



Gansos silvestres (*Anser caerulescens*)

Daniel Tomsic

Instituto de Fisiología, Biología Molecular y Neurociencias (IFIBYNE),  
UBA-Conicet

# Cómo advertimos lo que se nos viene encima

## Neuronas detectoras de colisiones

**C**uando al atravesar una calle vemos aproximarse velozmente un auto, o cuando conduciendo vemos cruzarse un peatón, realizamos una muy precisa y rápida estimación del tiempo hasta la posible colisión y ejecutamos las maniobras necesarias para evitarla. Nuestro cerebro efectúa ese cálculo sin que ni siquiera nos demos cuenta, y casi sin demora comanda una acción preventiva. De igual modo, cualquier jugador de fútbol medianamente habilidoso es capaz de interceptar

en el aire una pelota y, sin detenerla, patearla en la dirección que cree adecuada. Para hacerlo, el cerebro del jugador, sin que este lo advierta, procesa información sobre la velocidad y trayectoria de la pelota que se le acerca con una precisión del orden de las décimas de segundo, y prepara anticipadamente su cuerpo para darle el impulso preciso. Un error de pocas décimas de segundo redundaría en un resultado decepcionante. Para que un jugador profesional de tenis pueda devolver un saque que viene a 200km/h, es necesario que su cerebro

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

El sistema nervioso posee mecanismos que le permiten procesar información visual acerca de objetos que se avecinan y poner en marcha respuestas motrices adecuadas.

responda con una precisión del orden de milésimas de segundo.

Esta habilidad para anticipar colisiones ¿es única de los seres humanos o se encuentra también en otros animales? ¿De qué información se vale el cerebro para calcular la trayectoria de movimiento de un objeto y el tiempo a la eventual colisión? ¿Qué cálculos utiliza y cómo resuelve de forma rápida y precisa una tarea tan compleja? Una vez desentrañados los eficientes mecanismos de detección de colisiones con que operan los seres vivos, ¿será posible aplicar esos conocimientos a desarrollar sistemas artificiales que ayuden a prevenir colisiones? Estas preguntas están siendo intensamente investigadas en laboratorios de distintas partes del mundo.

## Animales que detectan colisiones

Conducir un auto en medio del tránsito congestionado o caminar entre una multitud sin chocarnos con otros son tareas que realizamos con facilidad. Pero los humanos no somos los únicos que enfrentamos el desafío de movernos en medio de tránsitos intensos. Los peces de un cardumen, las aves de una bandada, las mangas de langostas o las populosas comunidades de cangrejos conforman aglomeraciones en movimiento en las que cada individuo se desplaza en medio de cientos o miles



de otros individuos. Para evitar chocarse con el vecino todos esos animales cuentan con efectivos mecanismos de detección de colisiones, los que les sirven asimismo para evitar chocar los objetos inmóviles situados en su camino, como árboles o rocas.

Cualquiera que se haya detenido a observar a un insecto volando entre las ramas de un arbusto habrá podido constatar las acrobáticas maniobras que es capaz de realizar para no embestir los obstáculos que le van apareciendo por delante. De la misma manera, cualquiera que haya intentado eliminar a una fastidiosa mosca por medio de un rápido manotazo, habrá podido comprobar (con algo de frustración) que esos insectos están igualmente equipados con un eficaz sistema de detección de objetos que se les aproximan en trayectoria de colisión.

En términos evolutivos, el sentido de la visión surgió en el período cámbrico del Paleozoico, hace unos 500 millones de años, muy probablemente impulsado por las ventajas que confiere la detección anticipada de predadores, pues esta incrementa las posibilidades de sobrevivir al ataque y en consecuencia de dejar descendencia heredera de la misma capacidad (la que así se disemina en la población).

## Percepción visual de objetos que se acercan

Cuando nos acercamos en línea directa a un objeto, o cuando este se aproxima directamente a nosotros, su imagen sobre nuestra retina va aumentando. Cada célula fotorreceptora de esa membrana del globo ocular (véase en este mismo número 'Percibir la luz proporciona más que visión a los animales', en particular la figura de la página 44) recibe los rayos provenientes de una pequeña porción

del espacio visual. Al aumentar el tamaño de la imagen, aumenta en forma proporcional el número de fotorreceptores estimulados en esa secuencia espacial y temporal.

La información captada por los fotorreceptores retinianos y elaborada por otras neuronas del ojo llega en forma inmediata como impulsos eléctricos al cerebro, que decodifica e interpreta los mensajes recibidos, decide las acciones a seguir y emite las órdenes motrices correspondientes. Si la imagen del objeto en la retina se expande de forma simétrica, es decir, aumenta a la misma velocidad en todos sus bordes, es porque dicho objeto viene directamente hacia nosotros (o nosotros nos movemos directamente hacia él). En cambio, si los bordes de la imagen se expanden de forma no simétrica, el objeto se mueve con una trayectoria oblicua que no resultará en colisión. Nuestro cerebro analiza cuidadosamente la simetría dinámica de las imágenes y así determina la trayectoria relativa a nosotros del cuerpo que las produce.

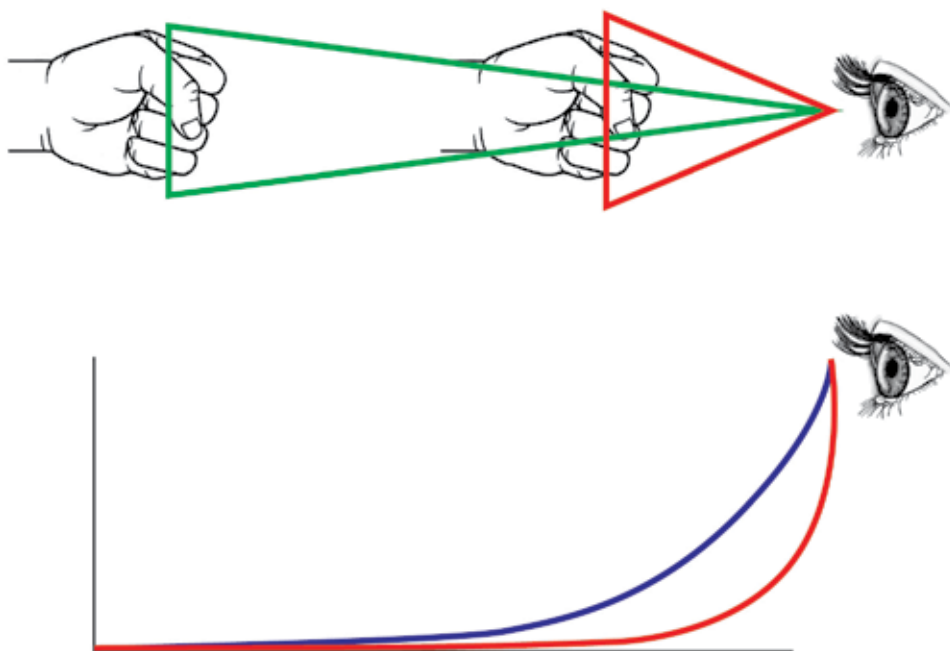
La velocidad con que crece en la retina de un observador la imagen de un objeto que se le acerca depende del tamaño absoluto del objeto, de su distancia al observador y de la velocidad de acercamiento. El ángulo que abarca la imagen de un objeto en el ojo del observador se denomina tamaño angular o tamaño aparente del objeto y se mide en grados. Ese ángulo se incrementa a medida que el objeto se aproxima y, consecuentemente, el momento del choque se acerca, como se aprecia en la parte superior de la figura 1. La imagen en la retina del observador de un objeto que se le acerca a velocidad constante crece en forma aproximadamente exponencial, es decir, su tamaño aparente aumenta cada vez más rápido a medida que el objeto se acerca al observador.

Se puede representar en gráficos el incremento del tamaño aparente de objetos que se acercan a observadores. La parte inferior de la figura 1 muestra cómo difieren las curvas correspondientes a dos objetos del mismo tamaño real que parten de la misma distancia pero se desplazan a distinta velocidad. A mayor velocidad, más abrupto es el crecimiento de ese tamaño en los momentos cercanos al choque (curva roja).

Es posible representar otros parámetros de una imagen que se expande mediante curvas que serán similares a las de la figura, aunque no idénticas; por ejemplo, la velocidad con que se mueven sus bordes (usualmente llamada *velocidad retinal*). Dado que cada curva, sea de incremento del tamaño angular o de la velocidad retinal, es el resultado de una combinación particular de distancia, tamaño absoluto y velocidad del acercamiento, el análisis de esas curvas permite obtener información sobre el tiempo que resta hasta la colisión. Los cerebros realizan con gran eficiencia la tarea de leer e interpretar la información de este tipo provista por el sistema visual. ¿Cómo lo hacen?

## Neuronas detectoras de colisiones

Aun cuando los cerebros de la mosca, la paloma, el ratón y el ser humano son extremadamente diferentes, los mecanismos neuronales y computacionales de la detección visual de colisiones parecen ser los mismos. La investigación de dichos mecanismos se realiza en determinados organismos (llamados *organismos modelo*) en los que ha sido posible identificar neuronas especializadas



**Figura 1.** Arriba: cambio del tamaño aparente de un objeto en movimiento en función de su distancia al observador. El puño, cuyo tamaño real podría rondar los 12cm de alto, a medida que se acerca a la retina del observador adquiere cada vez mayor tamaño aparente o tamaño angular, cuya medida está dada por el ángulo derecho de los triángulos, que corresponde al ángulo que abarca el objeto en el ojo del observador. Abajo: crecimiento en el tiempo del tamaño aparente de dos objetos del mismo tamaño real que se acercan al observador a velocidades distintas. El eje horizontal indica el tiempo entre el momento en que ambos objetos se ponen en movimiento (extremo izquierdo) y el momento en que embisten al observador (extremo derecho). El eje vertical mide el tamaño aparente o angular que percibe el observador de los objetos que se le aproximan. La curva roja corresponde al objeto que se desplaza más rápido.



Cangrejos. Foto Diego Spivakow, revista digital *Anfibia*, UNSAM.

en la detección visual de esas colisiones, cuyo funcionamiento es posible estudiar.

El modelo animal más utilizado es la langosta, en cuyo cerebro se encuentra una neurona capaz de reconocer si las secuencias temporales y espaciales con que le llegan las señales de la retina corresponden a las generadas por un objeto en trayectoria de colisión. En caso afirmativo, la neurona envía información a los centros motores que controlan los movimientos de alas y patas con que el animal ejecuta las maniobras que le permiten evitar esa colisión.

Esa neurona (como la mayoría de las neuronas) transmite información mediante señales eléctricas conocidas por *potenciales de acción*, que consisten en cambios rápidos de voltaje propagados a lo largo del axón (la delgada prolongación de la neurona que actúa como una especie de cable y conduce las señales eléctricas hasta la neurona siguiente). El contenido del mensaje, es decir la información enviada por una neurona, va codificado en términos del número de potenciales de acción por unidad de tiempo (o sea, la frecuencia de disparos).

Cuando el animal observa un objeto que se le acerca, las neuronas especializadas en procesar información sobre colisiones muestran un incremento de su frecuencia de disparos que refleja la dinámica de expansión de la imagen del objeto en su retina. Dado que la velocidad de esa expansión es función de la velocidad a la que se acerca el objeto, la codificación neuronal de esa dinámi-

ca contiene información que permite al animal estimar el tiempo hasta la colisión.

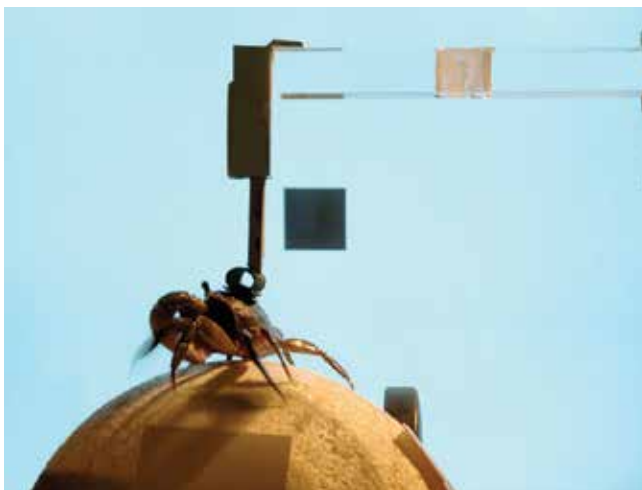
En nuestro laboratorio trabajamos con otro modelo experimental que exhibe singulares ventajas para estudiar los mecanismos neuronales por los cuales los animales detectan y eluden colisiones. Se trata de los pequeños cangrejos de la especie *Neohelice granulata* que habitan la bahía de Samborombón (más información en 'El eterno resplandor de una mente con recuerdos. Consolidación y labilización de la memoria animal', el artículo anterior de este mismo número), cuya respuesta de escape ante un predador que se les acerca no consiste, como en las langostas, en un salto repentino sin mucho control de dirección e intensidad, sino en una carrera que el animal regula de modo permanente en función de los cambios de velocidad y rumbo del predador que lo ataca.

La figura 2 ilustra cómo analizamos ese comportamiento del cangrejo en el laboratorio. Lo sostenemos de modo que no pueda desplazarse pero sí mover sus patas apoyadas sobre una esfera que flota en agua. Confrontado a la imagen de computadora proyectada sobre una pantalla de un cuadrado negro que se agranda simulando un objeto que se acerca, el animal responde procurando escapar en dirección opuesta, con lo que rota la esfera flotante. Registramos sus movimientos mediante una computadora, lo cual nos permite determinar en forma instantánea el momento en que decide comenzar

su huida, así como sus cambios de velocidad y dirección. Analizando respuestas a simulaciones de objetos que se aproximan con direcciones y velocidades distintas, es posible identificar las variables ópticas que desencadenan la respuesta motriz del cerebro del animal (por ejemplo, el valor crítico del tamaño aparente o de la velocidad retinal) y deducir los algoritmos mediante los cuales explicarla.

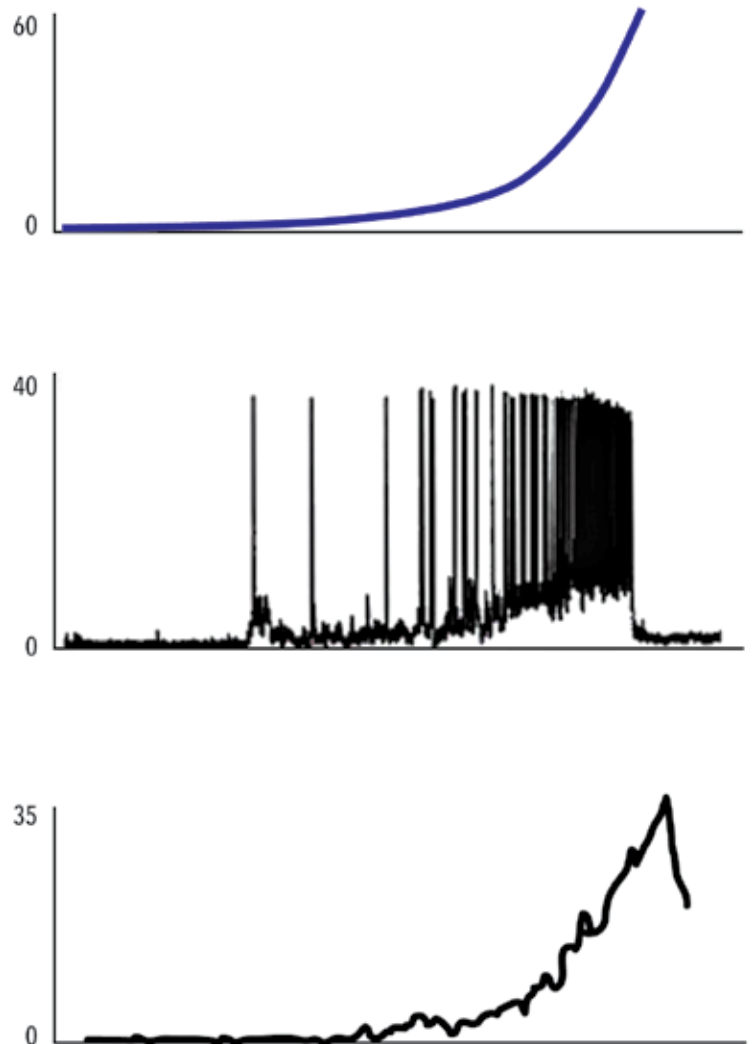
Como se aprecia, comportamientos que dependen de estímulos visuales implican la transformación de información visual en información motora. En esa transformación hay una correspondencia entre las señales que llegan y las que salen del sistema. Así, el cerebro del cangrejo recibe información de la expansión de una imagen en los ojos y la transforma en señales usadas para regular la velocidad de su carrera de escape. Dicha transformación requiere la existencia de neuronas capaces de establecer la velocidad de crecimiento del tamaño aparente del objeto en la retina y transferirla fielmente a centros cerebrales de control motor.

Los gráficos de la figura 3 reflejan el proceso anterior. Cuando un predador se acerca a un animal, su tamaño angular en el ojo del observador se expande como indica, por ejemplo, la curva superior azul. La expansión es percibida por neuronas especializadas en detectar ese tipo de estímulos, las que comienzan a disparar potenciales de acción e incrementan la frecuencia de disparo a medida que el predador avanza, como lo indica el dibujo del centro. La información proporcionada por estas neuronas permite al animal determinar la velocidad



**Figura 2.** Dispositivo usado en el laboratorio del autor para sus experimentos con cangrejos *Neohelice granulata*. La armazón derecha y superior mantiene en el mismo sitio al animal pero le permite mover libremente sus patas apoyadas en una esfera flotante que puede rotar. En una pantalla se proyecta la imagen de computadora de un cuadrado negro, percibida por el animal como una amenaza que se le acerca, mientras la computadora registra la dirección y velocidad de su huida.

de su carrera de escape, indicada en el gráfico inferior. A medida que el crecimiento del tamaño angular de la imagen se acelera (la curva azul se va haciendo más empinada), la frecuencia de disparo de la neurona aumenta y el animal apresura su carrera. Hace lo mismo que un peatón que corre al advertir, mientras cruza la calle, la existencia de un auto aproximándose a alta velocidad. Los estudios en modelos animales están comenzando a



**Figura 3.** Reacciones neuromotrices provocadas en animales (incluidos humanos) por un objeto que se acerca en vía de colisión. El gráfico superior indica la expansión del estímulo visual, es decir, el aumento de tamaño en la retina del animal de la imagen del objeto que se aproxima; técnicamente, es el incremento del tamaño aparente del objeto, medido en grados (indicados en el eje vertical). El gráfico del medio muestra las señales eléctricas que envían al cerebro las neuronas detectoras de colisiones, que aumentan la frecuencia de disparos de potenciales de acción a medida que el objeto se aproxima y regulan así la velocidad de la reacción motriz: el trazo más continuo corresponde al potencial de membrana desde el que se disparan los potenciales de acción, que son cambios bruscos de ese potencial de membrana; el eje de la izquierda en este caso mide la diferencia de potencial eléctrico en milivoltios. El gráfico inferior representa reacción de escape del animal; el eje de la izquierda mide la velocidad de huida en centímetros por segundo. La escala del tiempo es la misma en los ejes horizontales de los tres gráficos.




permitirnos entender cómo se organizan los circuitos neuronales que sirven para anticipar las colisiones y cuáles son sus mecanismos de detección, procesamiento y transferencia de información.

## Perspectivas

Comparar las habilidades para maniobrar y anticipar las colisiones que demuestran poseer animales con cerebros tan pequeños como el de una mosca con las rudimentarias capacidades de los aparatos de ingeniería diseñados para realizar automáticamente esa tarea sugiere que podemos aprender mucho estudiando las primeras.

Los conocimientos que están surgiendo de este tipo de estudios atraen la atención de diseñadores de dispo-

sitivos robóticos interesados en la ingeniería neuromórfica, es decir, diseños basados en conceptos de funcionamiento del sistema nervioso. Se habla así de robots de inspiración biológica (*biologically inspired robots*), cuyo diseño toma como guía el modo extraordinariamente eficiente en que los diminutos cerebros de insectos o cangrejos adquieren y procesan información. Durante la última década, la colaboración de biólogos, físicos e ingenieros dio como resultado los primeros robots de este tipo. Los mecanismos de procesamiento neuronal estudiados en la langosta se están aplicando al diseño de instalaciones antichoque para vehículos comerciales, no con el propósito de reemplazar al conductor humano sino para que la detección anticipada de un choque active las bolsas de aire y ajuste los cinturones de seguridad una fracción de tiempo antes de la colisión. 

### LECTURAS SUGERIDAS

**BERMÚDEZ I BADÍA S**, 2007, 'A fly-locust based neuronal control system applied to an unmanned aerial vehicle: The invertebrate neuronal principles for course stabilization, altitude control and collision avoidance', *The International Journal of Robotics Research*, 26: 759-772.

**FOTOWAT H & GABBIANI F**, 2011, 'Collision detection as a model for sensory-motor integration', *Annual Review of Neuroscience*, 34: 1-19.

**SRINIVASAN MV & SHAOWU Z**, 2004, 'Visual motor computations in insects', *Annual Review of Neuroscience*, 27: 679-696.



#### Daniel Tomsic

Doctor en ciencias biológicas, UBA.

Investigador principal en el IFIBYNE, UBA-Conicet.

Profesor adjunto de la FCEN, UBA.

[dtomsic61@gmail.com](mailto:dtomsic61@gmail.com)