGICO

Los procesadores biológicos, a pesar de haber sido estudiados de manera amplia desde la primera década del siglo XX, aún no son suficientemente conocidos para poder ser emulados en procesadores artificiales. Un hecho casi irrefutable es que los procesadores biológicos son fundamentalmente analógicos y se basan en el procesamiento de —o a través de— potenciales de acción, lo cual se deduce de los trabajos pioneros de Hartline,<sup>2, 3</sup> Kuffler,<sup>4, 5</sup> Hubble<sup>6</sup> y otros contemporáneos.<sup>7</sup> Por lo tanto, como se puede inferir, la fuente de información que enriquecerá o mejorará los procesadores artificiales en el futuro es muy amplia, se encuentra en los seres vivos y aún es desconocida.

- **Codificación de la información:** Hasta la fecha, hay dos propuestas —en principio, diferentes o incluso, opuestas— respecto a la forma como se lleva a cabo la codificación de la información óptica. La primera plantea que la información se encuentra codificada en el dominio del tiempo, es decir, en la forma de onda de cada uno de los potenciales de acción de un tren de impulsos dado. La segunda establece que la información se encuentra codificada en el dominio de la frecuencia, o sea que, la información estaría contenida en la densidad de impulsos por unidad de tiempo.
- **Tolerancia a fallas:** Los actuales procesos digitales tienen como características principales que sus señales son predominantemente deterministas y el ruido es



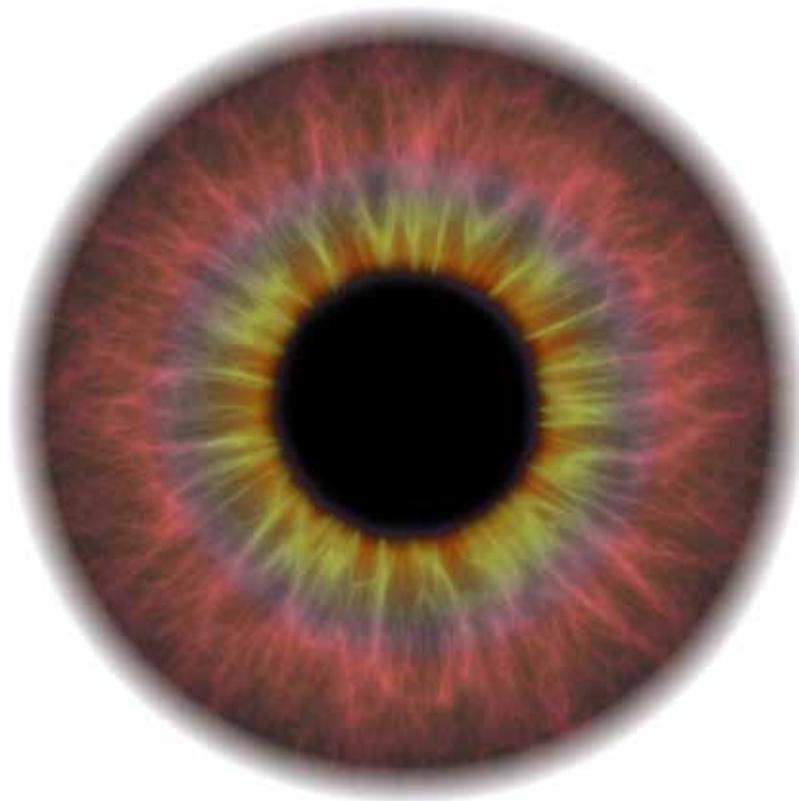
Los procesadores biológicos —a pesar de haber sido estudiados de manera amplia, desde la primera década del siglo XX— aún no son suficientemente conocidos para poder ser emulados en procesadores artificiales

de naturaleza aleatoria: “Una falla en un *bit*, producida por el ruido, indica que ha habido un error, y entra en acción el algoritmo de corrección de errores”. Sin embargo, los sistemas naturales tienen una alta tolerancia a fallos, y los errores se corrigen por aproximación, mediante asociación probabilística de patrones.

- **Jerarquía:** Como se ha mencionado, el modelo de capas de la retina tiene asociado, de manera intrínseca, el concepto de jerarquía, y cada una de sus capas procesa la información obtenida en la capa de jerarquía inferior. Este modelo también se aplica en etapas superiores del sistema visual, (tálamo y corteza visual).
- **Estrategias:** Como punto de inicio, en esta ruta de investigación, se busca emular propiedades de los campos receptivos. Los retos son: a) hacer procesamiento analógico tal como se lleva a cabo en las neuronas naturales; b) hacer más eficientes las neuronas artificiales en el sentido de acercarse cuanto sea posible a las naturales; c) reducir el tamaño de dichos procesadores; d) sustituir conos y bastones deteriorados por fotodiodos de silicio, y e) solicitar recursos, públicos o privados, para llevar a cabo pruebas.



La retina transforma la luz en impulsos eléctricos codificados, que se envían al cerebro a través del nervio óptico, y el cerebro decodifica (interpreta) estos mensajes, convirtiéndolos en las imágenes que vemos





Como institución que forma ingenieros en Sistemas Computacionales, en la ESCOM, se busca orientar la investigación hacia metas innovadoras; por ejemplo: sistemas tipo intérpretes, traductores de energía luminosa en información preprocesada, para ser entregada a las neuronas en etapas superiores del sistema visual. ●

## REFERENCIAS

1. Organización Mundial de la Salud. "Ceguera y discapacidad visual". Octubre 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/index.html>
2. H. K. Hartline, "The Effects of Spatial Summation in the Retina on the Excitation of the Fibers of the Optic Nerve" *American Journal of Physiology*, vol. 130 no. 4, pp. 700-711, September 1940.
3. H. K. Hartline, "The Receptive Fields of Optic Nerve Fibers" *American Journal of Physiology*, vol. 130, pp. 690-699, 1940.
4. Stephen W. Kuffler. "Discharge Patterns and Functional Organization of Mammalian Retina". *J. Neurophysiology*. 1953, vol. 16, pp. 37-68.
5. H. B. Barlow, R. Fitzhugh, S. W. Kuffler, "Change of Organization in the Receptive Fields of the Cat's Retina During Dark Adaptation". *Journal of Physiology*, vol. 37, pp. 338-354, December 1956.
6. D. H. Hubel y T. N. Wiesel. „Integrative Action in the Cat's Lateral Geniculate Body". *J. Physiology*, 1961, vol. 155, pp. 385-398.
7. Tomomi Ichinose y Peter D. Lukawsiewickz. "Inner and Outer Retinal Pathways Both Contribute to Surround Inhibition of Salamander Ganglion Cells". *J. Physiology*, 2005, 565, 2, pp. 517-535.

**Gelacio Castillo Cabrera** es Doctor en Ciencias, con especialidad en Ingeniería Eléctrica, por el Cinvestav. Actualmente es profesor investigador del Instituto Politécnico Nacional, adscrito a la Escuela Superior de Cómputo. Sus líneas de investigación versan sobre diseño de circuitos integrados y procesadores biológicos.

**Daniel Yacob Espinosa González** es estudiante de la Escuela Superior de Cómputo perteneciente al Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional Febrero-Junio del 2012.

**Eduardo Adolfo Arroyo López** es estudiante de la Escuela Superior de Cómputo perteneciente al Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional Febrero-Junio del 2012.

**Evila Lucero Salazar Ortiz** es estudiante de la Escuela Superior de Cómputo perteneciente al Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional Febrero-Junio del 2012.

La fuente de información que enriquecerá o mejorará los procesadores artificiales en el futuro es muy rica, se encuentra en los seres vivos y es aún desconocida