

Biomimética, tecnología inspirada en la naturaleza

Dr. Eduardo Alfredo Favret

La naturaleza puede ser considerada como un centro de entrenamiento para ingenieros y científicos que buscan innovaciones tecnológicas. Ella ha desarrollado numerosos y cuasi-perfectos materiales, procesos y sistemas a nano, micro y macro-escalas después de miles de millones de años de existencia. Por ello es una fuente de inspiración para el desarrollo de innovaciones tecnológicas. Este nuevo campo científico se conoce como biomimética.

La naturaleza ha sido desde siempre una musa inspiradora para el artista. Sólo pensemos en los poemas de Rabindranath Tagore, en los cuadros de Claude Monet, en la música del colosal Beethoven, en su sinfonía Pastoral, cuando en su segundo movimiento aparece el canto del ruiseñor, la codorniz y el cuclillo en el decir melancólico del oboe, la flauta y el clarinete. Pero ahora bien sabemos que numerosos inventos también utilizaron la naturaleza como fuente de inspiración, desde Leonardo Da Vinci (circa 1500) estudiando el vuelo de las aves y su diseño del Ornitóptero, hasta Otto Lilienthal (Fig. 1) quien fue uno de los primeros en escribir un libro sobre biomimética “El vuelo de los pájaros como base de la aviación”, obra publicada en 1889.

Los desarrollos tecnológicos basados en los sistemas naturales reciben el nombre de biomimética. La idea consiste en trasladar una determinada propiedad funcional de un sistema biológico a un sistema artificial. Si tomáramos como ejemplo lo propuesto por Lilienthal, las aves serían el sistema biológico, el vuelo la propiedad funcional y el avión el sistema artificial.

La abundancia de estos diseños eficientes y multifuncionales se debe a los miles de millones de años de evolución. Los ingeniosos mecanismos de la madre naturaleza llevaron



1. Otto Lilienthal (1848 – 1896).

a los científicos a desarrollar nuevos sistemas en diversos campos. ¡Hay miles de patentes escondidas en la naturaleza!

Desarrollos biomiméticos

La primera patente biomimética fue el Velcro (VELours-CROchet, palabras en francés que significan terciopelo-tejido), propuesta por el ingeniero suizo George de Mestral (1950). Un mecanismo de cierre tan usado hoy día por el hombre fue desarrollado a partir del análisis de la adherencia del abrojo en la pelambre de su perro (sistema de cierre denominado “gancho-lazo”).

En muy diferentes campos de aplicación son innumerables los estudios en desarrollo. Por ejemplo, la Dra. Claire Rind, neurobióloga de la Universidad de Newcastle, Gran Bretaña, está analizando cómo las langostas evitan chocar entre sí cuando vuelan. Sus estudios despertaron el interés de la empresa automotriz sueca Volvo para construir sensores anti-colisión. Aparentemente las langostas poseen una gran neurona (LGMD, Locust Giant Movement Detector) ubicada detrás de los ojos que libera energía, denominada potencial de acción, siempre y cuando la langosta esté en camino de colisión con otro animal. Esta energía le permite tomar una acción evasiva y todo el proceso desde la detección hasta la evasión lleva un tiempo de 45 milisegundos.

Pero hay otro ejemplo en el campo de los sensores donde la naturaleza nos puede ayudar. Para la mayoría de las criaturas los incendios no son atractivos, pero existe una pequeña cantidad de insectos que buscan el fuego, los llamados “insectos pirófilos”, los cuales dependen directa o indirectamente de las áreas quemadas de los bosques para su alimentación, refugio y reproducción. Uno de ellos es el escarabajo *Melanophila acuminata* que tiene un conjunto de órganos con receptores de ondas infrarrojas (IR), situados al lado de sus patas anteriores, para detectar incendios forestales a una distancia de 130 km. Estos receptores se componen de 50-100 sensores individuales (órganos de pequeño tamaño, aproximadamente 15 micrones de diámetro, los cuales se organi-



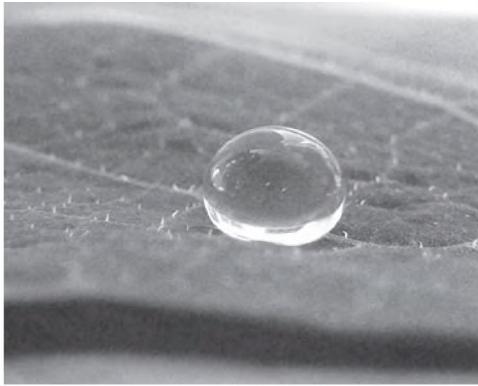
2. Martín Pescador. Cortesía de J. J. Harrison (GFDLicence).

zan de forma compacta y están conectados directamente con neuronas) y situados en la parte inferior de una cavidad de 100 micrones de profundidad. Debido a la absorción de los fotones IR en las paredes cuticulares internas del sensor, el aire y fluidos encerrados se calientan y se expanden. Este aumento de presión sólo puede ser compensada por una estructura flexible. Esta estructura elástica deforma la membrana celular y produce la apertura de canales iónicos generándose una señal eléctrica. Es decir, los receptores de IR actúan como un dispositivo de microfluidos que convierte la radiación infrarroja en una señal eléctrica. Estudiar estos receptores nos ayudaría a desarrollar sensores anti-incendios muy sensibles. Además este escarabajo tiene antenas detectoras de humo, que podría ser otro interesante aporte. La estructura química de los elementos volátiles que componen el humo depende de la especie de árbol atacada por el fuego y estos insectos son capaces de identificarlos.

Recolectar agua en un desierto es una tarea ardua y compleja, para no decir imposible. La naturaleza aquí también nos da una mano, utilizando mecanismos asombrosos, como el del coleóptero *Stenocara* sp. estudiado por el zólogo inglés Andrew Parker, con su cutícula compuesta por zonas hidrofílicas y superhidrofóbicas.

Otro ejemplo es el diablillo espinoso australiano, *Molloch horridus*, un saurio de la familia de los agámidos que puede recoger toda el agua que necesita directamente de un charco o incluso de la humedad del suelo, en contra de la gravedad y sin emplear energía ni dispositivos de bombeo. ¿Cómo logra desafiar la gravedad y hacer que el agua suba por sus patas, recorra su cuerpo y llegue hasta su boca? Se piensa que la humedad del ambiente o el rocío que cae sobre sus escamas discurre por su áspera piel y entra en una red de canales o surcos que hay entre las escamas. Estos canales están conectados unos a otros y llegan hasta los lados de su boca. Al parecer, los científicos han descubierto su secreto. Los canales que hay sobre su piel están conectados por medio de conductos a otra red de canales más profunda. La forma de estos canales facilita la capilaridad, una propiedad que hace que el agua avance a través de espacios muy estrechos, incluso en contra de la gravedad. Podría decirse que la piel de este lagarto es como una esponja.

En cuanto a mecanismos de refrigeración la naturaleza también presenta soluciones inteligentes. Los termiteros han inspirado a los arquitectos para encontrar nuevos sistemas de ventilación que permitan el ahorro de energía. Las termitas edifican sus nidos



3. Gota de agua sobre una hoja de la planta Taco de Reina (*Tropaeolum majus*).

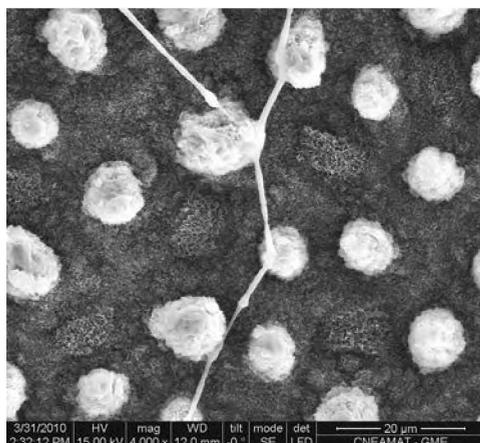
teniendo en cuenta los principios básicos de la termorregulación. La morfología del termitero es similar a una chimenea que disipa el aire caliente más liviano renovando el aire más frío y pesado en la base, en una corriente iniciada en la red de conductos subterráneos que actúan como fuente de refrigeración. Dichas estructuras internas con conductos, como los termiteros de *Macrotermes michaelseni*, permiten mantener la temperatura dentro del nido en $31\pm 1^\circ\text{C}$ durante el día y la noche, cuando la varia-

ción en el exterior es de entre 3°C y 42°C . Es esencial para las colonias de termitas mantener el sistema de regulación térmica en un funcionamiento preciso y constante pues permite el cultivo y la proliferación de un hongo del cual se alimentan. En Harare, Zimbabwe, se ha construido el centro comercial Eastgate siguiendo tal diseño. Consume un 35% menos de energía que 6 edificios convencionales.

Como hemos visto, la naturaleza no concibe malgastar energía; los sistemas naturales tienen diseños que buscan la eficiencia energética. Otro interesante desarrollo en este sentido, fue el que surgió a través de estudiar la ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae*, conocida por su eficiente método para capturar las grandes cantidades de kril con que se alimenta creando cortinas de burbujas separadas apenas por 1,5 metros. El Dr. Frank Fish, biólogo de la Universidad de New Chester, Pennsylvania, Estados Unidos, encontró que su destreza se debe fundamentalmente al diseño de sus aletas, que en sus bordes presentan tubérculos o nódulos aparentemente dispuestos al azar. La ballena genera en una serie de vórtices turbulentos al paso de las aletas y gracias a los nódulos, se crean corrientes de agua que ayudan al animal a estabilizar su gigantesca inercia y moverse con la destreza y la exactitud de animales de un tamaño muy inferior. El Prof. Fish concluyó que esta ballena mejoraba su sustentación en un 8%, lograba una reducción del 32% a la resistencia a la fricción y un aumento del 40% en el ángulo de ataque para atrapar el kril antes de volver a la posición de reposo. A partir de estos estudios se pensó que se podía mejorar la eficiencia de un generador eólico (molino de viento) colocando protuberancias en los bordes de sus aspas. Consciente de la asombrosa eficiencia en la hidrodinámica de un cuerpo tan pesado y extenso como el de esta ballena, la empresa WhalePower Co

Sin dudas, el mundo del transporte, desde el diseño de navíos hasta el aeronáutico, pasando por los vehículos terrestres como automóviles o trenes, es uno de los que más se está beneficiando de los diseños biomiméticos. Es emblemático el caso del tren bala construido en Japón por los años

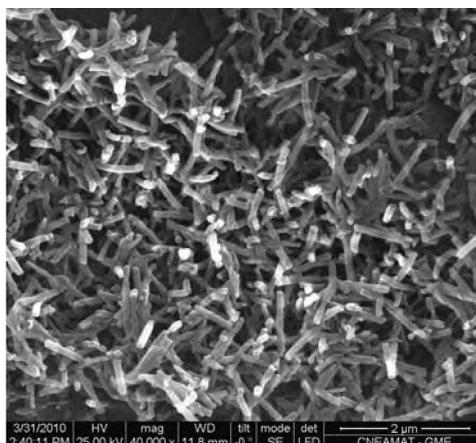




4. Micrografía electrónica de barrido de la microestructura de la hoja del Loto.

1960, denominado Shinkansen, de la West Japan Railway Company. Era uno de los trenes regulares más rápidos del mundo, aunque sus trayectos tenían dos problemas: el ruido causado por la presión del aire cuando el tren salía de los numerosos túneles de su recorrido y la desaceleración del mismo. Es decir se generaban ondas de choque. El ingeniero Eiji Nakatsu, avistador de aves aficionado, recurrió a los diseños de la naturaleza para solucionar el problema y encontró la respuesta en el martín pescador o alcedino, cuya zambullida es tan aerodinámica que no causa ondas en el agua (Fig. 2). Para sumergirse con la mayor rapidez y precisión posible para atrapar pequeños peces, el martín pescador adopta una hidrodinámica que reduce al máximo la fricción con el agua. Nakatsu modeló la cabina del tren al modo del pico y la disposición del cuello y la cabeza del martín pescador, en el momento de entrar en el agua. El rediseño consiguió un tren menos ruidoso que

Otro desarrollo biomimético interesante, aunque en pañales, es el de las nuevas agujas hipodérmicas. Parece que los mosquitos pueden ser útiles después de todo, además de ser comida de ranas y vectores de enfermedades. Científicos de la Universidad de Kansai en Osaka, Japón, acaban de crear una aguja hipodérmica casi indolora, basada en la probóscide (o trompa) de un mosquito. Aparentemente, esta aguja amigable con el paciente basa su éxito en que su superficie exterior es dentada y no lisa. La probóscide del mosquito incluye una especie de labio tubular interno, el cual se encarga de ex-



5. Micrografía electrónica de barrido de la nanoestructura de la hoja del Loto

traer la sangre, y que está cubierto por dos maxilares aserrados, uno a cada lado. Son los maxilares los que penetran primero la piel de la víctima y se hunden en ella, después de lo cual el labio se desliza en medio de estos. Debido a que los maxilares tienen una superficie exterior aserrada, presentan una menor área que entra en contacto con los nervios de la piel. En contraste, la aguja hipodérmica de superficie uniforme, hace todo lo contrario y produce más dolor.

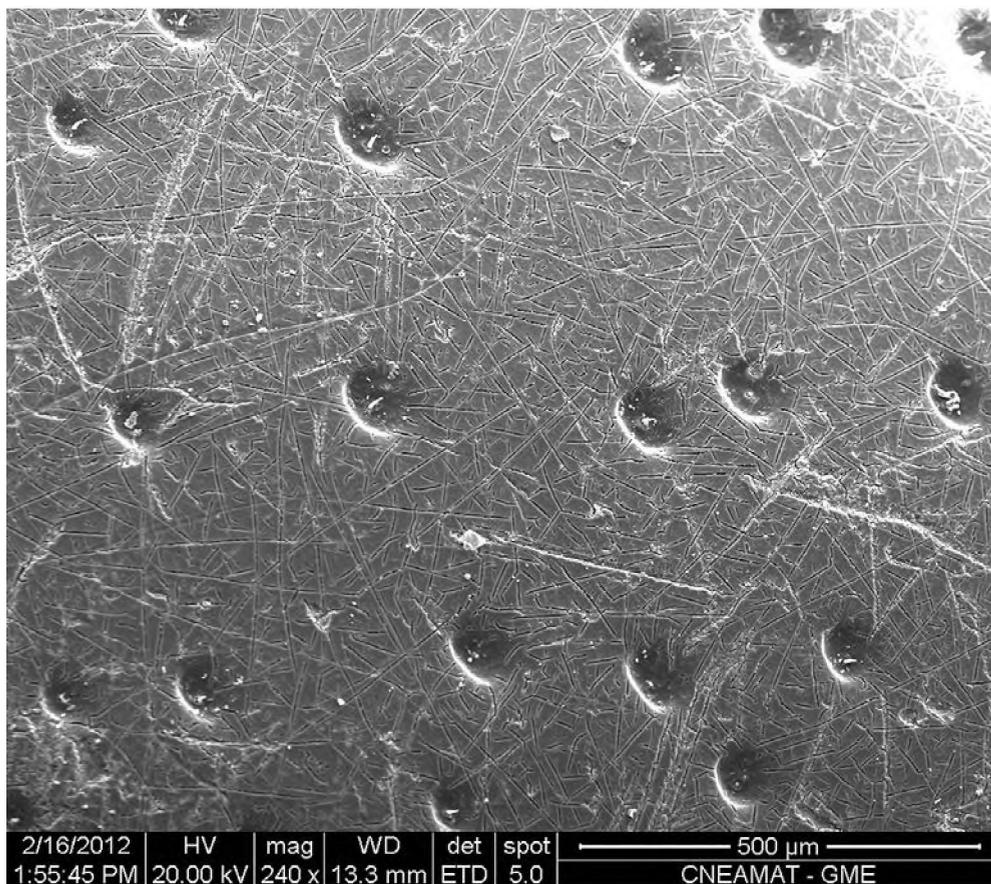
Otra clara expresión de la biomimética es el análisis de los principios funcionales y estructurales de ciertas superficies biológicas. Es común escuchar hablar del efecto "piel de tiburón" para generar superficies antifricción, o bien el efecto "ojo de polilla" para obtener superficies antirreflectantes, de aplicación en celdas solares. Hay numerosos ejemplos que van desde el campo de la óptica al de la acústica. Uno de ellos es el efecto "lotus" (planta del Loto, *Nelumbo nucifera*) para producir superficies autolimpiantes ultrahidrofóbicas. Durante la década de 1980 se desarrollaron en la Universidad de Bonn (Alemania) una serie de trabajos, a cargo de los Dres. Barthlott y Neinhuis, enfocados en hallar y caracterizar cualitativamente las plantas cuyas hojas eran consideradas "autolimpiantes", perteneciendo éstas específicamente a la categoría de superficies superhidrofóbicas. Es decir, superficies que repelen y le tienen "horror al agua", que no se mojan. Se denominan "autolimpiantes" porque las partículas contaminantes situadas sobre dichas superficies son arrastradas por gotas de agua, debido a que existe una



6. Bicho Torito hembra. Cortesía de Ted MacRae.

reducción de su adhesión (tensiones superficiales) a la superficie. Los científicos alemanes demostraron que las hojas son no-mojables debido a la micro-nanoestructura topográfica de su epidermis, conjuntamente con las propiedades hidrofóbicas de la cera epicuticular. Entre las especies cuyas hojas presentan esta condición, se encuentran, además de la planta de loto otras como una variedad de col (*Brassica oleracea*), una planta cultivada en Centroamérica (*Xanthosoma violaceum*), algunas plantas decorativas como el taco de reina (*Tropaeolum majus*) y otras herbáceas perennes como *Euphorbia myrsinites* y *Colocasia esculenta* (Figs. 3, 4 y 5). Las aplicaciones tecnológicas son vastas, desde la industria automotriz a la microelectrónica, pasando por pinturas (Sto Lotusan) y telas.

Otro ejemplo es el denominado efecto “gecko”, o bien superficies con adherencia seca, que fue descubierto por el zoólogo estadounidense Kellar Autumn y ha revolucionado al mundo científico en el campo de los adhesivos inteligentes. El gecko, *Gekko gecko*, es un tipo de lagartija de pequeño tamaño que tiene la capacidad de caminar por paredes verticales y techos lisos sin caerse y a velocidades de 1 m/seg. El Dr. Autumn descubrió que la adherencia era causada por fuerzas de Van der Waals, o atracciones de



7. Micrografía electrónica de barrido de la microestructura del tórax del bicho torito hembra.

uniones químicas secundarias. Los dedos del pie del animal tienen en su superficie inferior ramificaciones similares a filamentos llamadas “setas”, las cuales a su vez también terminan en ramificaciones denominadas “espátulas”. Cada “seta”, compuesta de una proteína llamada β queratina, tiene aproximadamente $100\ \mu\text{m}$ de largo y $7\ \mu\text{m}$ de ancho, con una densidad de 14000 por mm^2 , y cada una de ellas cuenta en su extremo con centenares de “espátulas” de $3\ \mu\text{m}$ de largo y $0,2\ \mu\text{m}$ de ancho. Se ha calculado que la fuerza de adhesión máxima de cada “seta” es de $194 \pm 25\ \mu\text{N}$. Para comprenderlo mejor, si tuviéramos una superficie de $3\ \text{cm}$ de diámetro cubierta con 5000 “setas” por mm^2 , dicha superficie podría soportar un peso de $7\ \text{kg}$. Es interesante preguntarse cómo el gecko al caminar puede despegar su pie de la superficie tan rápidamente ($15\ \text{ms}$), permitiéndole desarrollar una alta velocidad de traslado. La explicación se debe a que es una adhesión direccional, se pega cuando se mueve en un sentido y se libera cuando se desplaza en sentido contrario. Por esta

razón se dice que es un adhesivo inteligente. Grupos de investigadores están desarrollando, gracias al avance de la nanotecnología, “espátulas” sintéticas para la fabricación de adhesivos que utilicen el principio del gecko, en materiales como el poliéster, siliconas y nanotubos de carbono. La utilidad de estos adhesivos no tiene límites.

En nuestro país también hay científicos trabajando en biomimética. En los últimos años un grupo de investigadores del INTA y la UTN Regional Pacheco han estado estudiando la adhesión del suelo a las superficies sólidas de los componentes de la maquinaria agrícola, considerando los principios y características biomiméticas de la fauna del suelo. El fenómeno de adhesión aumenta la resistencia al trabajo como el consumo de energía de la maquinaria, disminuyendo la calidad del trabajo. Los animales que habitan el suelo no tienen este inconveniente, se desplazan sin que el suelo se adhiera a ellos, gracias a sus formas geométricas, hidrofobicidad, sistemas micro-electro-osmóticos, lubricación y flexibilidad de

la superficie cuticular. Los investigadores propusieron como hipótesis de trabajo que si el tratamiento superficial resultara efectivo para disminuir la adhesión del suelo a la superficie de los órganos activos entonces debería percibirse una reducción significativa en el esfuerzo tractivo y un incremento en la capacidad de penetración de la herramienta, debido al reemplazo de la fricción suelo-suelo por el rozamiento suelo-metal. Diseñaron la superficie de una púa de escarificador teniendo en cuenta las características principales del exoesqueleto de la hembra del bicho torito, *Diloboderus abderus* (Figs. 6 y 7). La superficie de dicha púa biomimética consta de cavidades semiesféricas distribuidas según un patrón hexagonal. Los resultados mostraron una reducción del esfuerzo de tracción del 5 al 7%, comparando con una púa de superficie lisa, permitiendo obtener una patente internacional (USA) en el mes de mayo de 2015. Esta innovación tiene un profundo impacto ecológico y económico como consecuencia del ahorro de combustible y de tiempo de trabajo.

Estos y otros muchos ejemplos no hacen más que poner en evidencia que la naturaleza ofrece modelos efectivos y eficientes para muy diversos desarrollos tecnológicos que van desde herramientas mecánicas, diseños, algoritmos computacionales hasta nuevos materiales como pegamentos acuáticos y cerámicos no frágiles. Nos permite, además, aprender nuevos procesos de producción, sin polución y residuos tóxicos. ¡La naturaleza opera sin producir desperdicios! Es hacia allí donde debemos dirigir nuestros esfuerzos, emular al mundo natural, un sistema auto-contenido que no afecte al medio ambiente. La biomimética nos enseña un nuevo mundo lleno de misterios y desafíos, fuente de nuevas tecnologías y apuntando a un desarrollo sustentable.◆

Agradecimientos

Al Laboratorio de Microscopía Electrónica del Departamento de Materiales del CAC – CNEA por la obtención de las micrografías electrónicas.

Lecturas sugeridas

Favret, E. and Fuentes, N. (Eds.). 2009. *Functional Properties of Bio-inspired Surfaces: Characterization and Technological Applications*. World Scientific Publishing Co. Págs. 412. ISBN: 978-981-283-701-1.

Favret, E. 2008. La biología inspira nuevos desarrollos tecnológicos en el campo de la ciencia de los materiales y la Ingeniería. *Revista de la Sociedad Argentina de Materiales*. 5 (1): 2-13.

Bar-Cohen, Y. (Ed). 2005. *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. CRC Press. Págs. 552. ISBN 9780849331633.

Dr. Eduardo Alfredo Favret
UBA (Área Ciencias Físicas)
Instituto de Suelos. CIRN. INTA.
CONICET.
Instituto de Tecnología "Prof. Jorge
Sabato". UNSAM-CNEA.