

AGOSTO 2018

Año 9 N° 26

Registro de la propiedad intelectual N° 841211 / ISSN 1853-032X

BIOLOGIA Cátedra Fernández Surribas- Banús
Declarada de interés institucional según
resolución [D] n° 1293/10

Elemental
Watson
LA REVISTA

ESPECIAL

BIOLOGÍA MATEMÁTICA

EN ESTE NÚMERO

Genética y matemática | Formas biológicas y matemática
Geometría celular | Ecosistemas y patrones vegetales
Filogenia y matemática | Ciencia y arte
Ciencia y tecnología en sociedad | Y mas.....



UBA



33
AÑOS

UBA

CBC

TRABAJANDO POR LA EDUCACIÓN

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Jorge Fernández Surribas
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Dra. Liliana Noemí Guerra
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LUJÁN

Dr. Hernán Miguel
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, MONTEVIDEO URUGUAY
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
SOCIEDAD ARGENTINA DE ANÁLISIS FILOSÓFICO

Lic. María del Carmen Banús
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Elemental Watson

LA REVISTA

STAFF / Elementalwatson "la" revista // Revista cuatrimestral de divulgación / Año 9, número 26/ Universidad de Buenos Aires Ciclo Básico Común (CBC) /Departamento de Biología / Cátedra F. Surribas - Banús / PB. Pabellón III, Ciudad Universitaria, Avda. Intendente Cantilo s/n CABA, Argentina // **Propietarios:** María del Carmen Banús, Carlos E. Bertrán / **Editor Director:** María del Carmen Banús // **Escriben en este número:** Alejandro Ayala María del Carmen Banús / Ana Borthagaray / Adrián Fernández / Miguel Fuentes / Sofía López Olalde / Pablo Marquet / Hernán Miguel / Víctor Panza // **Diseño:** Guillermo Orellana // revista_elementalwatson@yahoo.com.ar, www.elementalwatson.com.ar/larevista.html // 54 011 5285-4307 // Todos los derechos reservados; reproducción parcial o total con permiso previo del Editor y cita de fuente. / Registro de la propiedad intelectual N° 841211, ISSN 1853-032X / Las opiniones vertidas en los artículos son responsabilidad exclusiva de sus autores no comprometiendo posición del editor / **Imagen de tapa:** "Génesis creativa" Acrílico sobre madera entelada, año 2018, María del Carmen Banús.

**MARÍA DEL CARMEN BANÚS**

Lic. En Ciencias Biológicas
Coordinadora de Biología, CBC-UBA

BIOLOGÍA MATEMÁTICA

Decía Galileo que "la filosofía está escrita en ese gran libro del universo, que está continuamente abierto ante nosotros para que lo observemos, pero que no puede comprenderse si no aprendemos el lenguaje en que está escrito". Ese lenguaje es el de la matemática, madre de las ciencias.

De hecho, no se puede concebir hoy la biología sin ese aporte matemático, que va desde el uso de los sistemas dinámicos y la estadística a los modelos de población y a los de la propagación de epidemias, a las aplicaciones de las ecuaciones en derivadas parciales a la quimiotaxis y a la metástasis del cáncer. Las aplicaciones a la neurociencia y la avalancha de datos que genera la moderna investigación exige desarrollar nuevos algoritmos que identifiquen patrones y ayuden a construir modelos; la ciencia de datos se revela un poderoso instrumento en el siglo XXI.

La teoría de juegos aplicada al cáncer, las ideas de la evolución darwinista o la teoría de grafos aplicada a la ecología también necesitan de la matemática

¿Piedra, papel o tijera?

En los últimos años, la biología matemática ha tenido un enorme desarrollo empleando todas las vertientes de las ciencias exactas, y de paso la biología ha proporcionado importantes desafíos que deben ser afrontados por los matemáticos.

Es por ello que este año 2018 ha sido proclamado Año Internacional de las Matemáticas en Biología para destacar el incremento y la importancia de las aplicaciones de las matemáticas a la biología y a las ciencias de la vida y fomentar esa interacción.

Y desde la revista, tomamos un pequeñísimo y sesgado recorte de tan amplio tema para mostrar todo lo que esta asociación de ciencias, puede llegar a resolver.

Agradecemos también la participación de Ana, Miguel y Pablo, que desde Chile y Estados Unidos nos envían un interesantísimo estudio.

Y como siempre nuestra columna de CTS, y Ciencia y Arte y mas.....

Nos reencontramos en diciembre.

Y como siempre, Facebook, instagram y todo lo necesario, para mantenernos en contacto.


María del Carmen Banús

CORREO DE LECTORES (Comunicate con nosotros!)
revista_elementalwatson@yahoo.com.ar



AGOSTO 2018

CONTENIDO

01/ Editorial

04/ Genética y matemática

ALEJANDRO AYALA

10/ Matemática de las formas

ADRIAN FERNANDEZ

20/ Orgullosa matemática

MARÍA DEL CARMEN BANÚS

24/ **PATRONES Y VEGETACION**

BORTHAGARAY - FUENTES - MARQUET

La formación de patrones de vegetación es una característica llamativa de varios ecosistemas con agua limitada en todo el mundo

38/ Matemática y filogenia

VICTOR H. PANZA

44/ Geometría y vida

MARÍA DEL CARMEN BANÚS

50/ Educación, ciencia y tecnología

HERNÁN MIGUEL

58/ Ciencia y arte

SOFIA LOPEZ OLALDE



ALEJANDRO AYALA

Lic. en Ciencias Biológicas
Docente de Biología, CBC-UBA

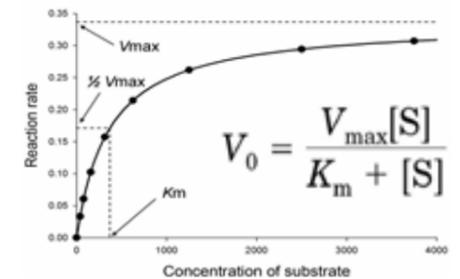
GENÉTICA Y MATEMÁTICA, LA SEGREGACIÓN INDEPENDIENTE Y LA PRUEBA DEL CHI-CUADRADO

En "Experimentos de hibridación en plantas" Gregor Mendel propuso la denominada ley de la segregación independiente, que nos dice que dos o más pares de alelos se separarán y combinarán de manera azarosa e independiente durante la formación de las gametas. Hoy sabemos que para que este principio se cumpla debe darse una condición "sine qua non", los dos o más pares de alelos considerados deben encontrarse en pares de cromosomas homólogos diferentes. Cuando se desconoce si tal condición se cumple o no, se pueden analizar las frecuencias fenotípicas de la descendencia y compararlas con una situación teórica esperada. He aquí donde la matemática se convierte en una herramienta indispensable para transformar las interpretaciones aproximativas en conclusiones científicas.

Semilla		Flor	Vaina		Tallo	
Forma	Cotiledones	Color	Forma	Color	Lugar	Tamaño
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7

INTRODUCCIÓN

La Biología moderna es inconcebible sin el aporte de la Matemática, tal vez sea la mejor manera de definir este matrimonio cuyo resultado es un salto cualitativo que posibilita, entre otras cosas, pasar de la mera descripción de la naturaleza a la representación de los fenómenos biológicos mediante modelos matemáticos predictivos que aportan a su comprensión. La Biomatemática o Matemática biológica representa un conjunto de herramientas tan poderosas que prácticamente no hay campo de las Ciencias Naturales que esté exento de su aplicación. Biología celular y molecular, Fisiología, Ecología, Genética y Evolución, solo por citar algunas especializaciones en donde las herramientas matemáticas se han vuelto un auxilio potente e indispensable.

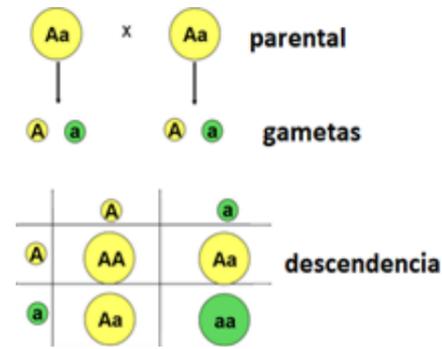


LOS ALBORES DE LA GENÉTICA

En 1843, a la edad de 21 años, Gregor Mendel ingresa al monasterio agustino Santo Tomás Apóstol en la ciudad de Brünn (por entonces perteneciente al antiguo Imperio Austro-Húngaro). Más allá de su vocación religiosa tenía una profunda inclinación hacia las Ciencias Naturales, había estudiado Botánica, Química, Filosofía y Matemática. Apenas ordenado monje se hace cargo de los jardines del monasterio donde funcionaba una suerte de huerto experimental. Allí es donde, luego de una detallada planificación, lleva a cabo sus famosos experimentos con la planta de guisantes, *Pisum sativum*. Con su pasado de agricultor adquirido en la granja familiar, Mendel estaba interesado en comprender y dominar la formación de híbridos en plantas, seguramente como un modo de mejorar los cultivos de la zona. Planificó un trabajo a largo plazo que incluiría varias generaciones de descendientes y un gran número de individuos, en modo de poder dar a los resultados un tratamiento matemático, algo que en esa época no era habitual en estudios sobre herencia. Fue determinante la elección del modelo experimental así como varias consideraciones previas. La planta de guisantes era fácil de conseguir y de cultivar, de rápido crecimiento, y al ser una especie hermafrodita permitía las autofecundaciones, lo que equivale a un control en los cruzamientos. Concentró su atención en características cualitativas como colores o formas, que presentaban variantes concretas sin formas intermedias. Tal vez como un modo de contrastar o poner a prueba la idea de la herencia por mezcla o intermedia, que era aceptada por aquel entonces pero que Mendel cuestionaba o consideraba en algún modo incorrecta. Finalmente, y demostrando una vez más gran inteligencia dividió los experimentos en dos etapas: primero estudió la transmisión hereditaria de cada característica por separado, y en una segunda parte se concentró en la transmisión de dos caracteres distintos en forma simultánea.

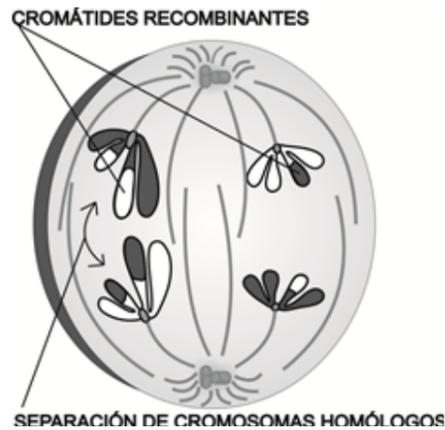
Gregor Mendel

Planta de guisantes, *Pisum sativum*



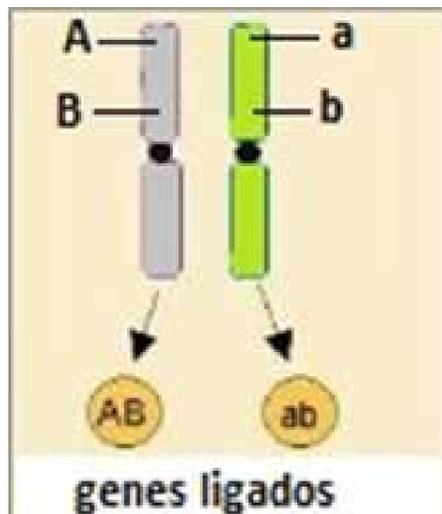
GREGOR MENDEL, EL ADELANTADO

Cabe destacar que en aquella época nada se sabía sobre el ADN y sus funciones, desde luego nada se sabía tampoco acerca de los cromosomas o los genes. No se conocía la naturaleza de los “factores hereditarios” y se pensaba que en la transmisión de las características heredables estaban involucrados los fluidos corporales. Ahora bien, ante los resultados de sus experimentos, Mendel recurrió a una visión innovadora. Imaginó a los “factores hereditarios” no como fluidos sino como unidades discretas que se transmitían a través de las gametas, y que una vez en la descendencia se manifestaban como tales, sin mezclarse. En su publicación utilizó letras para designar a dichos factores, algo que todavía hacemos en nuestros días. Mendel se había adelantado alrededor de 50 años al concepto de gen. Sin embargo, nunca llegaría a saber la importancia de su descubrimiento. De la primera etapa de su trabajo extrajo como conclusión que: *cada carácter hereditario estaba determinado por dos factores, y que dichos factores se separaban durante la formación de las gametas, de modo que cada gameta recibía y transmitía sólo uno de ellos*. Denominamos a esta conclusión: “ley de la segregación”, y sin saberlo, Mendel estaba describiendo la separación de los cromosomas homólogos durante la anafase de la primera división meiótica. También de esta primera etapa derivan los conceptos de dominante y recesivo. La segunda parte fue más compleja porque implicaba el seguimiento de dos caracteres al mismo tiempo, por ejemplo el color de la semilla más la forma del tegumento. Del análisis de los resultados obtenidos en todos los casos descritos, la conclusión de Mendel se resume en la denominada “ley de la segregación independiente” que se plantea de la siguiente manera: *los pares de factores hereditarios que se separan durante la formación de las gametas lo hacen de manera independiente unos de otros. De este modo se forman diferentes tipos de gametas que combinan factores dominantes y recesivos*. Con este segundo postulado nuevamente Mendel describe un fenómeno que será corroborado más adelante, esto es, que la separación de los cromosomas homólogos durante la anafase de la primera división meiótica es al azar.



UN SALTO EN EL TIEMPO

El trabajo de Mendel se publicó en 1865 pero pasó inadvertido para la comunidad científica de la época. Recién a partir de 1900 cuando el escrito fue redescubierto por tres botánicos, recibió el merecido reconocimiento. Pero una mayor comprensión trajo también algunos interrogantes. Pronto se descubrió que la segregación de dos o más pares de alelos (los factores hereditarios de Mendel) no siempre ocurre de manera independiente. Esto en principio no contradice la conclusión mendeliana, pero le agrega una condición: para que la ley de la segregación independiente se cumpla, los dos pares de alelos deben encontrarse en pares de cromosomas homólogos diferentes. Dicho de otro modo, los genes que se encuentran en el mismo cromosoma migran juntos (por estar en el mismo cromosoma) y por ende irán juntos a la misma gameta, es decir, su segregación no será independiente. Ahora, ¿cómo saber si dos pares de alelos se separan en forma independiente o se encuentran en el mismo grupo de ligamiento? El procedimiento es bastante simple. Se deben comparar las proporciones fenotípicas observadas con las esperadas según el principio mendeliano, y para hacerlo con rigor científico se aplica una herramienta matemática conocida como la prueba del chi-cuadrado (X^2). Veamos un ejemplo:



En las plantas de guisantes (*Pisum sativum*) el color amarillo de las semillas es dominante frente al verde, mientras que el tegumento liso domina sobre el rugoso.

Color de la semilla	Tipo de tegumento
Alelo dominante A: semilla amarilla	Alelo dominante L: semilla lisa
Alelo recesivo a: semilla verde	Alelo recesivo l: semilla rugosa

Se cruzan plantas dihíbridas (heterocigotas para ambos caracteres) de semillas amarillas y lisas, lo que se puede expresar como sigue:

Fenotipos: planta de semillas amarillas y lisas x planta de semillas amarillas y lisas
 Genotipos: AaLl AaLl

Si se asume el cumplimiento del principio de la segregación independiente, entonces se deberían obtener las siguientes gametas:

AL	Al	aL	al	Y	AL	Al	aL	al
----	----	----	----	---	----	----	----	----

y por ende, la siguiente descendencia:

	AL	Al	aL	al
AL	AALL	AALl	AaLL	AaLl
Al	AALl	AAll	AaLl	Aall
aL	AaLL	AaLl	aaLL	aaLl
al	AaLl	Aall	aaLl	aall

Del cuadro entonces, resultan las proporciones fenotípicas esperadas:

- 9/16 plantas de semillas amarillas y lisas
- 3/16 plantas de semillas amarillas y rugosas
- 3/16 plantas de semillas verdes y lisas
- 1/16 plantas de semillas verdes y rugosas

En uno de sus experimentos Mendel realizó la autofecundación de plantas dihíbridas de semillas amarillas y lisas, obteniendo la siguiente descendencia (resultados observados): sobre un total de 556 semillas;

- 315 semillas eran amarillas y lisas
- 108 semillas eran amarillas y rugosas
- 101 semillas eran verdes y lisas
- 32 semillas eran verdes y rugosas

Según las proporciones esperadas:

- el 9/16 de las 556 semillas deberían ser amarillas y lisas, lo que daría 312,75
- el 3/16 de las 556 semillas deberían ser amarillas y rugosas, lo que daría 104,25
- el 3/16 de las 556 semillas deberían ser verdes y lisas, lo que daría 104,25
- el 1/16 de las 556 semillas deberían ser verdes y rugosas, lo que daría 34,75

Valores Observados	Valores Esperados
315 semillas amarillas y lisas	$(9/16)(556) = 312.75$ amarillas y lisas
108 semillas amarillas y rugosas	$(3/16)(556) = 104.25$ amarillas y rugosas
101 semillas verdes y lisas	$(3/16)(556) = 104.25$ verdes y lisas
32 semillas verdes y rugosas	$(1/16)(556) = 34.75$ verdes y rugosas
556 Total de semillas	556 Total de semillas

Como se puede notar, los valores obtenidos en el cruzamiento difieren ligeramente de los esperados. Si bien podemos sospechar una concordancia, las conclusiones no deben ser aproximadas sino lo más precisas posibles, así que dejamos de lado el "ojímetro" y aplicamos un poco de Matemática.

LA PRUEBA DEL CHI CUADRADO (χ^2)

Es una herramienta estadística que se emplea para determinar si la distribución de una colección de valores observados, provenientes de un muestreo o de un experimento, se ajusta razonablemente a una distribución teórica esperada. En otras palabras, en qué medida las frecuencias observadas se ajustan a las frecuencias esperadas en base a una distribución hipotética. Para su aplicación es necesario que los datos estén agrupados en categorías, y que la muestra sea lo suficientemente grande.

La Formula es:

$$\chi^2 = \sum \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde, O corresponde al valor observado, e al valor esperado y el subíndice i a la clase o categoría.

La hipótesis nula plantea que los datos observados se ajustan a una distribución hipotética esperada (teórica), mientras que la hipótesis alternativa plantea que no hay ajuste entre ellos. En este tipo de contraste se suele rechazar la hipótesis nula cuando el valor de χ^2 es mayor que un determinado valor crítico, el cual se obtiene de una tabla que combina los grados de libertad (dados por el número de categorías menos 1) con el nivel de significancia decidido por el evaluador (generalmente 1%, 5% o 10%), y que representa el nivel de confianza del resultado. Por ejemplo un nivel de significancia de 0,05 significa un nivel de confianza del 95%. Si por el contrario, el valor del χ^2 es menor que el valor crítico de tabla, se concluye que no hay evidencias que permitan rechazar la hipótesis nula, lo que se afirma con una confianza del 90 %, o del 95% o del 99%, según el nivel de significancia elegido.

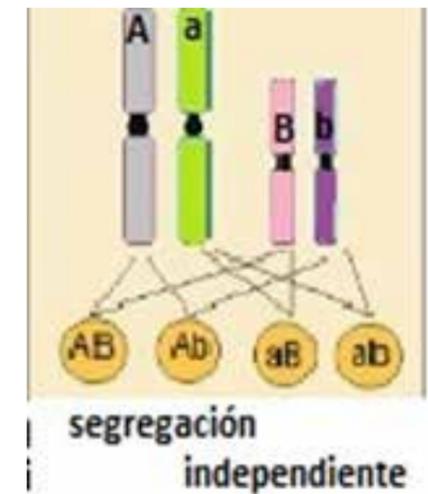
Aplicando la ecuación a nuestro ejemplo

$$\chi^2 = \frac{(315 - 312,75)^2}{312,75} + \frac{(108 - 104,25)^2}{104,25} + \frac{(101 - 104,25)^2}{104,25} + \frac{(32 - 34,75)^2}{34,75}$$

Obtenemos el siguiente resultado: $\chi^2 = 0,47$, y para poder sacar una conclusión debemos compararlo con un valor de la tabla de chi-cuadrado.

Tabla de chi-cuadrado	Probabilidad				
Grados de libertad	0.9	0.5	0.1	0.05	0.01
1	0.02	0.46	2.71	3.84	6.64
2	0.21	1.39	4.61	5.99	9.21
3	0.58	2.37	6.25	7.82	11.35
4	1.06	3.36	7.78	9.49	13.28
5	1.61	4.35	9.24	11.07	15.09

El valor crítico para 3 grados de libertad ($4 - 1$) y una probabilidad de 0,05 es 7,82, claramente mayor que el χ^2 obtenido. Este resultado convalida la hipótesis nula, lo que significa que la distribución de los datos observados se ajusta a los esperados, es decir, una distribución 9:3:3:1 tal como lo predice la segunda ley de Mendel. En términos biológicos este resultado indica que el gen que determina el color de la semilla y el gen que determina la textura del tegumento de la semilla (ambos con sus respectivos alelos) se encuentran ubicados en pares de cromosomas homólogos diferentes, y por ende, durante la meiosis se separan en forma independiente, generando gametas con todas las combinaciones posibles.



ALEJANDRO AYALA

[VOLVER](#)

**ADRIAN FERNANDEZ**

Lic. en Ciencias Biológicas
Docente de Biología, CBC-UBA

LA MATEMÁTICA DE LAS FORMAS BIOLÓGICAS

Una buena parte de las dimensiones y de las funciones de los distintos órganos de los seres vivos se explica por un parámetro simple: la relación entre la superficie y el volumen.

Los seres vivos no pueden tener cualquier aspecto. Numerosos condicionantes han moldeado, a lo largo de la evolución de las especies, distintas formas y tamaños. Uno de los más poderosos es la relación superficie-volumen, la cual puede llegar a imponer límites infranqueables en los cuerpos de los organismos. Una matemática relativamente sencilla nos ayuda a comprender por qué es tan importante esa restricción física, en la biología. Veremos cómo esa relación interviene en la regulación de la temperatura, en el intercambio gaseoso, y en el tamaño de los cuerpos de los organismos, y de sus órganos.

¿Por qué no existen células de un metro de diámetro? ¿Por qué las orejas de los elefantes son tan grandes? ¿Por qué a los bebés se los debe abrigar inmediatamente al nacer? ¿Por qué nuestras manos y pies se enfrían tan fácilmente? Todas estas preguntas se responden atendiendo a un aspecto morfológico de las estructuras involucradas: la relación superficie-volumen. Si bien la palabra “relación” puede interpretarse por su significado como conexión o vínculo, aquí debe entenderse por su significado matemático de cociente, o división. Cuando dos cantidades se dividen una por la otra, se obtiene un número que expresa cuántas veces está contenida una (el dividendo) en la otra (el divisor). Así, la relación superficie-volumen (RSV) se convierte en un parámetro muy útil para establecer cuán grande es la superficie de un cuerpo con respecto a su volumen. Un aspecto interesante es que si se comparan cuerpos de distinto tamaño, el de mayor tamaño presenta menor RSV. Esto tal vez resulte paradójico, pero un simple razonamiento permitirá entenderlo. Cuando un cuerpo crece en tamaño, manteniendo su forma, obviamente se incrementa su superficie. Su volumen también aumenta, aunque mucho más. Al dividir una superficie mayor por un volumen mucho mayor, el resultado de ese cociente es menor. Y más pequeño será, cuanto mayor sea ese cuerpo. Estas cuestiones no pasarían de ser simples curiosidades matemáticas si no fuera porque hay numerosos procesos biológicos que dependen de la superficie o del volumen del órgano en cuestión.

Para comenzar, analicemos el tamaño de una célula eucarionte. ¿Puede existir una célula de un metro de diámetro? Para tratar de responder a esta pregunta debemos comprender que a

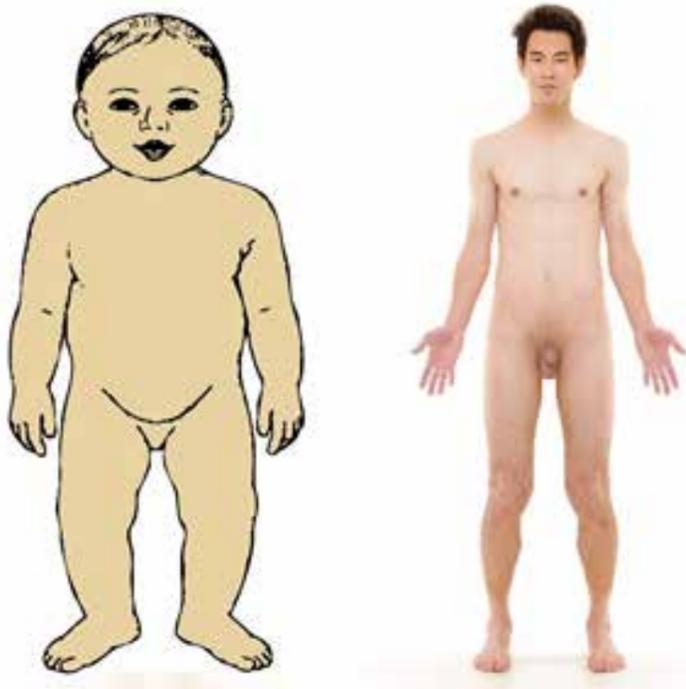
través de la membrana plasmática ocurre el transporte tanto de sustancias nutricias y oxígeno hacia el interior, como el de los desechos hacia el exterior. A su vez, el consumo de nutrientes y oxígeno, y la producción de desechos, ocurren en el interior de la célula. Cuando una célula crece, se incrementa la superficie de la membrana plasmática, pero más crece el volumen de su interior. Esto inevitablemente conduce a la idea de “tamaño límite”, más allá del cual, la membrana plasmática no da abasto con el enorme volumen interior, y la célula comenzaría a sufrir desabastecimiento de alimento y oxígeno, y altas concentraciones tóxicas de desecho.

Otro de los más claros fenómenos biológicos relacionados a la RSV es la generación y disipación de calor en los seres vivos, especialmente en los organismos homeotermos, es decir aquellos que mantienen su temperatura corporal constante y más alta que su entorno. La generación de calor es un proceso que se da en lo más profundo del interior celular, más exactamente en los peroxisomas, aunque también colaboran las mitocondrias. En los peroxisomas ocurre la degradación de los ácidos grasos de cadena larga, proceso muy exotérmico. Miles de peroxisomas dentro de cada una de los billones de células de un mamífero o un ave generan el calor necesario para mantener su cuerpo a una temperatura elevada, que favorece la acción de las enzimas, lo cual conduce a un metabolismo rápido y eficiente. Claramente esta generación de calor depende del volumen de ese animal, ya que a mayor volumen, mayor número de células, y mayor número de peroxisomas. Para estos animales es muy importante la conservación del calor, sobre todo en aquellos que habitan en climas fríos. De allí la importancia de tener mucho volumen, generador de calor, y la menor superficie posible, disipadora de calor, es decir, baja RSV. Y esto se logra con un gran tamaño corporal, por lo que, generación tras generación, fueron siendo seleccionados los individuos de mayor tamaño, dentro de lo que permitan las restricciones fisiológicas y ambientales de cada especie. El oso polar es el más grande de los osos, y justamente habita las zonas heladas del Ártico.

La relación inversa también es correcta: una reducción de tamaño lleva a un incremento de la RSV, con lo cual, se deduce que un organismo más pequeño que otro, con la misma forma corporal, tendrá proporcionalmente mayor superficie y menor volumen. De allí se desprende que generará poco calor y lo perderá muy rápido. No podrá mantener el calor en ambientes fríos. Es exactamente lo que le pasa a los bebés humanos recién nacidos. Rápidamente deben ser

Fig. 1. Comparación de la forma corporal de un bebé y un varón adulto.

Adulto tomado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_Body.jpg#/media/File:Human.jpg. Autor: Mikael Häggström. Bebé tomado de: <https://pixabay.com/es/beb%C3%A9-infantil-ni%C3%B1o-cuerpo-desnuda-304401/>



abrigados para evitar la pérdida de calor. Especialmente deben cubrirse sus piecitos, manitas, y su cabeza, ya que esas partes presentan mayor RSV que el resto de su cuerpo. Aquí llegamos a otro punto importante: el análisis de las distintas formas de los cuerpos. La forma corporal de los bebés es más rechoncha que la de los adultos, sus extremidades son proporcionalmente más cortas, y su cabeza es desproporcionadamente grande (Fig. 1), todo lo cual ayuda a retener calor, sin embargo no alcanza a compensar la alta RSV debida a su pequeño tamaño. Obviamente, este no es un problema en las regiones cálidas. Sin duda, cuando *Homo sapiens* comenzó a poblar zonas templadas y frías del mundo, el abrigo de los pequeños debió haber sido un punto especialmente importante para la supervivencia de sus poblaciones.

Las diferentes formas, a igual volumen, necesariamente tienen distinta RSV: si el cuerpo es regular o no, si tiene bordes o curvas, si tiene prolongaciones o pliegues. Como regla general, los bordes, láminas, prolongaciones y pliegues aumentan la superficie con respecto al volumen, es decir que aumenta la RSV, mientras que los cuerpos compactos, redondeados y lisos, disminuyen la RSV. Ahora entendemos por qué manos y pies se enfrían con facilidad, en invierno. En climas fríos, los animales suelen presentar formas que disminuyen mucho la superficie de contacto con el aire. Esta característica puede ser un complemento al aumento de tamaño, o a veces, una alternativa (si hubiera algún impedimento para el aumento de tamaño). La disminución de superficie se logra, como ya vimos, con formas redondeadas, lisas, y reduciendo al mínimo, toda prolongación corporal como orejas y patas. Por selección natural, aquellos individuos más grandes, más rechonchos, con orejas y colas mínimas, y patas gordas y cortas serán los favorecidos. Existen conductas que pueden alterar la superficie de un indi-

viduo, como la típica forma de reposar o dormir enrollado de los perros (Fig. 2). Otras adaptaciones, como la capa de grasa debajo de la piel, ayudan a reducir la pérdida de calor. También la conducta de erizar los pelos, o la de algunas aves, de parar las plumas y redondear su contorno hasta quedar casi esféricas, crean capas de aire inmóvil, que reduce el escape del calor. La funcionalidad de estas adaptaciones puede entenderse como una reducción de la superficie efectiva de los cuerpos.

Algunos animales pequeños que viven en climas fríos, para compensar la gran pérdida de calor deben consumir grandes cantidades de alimento, y suelen tener un metabolismo intenso, para generar más calor. En regiones cálidas, el problema es el opuesto. Hay que bajar la temperatura corporal favoreciendo la pérdida de calor, por lo que una solución sería tener pequeño tamaño, y alta RSV. Esta estrategia es imposible en el caso del elefante, ya que basa su defensa frente a los depredadores, en su gran tamaño. Pero los elefantes han compensado con un órgano radiador de calor, sus orejas. El enorme tamaño de sus pabellones auditivos contrasta con su pequeño espesor, lo que resulta en una enorme superficie de contacto con el aire. Al agitarlas, logra perder calor de los vasos sanguíneos que están muy próximos a la piel. El aumento de la superficie, por medio de estructuras planas y finas, puede tener otras funciones. Cuando un biguá sale del agua, luego de haber buceado para procurarse alimento, busca un buen punto de apoyo, y allí extiende sus alas al sol y al viento, aumentando así la superficie de contacto con el aire y la consecuente mayor rapidez de secado de las mismas (Fig. 3).

Otros fenómenos biológicos relacionados con la superficie del órgano involucrado son la absorción de nutrientes y el intercambio gaseoso. En el primer caso, el intestino delgado es un clarísimo ejemplo. Con el fin de aumentar la superficie de absorción la pared interna del intestino presenta pliegues, los cuales tienen a su vez vellosidades, y a nivel microscópico las células presentan microvellosidades. Se estima que la superficie aumenta unas 1000 veces¹, hasta unos 300 metros cuadrados, gracias a estos 3 factores. En cuanto al intercambio gaseoso, tanto en pulmones como en las branquias de los peces se observa algo similar: el aumento de la superficie de contacto con el aire, o con el agua, respectivamente. En el caso de los pulmones, la superficie total de los alvéolos pulmonares se estima en unos 100 metros cuadrados. Cuesta creer que dentro de nuestros pulmones haya una superficie equivalente a la de una lámina de 10 metros de largo por 10 metros de ancho. Durante la evolución humana se registró un aumento del volumen craneal. Sin embargo la parte que más se desarrolló



Fig. 2. Típica postura de un perro para tolerar el frío.



Fig. 3. Biguá secándose al sol. Tomado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Phalacrocorax_brasilianus_back.jpg. Autor: Darío Sánchez.

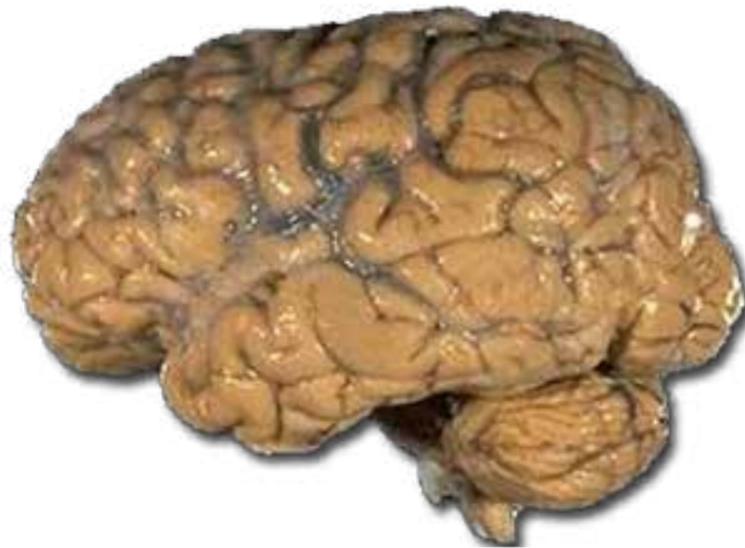


Fig. 4. Cerebro humano. Tomado de: https://de.wikipedia.org/wiki/Gehirn#/media/File:Human_brain_NIH.png

fue el neocórtex, la capa más externa, y lo hizo tanto que la única manera de entrar en el cráneo, fue por medio de los bien característicos pliegues de la corteza cerebral (Fig. 4).

ANÁLISIS MATEMÁTICO

Propongo ahora un análisis del tema, con un poco de rigor matemático. Ya vimos que a mayor tamaño de un cuerpo, menor RSV. Esto se debe a que el volumen depende del cubo del lado², o del radio, mientras que la superficie depende del cuadrado³ de esos parámetros. Consideremos un cubo⁴. Su superficie es la suma de las áreas de las 6 caras, es decir, 6 veces L^2 , donde L es la medida del lado del cubo:

$$(1) S=6L^2.$$

Su volumen es el cubo del lado, o sea,

$$(2) V=L^3.$$

La relación superficie-volumen, RSV, es

(3) $RSV=S/V$. Reemplazando (1) y (2), en (3), queda $RSV=6L^2 / L^3$, y simplificando queda

$$(4) RSV=6/L$$

Esta fórmula nos muestra claramente que la RSV y L son inversamente proporcionales. Si se incrementa el tamaño de un cubo, es decir que L aumenta, necesariamente la RSV disminuye (Fig. 1). Algo similar ocurre con una esfera. Su superficie depende del radio R así:

(5) $S=4\pi R^2$ mientras que su volumen es

(6) $V=(4/3)\pi R^3$. Recordemos que el valor de π es 3,14159. La relación superficie-volumen, RSV, es

(7) $RSV=S/V$. Reemplazando (5) y (6), en (7), queda $RSV=4\pi R^2 / (4/3)\pi R^3$, y simplificando queda:

$$(8) RSV=3/R$$

Esta fórmula muestra que para las esferas también es válido que si aumenta su tamaño, determinado por su radio R, la RSV disminuye, ya que SRV

y R son inversamente proporcionales (Fig. 5). Todo esto nos explica que sin importar la forma de un cuerpo, cuando este crece en tamaño, manteniendo la forma, se reduce su RSV. Esto es lo que da sustento a lo anteriormente explicado sobre el enfriamiento rápido en bebés, o, en el otro extremo, el tamaño del oso polar.

Es muy interesante la comparación entre la RSV de un cubo y una esfera que tengan el mismo volumen, ya que permitirá sacar conclusiones acerca de la importancia de tener, o no, aristas y vértices. Si consideramos un cubo y una esfera de igual volumen entonces debemos igualar (2) y (6):

(9) $L^3=(4/3)\pi R^3$. Aplicando raíz cúbica en ambos miembros nos queda

$$(10) L=1,612R, \text{ o su inversa}$$

$$(11) R=0,62L$$

Según (10), un cubo, para tener el mismo volumen que una esfera, debe tener un lado un poco mayor que el radio de la esfera, pero menor que el diámetro, exactamente 1,612 veces. Si reemplazamos (11) en (8) nos queda $RSV=3/(0,62L)$, y resolviendo queda

$$(12) RSV=4,836/L.$$

Si comparamos la RSV del cubo (4) con la RSV de la esfera de igual volumen (12), claramente se ve que $6/L > 4,836/L$, lo que demuestra que a igualdad de volúmenes, los cubos presentan mayor RSV que las esferas. El mismo tipo de análisis se puede efectuar con cualquier otro cuerpo geométrico (prismas, pirámides, cilindros). La conclusión es que la esfera es el cuerpo geométrico que presenta la menor RSV. Se debe a que es compacta y lisa. La presencia de aristas y vértices aumenta la RSV. Esto ayuda a comprender lo anteriormente explicado de animales rechonchos, perros enrollados, aves que toman forma esférica, etc. Un cuerpo geométrico muy interesante para analizar es el cilindro, ya que muchas estructuras biológicas pueden asimilarse en su forma a un cilindro: patas, torso, dedos y hasta orejas. A diferencia del caso del cubo, en que la superficie y el volumen dependen de un único parámetro, el lado, y el caso de la esfera, en que se necesita sólo el radio, en el caso del cilindro hacen falta dos parámetros: radio y altura. El cubo y la esfera sólo pueden ser más grandes o más chicos, pero no varía su forma, en cambio, el cilindro, además de tener distintos tamaños puede ser más delgado y largo, como un palo (o la pata de un animal), o más bajo y ancho, como un disco (o la oreja de un animal).

Es muy complejo analizar la RSV del cilindro considerando las dos variables, radio y altura, simultáneamente, ya que necesitaríamos un gráfico en tres dimensiones, con

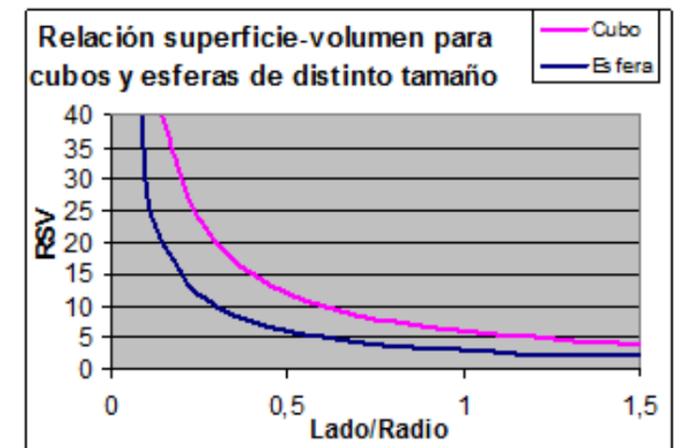


Fig. 5. Variación de la RSV en función del tamaño, para cubo y esfera.

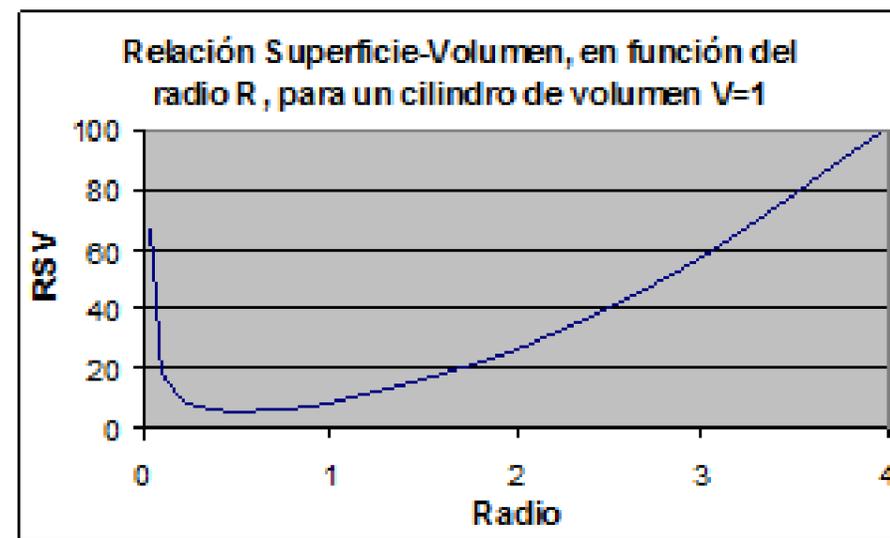


Fig. 6. RSV vs. R, para un cilindro de V=1.

ejes x, y, z. Para simplificar fijaremos el volumen del cilindro, es decir quedará constante, y le daremos distintos valores al radio. Así, la altura cambiará lo necesario para mantener constante el volumen. Hallemos primero la fórmula de la RSV del cilindro. La fórmula de la superficie del cilindro es:

(13) $S=2\pi R^2 + H2\pi R$, y la del volumen es:

(14) $V=\pi R^2 H$. La de la RSV es:

(15) $RSV=S/V$. Si reemplazamos (13) y (14), en (15): $RSV=(2\pi R^2 + H2\pi R) / (\pi R^2 H)$, y al simplificar da

(16) $RSV=2/H + 2/R$.

Aquí se ve que la RSV del cilindro depende del radio y de la altura.

De (14) despejamos la altura:

(17) $H=V / (\pi R^2)$. Como ya dije, dejaremos constante el volumen, con un valor K. Entonces:

(18) $H=K / (\pi R^2)$. En esta fórmula se ve que la altura H sólo depende del radio R. Esto significa que si cambia el valor de R, H adquirirá el valor justo para mantener al volumen V en un valor fijo K. Reemplazando (18) en (16) queda:

(19) $RSV= (2\pi/K)R^2 + 2/R$. Aquí vemos que la RSV sólo depende del radio R. Considerando $K=1$, la fórmula (19) se simplifica más aún, quedando:

(20) $RSV=2\pi R^2 + 2/R$. Dando valores a R se obtienen valores de RSV, los que generan el gráfico de la Fig. 6.

Lo primero que debe notarse en esta gráfica es que se trata de una curva que presenta un mínimo de RSV aproximadamente en un radio $R=0,5$. Si el radio disminuye mucho de ese valor, es decir si el cilindro toma forma de palo, se ve que la RSV aumenta proporcionalmente mucho. Del otro lado del gráfico, si el radio aumenta, y el cilindro comienza a tener forma de disco, también aumenta la RSV, aunque no tanto como hacia la izquierda. Sería muy práctico saber exactamente a qué radio corresponde la RSV mínima. Debemos averiguar la derivada de RSV, para ver el comportamiento de la pendiente de

la curva.

A partir de (20): $RSV= 2\pi R^2 + 2/R$, su derivada (se agrega un apóstrofe: ') es:

(21) $RSV'=4\pi R - 2/R^2$. Esta fórmula describe el comportamiento de la pendiente de la curva de RSV. Cuando la curva de RSV alcanza el mínimo, en ese punto de R la pendiente RSV' vale 0. Igualando a 0 queda:

$0=4\pi R - 2/R^2$. Pasando " $- 2/R^2$ " al otro lado queda: $4\pi R = 2/R^2$. Luego: $R^3=1/(2\pi)$. Aplicando raíz cúbica en ambos miembros nos queda $R=0,542$. Así obtuvimos el radio en el que se alcanza la mínima RSV. Ahora calcularemos la altura H para que el volumen sea $V=1$. Para ello reemplazaremos en (18): $H=K/\pi R^2$ con los valores $K=1$ y $R=0,542$, obteniéndose el valor $H=1,084$, que equivale al del diámetro (el doble del radio: $D=2R$). Quiere decir que en un cilindro de volumen $V=1$, la mínima relación superficie-volumen se alcanza cuando mide exactamente lo mismo de alto que de ancho (Fig. 7 (B)).

Cualquier otra forma da una relación superficie-volumen mayor. Tanto si se trata de un cilindro estirado en altura, semejante a un palo, como si se trata de otro estirado hacia los costados, algo así como un disco. Todo esto nos permite entender por qué en climas fríos los animales tienen torsos y patas rechonchas. También comprenderemos que unas orejas enormes disiparán calor muy eficientemente. Para el caso de cilindros con volumen constante distinto de 1, he elaborado el gráfico de la Fig. 8, donde pueden verse las curvas de variación de la RSV en función de R. Se observa que, independientemente del volumen, hay un radio en el que se alcanza una RSV mínima, correspondiente a cilindros rechonchos. A la vez, cuanto mayor es el cilindro, la RSV mínima es menor, lo cual es lógico: lo mismo que ocurre con cubos y esferas, también se da en cilindros rechonchos. Por último, la RSV mínima, en cilindros mayores, se da a radios mayores, lo que también es lógico, para mantener la forma rechoncha.

Otro aspecto de la estructura de los seres vivos que merece ser analizado, es el de la forma de los cuerpos en relación con su peso. Pensemos en una hormiga. Claramente sus seis patas sostienen el peso de su cuerpo con holgura. De hecho pueden llevar peso extra sobre su cuerpo y desplazarse ágilmente hacia sus nidos. Ahora la pregunta es si podría existir una hormiga gigante, conservando exactamente las proporciones de una hormiga común. Para responder a esta pregunta hay muchos aspectos que deberían analizarse, como la red de tráqueas de su aparato respiratorio, o la cantidad de alimento que deben ingerir, entre otros, pero prefiero concentrarme sólo en el soporte del peso del animal. Si consideramos una hormiga gigante debemos comprender que

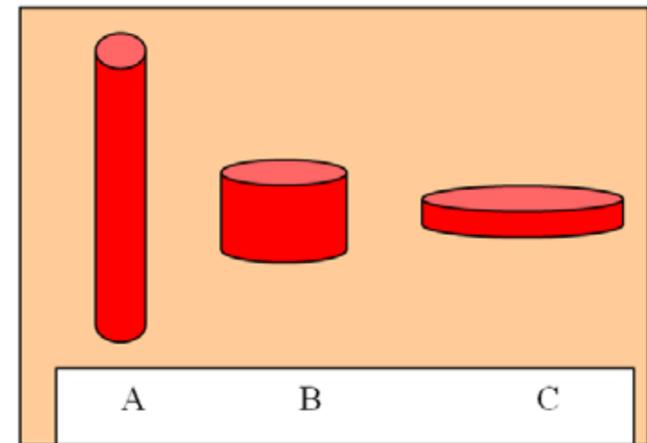


Fig. 7. Cilindros de igual volumen. (A) con preponderancia de altura sobre diámetro. (B) con altura y diámetro iguales. (C) con preponderancia de diámetro sobre altura.

su volumen ha aumentado de manera proporcional al cubo del incremento de sus dimensiones lineales: largo, ancho y alto, del mismo modo que en un cubo. Si sus dimensiones largo, ancho y alto se han duplicado, es decir, han aumentado en un factor 2, el volumen ha crecido en un factor 8 ($2^3=8$). El peso de la hormiga gigante también crece en un factor de 8, ya que depende directamente del volumen (asumiendo que la hormiga gigante tiene la misma densidad en sus tejidos que la hormiga común). Veámoslo para el caso de un cubo:

(22) $V=L^3$. Si el lado L se duplicara, su nuevo lado L' valdría el doble:

(23) $L'=2L$. Y el nuevo volumen V' sería:

(24) $V'=L'^3$. Si reemplazamos (23) en

(24) queda $V'=(2L)^3$. Luego:

(25) $V'=8L^3$. Al reemplazar (22) en (25), da que

(26) $V'=8V$, con lo que queda demostrado que si el lado de un cubo se duplica, su volumen aumenta 8 veces.

Con el mismo razonamiento, si las dimensiones lineales se triplicaran, el volumen y el peso crecerían en un factor de 27 ($3^3=27$). Ese peso debe ser sostenido por las patas. La resistencia de una columna al peso que soporta es proporcional a su sección (área de un corte transversal de la misma). Y cuando las dimensiones lineales se duplican, y el volumen se octuplica, la sección de la columna sólo se cuatriplica. La sección S de una columna cuadrada es:

(27) $S=L^2$. Si L se duplica el nuevo lado L' es:

(28) $L'=2L$. Y la nueva sección S' es:

(29) $S'=L'^2$. Si reemplazamos (28) en

(29) queda $S'=(2L)^2$, y luego

(30) $S'=4L^2$. Y al reemplazar (27) en

(30) queda:

(31) $S'=4S$. Es decir que, si el lado L se duplica, la sección S se cuatriplica.

Dicho todo esto, el peso de la hormiga gigante aumentó tanto como su volu-

men, pero la resistencia de las patas a todo ese peso (al igual que la sección de la pata), aumentó mucho menos, al punto de no poder soportarlo. Conclusión: no puede existir una hormiga gigante que mantenga la forma exacta. Podría ser que sí, pero con patas mucho más gruesas. Esto lo vemos en elefantes, y dinosaurios herbívoros, los cuales tienen patas desproporcionadamente gruesas.

La matemática nos proporciona herramientas para percibir fenómenos que de otro modo pasarían inadvertidos. La matemática potencia a la intuición e ilumina el entendimiento.

ADRIAN FERNANDEZ

[VOLVER](#)

REFERENCIAS

- 1- Universidad de Cantabria. Curso virtual.
- 2- La palabra "cubo" tiene dos significados, ambos relacionados. Aquí, cubo es sinónimo de "tercera potencia", lo cual suele decirse "elevar al cubo". Es decir que el cubo del lado L , es L^3 .
- 3- Del mismo modo, la palabra "cuadrado" tiene dos significados relacionados. Aquí equivale a "segunda potencia", lo que comúnmente se dice "elevar al cuadrado". El otro significado de "cuadrado" es la figura geométrica con lados iguales. La relación entre ambos significados es que la superficie de un cuadrado (figura geométrica), es igual al cuadrado (segunda potencia) del lado, $S=L^2$.
- 4- Este es el otro significado de "cubo": es un cuerpo geométrico que posee largo, ancho y alto, de la misma longitud. Un cubo en la vida real es, por ejemplo, un dado. La relación que hay entre ambos términos "cubo" es la siguiente: el volumen de un cubo (cuerpo geométrico) es el cubo (tercera potencia) del lado, $V=L^3$.

BIBLIOGRAFIA

- Universidad de Cantabria. Curso virtual. Disponible en: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=186§ion=4>
- Agradecimientos
Al Ingeniero Pablo Oneto, y al Doctor en Física Guillermo Venier, por su aporte al esclarecimiento de varios puntos de la biología, comunes a la ingeniería y a la física.

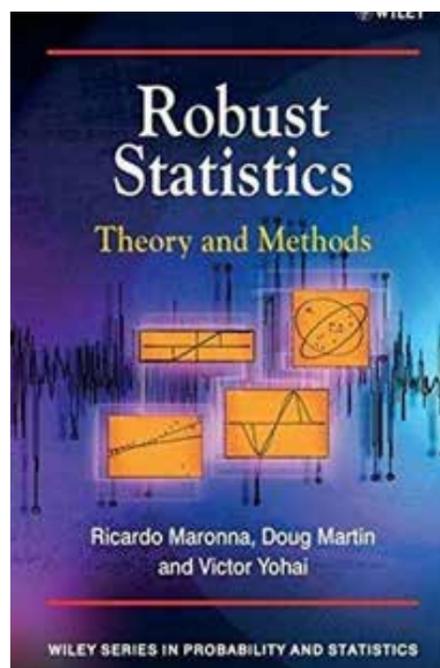

MARÍA DEL CARMEN BANÚS

Lic. En Ciencias Biológicas
Coordinadora de Biología, CBC-UBA

ORGULLOSA MATEMÁTICA

(La belleza de una disciplina fundamental)

Por primera vez desde el año 1964, el prestigioso premio Bunge y Born distingue a un matemático. Su biografía, la belleza en la matemática y sus opiniones sobre la educación en Argentina en un rápido recorrido, recogido de diversas fuentes.



Quizás porque este año es el año de la matemática biológica, o quizás porque venía siendo reconocida de manera solapada, en los galardones recibidos por físicos, agrónomos, ingenieros, médicos y biólogos. Lo cierto es que la matemática está en todo y ha llegado su hora, por eso, este año, el célebre premio Bunge y Born homenajea por primera vez a un matemático. Víctor Jaime Yohai, es un estadístico argentino, Investigador Superior de CONICET y profesor emérito de la Universidad de Buenos Aires, doctor en estadística por University of California (Berkeley, Estados Unidos), trabajó en Venezuela, California, Chile, publicó 121 artículos en revistas especializadas, recibió 12 premios y distinciones, disertó en 57 congresos nacionales, regionales e internacionales y fue profesor visitante en universidades de Washington, Vancouver, Río de Janeiro, Madrid y Lausana. Su trabajo se ha centrado principalmente en el campo de los Métodos Estadísticos Robustos. La *estadística robusta* es una aproximación alternativa a los métodos estadísticos clásicos. El objeto es producir estimadores que no sean afectados por variaciones pequeñas respecto a las hipótesis de los modelos. Las estadísticas robustas intentan proporcionar métodos que emulan a los métodos clásicos, pero que no son afectados indebidamente por valores atípicos u otras pequeñas discrepancias respecto de las asunciones del modelo. Desafortunadamente, cuando hay valores atípicos en los datos, los resultados producidos por los métodos clásicos son a menudo de baja calidad. Leemos en <http://nexciencia.exactas.uba.ar/victor-yohai-ganador-premio-bunge-born-2018-matematica-estadistica>: “Ha sido una enorme sorpresa y, además, un gran honor. Para mí es una gran satisfacción que me hayan elegido teniendo en cuenta que es la primera vez que el premio se da en matemática”, asegura Víctor Yohai con alegría, casi como si reviviera el momento en el que se enteró del galardón. Y completa: “También me hace feliz que haya elegido un área de la matemática como la estadística, que es de matemática aplicada, un jurado que estaba conformado mayoritariamente por personas que se dedican a la matemática pura. Es como que se llegó a un consenso sobre la importancia de la matemática aplicada en general, y de la estadística en particular. Más allá de mi nombre”. Justamente, en su comunicación oficial, la Fundación explicitó las razones por las cuales se inclinó a premiar a dos representantes del ámbito de la matemática, cosa que no había ocurrido nunca desde 1964. “Esta premiación pone de relieve la trascendencia de una disciplina que aporta fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas tanto para las ciencias sociales y del comportamiento como para la ingeniería, la computación, la geografía, las ciencias biológicas o la música. La matemática es un factor clave para la formación de capital humano y el progreso tecnológico, y constituye un imperativo para el desarrollo económico y social de nuestro país”. A lo largo de su carrera Yohai ha sido reconocido en numerosas ocasiones. Entre otras, recibió el Mahalanobis Award, otorgado por el Estado de la India; el premio Konex de Platino; fue nombrado Fellow por el Institute of Mathematical Statistics, y Doctor honoris causa por la Universidad Carlos III de Madrid.

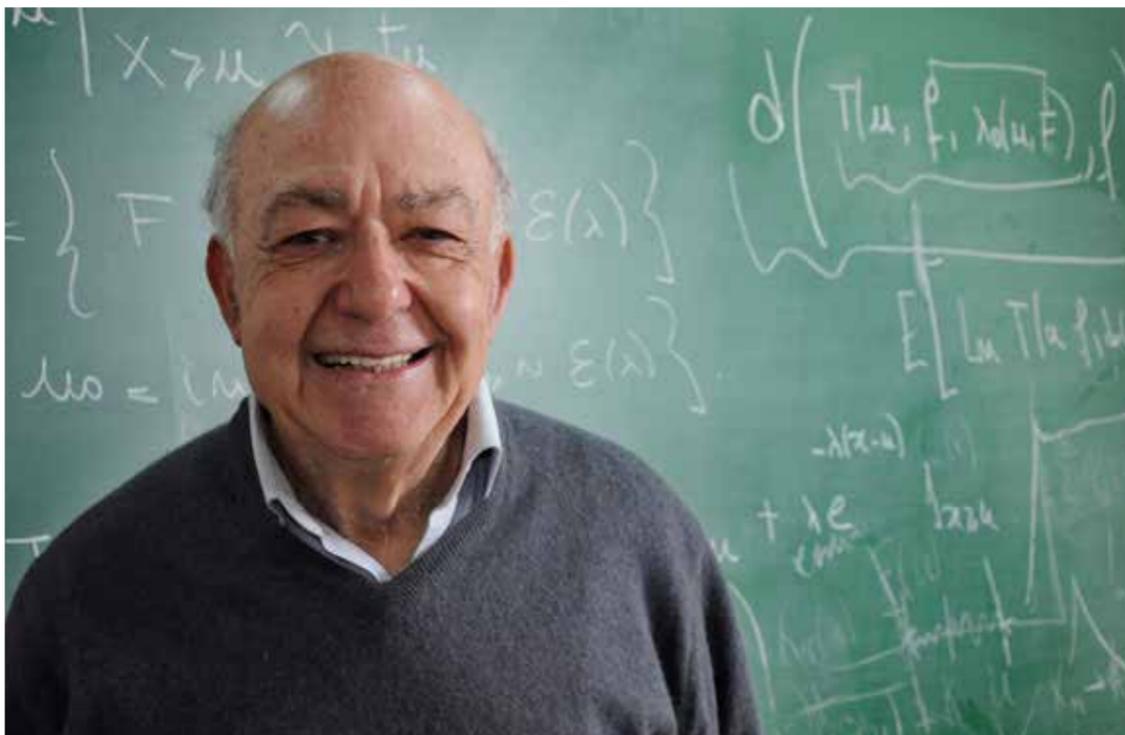
Hijo de un inmigrante judío sefardita, casi analfabeto, que comenzó como vendedor ambulante y llegó a tener una tienda importante y una madre que completó la escuela primaria, a Yohai siempre le gustó la matemática desde su educación inicial. En la secundaria le siguió resultando fácil y recuerda a una profesora muy buena que tuvo durante cuatro años seguidos. Sin embargo, lo atraían muchas materias. “Yo tenía interés también por historia, filosofía, pero la diferencia con la matemática, es que el único criterio para establecer la verdad de una teoría o de un resultado, deriva de la lógica. Una vez alcanzado ya nadie va a discutirlo. En cambio, en ciencias sociales hay muchos elementos ideológicos, políticos, religiosos que entran en consideración. Entonces el criterio de verdad es mucho menos estricto y uno puede dudar. Por eso, la matemática me daba una seguridad plena y en mi inseguridad de adolescente eso era algo muy importante”, recuerda Yohai con algo de humor.

En busca de esas verdades inmovibles se dirigió entonces a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA para realizar la licenciatura en Matemática. De su cursada recuerda con particular cariño a dos profesores. “Misha Kotlar, una persona extraordinaria, y Gregorio Klimovsky, un profesor increíble, nunca tuve otro igual. Ambos eran casi autodidactas y me enseñaron a disfrutar de la matemática”.

A lo largo de la carrera se estudiaba casi exclusivamente matemática pura y le encantaba. “Me atraía mucho. Es que tiene un sentido de belleza que es muy profundo”. Sin embargo a la hora de definir su futuro, Yohai decidió que quería dedicarse a algo más aplicado y eligió la estadística. “Es cierto que las teorías más abstractas de la matemática pura, muchas veces, con el correr de los años, resultaron claves para resolver numerosos problemas prácticos. Sin embargo, a esa edad, yo tenía inquietudes sociales y necesitaba que mi investigación tuviera una aplicación segura y en corto tiempo. Esa fue una de las razones que me hicieron elegir la estadística”, explica. Dado que, por esos años, en Argentina, prácticamente no se hacía investigación en estadística Yohai viajó a Estados Unidos para hacer su doctorado en Berkeley, California. “Encontré excelentes profesores y un departamento en donde se le daba importancia a los aspectos matemáticos de la estadística, lo que hizo que mi rompimiento con la matemática pura fuera gradual. Allí encontré una fórmula de trabajo que después usé toda mi vida: trabajar en problemas que requieren mucha matemática, pero que, al mismo tiempo, tengan utilidad para el análisis de datos, que es lo que le importa a la estadística”, precisa.

“LA MATEMÁTICA TIENE UN PROFUNDO SENTIDO DE LA BELLEZA”

Para una persona que sabe disfrutar de “la belleza profunda de la matemática”, debe ser muy difícil de aceptar que su disciplina amada, sea considerada por la mayoría de los estudiantes como un verdadero “cuco”, quizá la materia más temida y más odiado por los alumnos. Sin embargo, para él resulta claro el origen de este equívoco. “Es que la enseñanza de la matemática está muy deteriorada. En general, la forma de transmitirla es a través de reglas nemotécnicas para recordar determinadas fórmulas pero, por qué esa regla, qué hay detrás de eso, ni siquiera el profesor lo sabe, en muchos casos. Entonces, creo que para poder interesar a los alumnos hay que cambiar la formación de los profesores. Una cosa importante sería que los profesores se formaran en la universidad”. “La matemática tiene, para los que nos gusta, una belleza sin igual. A veces es difícil transmitirla a una persona que está afuera, por qué la matemática es bella. Las demostraciones son bellas y los resultados son de una profundidad que hace que uno lo sienta bello. Un matemático famoso húngaro, Paul Erdos, dijo: ‘Explicar por qué la matemática es bella es como explicar por qué la novena sinfonía de Beethoven es bella. El que no se da cuenta solo, no lo va a entender’”.



Define a la matemática como una herramienta que no hace descubrimientos, sino que los produce: “La matemática es fundamental para la física, por ejemplo, pero lo que se conoce es el resultado de física. Einstein formuló la teoría de la relatividad, pero para eso tuvo que usar mucha matemática. Si no hubiera existido la matemática, no lo hubiera podido hacer”.

También encuentra raíces matemáticas en el diagnóstico de un médico, en la receta de una droga, en el pronóstico del tiempo, en el cálculo de un ingeniero. Yohai valora mucho el trabajo realizado por Adrián Paenza y otros divulgadores que, a partir de libros y artículos en los diarios, han logrado cambiar la imagen de la matemática y hacerla más popular en la sociedad. “Contrariamente con lo que pasa en la escuela, los libros de Paenza son amenos porque plantean los problemas de una manera inteligente y atractiva. Entonces, despiertan el interés de muchos de los jóvenes que después van a la escuela y son aplazados”. Durante los últimos años se impulsó, discursivamente y con recursos, los aportes que las ciencias en general y la matemática en particular podían ofrecer para el desarrollo tecnológico nacional. Posición que en los últimos tiempos se llevó al extremo cuando algún funcionario intentó dividir la ciencia en “útil” e “inútil”. ¿Qué opina Yohai al respecto? “Creo que hay varias ramas de la matemática aplicada que pueden hacer contribuciones importantes con aplicaciones en el ámbito industrial. Pero creo que se equivocan algunas voces que se levantan priorizando la ciencia aplicada o las aplicaciones tecnológicas respecto de la ciencia básica. Las dos son importantes y no puede haber una sin la otra”, sostiene. A los 79 años, este matemático multipremiado, mantiene una vitalidad envidiable y asegura que va a seguir investigando. “No voy a dejar de hacerlo, es mi vida. Y lo sigo haciendo con el mismo entusiasmo de siempre”. Además continúa teniendo alumnos de doctorado, aunque ha dejado de dar clases. “Es que me cansan un poco”.

Mirando hacia el futuro Yohai dice sentirse satisfecho y tranquilo por el trabajo que vienen realizando grupos liderados por jóvenes investigadores. “El nivel de la matemática argentina es muy bueno, tanto en las áreas de matemática pura como de estadística. Hay muchos jóvenes que publican en las mejores revistas y que son invitados los congresos internacionales más prestigiosos. Es decir que, en el exterior, se aprecia lo que se hace en Argentina. Tenemos un futuro promisorio”.

MARIA DEL CARMEN BANUS

[VOLVER](#)



ANA I. BORTHAGARAY^{1,2}MIGUEL A. FUENTES^{3,4}PABLO A. MARQUET^{1,2,3}**Afiliaciones**

¹Center for Advanced Studies in Ecology and Biodiversity and Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago CP 6513677, Chile. ²Instituto de Ecología y Biodiversidad, Casilla 653, Santiago, Chile. ³Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501, USA. ⁴Instituto de Investigaciones Filosóficas, Sociedad Argentina de Análisis Filosófico (IIF-SADAF), Bulnes 642, Buenos Aires 1176. borthagaray@gmail.com; fuentesm@santafe.edu; pmarquet@bio.puc.cl

ECOSISTEMAS EN LA NIEBLA... PATRONES EN LA FORMACION DE VEGETACION¹

La formación de patrones de vegetación es una característica llamativa de varios ecosistemas con agua limitada en todo el mundo. Aquí, mostramos que patrones de bandas en la vegetación pueden emerger en áreas sin lluvia y en plantas sin raíz funcional (*Bromelia Tillandsia landbeckii*) y donde la niebla es la principal fuente de humedad. Mostramos que un modelo simple basado en la advección del agua de niebla por el viento y su intercepción por la vegetación puede reproducir patrones de bandas que coinciden con los patrones empíricos observados en el desierto costero de Atacama. Este modelo predice cómo los parámetros pueden afectar las condiciones para formar el patrón de bandas, mostrando una transición desde un estado con vegetación uniforme, con una entrada de agua importante o pendiente del terreno a un estado desértico con estados de bandas bien definidas. Además, el modelo predice que la longitud de onda del patrón es una función no lineal decreciente de la entrada y la pendiente del agua de niebla, y una función creciente de las pérdidas (o ineficiencia en la captura) de alimento que puede tener la planta y la velocidad del flujo del agua de niebla. Finalmente, se puede ver que la densidad de la vegetación se incrementa por la formación del patrón regular en comparación con la densidad esperada por el modelo espacialmente homogéneo que enfatiza la importancia de la autoorganización en los ecosistemas áridos.

INTRODUCCIÓN

La formación de patrones de vegetación se ha estudiado empírica y teóricamente en numerosos sistemas ecológicos, incluidos los ecosistemas áridos y semiáridos, turberas y marismas². En los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, en particular, la interacción entre una cantidad limitada de agua y la vegetación puede conducir a la aparición de una disposición espacial espontánea de la vegetación o la formación de patrones. Una característica común interesante en estos ecosistemas es que el paisaje físico (es decir, topografía y geomorfología) impone restricciones a la orientación y las velocidades de los flujos de materiales como agua, nutrientes, sedimentos y semillas. En respuesta, la vegetación tiende a producir patrones espaciales específicos con una geometría claramente definida. Un ejemplo sorprendente son los patrones de vegetación con bandas generalmente descritos en sistemas con pendientes suaves, que restringen los flujos de agua y nutrientes a lo largo de una dirección espacial a lo largo de las cuales se desarrollan bandas de vegetación, perpendiculares a la dirección de tales flujos. Se han propuesto varias hipótesis para comprender la formación y el mantenimiento de los patrones de vegetación en bandas en ecosistemas de agua limitada³. En general, se cree que estos patrones surgen como consecuencia de la interacción entre dos componentes que actúan en escalas espaciales ligeramente diferentes. Por un lado, existe cooperación local entre individuos (plantas) vecinas para concentrar los recursos escasos en ciertas zonas (interceptando el flujo de materiales), lo que aumenta la probabilidad de establecimiento, crecimiento y supervivencia de la planta. Por otro lado, el agotamiento de los recursos por la vegetación resulta en un efecto neto negativo sobre sus tasas de crecimiento en una escala espacial ligeramente más grande. Por lo general, los efectos positivos favorecen las condiciones ambientales, como la reducción de la pérdida de humedad del suelo o la protección contra los herbívoros, mientras que los efectos negativos se atribuyen a la competencia por los recursos.

Sin embargo, esta situación no es de ninguna manera general. Como mostramos en este trabajo, los patrones de bandas en la vegetación pueden emerger en áreas sin lluvia y en plantas sin raíz funcional como es el caso del Desierto de Atacama en el norte de Chile, el ecosistema más árido del mundo (con promedio anual de precipitación de 2 mm entre 1905 y 2001). Aquí, el agua de niebla es la principal fuente de humedad que se desplaza hacia el interior desde el Océano Pacífico por los vientos del oeste, que constituye el sistema de viento prevaleciente a lo largo de la costa oeste de Sudamérica. La interacción entre la niebla y la topografía local del sistema da lugar a la formación de parches aislados que consisten en bandas vegetadas paralelas de la bromelia *Tillandsia landbeckii*, una especie epiarénica que carece de raíces funcionales. En este trabajo, desarrollamos un modelo que describe dinámicamente la biomasa de *Tillandsia landbeckii*, planta que se encuentra en Perú y Chile, es común en sus franjas costeras, donde forma extensos campos en arena. Se encuentra generalmente a alturas entre 600 y 1200 msnm donde está expuesta a la influencia de la neblina costera, la camanchaca, y llega a alcanzar 40 cm de altura. Vamos a realizar un modelo matemático que utilizando (entre otros) el suministro de agua de niebla explica la aparición del patrón de vegetación en bandas observado en el desierto de Atacama (201290 S – 201260 S, Fig. 1a).

MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual para explicar la formación del patrón por *Tillandsia landbeckii* en el Desierto de Atacama es el siguiente (ver Fig. 1b). El agua de niebla es movida por el viento y es interceptada por la biomasa de la planta. La mayor interceptación de agua facilita el crecimiento de la vegetación en un rango local. Dado que *T. landbeckii* no tiene un sistema de raíces funcional, suponemos que la cantidad de niebla interceptada está directamente asociada con el dosel o su biomasa más alta. Por lo tanto, una mayor densidad de vegetación permite una mayor interceptación de agua. Además, la propagación de vegetación es lenta en comparación con el flujo de agua de niebla, lo que hace que el efecto del agotamiento del agua de niebla por la vegetación crea una sombra de niebla o un área donde la entrada de agua de niebla no permite el crecimiento de la planta. Cuando la disponibilidad de suministro de agua de niebla es suficiente para el establecimiento y crecimiento de la planta (es decir, a cierta distancia de la banda antes del flujo) se desarrolla una nueva banda. A continuación, brindamos soporte a esta hipótesis mediante un modelo espacialmente explícito.

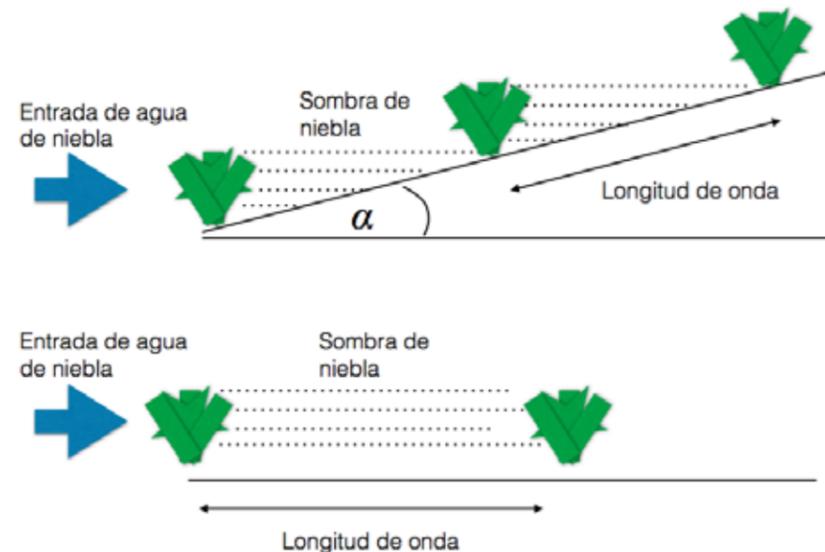


Fig. 1. a) Fotografía aérea de un patrón de vegetación en el desierto de Atacama, norte de Chile. La escala es de aproximadamente 400 x 200 m. La fotografía fue tomada de Google Earth. b) Modelo conceptual de la formación del patrón con los parámetros como en el modelo matemático (ver el texto y la Tabla I para más detalles).

MODELO MATEMÁTICO

Utilizamos el modelo propuesto por Klausmeier (1999) para un ecosistema dependiente de flujo de agua, pero lo modificamos para incluir un flujo advec-

tivo de agua de niebla. También incorporamos en nuestro modelo un parámetro, que pondera la topografía o la pendiente del terreno, lo que modifica la captura efectiva de agua (en lo sucesivo denominada *ECW* -*effective capture of water*) por la biomasa de la planta. Tal que *ECW* es más bajo en un terreno horizontal, mientras que el efecto inverso se espera en un terreno inclinado. En este último caso, un aumento en la biomasa de la planta en contacto con las entradas de agua de niebla mejora la *ECW*. Nuestro modelo se compone de un conjunto de dos ecuaciones

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = W_0 - RW(x,t) - \alpha cW(x,t)B(x,t)^2 + V \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} \quad 1$$

$$\frac{\partial B(x,t)}{\partial t} = e\alpha cW(x,t)B(x,t)^2 - MB(x,t) + D \frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial x^2} \quad 2$$

diferenciales parciales que describen la tasa de cambio en la biomasa de la planta, $B [g m^{-2}]$, y el agua de niebla, $W [mm]$, en el espacio y el tiempo. La dinámica de cada variable de estado se expresa mediante un término de reacción y un término de difusión o advección de la siguiente manera:

Veamos cada ecuación por separado. La ecuación (1) contiene un término fuente W_0 que representa los aportes de agua de niebla supuestamente constantes y uniformes, y dos términos de pérdida: una merma independiente de la biomasa RW , que representa la evaporación (R es el factor de evaporación por unidad de tiempo), y un segundo término αcWB^2 que representa la captación de agua de la planta, de modo que un aumento en la biomasa se asocia con un aumento en la cantidad de agua interceptada. El parámetro c es la constante de consumo y α está relacionado con el efecto de la topografía (pendiente) en la *ECW*. Es un parámetro adimensional que oscila en el intervalo $[0, 1]$ y corresponde a una pendiente normalizada que vale 0 para un suelo horizontal y 1 para un terreno a 90° de la horizontal. El movimiento de la niebla de agua por el viento se modela por un término de advección $V \partial W(x,t)/\partial x$, donde V es la velocidad del viento. En otras palabras, la cantidad de agua de niebla que pasa por cierto lugar por unidad de tiempo es la que proviene inicialmente menos la que ha sido interceptada por la planta y luego evaporada y también menos la que ha sido interceptada por la planta y absorbido para su crecimiento, más un término que suma como si el agua de niebla fuera una cantidad efectivamente mayor debido a la velocidad del viento y a la manera en que el agua de niebla se distribuye a lo largo del terreno por el que se desplaza la niebla.

Por otra parte, en la ecuación (2) muestra que el crecimiento de la planta (su biomasa) en el tiempo depende, en primer lugar, de lo que ha podido interceptar y absorber para su crecimiento, representado en el primer término, que es justamente la cantidad que se contemplaba en el tercer término de la primera ecuación, multiplicado por el parámetro e que indica en qué medida el agua absorbida se transforma efectivamente en crecimiento de la planta. Por otra parte, suponemos que hay una porción de mortalidad que no depende de la densidad, pero depende de la cantidad de biomasa y está dado por el segundo término MB , que resta biomasa al sistema.

Por último, el tercer término representa el crecimiento lateral por difusión en la que D es el coeficiente de crecimiento de las bandas (que permite el crecimen-

to en el sentido longitudinal de la banda, transversal al flujo de agua de niebla). Para esta segunda ecuación entonces, la vegetación crece a lo largo y a lo ancho de cierta zona en cierto lapso en función de la eficacia con la que convierte en biomasa el agua interceptada en la dirección de afluencia de agua de niebla y de su capacidad de difundirse en todas direcciones independientemente de ese flujo de agua, menos la cantidad de biomasa que muere durante ese lapso. Notemos que ambas ecuaciones están acopladas ya que por un lado el flujo de agua de niebla a través de una franja de vegetación disminuye por ser capturada en esa franja y la cantidad que es capturada depende de la cantidad de biomasa existente en esa franja. Por otra parte, el crecimiento de la biomasa de cada franja depende del flujo de agua de niebla que recibe, que es resultado de la interacción del flujo de agua de niebla con las franjas de vegetación anteriores que han recibido la niebla. De este modo se establecen relaciones que se realimentan una con la información de la otra: el flujo de agua de niebla en cierta parte del terreno depende de sus interacciones anteriores y de la captura por parte de las plantas y a su vez, el crecimiento de las plantas y la biomasa existente en cada parte del terreno depende de la cantidad de agua de niebla que esas plantas han podido absorber del flujo de agua que les llega. La Tabla I muestra la lista de los parámetros del modelo, sus unidades y los valores numéricos obtenidos de la literatura y en el campo.

Tabla I. Parámetros utilizados en el modelo, sus valores y unidades.

Símbolo	Interpretación	Unidades	Valor numérico
B	Biomasa de las plantas	g m^{-2}	-
W	Agua de niebla	mm	-
t	tiempo	día	-
x	espacio	m	-
W_0	Provisión de agua de niebla	mm día^{-1}	0,07
R	Factor de evaporación	día^{-1}	1
α	Efecto de la topografía en la captura de agua	adimensional	0,05
c	Agua capturada	$\text{m}^{-4} \text{g}^{-2} \text{día}^{-1}$	0,3
e	Conversión de agua capturada en efectivo crecimiento de la planta	$\text{g mm}^{-1} \text{m}^{-2}$	12
M	Pérdida de densidad de plantas por mortalidad	día^{-1}	0,0007
V	Viento	m día^{-1}	85000
D	Dispersión de crecimiento lateral	$\text{m}^2 \text{día}^{-1}$	0,00005

ANÁLISIS DEL MODELO

Analizamos nuestro modelo utilizando la teoría de reacción-difusión (de morfogénesis) desarrollada por Turing en 1952, que también ha sido aplicada en ecología para relacionar los patrones espaciales del ecosistema con los mecanismos subyacentes. Brevemente, Turing sugirió que, bajo ciertas condiciones, dos especies químicas pueden reaccionar y difundirse de manera tal que producen patrones espaciales heterogéneos en sus concentraciones químicas⁴. Esto im-

plica que, en ausencia de difusión, los productos químicos tienden a un estado estable constante, pero bajo ciertas condiciones, puede evolucionar por inestabilidad impulsada por la difusión, un patrón espacialmente no homogéneo. En nuestro modelo, la inestabilidad que promueve la formación del patrón⁵ de bandas no es inducida por la difusión, sino por el término de advección relacionado con el flujo de agua de niebla. Sin embargo, aunque la descripción matemática de la dinámica puede ser diferente, es esencialmente el mismo mecanismo físico, descrito tempranamente por Turing, que induce la formación del patrón, que comúnmente se denomina “inestabilidad por ruptura de simetría.” Las condiciones requeridas para la aparición de la formación del patrón es que el modelo completo tiende a un estado estable uniforme en ausencia de cualquier efecto espacial, pero a un estado inestable cuando está perturbado espacialmente.

RESULTADOS

CONDICIÓN PARA FORMACIÓN DE PATRONES

En primer lugar, se resuelve el comportamiento del modelo no espacial (es decir, sin derivadas espaciales). Como lo muestra Klausmeier (1999), el modelo no espacial tiene tres estados estables correspondientes a los equilibrios espacialmente homogéneos del modelo completo. Uno de ellos es un estado estacionario trivial que consiste en suelo desnudo sin plantas, el cual es linealmente estable. Hay otros dos estados estables (distintos de cero), uno que siempre es inestable y el otro que es de equilibrio. Este último es clave, ya que a partir de él se desarrolla el patrón de franjas. Llamémoslo W_{est} ya que es un estado de flujo de agua de lluvia que da lugar a un estado estable de crecimiento de plantas.

El siguiente paso es determinar en qué condiciones este estado estable no trivial es inestable a pequeñas perturbaciones heterogéneas. El tratamiento matemático⁶ da como resultado que para cierto rango de los valores de los parámetros de flujo inicial, la pendiente del terreno, el viento y la tasa de mortalidad vegetal, encontramos un patrón de franjas de vegetación que tiene lugar entre dos extremos, en uno de ellos la vegetación resulta homogénea y en el otro extremo de esos rangos, resulta inexistente dando como resultado un paisaje desértico.

EFFECTO DE LOS PARÁMETROS EN LA DINÁMICA DEL MODELO

El efecto de los parámetros W_0 , α , M y V en el comportamiento del modelo se muestra en las Figuras 2 y 3. En todos los casos, se indica la transición de un estado desértico sin vegetación, a través de un estado de vegetación rayada, a un estado de vegetación homogénea (flecha negra en las figuras 2 y 3). En general, W_0 y α , afectan la dinámica del modelo en la misma dirección pero opuesto al efecto de M o V . Es decir, a medida que aumentan W_0 y α , el modelo predice una transición de un estado desnudo sin vegetación, a través de un estado de vegetación rayada, a un estado de vegetación homogéneo (figura 2a) y se observa la tendencia inversa si M y V aumentan (Fig. 2b). Como era de esperar, un aumento en α puede dar lugar a un patrón de vegetación con bandas aunque W_0 sea bajo, al aumentar el ECW. Como se muestra en la Figura 2b, el límite entre el patrón rayado y el estado desértico es independiente de V y está determinado únicamente por M . Una situación similar se observa en las Figuras (3a-b) para el efecto de V sobre W_0 y α . Finalmente, a medida que M disminuye y W_0 o α aumentan, el modelo predice una transición de un estado desnudo a un estado homogéneo con vegetación (Figuras 3c-d).

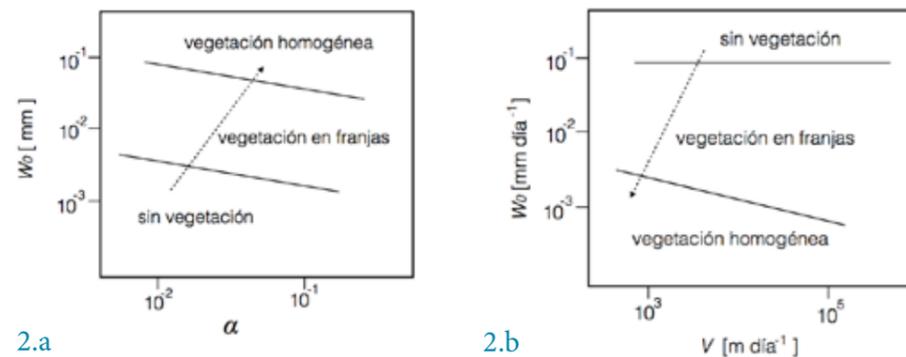


Fig. 2. Espacio de parámetros bajo el cual el modelo predice una transición de un estado desnudo sin vegetación a un estado de vegetación homogénea, indicado con flechas negras. En a) la transición se logra cuando W_0 y α aumentan, mientras que en b) se observa una situación similar a medida que M y V disminuyen. Todos los parámetros están en una escala logarítmica.

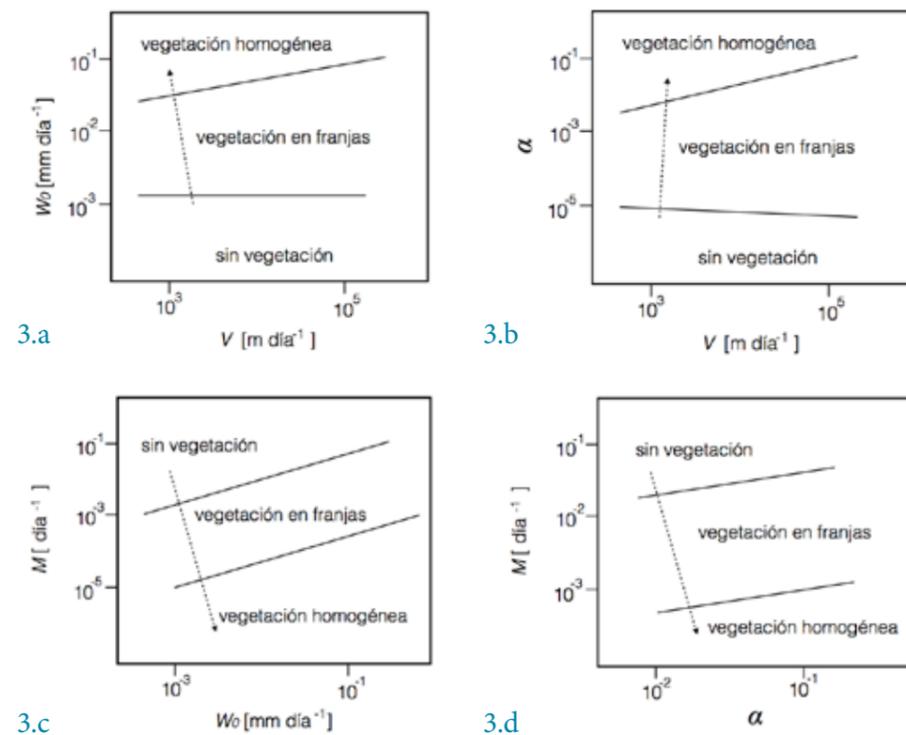


Fig. 3. Espacio de parámetros bajo el cual el modelo predice una transición desde un estado desnudo sin vegetación a un estado de vegetación homogénea, indicado con flechas negras. En a-b) la transición se logra cuando W_0 o α aumentan y V disminuye mientras que en c-d) cuando W_0 o α aumentan y M disminuye. Todos los parámetros están en una escala logarítmica.

Los valores críticos a los cuales ocurre un cambio repentino entre el desierto y los estados vegetados se presentan en la **Figura 4**. Los puntos críticos son $W_{0c} = 0,001 \text{ mm día}^{-1}$ (**Figura 4a**), $R_c = 5,40 \text{ day}^{-1}$ (**Figura 4b**) and $M_0 = 0,05 \text{ day}^{-1}$ (**Figura 4c**). Cuando $W_0 < W_{0c}$ o $R > R_c$ y $M > M_0$ solo es posible el estado desértico. Es bastante intuitivo que si el flujo de agua de niebla es menor que el flujo crítico, o bien el factor de evaporación es mayor que el factor de evaporación crítica y que la tasa de mortalidad vegetal es mayor que la crítica, el resultado sea finalmente el estado desértico. En cambio, por encima de W_{0c} o por debajo de R_c y de M_c se observa el segundo estado estable desde el que se forma el patrón de franjas.

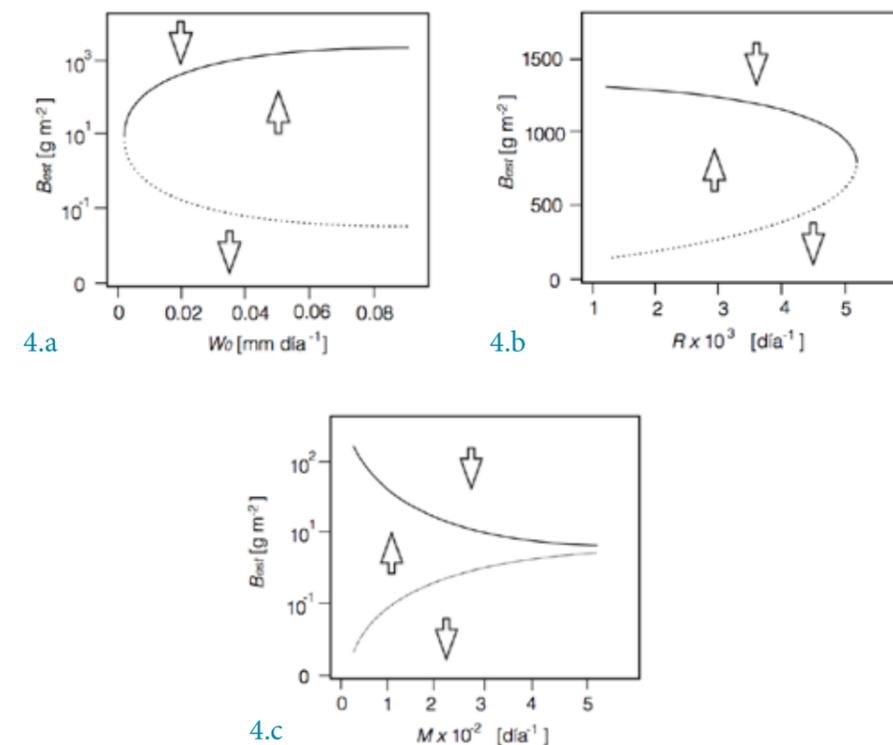


Fig. 4. Diagramas de bifurcaciones para: a) W_0 , b) R y c) M . Las líneas continuas representan los estados estables mientras que las líneas discontinuas representan los estados inestables. En todos los casos, las flechas indican la dirección del cambio en la biomasa de la planta (ver el texto para los valores de umbral en los que se observa la bifurcación en el modelo). En a) y c) $Best$ está en escala logarítmica.

EFEECTO DE LOS PARÁMETROS EN LA GEOMETRÍA DEL PATRON

Utilizando los valores de los parámetros dados en la **Tabla I**, nuestro modelo predice longitudes de onda para el patrón de vegetación con bandas que van desde 2,5 m hasta 12 m. Esta longitud de onda es la longitud entre dos picos consecutivos de biomasa, que es la distancia desde el medio de dos bandas consecutivas. La relación entre la longitud de onda ζ del patrón y los cuatro parámetros se muestra en la **figura 5**. El modelo predice una relación no lineal negativa entre ζ y W_0 (**figura 5a**) y entre ζ y α (**figura 5b**). Esto significa que a medida que aumenta la entrada de agua de niebla o la pendiente del terreno, se reduce la distancia esperada entre las bandas. Por otro lado, se espera una relación positiva no lineal entre ζ y M (**Fig. 5c**) y entre ζ y V (**Fig. 5d**). En general, la relación entre la longitud de onda del patrón y los parámetros que se muestran en la **Figura 5** están de acuerdo con los efectos de estos parámetros en la dinámica del modelo como se mencionó anteriormente.

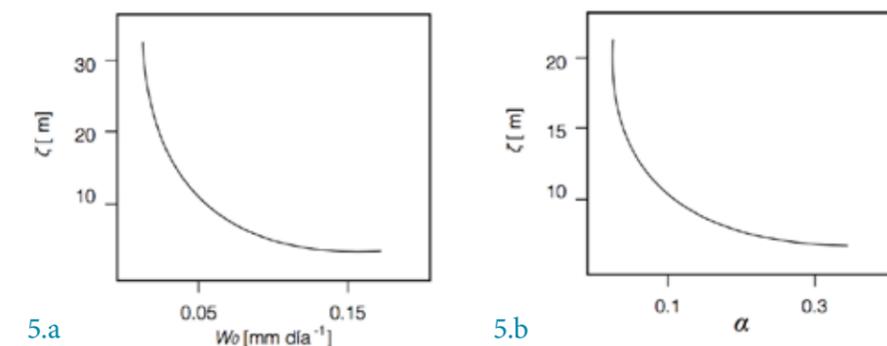
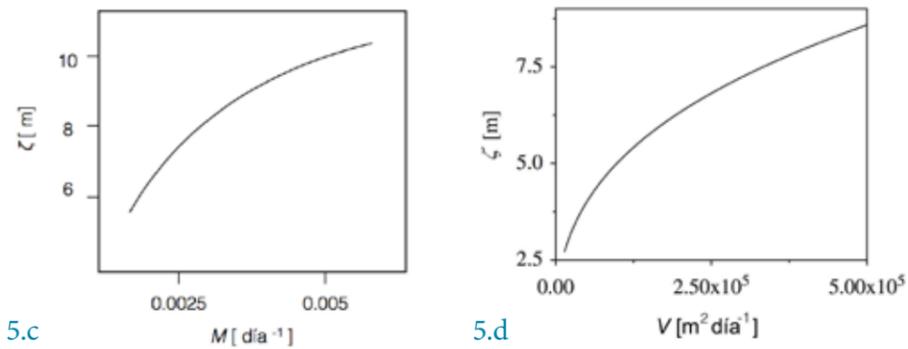


Fig. 5. Relación esperada entre la longitud de onda del patrón y W_0 , α , M y V .

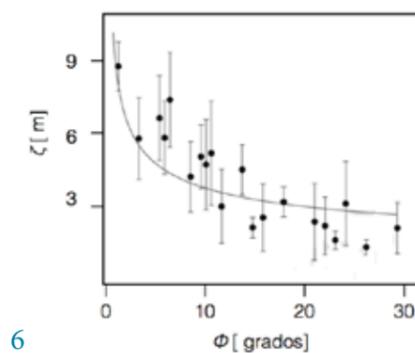


5.c

5.d

Fig. 5. Relación esperada entre la longitud de onda ζ del patrón y W_0 , α , M y V .

En nuestro modelo, el parámetro α se incorporó para tener en cuenta el efecto de la pendiente del terreno sobre la geometría del patrón. En la **Figura 6**, la relación empírica entre la longitud de onda del patrón y la pendiente se muestra de acuerdo con la predicción del modelo, es decir, una disminución en la longitud de onda a medida que aumenta (**figura 5b**). En el campo, el patrón de bandas se observa en colinas con pendientes que varían, en promedio, entre 1° y 30° , que corresponden a longitudes de onda de 3 a 10 metros, respectivamente.



6

Fig. 6. Relación entre la longitud de onda ζ del patrón de bandas y la pendiente del terreno para bandas de *T. landbeckii* (puntos), y la relación entre la longitud de onda esperada por el modelo y el parámetro α (línea completa). Las barras son los intervalos de confianza del 95%.

DISCUSIÓN

Se han descrito patrones de bandas regulares en varios ecosistemas de recursos limitados en todo el mundo y se ha demostrado que resultan de un balance de retroalimentación positiva y negativa entre agua y biomasa, junto con la dispersión. Hasta ahora, la mayoría de los ejemplos de modelos de formación de patrones en bandas provenían de ecosistemas donde el flujo de agua es unidireccional e impulsado por terrenos con pendientes suaves. Aquí, utilizando una versión modificada del modelo propuesto por Klausmeier (1999) demostramos que un modelo simple basado en el desplazamiento del agua de niebla por el viento y su interceptación por la vegetación puede reproducir el patrón de bandas observado en los rodales de *Tillandsia landbeckii* en la costa del Desierto de Atacama. Esta es la primera vez que se modela matemáticamente un patrón de vegetación en forma de bandas producido por la advección del aporte de agua de niebla, lo que contribuye a la hipótesis teórica de la autoorganización espacial como la explicación principal de la aparición de patrones espaciales regulares en ecosistemas de recursos limitados.

Como se destacó anteriormente, dos diferencias clave de este ecosistema con otros que muestran patrones de vegetación con bandas son: 1) es un sistema dependiente de la niebla, por lo que la inclinación del terreno tiene un papel estructural diferente al de interceptar el flujo de niebla advectivo horizontal, en comparación con modelos anteriores⁷ para ecosistemas donde la pendiente del terreno modula el flujo de agua cuesta abajo, y también, 2) las plantas no tienen un sistema de raíz funcional lo que implica que las diferencias espaciales en la tasa de infiltración entre las áreas con vegetación y el suelo desnudo no son importantes para inducir la formación del patrón como se ha propuesto en modelos anteriores. Las plantas de *T. landbeckii* tienen múltiples hojas estrechas cubiertas por densos tricomas que absorben agua en su superficie. Por lo tanto, la interceptación de agua de niebla por la superficie de la vegetación es el proceso clave que da lugar a un patrón de bandas regulares. Dado que la pendiente del terreno modula la interceptación del agua de niebla advectiva, también incorporamos en el modelo un parámetro, que pondera el efecto de la topografía local en la formación del patrón de vegetación. Esta es una diferencia importante con modelos previos en los que el desarrollo del patrón de vegetación está controlado por la pendiente del terreno en la medida en que afecta el flujo de agua superficial cuesta abajo, como anticipamos.

Nuestro modelo predice cómo los parámetros pueden afectar las condiciones bajo las cuales surgirá el patrón de bandas. Muestra que se espera una transición desde un estado vegetativo uniforme, con un alto nivel de agua y / o baja mortalidad de la planta, un estado desértico, con bajo nivel de agua y / o alta mortalidad de plantas, en estados intermedios con bandas. Consistentemente con eso, también encontró que la longitud de onda del patrón es una función decreciente no lineal de la entrada de agua de una niebla y una función creciente no lineal de la mortalidad de la planta. Estos resultados están de acuerdo con los resultados del modelo previamente reportados. Además, Rietkerk et al. (2000) analizando el efecto de la variabilidad del impacto de los herbívoros sobre el patrón de vegetación, provee evidencia empírica sobre el efecto de la pérdida de plantas en la formación del patrón. Del mismo modo, se ha encontrado que la reducción en la cubierta vegetal por la acción de herbívoros más allá de un punto crítico puede conducir a un colapso de la vegetación, lo que es consistente con las predicciones de nuestro modelo. Además, estos autores han observado que la reducción de la cubierta vegetal puede conducir a un pastoreo excesivo en los parches con vegetación restante. Sugieren que la redistribución de los herbívoros crea una retroalimentación positiva entre la reducción de la cobertura y el aumento del pastoreo, lo que puede conducir a un estado desértico.

La mayoría de los modelos muestran que se requieren pendientes suaves para que surja el patrón de bandas, ya que un terreno inclinado permite un flujo unidireccional de hojas de agua de lluvia. Una de las complicaciones de estos análisis es que es difícil separar el efecto de la topografía per se del efecto de la velocidad del flujo de agua sobre la geometría del patrón. De hecho, Sherrat (2005) muestra que la longitud de onda del patrón es una función creciente de la pendiente del terreno, usando la velocidad del flujo descendente como indicativo de la inclinación de la pendiente. En nuestro caso, dado que la entrada de agua depende de la advección de la niebla y es independiente de la inclinación del terreno, podemos distinguir el efecto de la pendiente sobre la geometría del patrón del efecto de la velocidad del flujo de agua de niebla. Nuestro modelo predice que ambos parámetros tienen efectos opuestos sobre la geometría del patrón. Por un lado, la longitud de onda del patrón es una función decreciente no lineal de la inclinación de la

pendiente, mientras que es una función creciente de la velocidad del flujo de agua de niebla. Por lo tanto, la pendiente tiene un efecto similar a la cantidad de entrada de agua de niebla, al aumentar el ECW, mientras que el efecto de la velocidad del flujo de agua de niebla es muy similar al efecto de la pérdida de la planta. Esto implica que si la pendiente es pronunciada, el ecosistema podría tolerar valores más bajos de entrada de agua o mayores valores de pérdida de plantas, en comparación con un escenario plano, y aún así se podría observar el patrón regular. Además, nuestro modelo nos lleva a la hipótesis de que las plantas que crecen en áreas planas estarían más estresadas fisiológicamente como resultado de una menor entrada de agua de niebla.

Nuestro modelo sugiere que la pendiente del terreno podría tener un papel estructural diferente en la formación del patrón que el previamente identificado. En los ecosistemas dependientes de la niebla, la pendiente del terreno determina la captura efectiva de agua de niebla por parte de una planta local debido a los cambios en lo que se ha llamado, un efecto de sombra de niebla. Aquí, la sombra de niebla es el efecto negativo que una banda podría tener en la banda inmediatamente detrás de ella debido a una reducción en la disponibilidad de agua. En general, este efecto inhibitorio en los ecosistemas dependientes de la escorrentía se produce a través del sistema radicular, que permite a la planta extender su influencia más allá de los bordes de la corona aérea y extraer agua y nutrientes de las zonas intercampa creando una sombra o una reducción local en la disponibilidad de recursos. En el desierto de Atacama, la planta responsable de la formación del patrón no tiene un sistema de raíces funcional, como ya hemos mencionado. Sin embargo, los efectos negativos están asociados al hecho de que el agotamiento del agua de niebla por la vegetación en una banda se manifiesta como una disminución en la entrada de agua hasta una distancia, más allá de la cual puede establecerse una nueva banda de cara hacia el viento. Se ha postulado un mecanismo similar para la aparición del patrón espacial regular descrito en los lechos de mejillón. En consecuencia, este efecto de sombra de niebla debería ser más pronunciado en superficies planas, mientras que el efecto opuesto podría esperarse en pendientes más pronunciadas que determinan la geometría, y en particular, la longitud de onda observada en el patrón de bandas. Además, dado que el área estudiada exhibe una amplia gama de pendientes, pudimos probar la predicción del modelo, encontrando un fuerte acuerdo entre el modelo y el patrón observado, validando así el modelo.

Otros factores, no considerados en el modelo, pueden afectar la formación de un patrón de vegetación con bandas al afectar la ECW, y pueden estar asociados a la dispersión observada en la relación entre la pendiente y la longitud de onda (ver Figura 6). Por ejemplo, el contenido de agua en la niebla disminuyó desde el océano (donde se origina la neblina) hasta los rodales Tillandsia debido a la evaporación de las gotas de niebla cuando se proyecta niebla sobre la superficie continental. De manera similar, la niebla ocurre en un rango bien delimitado de altitudes entre 500-1100 m dentro del cual la cantidad de agua de niebla también varía, afectando así la cantidad de agua que podría recibir un soporte de Tillandsia. De hecho, se ha informado en el área estudiada que cuanto mayor sea la elevación en la que se encuentre una planta, mayor será el contenido de agua en la niebla. Además, los regímenes de viento podrían jugar un papel importante en la cantidad de agua presente en la niebla pero principalmente debido a su variación temporal asociada al calentamiento diferencial entre el mar y el continente experimentado durante un día (noches vs. mañana) o durante un año (invierno vs. verano). Finalmente, aparte de estos factores físicos, la eliminación de biomasa vegetal

por herbívoros también podría explicar la variabilidad observada en los rodales de Tillandsia. Sin embargo, aunque se han reportado insectos herbívoros en los rodales de Tillandsia, aún no se han recopilado datos sobre su posible efecto. Aunque, nuestras propias observaciones y monitoreo de tallos a través del tiempo sugieren que el efecto de los herbívoros es mínimo.

La aparición de una formación de patrón en bandas tiene un efecto importante en la productividad de la planta. La simulación numérica demuestra que la cantidad total de biomasa que un área determinada puede soportar aumenta por la formación del patrón regular en comparación con la situación esperada bajo un modelo espacialmente homogéneo. En un estudio reciente se proporciona evidencia experimental que muestra que la formación de patrones en lechos de mejillón mejora el crecimiento individual y la supervivencia, lo que se refleja, en la escala de patrones, en una mayor productividad y resiliencia. Sin embargo, la productividad y la resiliencia pueden no estar siempre positivamente conectadas en la formación del patrón. De hecho, se ha encontrado que los patrones de bandas con longitudes de onda más bajas son más productivos, pero también son más vulnerables a los cambios ambientales, como la reducción de la precipitación.

“En general, este efecto inhibitorio en los ecosistemas dependientes de la escorrentía se produce a través del sistema radicular, que permite a la planta extender su influencia más allá de los bordes de la corona aérea y extraer agua y nutrientes de las zonas intercampa creando una sombra o una reducción local en la disponibilidad de recursos”

El estudio de la formación de patrones puede proporcionar una manera de comprender mejor y crear sistemas de alerta temprana para los impactos del cambio ambiental global, uno de los principales desafíos que tenemos por delante. En esta línea, el modelado de ecosistemas ha permitido avances considerables que generan fuertes predicciones sobre el comportamiento de los ecosistemas reales en condiciones extremas. Por ejemplo, el fenómeno de desertificación (un cambio abrupto a un estado desértico), que es irreversible y principalmente atribuido a una disminución de la precipitación, también puede ocurrir debido a cambios en las condiciones externas que reducen la resiliencia sin afectar el estado de equilibrio del sistema, que parece inalterado hasta que de repente cambia a un estado más degradado. Varios autores han enfatizado que la forma del patrón de vegetación debe tomarse como una señal de advertencia temprana del hecho de que los ecosistemas pueden repentinamente experimentar cambios irreversibles. Esto es especialmente importante si se considera que los ecosistemas áridos y semiáridos se encuentran entre los más sensibles al cambio climático.

En resumen, mostramos en este estudio, por primera vez, que la formación de patrones de vegetación en bandas puede desarrollarse bajo aportes de agua advectiva como en los ecosistemas dependientes de la niebla en el desierto de Atacama. Además, mostramos que los mecanismos, basados en retroalimentaciones de-

pendientes de la escala, son comunes a una variedad de ecosistemas dependientes de la escorrentía árida. También mostramos que la aparición del patrón y su geometría depende de una serie de parámetros, siendo los más importantes la entrada de agua de niebla, la pendiente del terreno, la pérdida de la planta y la velocidad del flujo de agua de niebla. En particular, mostramos que una amplia gama de combinaciones de valores de parámetros podría conducir a un patrón de bandas regulares. Estos resultados contribuyen al creciente cuerpo de estudios que demuestran la importancia de la autoorganización en los ecosistemas áridos.

ANA I. BORTHAGARAY ^{1,2}

MIGUEL A. FUENTES ^{3,4}

PABLO A. MARQUET ^{1,2,3}

[VOLVER](#)

Sakura

REFERENCIAS

- 1.- El presente trabajo es una adaptación por parte del Comité Editorial de Elemental Watson La Revista, a partir del artículo original de sus autores Borthagaray Fuentes y Marquet, 2010. En este proceso se han omitido algunos apartados y varias referencias bibliográficas presentes en el original.
- 2.- Barbier et al., 2006, entre otros.
- 3.- Ver Borgogno et al., 2009 para una revisión.
- 4.- Murray, 2002.
- 5.- Borgogno et al., 2009.
- 6.- Ver detalles en el artículo original de los autores Borthagaray, Fuentes y Marquet, 2010.
- 7.- HilleRisLambers et al., 2001; Rietkerk et al., 2002

BIBLIOGRAFIA

- Barbier, N., Couteron, P., Lejoly, J., Deblauwe, V., Lejeune, O., 2006. Self-organized vegetation patterning as a fingerprint of climate and human impact on semi-arid ecosystems. *J. Ecol.* 94, 537-547.
- Borgogno, F., D'Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., 2009. Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology. *Rev. Geophys.* 47, 1-36.
- Borthagaray, A. I., Fuentes, M. A., & Marquet, P. A. 2010. Vegetation pattern formation in a fog-dependent ecosystem. *Journal of theoretical biology*, 265(1), 18-26.
- HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H. H. T., de Kroon, H., 2001. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. *Ecol.* 82(1), 50-61.
- Klausmeier, C. A., 1999. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation. *Science* 284, 1826-1828.
- Murray, J. D., 2002. *Mathematical Biology*, Springer, Berlin.
- Rietkerk, M., Ketner, P., Burger, J., Hoorens, B., Olf, H., 2000. Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecol.* 148, 207-224.
- Rietkerk, M., Boerlijst, M. C., van Langevelde, F., HilleRisLambers, R., van de Koppel, J., Kumar, L., Prins, H. H. T., de Roos, A. M., 2002. Self-organization of vegetation in arid ecosystems. *Am. Nat.* 160(4), 524-530.
- Sherratt, J. A., 2005. An analysis of vegetation stripe formation in semiarid landscapes. *J. Math. Biol.* 51, 183-197.

El Sakura, es una planta arbórea de la familia de las rosáceas, cuyo origen se remite al Himalaya o a China continental donde solamente hay pocas especies de la misma. En Japón hay de 30 a 40 especies cuyas flores se presentan en forma doble o simple.

Dentro de la historia cultural del Japón, esta flor ocupa un lugar tan privilegiado que se la identifica como la flor nacional. Ya en la época que se registran las primeras escrituras genuinas del Japón, en los años 700 (era de Nara), esta flor aparece en cuantiosos poemas.

A fines de la era Nara, y comienzos de la era Heian (704 d.C) reaparece el Sakura y se la identifica fuertemente con el espíritu japonés. Desde esta época, los guerreros ofrecían poemas escritos en la corteza del árbol de Sakura al emperador en signo de lealtad. Existe desde entonces la creencia de que al cortar un árbol de Sakura, éste sangra, creencia que ha hecho hasta desviar la construcción de la vía férrea en Tokio por no destruir la plantación de una arboleda de Sakura en esta prefectura.

**VICTOR H. PANZA**

Lic. en Ciencias Biológicas
Docente de Biología, CBC-UBA

MATEMÁTICA Y ESTUDIOS FILOGENÉTICOS

Sin la matemática la filogenia moderna sería imposible de realizar.

La filogenia es la determinación de la procedencia de los organismos, es decir, de su historia evolutiva. La utilización de biomoléculas en los estudios filogenéticos, permite determinar relaciones de parentesco y de procedencia, sin que se encuentren fósiles de los antepasados. Esto se puede realizar porque, dos especies que provienen de un único antepasado en común, originalmente poseían una misma secuencia de ADN y las diferencias que hoy presentan estas dos especies, se deben en última instancia, a mutaciones estables que han quedado fijadas en el ADN. Estos análisis se logran mediante la **cladística**, que define las relaciones evolutivas entre los organismos basándose en similitudes derivadas. El método cladista analiza matrices de datos para producir un diagrama de árbol llamado cladograma. Dicho de otra manera, se ven gráficamente las relaciones filogenéticas (de parentesco) entre las especies. Estas relaciones son hipótesis de cuando un taxón deriva de otro.

La robustez de estas hipótesis se puede verificar mediante métodos estadísticos como: medidas de bondad de ajuste de la matriz a los cladogramas, el Índice de Consistencia o técnicas de re-muestreo que prueban la robustez de cada grupo, entre las que se encuentran: bootstrap y re-muestreo simétrico.

Los algoritmos matemáticos que se utilizan para confeccionar redes o árboles filogenéticos determinan una gran diversidad de métodos.

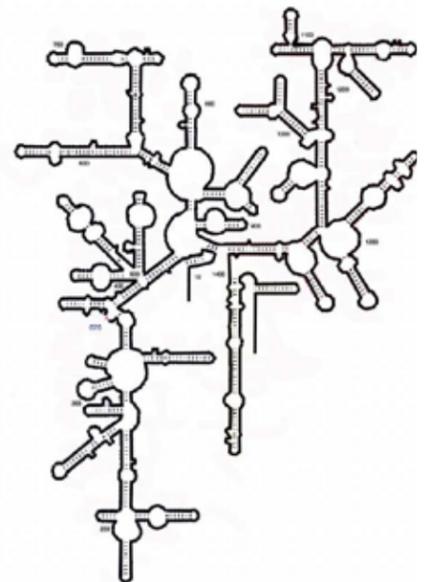
La evolución es un proceso y a la vez, muestra un resultado. El proceso evolutivo se entiende mediante diversas teorías, el resultado de la evolución, se observa en la increíble diversidad biológica que puebla el planeta, en las adaptaciones entre individuos y al ambiente y en las relaciones filogenéticas existentes entre las distintas especies. La filogenia es la determinación de la procedencia de los organismos, es decir, de su historia evolutiva. Se intenta determinar los antecesores de los distintos seres vivos existentes o pasados. Se infiere a partir de estudios comparativos entre los distintos organismos vivos en la actualidad o en el pasado. La utilización de biomoléculas en los estudios filogenéticos, permite determinar relaciones de parentesco y de procedencia, sin que se encuentren fósiles de los antepasados. La base de estos estudios, es la aceptación de que ciertas macromoléculas biológicas sirven como cronómetros evolutivos y dan medidas reales, del cambio evolutivo. Hoy en día, se mide la distancia evolutiva entre dos es-

pecies (el grado de parentesco o cercanía a partir de un ancestro en común del cual divergieron), mediante la diferencia en la secuencia de aminoácidos o nucleótidos, entre macromoléculas homologas de ambas especies. Entre los distintos cronómetros evolutivos se viene utilizando cada vez más el ARNr 16s en procariotas y el ARNr 18s en eucariotas. Su uso se debe a que son moléculas muy antiguas, universalmente distribuidas, funcionalmente constantes, que brindan suficiente información y poseen un tamaño adecuado para su manejo en el laboratorio.

Como si todo esto fuera poco el ARNr presenta secuencias llamadas "secuencias signatura", que son oligonucleótidos cortos característicos de un determinado grupo de organismos. Hay secuencias signatura exclusivas para cada uno de los tres dominios y para los taxones principales de cada uno de ellos. Con estas secuencias se puede ubicar a un organismo desconocido en el grupo filogenético principal que le corresponde. Hay incluso secuencias

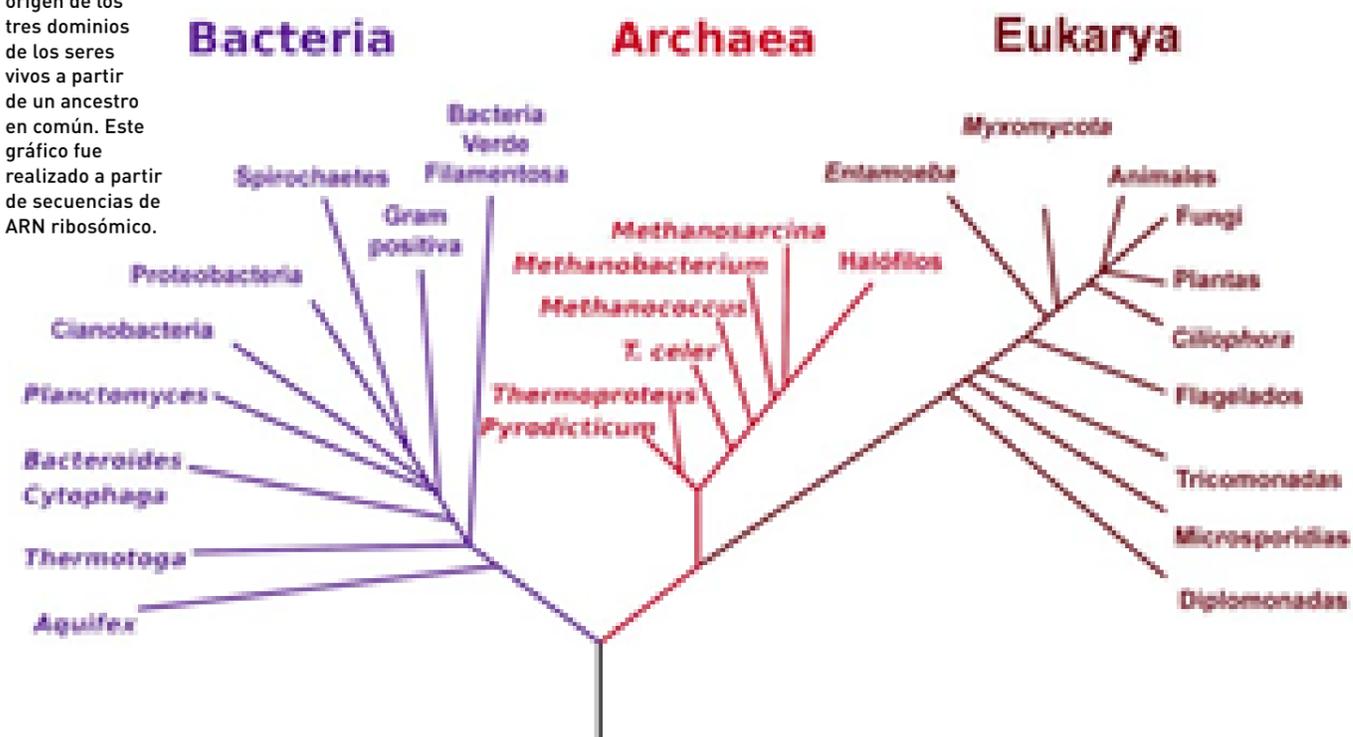
signaturas de una sola base nitrogenada que permiten diferenciar dominios, como es el caso de la adenina presente en la posición 675 del ARNr 16s bacteriano, la cual no se encuentra en el dominio Archaea.

Esquema mostrando la estructura primaria y secundaria del ARNr 16s. En el esquema está marcado el nucleótido 675.



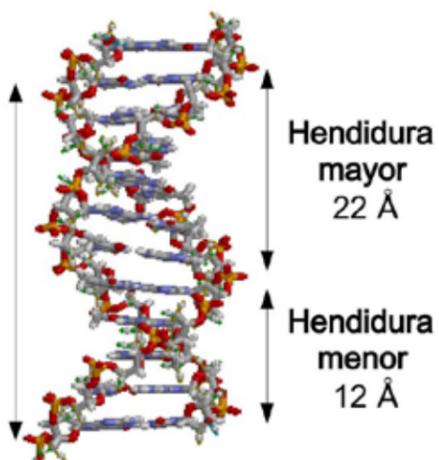
Árbol Filogenético de la Vida

Un cladograma o árbol filogenético mostrando el origen de los tres dominios de los seres vivos a partir de un ancestro en común. Este gráfico fue realizado a partir de secuencias de ARN ribosómico.

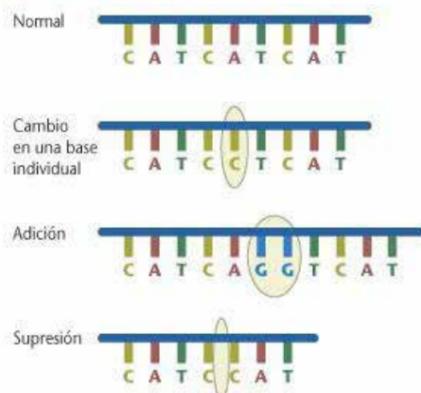


Modelo tridimensional del ADN

Vuelta de hélice
34 Å
10,5 pb



ADN (una cadena)



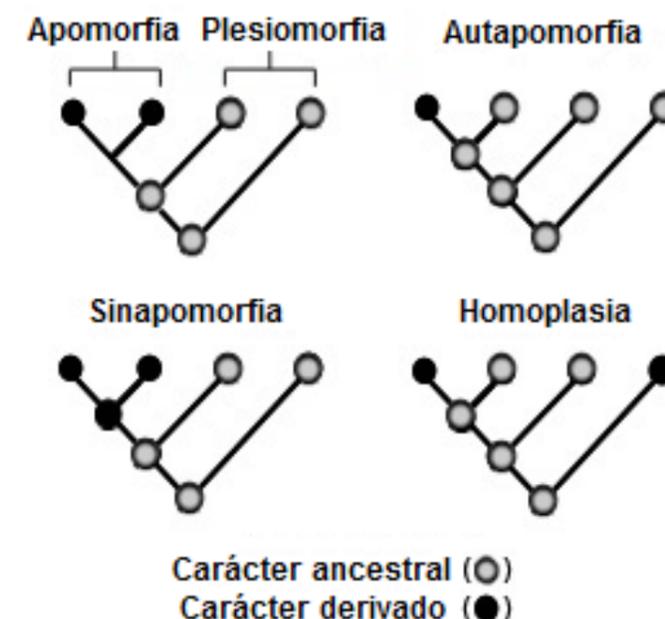
Esquema representando distintos tipos de mutaciones en el ADN.

La consistencia y fiabilidad del uso del ARNr en estudios filogenéticos es tal que, el árbol filogenético universal (de todos los grupos de seres vivos) cambió radicalmente a partir de él. Se pasó de una agrupación de 5 reinos a una agrupación de tres dominios, en los cuales se encuentran incorporados los reinos. ¿Por qué se puede realizar esto? Esto se puede realizar porque, dos especies que provienen de un único antepasado en común, originalmente poseían una misma secuencia de ADN. Las diferencias que hoy presentan estas dos especies, tanto sea a nivel proteico como nucleico, se deben en última instancia, a mutaciones estables que han quedado fijadas en el ADN.

Como la selección natural elimina muchas mutaciones por ser desfavorables y fija otras por resultar favorables en un tiempo en particular, se evita este inconveniente, utilizando zonas del ADN que son no codificantes, no poseen función reguladora, ni poseen ninguna otra función conocida, en las cuales las mutaciones resultan neutras.

La técnica requiere de un análisis estadístico riguroso y debe contemplar una gran diversidad de casos. Para ejemplificar la idea se puede mencionar que hay que tener en cuenta posibilidades estadísticas, como que un nucleótido haya mutado más de una vez. Ejemplo de esto sería el paso de C a T y posteriormente a C. En este caso no se notaría dicha mutación y se subestimaría el número de mutaciones. Otro ejemplo podría ser el paso de C a T y luego a G. En esta posibilidad ocurrieron dos mutaciones, pero al momento de comparar los ADNs sólo se observa una y nuevamente se subestimaría el número de mutaciones. Debido a que pueden ocurrir este tipo de mutaciones repetidas sobre un mismo nucleótido, es que existen diversos análisis estadísticos que se pueden realizar. La elección del método de análisis estadístico es también un paso importante e implica conocer cabalmente los requisitos del método para ser aplicado, el funcionamiento del mismo (con sus pros y contras) y los alcances de los resultados obtenidos.

Como se puede imaginar, los datos moleculares están sujetos a varios problemas, al igual que los datos morfológicos, pero tienen una gran ventaja a su favor, son mucho más abundantes. Lo ideal es poder llevar a cabo un estudio filogenético que incluya ambos tipos de datos, moleculares y morfológicos. Pero, ¿cómo puede lograrse esto? Esto se logra mediante la *cladística*, que define las relaciones evolutivas entre los organismos basándose en similitudes derivadas. Para facilitar la lectura vamos a definir algunos términos: *Plesiomorfía* o estado ancestral, es un estado de carácter que esté presente en los dos grupos externos (los parientes ancestrales más cercanos del grupo que no son parte del propio grupo) *Apomorfía*, es un estado de carácter evolutivamente novedoso, es decir, derivado de otro rasgo perteneciente a un taxón an-



Caracteres biológicos según su posición evolutiva
De MaulucioniOriginal work: Ferahgo the Assassin - Trabajo propio. Adapted from Page, Roderic D.M. and Holmes, Edward C. Molecular evolution: a phylogenetic approach. Wiley-Blackwell, 1st edition, 1998., CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52301427>

cestral filogenéticamente próximo. Se suelen utilizar los adjetivos *plesiomórfico* y *apomórfico* en lugar de “primitivo” y “avanzado” ya que evitan realizar juicios de valor sobre la evolución de los caracteres de estado.

La cladística es un método de análisis riguroso que utiliza las “propiedades derivadas compartidas” o sinapomorfias (una apomorfía compartida por un grupo monofilético) de los organismos que se están estudiando. El análisis cladístico forma la base de la mayoría de los sistemas modernos de clasificación biológica que buscan agrupar a los organismos por sus relaciones evolutivas. El método cladista analiza matrices de datos para producir un diagrama de árbol llamado cladograma. ¿Qué es un cladograma? Un cladograma, es como una hipótesis en forma gráfica de las relaciones filogenéticas entre taxones (en general, especies). Dicho de otra manera, se ven gráficamente las relaciones filogenéticas (de parentesco) entre las especies. Estas relaciones son hipótesis de cuando un taxón deriva de otro. Como son hipótesis, hay que po-

nerlas a prueba y verificar que tan robustas son, ya que no se pueden comprobar en forma absoluta. La robustez de estas hipótesis se puede verificar mediante métodos estadísticos como: medidas de bondad de ajuste de la matriz a los cladogramas, el Índice de Consistencia o técnicas de re-muestreo que prueban la robustez de cada grupo, entre las que se encuentran: bootstrap y re-muestreo simétrico, entre otros parámetros. Un factor fundamental para el desarrollo del método cladista han sido los programas de computadoras, capaces de analizar matrices de datos cada vez mayores. Esto permite armar árboles filogenéticos más complejos y fiables. Entre los principales programas de computadora encontramos: Winclada, PAUP y TNT. Diferenciamos redes filogenéticas de árboles filogenéticos. Son redes (o “undirected trees”) cuando no se especifica la raíz, y árboles cuando para una red de nudos y entrenudos se especifica cuál es la raíz. Los algoritmos matemáticos que se utilizan para confeccionar redes o ár-

boles filogenéticos determinan una diversidad de métodos. Estos algoritmos difieren principalmente en la forma en que calculan las distancias entre taxones (“Unidades Taxonómicas Operativas” o UTOs). Los algoritmos más conocidos fueron propuestos por Camin y Sokal, por Farris y por Swofford. Una posibilidad de algoritmo es estimar árboles evolutivos mediante el cálculo de distancias mínimas para las ramas (entre los “nodos”, designados éstos como “Unidades Taxonómicas Hipotéticas” o UTHs). En este caso se utilizan las distancias patrísticas entre taxones, que son las distancias a lo largo de las líneas filéticas. Se busca reducir al mínimo dichas distancias, de forma que el número de transformaciones, o pasos, entre taxón y taxón consecutivos sea mínimo. Entre los métodos de análisis filogenético existentes y que se aplican actualmente para representar filogenias, se puede mencionar el de Wagner y el de compatibilidad de caracteres. Estos métodos se basan en criterios diferentes, sobre todo para la elección de caracteres, su evolución o serie de transformación y su ponderación o “pesado”.

Para entender un poco más este tema veamos como es un protocolo básico para un análisis filogenético basado en secuencias moleculares. Se pueden clasificar los métodos de reconstrucción filogenética en base al tipo de datos que emplean. Estos pueden ser caracteres discretos o distancias. También hay que tener en cuenta si usan un método algorítmico o un método de búsqueda basado en un criterio de optimización para encontrar la topología óptima bajo el criterio seleccionado. Los distintos métodos utilizan distintos tipos de datos. Los datos pueden ser: **caracteres**, los cuales proveen información sobre cada OTU individual o **distancias**, que son una cuantificación entre la disimilitud entre pares de OTUs. Los **caracteres** son una característica o variable independiente bien definida que en un OTU puede pre-

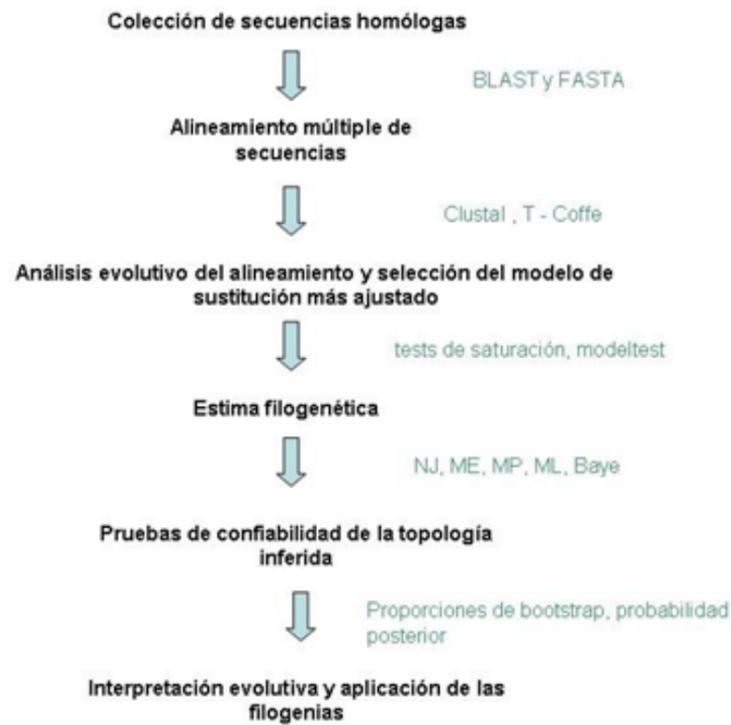
sentar dos o más estados mutuamente excluyentes (**estados de carácter**). Es necesario hipotetizar sobre la **evolución de los caracteres**, por lo cual, los métodos de reconstrucción filogenética requieren que se hagan suposiciones explícitas sobre el número de pasos discretos necesarios para que se de un cambio en un estado de carácter y la probabilidad con la que acontece un cambio en estado de carácter.

¿Por qué se transformarían caracteres en datos de distancia? Porque trabajar con distancias ofrece varias ventajas: 1.-Una lista de estados de carácter, como secuencias de ADN, ARN o aminoácidos, no posee en si misma significado evolutivo. Sin embargo al comparar las secuencias y establecer el porcentaje de similitud, da una idea de del grado de parentesco. 2.-Los modelos de sustitución de secuencias corrigen la posibilidad de que hayan múltiples sustituciones. El tema es que estas correcciones se pueden aplicar a las distan-

cias pero no a los datos (secuencias). 3.-Al utilizar muchos datos el tiempo de procesamiento puede ser alto. Los métodos de reconstrucción basados en matrices de distancias son muy rápidos.

Cómo las distancias topológicas (distancias en el árbol o red) no se corresponden exactamente con las distancias evolutivas, es necesario la utilización de métodos que minimicen este desfase. Estos métodos representan criterios de optimización. Los más utilizados son los métodos de **“bondad de ajuste”** y los métodos de **“evolución mínima”**. Los métodos de “bondad de ajuste” buscan el árbol métrico que mejor ajusta las distancias “observadas” y utilizan el método de cuadrados mínimos. Los métodos de “evolución mínima” buscan el árbol cuya suma de longitudes de ramas es la mínima. Si se utilizaran caracteres discretos en lugar de distancias, los criterios de optimización a utilizar son el de **“máxima parsimonia”** y el **“de máxima verosimilitud”**.

Protocolo básico para un análisis filogenético basado en secuencias moleculares.



Protocolo básico para un análisis filogenético basado en secuencias moleculares

Clasificación los métodos de reconstrucción filogenética en base al tipo de datos que emplean y al método de reconstrucción.

		Tipo de datos	
		Distancias	Caracteres discretos
Método de reconstrucción	Algoritmo de agrupamiento	UPGMA y Neighbor joining	
	Criterio de optimización	Mínimos cuadrados y Evolución mínima	Máxima parsimonia y Máxima verosimilitud

El principio de **parsimonia** se basa en la elección, entre todas las genealogías posibles, de aquellas que menos suposiciones requieran. Esto quiere decir que se eligen las genealogías que impliquen un número mínimo de transformaciones en los caracteres como consecuencia de la evolución. El problema que trae aparejado esto es que, el adoptar la hipótesis más sencilla, implica aceptar que la evolución sigue el camino más corto. Sin embargo hay infinidad de casos que muestran que esto no es así. Por eso surge la **Parsimonia Metodológica**, que es una herramienta con que se elabora y comprueba una hipótesis filogenética. Según este principio, se han de buscar los árboles con el mínimo número de pasos. Las hipótesis más sencillas son más “fáciles” de comprobar, pues cuanto más sencillas, más vulnerables resultan a las refutaciones rigurosas, con lo cual son *a priori* más probables.

Las hipótesis que requieren menos suposiciones son capaces de apor-

tar más información a la resolución de un caso particular. Esto no quiere decir que por ser las hipótesis más simples tienen mayor probabilidad de ajustarse a la realidad, simplemente, son más informativas.

El **“índice de consistencia”**, se utiliza para determinar la firmeza o “calidad” de un árbol filogenético. Refleja el grado de **homoplasia** (cambio evolutivo paralelo que hace que dos organismos presenten un mismo carácter adquirido de forma independientemente), es decir, los cambios en caracteres que tienen lugar más de una vez, ya sea por paralelismo, convergencia, por la existencia de reversiones, etc. Este índice se calcula como el cociente entre el número mínimo posible de cambios, dividido por el número total de cambios que contiene el cladograma (que es la longitud total en número de pasos). El número mínimo posible de cambios es la suma de las transformaciones que se dan en todos los caracteres. Esto provoca que árboles con idéntico nivel de

parsimonia tengan idéntico índice de consistencia y el índice de consistencia se hace mayor cuanto menor es el número real de cambios (o pasos).

Como puede verse sin las herramientas matemáticas utilizadas en estadística y sin los algoritmos matemáticos utilizados en los programas computacionales, no sería posible realizar los modernos estudios filogenéticos que se realizan en la actualidad.

VICTOR H. PANZA

[VOLVER](#)

**MARÍA DEL CARMEN BANÚS**

Lic. En Ciencias Biológicas
Coordinadora de Biología, CBC-UBA

GEOMETRÍA Y VIDA

Encontramos geometría en la naturaleza, o naturaleza en la geometría. “Descubrimos” formas nuevas, inimaginadas, pero que responden a principios físicos y termodinámicos. Aprendemos que desde la gestación nuestras células, unidad de vida funcional y anatómica, aprenden matemáticas, de mejor manera que nosotros cuando vamos a la escuela. Y ese aprendizaje, a veces definitivo, a veces temporario, les permite adaptación al medio y a la formación de tejidos. Estos cambios, se hacen muy visibles durante el desarrollo embrionario. Señoras y señores, con ustedes el “escutoide”

GAMETAS, FECUNDACIÓN, CIGOTA Y MÁS

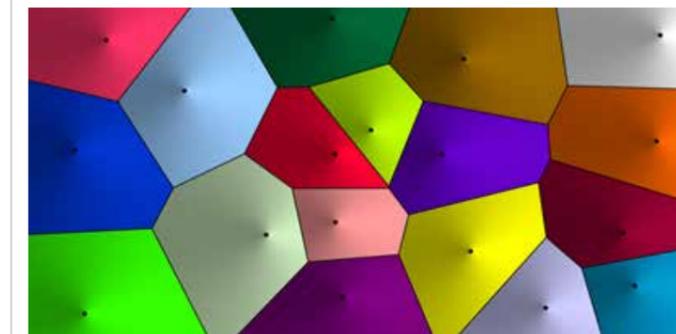
El proceso que lleva a la cigota a formar una estructura simple de unas cuantas células y luego un embrión hasta llegar a un individuo completo con órganos complejos implica un proceso de transición en el que los epitelios resultan fundamentales. Las células epiteliales se van moviendo y empaquetando de modo controlado durante el desarrollo embrionario. Estas células se juntan herméticamente. Para acomodar la curvatura que se produce durante el desarrollo embrionario, se ha supuesto que las células epiteliales adoptan formas columnares o similares a una botella. Este proceso es esencial, ya que la función y la forma de un órgano están relacionadas. Para que funcionen bien, su forma debe establecerse correctamente. Las células epiteliales son los bloques de construcción que forman, por ejemplo, la capa externa de la piel; también recubren los vasos sanguíneos y los órganos de todos los animales. Pero ¿cómo puede un científico predecir las formas que adoptan las células durante el desarrollo, siendo que este es un proceso dinámico? Trabajando con modelos. Si asociamos en equipo, a un grupo de científicos: biólogos celulares, físicos y matemáticos, podemos llegar a tener resultados que nos lleven a descubrir que formas pueden adoptar las células durante su desarrollo. Estas formas resultan de la mejor combinación de empaquetamiento, de una flexión epitelial eficiente y un gasto energéticamente también eficiente. Estos descubrimientos resultan importantísimos ya que podrían tener aplicaciones en medicina, especialmente en el diseño de órganos en el laboratorio. La biología celular y la biología del desarrollo son fundamentales para una rama de la biomedicina que es la de la creación sintética de órganos y sabiendo cuál es la estructura de los órganos en la realidad, será más fácil que aquellos sintetizados en laboratorio reproduzcan todas las características de los reales.

MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS A LA BIOLOGÍA

Explica Clara Grima, una de las autoras del descubrimiento, que una aproximación al empaquetado celular en los epitelios puede obtenerse a través de un diagrama de Voronoi.



El diagrama de Voronoi de un conjunto de puntos en el plano es la división de dicho plano en regiones, de tal forma, que a cada punto le asigna una región del plano formada por los puntos que son más cercanos a él que a ninguno de los otros objetos. Dicho de otra manera, lo que hace dicho diagrama es dividir el plano en tantas regiones como puntos tengamos de tal forma que a cada punto le asignemos la región formada por todo lo que está más cerca de él que de ningún otro. El diagrama debe su nombre al matemático ruso Georgy Voronoi, es una estructura tan sencilla e intuitiva que hasta un niño de tres años puede entenderla.



Vista la figura desde arriba, se habrá formado un diagrama de Voronoi

Esta estructura que sirve para diferenciar el espacio en regiones puede aplicarse al fútbol, al diagnóstico de tumores o para evitar las colisiones de barcos en la costa, entre otras utilidades. Si se colocan confites de colores en un plato y se vierte agua sobre ellos, podremos observar cómo poco a poco se van delimitando las regiones de Voronoi de cada uno de los confites (tiñéndose del color correspondiente) hasta que se tocan en la frontera, dibujando el diagrama de Voronoi completo

Tomado de ABC Ciencia





Variante del mapa original del Dr. John Snow. Los puntos son casos de cólera durante la epidemia en Londres de 1854 y Las cruces la ubicación de las bombas de agua. (tomado de Wikipedia)

A esta altura te preguntas ¿cómo es posible que se les haya ocurrido esto? No es nuevo. Si hacemos un poco de historia sobre las aplicaciones de un diagrama de Voronoi, lo encontraremos en uno de los primeros estudios epidemiológicos realizados, aunque no se hizo bajo ese nombre, sino más bien como algo intuitivo. Cabe preguntarnos entonces si “inventamos” un método o en realidad “descubrimos” la matemática implícita en la vida cotidiana. Me inclino por lo segundo. Y la historia nos lleva al Dr. John Snow: mediados del siglo XIX; un brote de cólera azota a la ciudad de Londres. En ese entonces no se conocía ni el agente etiológico ni la forma de transmisión de la enfermedad. Sin embargo, el sagaz Dr. Snow observa que los casos de enfermedad y muerte no se distribuían al azar, sino, más bien, siguiendo un patrón geométrico o geográfico, relacionado con la distancia a la que los enfermos vivían de una bomba de agua (la bomba de Broad Street). Finalmente, luego de planos, trazado de líneas, puntos y otros datos, llegó a la conclusión que la mayor parte de los enfermos habían consumido agua de esa bomba, que resultó contaminada con heces (recordemos, siglo XIX no existía el agua corriente). Resultó ser este el primer diagrama de Voronoi, mucho antes de que el mismo existiera! Y también uno de los primeros estudios epidemiológicos (para más información: https://es.wikipedia.org/wiki/John_Snow)

VOLVIENDO A LAS CÉLULAS

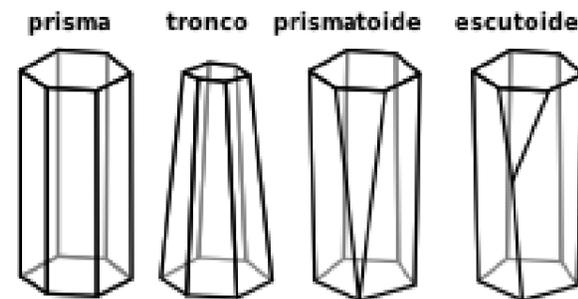
Modelos de este tipo en 2D ya habían sido utilizados para explicar el crecimiento de las células tumora-



Imágenes tomadas de Wikipedia Commons

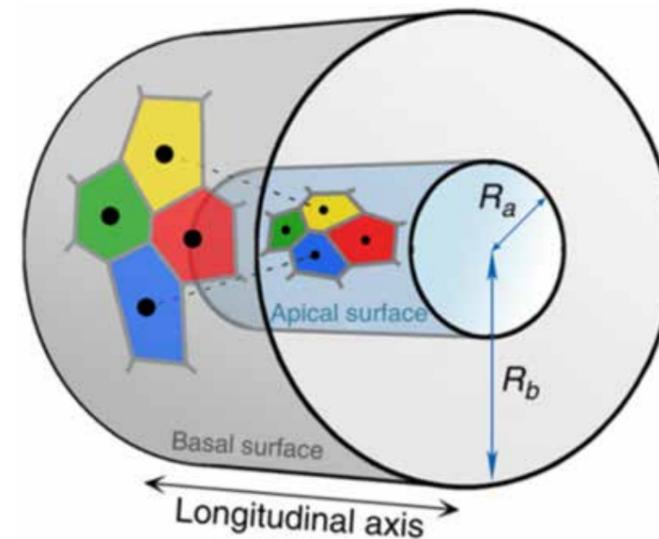
les. También los encontramos en la naturaleza con más frecuencia de la que podemos imaginar. Para muestra basta.....una jirafa, una hoja, un suelo en plena sequía, etc. Pero el verdadero descubrimiento realizado por los equipos de trabajo de Luis Escudero (Sevilla, España) y Javier Buceta (Estados Unidos), tiene que ver con haber planteado este mismo modelo en 3D. Mientras estudiaban el desarrollo embrionario de los animales, descubrieron que las células epiteliales se multiplicaban, apilaban y configuraban en una forma extraña. “Estábamos intentando entender cómo se organizan los tejidos epiteliales, células importantísimas durante el desarrollo embrionario y que tenemos en montones de órganos como el hígado, el páncreas y el tubo digestivo”, contó Luis M. Escudero, uno de los autores del nuevo estudio publicado en la revista Nature Communications. “Estos tejidos epiteliales son células que se empaquetan, que están ordenadas todas muy juntas y, por dificultades técnicas, es difícil saber exactamente como están empaquetadas en tres dimensiones”. Entonces lo que hicieron fue diseñar un modelo computacional de un tubo, que era un tejido curvo en tres dimensiones. El modelo computacional predijo una forma geométrica que no estaba descrita, y a esta forma geométrica la llamaron “escutoide”, por sus similitudes con una parte del tórax de algunos insectos que se llama “escutelo”. Los escutoides nos recuerdan la disposición de dos regiones del tórax de algunos insectos: el scutum y el scutellum. Este parecido es muy grande en escarabajos de la especie *Protætia speciosa*.

Un **escutoide** es un sólido geométrico entre dos superficies paralelas (la basal y la apical), de tal forma que la intersección del escutoide en cada una de las dos superficies (y en el resto de las capas intermedias también) son polígonos (lo que serían las ‘tapas’ del escutoide). Los vértices de estos dos polígonos están unidos por una curva o por una conexión en forma de Y. Las caras de los escutoides no tienen por qué ser convexas. Pueden tener huecos hacia dentro o hacia afuera, por lo que varios escutoides pueden empaquetarse para llenar todo el espacio entre las dos superficies paralelas. Si comparamos con formas geométricas más conocidas, observaremos lo siguiente:



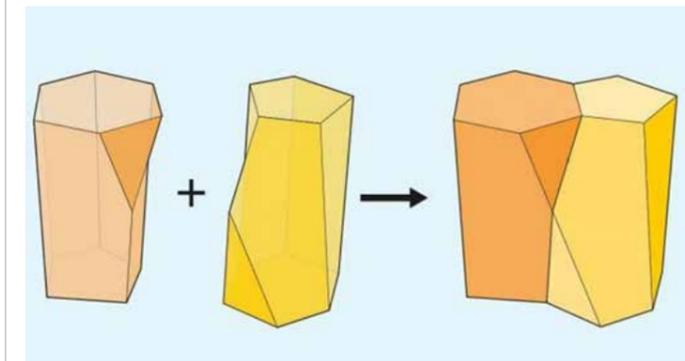
Y CUÁL ES LA RELACIÓN ENTRE EL MODELO TRIDIMENSIONAL Y UN ESCUTOIDE?

Los investigadores construyeron un modelo computacional de un tubo basándose de nuevo en los diagramas de Voronoi.



La figura corresponde al modelo computacional cilíndrico; se puede observar que las células amarilla y azul que son vecinas en la superficie interior del tubo (apical en el esquema) han dejado de serlo en la superficie exterior (basal en el esquema). Algo se interpuso entre ellas. Las células cambian de vecinos de una superficie a la otra.

Lo más importante es que el modelo era capaz de predecir lo que ocurría en la naturaleza. “Tras examinar las muestras de células epiteliales de la glándula salival de la mosca de la fruta, ¡vimos que las células reales tenían la misma forma que las del modelo!”, dice Clara Grima, colaboradora del equipo de investigación. Era necesaria una forma geométrica que modelara bien las células de los tejidos epiteliales. Que se pudiera plegar y adoptar distintas curvaturas. Cuya forma correspondiera a un modelo de equilibrio de fuerzas. Que fuera desde la superficie basal hasta la apical, pero sin tener los mismos contactos en ambas superficies. La solución final propuesta es el escutoide. ¿Cómo construir un escutoide? El escutoide se obtiene a partir de segmentos perpendiculares a todas las superficies comprendidas entre la superficie apical y la basal. Por ejemplo, se elige un conjunto de puntos (semillas) en la superficie apical. Se trazan los segmentos perpendiculares a la superficie apical en cada una de estas semillas. En cada capa comprendida entre la apical y la basal, cada segmento producirá una intersección (una nueva semilla). A estas semillas nuevas les calculamos el diagrama de Voronoi en dicha capa. Por último pegamos las regiones de Voronoi (que serán polígonos) correspondientes a todos los puntos de un mismo segmento



Formación de un escutoide (Esquema de Clara Grima)

FINALMENTE...

¿Y todo esto para qué? ¿Por qué se complica tanto la Naturaleza? La respuesta viene de la mano del físico del equipo, Javier Buceta, de los Departamentos de Bioingeniería e Ingeniería Química y Biomolecular de la Universidad de Lehigh en Pensilvania (EE UU). Cambiar de forma no es gratis para las células: cuesta energía. También empaquetarse juntas, pues deben invertir, por ejemplo, en producir las moléculas que funcionan a modo de pegamento. Sin embargo, las células siempre buscan ahorrar energía. Si calculamos el costo de pegar juntas las células plano a plano, encontramos que el escutoide es la mejor opción de empaquetamiento para economizar cuando hay cierta curvatura en el tejido.

El concepto está relacionado con buscar el equilibrio de las fuerzas a las cuales están sujetas las células desde el punto de vista de la tensión. Dichos resultados experimentales, también pudieron confirmarse en otros tejidos epiteliales curvos, como la superficie del embrión de la mosca y del pez cebra. Esto resulta necesario para poder generalizar las conclusiones. ¿Todavía seguís creyendo que no es necesaria la matemática para entender biología? Aquí tenés un modo muy elegante donde matemáticas, biología y física se dan la mano en este descubrimiento.

MARIA DEL CARMEN BANUS

[VOLVER](#)



Escarabajo de la especie protaetia donde puede observarse el escutelo en el torax

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Protiaetia_cuprea_phoebe_%283102496532%29.jpg

BIBLIOGRAFIA

- Gómez-Gálvez, Pedro; Vicente-Munuera, Pablo; Tagua, Antonio; Forja, Cristina; Castro, Ana M.; Letrán, Marta; Valencia-Expósito, Andrea; Grima, Clara et al. (2018-07-27). «Scutoids are a geometrical solution to three-dimensional packing of epithelia». Nature Communications (en inglés) 9 (1). ISSN 2041-1723. doi:10.1038/s41467-018-05376-1
- Grima, Clara (30 de julio de 2018). «Análisis | Hemos descrito un nuevo objeto geométrico y lo llevas puesto». El País. ISSN 1134-6582
- https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADgonos_de_Thiessen
- https://es.wikipedia.org/wiki/John_Snow

Sakura

En el archipiélago de Japón existe un sinnúmero de cerezos que adornan el paisaje en los meses de primavera (fines de Marzo, comienzos de Abril), las flores son de cinco pétalos dentados, dispuestas en racimos, y se presentan en una gama de colores que va desde un rosa tenue, casi blanco hasta un rosa carmesí con sutiles tonos intermedios. Esta forma y color de esta especie han simbolizado por siglos la pureza, sencillez y lealtad. Se compara la floración al punto máximo con el espíritu guerrero en plena batalla por el país y la efímera vida de esta flor y su modo de ir desapareciendo del paisaje en un lento caer de los pétalos, se compara a la vida del guerrero que cae luego de luchar por su país. De aquí que se haya nacido la admiración e identidad del pueblo japonés en esta flor.

Esta flor no solo se materializa en poemas y como nombre de la hija mujer, sino que también aparece su imagen en diseños artísticos, textiles, cerámicos y elementos domésticos, la madera del árbol es muy apreciada para la arquitectura en madera y para los instrumentos musicales.

La admiración nacional por éste árbol aún perdura, y es materializado en eventos locales denominados "Hanami" (observar la floración) que consiste en reunirse bajo las arboledas florecidas y sobre unas esteras tendidas en el pasto se festeja comiendo, bebiendo y danzando ya sea en familia o entre conocidos. Esta costumbre tiene sus comienzos en recitos imperiales en la era Heian (año 794 d.C.)

HERNÁN MIGUEL

Prof. Titular Introducción al
Pensamiento Científico. CBC – UBA
ciencias@retina.ar

CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN SOCIEDAD (CTS): EDUCACIÓN SUPERIOR Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA

La ciencia y la tecnología son parte de la producción de conocimiento y conforman la cultura de nuestra sociedad. Los ciudadanos tenemos cada vez más relación con las prácticas y los productos de estas actividades y surge naturalmente el interés y la necesidad de estar informados para la toma de posición. Esto da lugar a diferentes reflexiones sobre la Ciencia y la Tecnología en Sociedad, y en particular, como la enseñanza superior toma en cuenta el modo de abordaje de los contenidos sobre este enfoque. En esta mesa se reúnen diferentes actores del área para conversar sobre el lugar del enfoque CTS en el saber ciudadano y en la formación superior.

Hace unas semanas asistimos en la sede central del Ciclo Básico Común de la Universidad de Buenos Aires (CBC-UBA) a las XIV Jornadas de Material Didáctico y Experiencias Innovadoras en Educación Superior, cuya coordinación general está a cargo de María del Carmen Banús. Las jornadas fueron declaradas de interés académico por el CBC-UBA y auspiciadas por la Subsecretaría de Planeamiento e Innovación Educativa (SSPLINED) del Ministerio de Educación e Innovación de la Ciudad de Buenos Aires. En esa oportunidad tuvo lugar una mesa dedicada a la temática CTS y sus relaciones con la educación superior y la participación ciudadana, en la que oficié de coordinador, habiendo convocado a cinco profesionales con una trayectoria muy rica para poder entablar un diálogo sobre estas temáticas (fig. 1).

Dolores Marino es Profesora de Química, Licenciada en Educación, cuenta con dos Diplomaturas Superiores y se desempeña como capacitadora en el formación continua y profesora de nivel superior. Coordina el equipo de Acompañamiento para la Transformación Pedagógica en el Ministerio de Educación e Innovación de la Ciudad de Buenos Aires. Es autora y coautora de libros de texto para la enseñanza de las ciencias.

Agustín Courtoisie fue Director Nacional de Cultura del Uruguay (entre 2002 y 2005), evaluador de los materiales educativos generados por los docentes en el Plan Ceibal, autor y coautor de libros sobre descubrimientos científicos en diferentes campos y descubrimientos locales de gran relevancia. Su experiencia docente en la Uni-



FIG1. De izquierda a derecha: Gustavo Giuliano, Dolores Marino, Diego Hurtado de Mendoza, Gabriela Bortz, Agustín Courtoisie y Hernán Miguel.
www.youtube.com/watch?v=r1Jo3gMYKBA

versidad de la República y en otras universidades privadas del Uruguay se ha ampliado al dedicarse actualmente a las temáticas de CTS, apropiación ciudadana o social de la ciencia, divulgación científica y periodismo científico.

Gabriela Bortz es Doctora en Ciencias Sociales, Magíster en Ciencia, Tecnología y Sociedad y Licenciada en Ciencia Política. Actualmente es becaria posdoctoral del CONICET para Temas Estratégicos y docente en la Maestría en Ciencia, Tecnología y Sociedad de la Universidad Nacional de Quilmes.

Diego Hurtado de Mendoza es Doctor en Física, Profesor titular de Historia de la Ciencia y director del Centro de Estudios de Historia de la Ciencia y la Técnica José Babiñi en la Universidad Nacional de San Martín. Fue secretario

de Investigación de la UNSAM y desde 2009 es secretario de Innovación y Transferencia de Tecnología en esta misma universidad. Fue Presidente de la Autoridad Regulatoria Nuclear y miembro del Directorio de la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Es autor de La ciencia argentina. Un proyecto inconcluso (1930-2000) y de El sueño de la Argentina atómica. Política, tecnología nuclear y desarrollo nacional (1945-2006).

Gustavo Giuliano es Doctor en Epistemología e Historia de la Ciencia, Magíster en Epistemología e Historia de la Ciencia, Ingeniero en Electrónica. Profesor de Epistemología en carreras de Ingeniería y en posgrado. Es autor de libros, capítulos de libros y artículos en revistas especializadas sobre temas de filosofía de la tecnología y CTS. Dirige la revista

Tecnología & Sociedad.

La mesa fue presentada señalando que la ciencia y la tecnología son parte de la producción de conocimiento y conforman la cultura de nuestra sociedad. Los ciudadanos tenemos cada vez más relación con las prácticas y los productos de estas actividades y surge naturalmente el interés y la necesidad de estar informados para la toma de posición en los desarrollos futuros. Esto da lugar a diferentes reflexiones sobre CTS, y en particular, cómo la enseñanza superior toma en cuenta el modo de abordaje de los contenidos sobre este enfoque. Para lograr una apertura de temas para la discusión, en el rol de coordinador, pregunté a cada expositor por temas específicos de su experiencia, abriendo un panorama a través de respuestas para luego dar lugar al intercambio con los asistentes. Resumimos aquí los temas sobre los que conversamos con cada participante de la mesa para poder apreciar la riqueza del panorama al que pudimos asomarnos en esta ocasión.

La conversación con Dolores Marino (fig. 2), permitió aprovechar su experiencia muy rica en formar docentes en profesorado en su etapa de formación inicial y su trayectoria en la formación continua especialmente en el enfoque CTS a lo largo de varios años con alcance nacional. Se refirió a cómo puede abordarse la formación continua para lograr que efectivamente cada docente ya formado anteriormente adquiera un enfoque CTS que llegue a la formación de ciudadanos a través de sus aulas de primaria o secundaria. Mostró cuáles estrategias parecen potentes o recomendables para convocar la atención de nuestros docentes ya formados y qué resultados se pudieron obtener a lo largo de las experiencias concretas que llevó adelante. Dolores nos contó que en su experiencia en los trayectos de formación continua en el programa Nuestra Escuela, del Ministerio de Educación de la Nación a lo largo de los años hasta 2016 en que se cerraron estos trayectos, la formación en CTS se centró en la selección de alguna situación problemática ambiental que fuera compleja en el sentido de mostrar una riqueza multidisciplinar. Los docentes cursantes tenían que fundamentar la importancia de la elección del problema y mostrar su contextualización. Señala que el problema tiene que ser relevante para esa comunidad. De ese modo el abordaje de una solución posible tiene el valor de cambiar el entorno en el que viven. Es fundamental también tomar la noción de investigación acción en la que los propios actores van definiendo lo que es relevante estudiar y profundizar y cuáles son los demás actores involucrados para poder lograr un cambio efectivo en el entorno y las prácticas instaladas. Para ello la estrategia didáctica se centró en la búsqueda y conceptualización de casos de interés en la región del país en la que se desempeña el cursante para que cada cursan-



Fig. 2. Dolores Marino y la formación inicial y continua docente en temáticas CTS.
www.youtube.com/watch?v=r1Jo3gMYKBA

te como docente desarrolle recursos que involucren Grupos de discusión; Debates críticos; Grupos de mediación; Portfolio didáctico de medios (locales, nacionales); Entrevistas a especialistas; Desarrollo de talleres lúdicos para los más pequeños; Relevamiento de imágenes fotográficas; Murales digitales; Relatos e informes de pobladores; Muestras variadas (aguas, suelos, etc); Monografías; Campañas de socialización de información en redes; entre otras.

Se capacitaron entre 500 y 600 docentes por bimestre, alcanzando un total de más de 5.000 docentes argentinos entre 2015- 2017, pensando en sus problemáticas ambientales a lo largo de tres años de especialización, presentando formatos pedagógicos-didácticos innovadores según los contextos y posibilidades de cada región. Luego subían sus contribuciones en un mapa desplegable en el que se podían visualizar y acceder a los detalles de cada proyecto (fig. 3). Algunos de los proyectos son por ejemplo, el de la escuela Agro técnica de Jujuy Cultivar sin agua...; La regulación del uso del agua en la cuenca Senguer- Chubut que luego del estudio y relevamiento del caso culminó en una muestra fotográfica con epígrafes en el Centro Cultural de la localidad (fig 4); Basural a cielo abierto en La Carlota; La creación de un Observatorio escolar de inundaciones en Chaco y el problema de los residuos...; El Proyecto SEAN (Sociedad En Acción) en Córdoba que incluyó la construcción de un invernáculo con materiales reutilizables; En defensa del recurso agua, en la zona del Famatina; Se llegaron a establecer lazos entre escuelas secundarias y universidades e incluso algunos de los proyectos llegaron a dar lugar a nuevas ONG. Un resultado muy rico y perdurable. En el caso de Agustín Courtois (fig. 5), fue interesante el cruce de miradas desde sus distintas experiencias, como la apropiación ciudadana de la ciencia y la tecnología, la divulgación científica, la gestión como Director Nacional de Cul-

Módulo Ciencia y Tecnología en Sociedad: Alfabetización para la participación ciudadana.

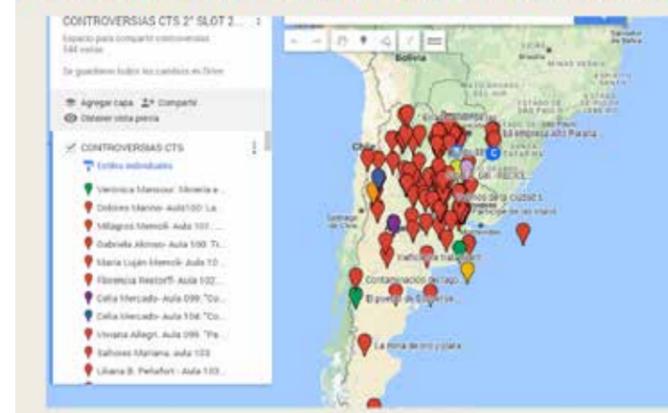


Fig. 3. Izquierda: Proyectos de los cursantes del módulo en el país. Derecha: detalle desplegable de cada proyecto.



Fig. 4. Fotografías de la muestra del proyecto La regulación del uso del agua





Fig. 5. Exposición de Agustín Courtoisie sobre la apropiación ciudadana de la ciencia.
<https://www.youtube.com/watch?v=8rxybklCSzY&t=43s>

tura, la evaluación relativa al Plan Ceibal, entre otras.

Pudo referirse brevemente a ciertos aspectos institucionales y de financiamiento internacional para la educación formal y las estrategias para diseñar un plan de apropiación ciudadana de la ciencia que atienda a la dimensión social del desarrollo científico y tecnológico. Señaló las proporciones de la población que están en diferentes segmentos, jubilados, trabajadores, en etapa escolar, y reseñó algunas medidas como las de otorgar dispositivos móviles (tablets) a personas de la tercera edad, que abre otras ventanas para su forma de vida. Por otra parte comentó sobre el uso de las notebooks del plan Ceibal, los efectos de transformación que tuvo en las familias de los niños y la necesidad de empoderar aún más a los docentes para su involucramiento para un mejor aprovechamiento de estos recursos. Nos recordó que “las ceibalitas” (las notebooks) no tienen la metáfora del escritorio de Windows sino que son herramientas para el hacer, para hacer algo. Si los niños toman la notebook, es para hacer algo, para sacar fotografías, jugar, escuchar música, etc. Al referirse a las entidades de financiamiento internacional y sus recomendaciones de contemplar el mercado laboral, mencionó sus reservas en cuanto a tener en claro para qué mercado se refieren estas recomendaciones ya que enfrentamos escenarios futuros difíciles de determinar. Por otra parte es todavía prematuro poder evaluar el impacto del plan Ceibal en esta formación dado el corto tiempo transcurrido desde su implementación. En todo caso, el uso de las notebooks favorece el desarrollo de las capacidades de interpretación simbólica, lo cual independientemente de las recomendaciones son un logro en sí mismo. Enfatizó la necesidad de atender prioritariamente al estado psicofísico de los estudiantes, como una buena alimentación y un buen ambiente libre de violencia doméstica, para llegar a los centros educativos en condiciones mínimas de receptividad.

Finalmente señaló la importancia de abordar casos de importancia para la comunidad, señalando algu-



Fig. 6. Gabriela Bortz sobre la detección y solución tecnológica de problemas de relevancia social.
<https://www.youtube.com/watch?v=8rxybklCSzY&t=44s> (a partir del minuto 12)

nos ejemplos, y no quedarnos solamente en una divulgación de la ciencia la tecnología que se refiera a casos generales y alejados de la repercusión en la vida de los ciudadanos como la teoría del big bang y ejemplos similares. Al conversar con Gabriela Bortz (fig. 6), recordamos que se ha dedicado en profundidad al estudio del caso del Yogurito escolar, que es un alimento cuyo consumo refuerza el sistema inmunológico y cuyo desarrollo tiene una serie de notas distintivas para la problemática de CTS. Nos contó que había realizado una búsqueda amplia sobre proyectos de investigación y desarrollo en el país que se articularan con problemáticas socialmente relevantes y con las políticas públicas para abordarlos, y que luego de relevar cientos y cientos de proyectos de los últimos años, llegó a 66 en esa categoría, de los cuales solo 6 llegaron a un producto concreto aunque aplicable a contextos reducidos, como por ejemplo unas pocas empresas. A la vez, estos proyectos se presentaban como soluciones técnicas a problemas formulados en también en términos técnicos. El caso del yogurito constituyó una excepción a este tipo de formulaciones.

Se refirió a cuáles son los circuitos que llevan de la detección de un problema de relevancia social a la obtención de una solución tecnológicamente viable y cómo este camino puede optimizarse por los contextos propios de cada región, contemplando características que deberíamos tener en cuenta en latinoamérica o en escalas todavía más pequeñas de las regiones o localidades. Nos cuenta que el Yogurito fue desarrollado por un instituto público de I+D argentino, y es elaborado por una pyme, ambos ubicados en San Miguel de Tucumán. Desde 2008, el Yogurito escolar se ha integrado al Programa Probiótico Social, el cual forma parte del plan alimentario provincial. Actualmente es distribuido por el Ministerio de Desarrollo Social de Tucumán a 200.000 niños y niñas en escuelas públicas de nivel inicial de la provincia, los cuales reciben el probiótico tres veces por semana como complemento alimentario. Puntualiza que parte de la problemática es la introducción de estos temas en la formación de profesionales ya que suelen



Fig. 7. Diego Hurtado de Mendoza, las políticas científicas y los saberes estratégicos del país.

ser trabajos y estudios separados de la malla curricular, pero señala que vale la pena prestar atención a las experiencias de extensión la Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas de la Universidad Nacional de Rosario, en que cada problemática social abordada junto con su propuesta de solución científica y tecnológica fue integrándose a la currícula de la formación universitaria. De este modo la inclusión de los temas se produce de forma gradual, significativa y perdurable para en la formación de los profesionales de la región.

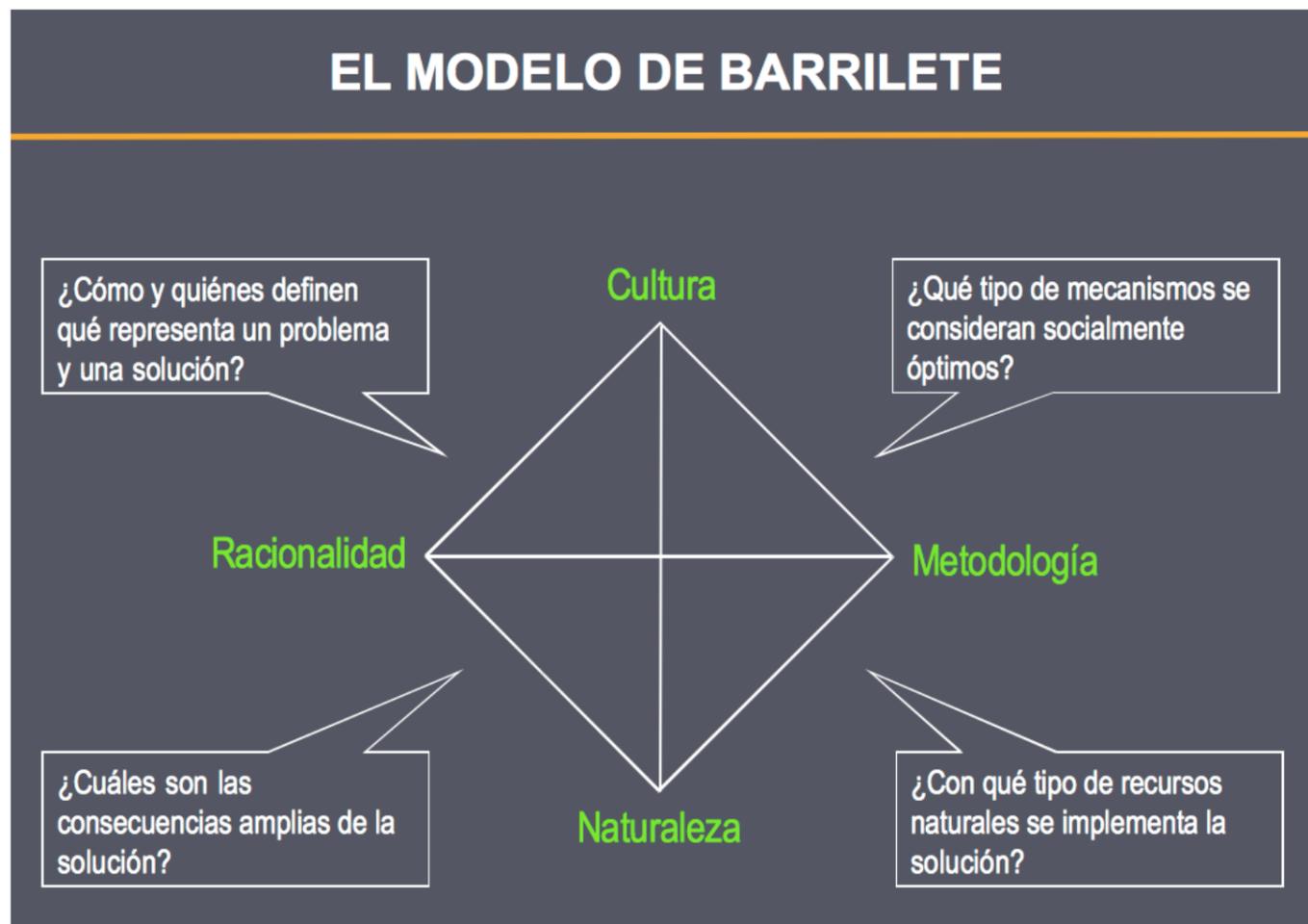
Con Diego Hurtado de Mendoza (fig. 7) nos concentramos en su experiencia en varios aspectos que son muy relevantes para la temática CTS, desde su lugar de historiador de la ciencia argentina en la que no falta la dimensión valorativa sobre la relevancia de ciertos desarrollos en el país para su propia gente, hasta su participación en el directorio de la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología, pasando también por haber sido Presidente de la Autoridad Regulatoria Nuclear. Nos contó sobre su percepción sobre la forma en que las políticas científicas a lo largo de los distintos períodos en Argentina han promovido un desarrollo y financiamiento que atienda a los problemas socialmente relevantes de los ciudadanos que aportamos al sistema de ciencia y tecnología de nuestro país. Respecto a la dinámica de desarrollo personal de los investigadores, al menos en las ciencias naturales, se refirió a la tensión entre atender y encontrar soluciones a problemas de nuestra región y nuestras comunidades por un lado, y, por otro lado estar sintonizados con la agenda científica y tecnológica internacional de modo que podamos estar en diálogo con los polos de construcción del conocimiento más avanzados del mundo, incluso poder trabajar indistintamente en programas de investigación binacionales, realizar estancias en otros laboratorios etcétera. En esta misma línea se refirió a las dificultades y tiempos que se deben tener en cuenta en caso que se deseara, si así fuera decidido, realizar un cambio de rumbo redirigiendo la comunidad académica hacia la producción de patentes en vez de la publicación de artículos. Desplegó el problema de la formación de científicos, la cul-



Fig. 8. Gustavo Giuliano despliega el desafío de la formación CTS en ingeniería.

tura y tradición de investigación en ciencia básica y la problemática de la evaluación de los investigadores en el marco de las políticas públicas en ciencia y tecnología. Señaló que aún cuando la ciencia y la tecnología nacieron siendo claramente diferenciables, hoy sabemos que donde hay ciencia, hay tecnología y donde hay tecnología hay ciencia. Por otra parte, la investigación científica se ha concebido en Argentina con un énfasis en la investigación básica y podría parecer que sería necesario redirigirla hacia productos concretos de desarrollo y patentes sobre procesos y productos tecnológicos. Claramente todo cambio de rumbo en las políticas públicas debe hacerse pensando en el largo plazo, de modo que es posible, si fuera una decisión ya tomada, que los científicos fueran dirigidos para enfocarse en el abordaje de problemas de ciencia aplicada, desarrollo tecnológico y registro de patentes. Pero sin duda ese cambio en la tradición instalada desde la fundación de nuestras primeras instituciones de ciencia y tecnología, debe contemplar cambios generacionales, capacitaciones, incentivos y formas de conversión. Sería poco probable tener éxito en generar un giro de los “papers” a las “patentes” con medidas que no contemplaran estos tiempos indispensables para un sistema complejo y fuertemente consolidado por la tradición. Por otra parte, el nudo del problema es político, en el sentido de que es necesario que todos nos involucremos en decidir un modelo de país y en ese modelo determinar el papel que se le otorga a la ciencia y a la tecnología para su crecimiento. Adicionalmente, al referirse a un ecosistema de emprendimiento y desarrollo de la ciencia y la tecnología, enfatizó la necesidad del apoyo a estas actividades. Apoyo que se traduce en marcos legales y normativas, disponibilidad de financiamiento, asesoría de técnicos expertos, entre otras, y que forma parte de un entramado en el que la política, los mercados, los recursos humanos, la cultura y el financiamiento junto con ese apoyo, se articulan de modo de garantizar una sustentabilidad en las prácticas de desarrollo.

La conversación con Gustavo Giuliano (fig. 8) rescató su recorrido que lo llevó desde su profesión como ingeniero



g. 9. Modelo de barrilete. Presentado por Gustavo Giuliano mostrando los ejes en tensión (diagonales del rombo) de la formación CTS en ingeniería.

hasta su compromiso en la formación de estudiantes de ingeniería en los aspectos epistemológicos y filosóficos de la ingeniería y el diseño, lo cual sin duda abarca las valoraciones de la tecnología como forma de construir un mundo distinto del que recibimos.

En este sentido su experiencia docente en el nivel universitario es muy relevante por el tipo de reflexión articulada con las temáticas CTS. Se refirió a la problemática y perspectiva que cree que puede instalarse como reflexión entre quienes serán ingenieras e ingenieros del futuro. También en qué grado ese nivel de reflexión puede sobrevivir a la formación técnica que no atiende de manera transversal a estas preocupaciones, es decir, cómo puede establecerse desde las asignaturas introductorias una cuota de pensamiento reflexivo suficientemente arraigado como para que no sea eliminado por un paradigma técnico en la formación profesional y que tampoco atente contra la propia formación.

Por otra parte, a partir de su trayectoria como docente en la formación de posgrado y en la dirección de grupos de investigación pudo comentarnos también sobre cuáles son las temáticas o problemas que pueden servir de cohesión para que se forme cierta masa crítica de investigadores en la que confluyan intereses y que esos temas sirvan de hilo conductor para mantener al grupo reflexionando a pesar de sus diversos intereses. Señala como un paso muy alentador la declaración del Consejo Federal de Decanos de Facultades de Ingeniería de la República Argentina del año 2017 (CONFEDI) en la que se recomienda la necesidad de proponer un currículo con un balance equilibrado de competencias y conocimientos académicos, científicos, tecnológicos y de gestión, con formación humanística. Mientras que hasta hace poco tiempo pedir que en ingeniería hubiera una formación humanística podría haber suscitado una sensación de contradicción, es de celebrar que estemos enfocando la carrera desde esta perspectiva. Sin duda toda formación en ingeniería que no tenga en cuenta el eje de la cultura y la naturaleza como en tensión con la racionalidad y la metodología, volverá a correr el riesgo de reducir la ingeniería a una racionalidad de medios a fines alejada de los valores de la sociedad en la que se implementan sus soluciones (ver esquema del modelo de barrilete de la figura 9).

La audiencia pudo luego intercambiar preguntas, apreciaciones y reflexiones con la mesa, dando lugar a la apertura de nuevos aspectos, todos enriquecedores de la temática, lo cual muestra el interés de la comunidad en seguir profundizando sobre estas temáticas.

HERNÁN MIGUEL

[VOLVER](#)

Autoridades de las Jornadas:

Universidad de Buenos Aires Rector: Prof. Dr. Alberto Edgardo Barbieri;

Ciclo Básico Común Director: Prof. Jorge Ferronato;

Departamento de Ciencias Biológicas y de la Salud:

Prof. Jorge Fernández Surribas;

Comité Académico: Lic. Isabel Hevia, Lic. María Donato, Dra. Ana Bedoya, Prof. Jorge F. Surribas;

Comité Científico: Dr. Manuel Alonso, Lic. María del C. Banús, Dra. Ana De Micheli, Dra. Silvia Marquez, Dra. Andrea A. Rey;

Coordinación general: Prof. María del Carmen Banús;

Comité Organizador: Departamento de Ciencias Biológicas y de la Salud.

Contacto: jornadamatdid@gmail.com

SOFIA LOPEZ OLALDE

Ingeniera Química egresada de la UNAM y
Maestra en Planeación Estratégica en Ingeniería
y Tecnología por la Universidad Anáhuac

ENTRE LA CIENCIA Y EL ARTE: UN ENCUENTRO PERFECTO PARA EL APRENDIZAJE

Creo que el arte y la ciencia son el resultado de un mismo proceso: la capacidad de utilizar la imaginación y nuestra habilidad mental. La imaginación nos llevó en gran medida a subsistir y avanzar. La curiosidad nos permite indagar e interpretar el mundo y porque no, también modificarlo.

Leonardo Da Vinci nos regaló, con sus ansias de saber, hermosos dibujos anatómicos, pero también bocetos de máquinas nunca antes pensadas.

Picasso utilizaba principios matemáticos para darle tridimensionalidad a la tela y como científicos muchas veces concluimos que un experimento es "bello".

La belleza y la imaginación, son muchas veces el motor que alimenta estas disciplinas propias de la evolución cultural del hombre. Esta vez, reproducimos una hermosa experiencia docente, publicada por la Fundación CEMAR y escrita por Sofía López Olalde

Cuando un profesor de química inicia su clase frente a un grupo de inquietos estudiantes de secundaria y comienza a proyectar una serie de imágenes que muestran esquemas de modelos atómicos a lo largo del tiempo, varias situaciones pueden suceder. Por ejemplo algunos estudiantes tomarán notas, otros más atrevidos harán preguntas para intentar comprender cómo Rutherford o Bohr lograron dibujar algo que en principio de cuentas nadie había visto antes; otros más distraídos dibujarán en su cuaderno o verán por la ventana deseando que algún súper héroe aterrice en el patio de la escuela y los salve del tedio de la clase de química.... pero no, esto último no sucederá.

Los modelos químicos son abstractos y las ecuaciones que los acompañan lo son aún más; enseñar y aprender sobre el átomo es complejo pues no podemos mostrar a nuestros estudiantes un átomo en el laboratorio o llevarlo en una caja de cristal a la clase. Lo que sí podemos hacer, es echar mano de la creatividad y las habilidades artísticas para fomentar la curiosidad y dar rien-



La integración del arte en el modelo educativo STEM -convirtiéndolo en STEAM (en español Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas)- tiene el propósito de fomentar la creatividad en los procesos de enseñanza de la ciencia. Como profesores podemos echar mano de esta disciplina para fomentar la curiosidad y el desarrollo de las habilidades artísticas de nuestros estudiantes como apoyo en su proceso de aprendizaje.

“La integración del arte en la ciencia permite comprender y explicar fenómenos que son cotidianos pero que no podemos ver a simple vista, fortaleciendo la capacidad de establecer analogías con situaciones ya conocidas y desarrollar la construcción de argumentos.”

da suelta a la imaginación para llevar a los alumnos por un momento al mundo en el que vivían inmersos los científicos que tuvieron estas grandiosas ideas.

En Estados Unidos y Europa desde la década de los 90 se acuñó el término STEM para un modelo educativo que unía ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas; décadas más tarde se decidió agregar una letra más a las siglas para convertirlas ahora en STEAM e incorporar el arte a la enseñanza de la ciencia. En mi aula de tercer grado de secundaria decidí llevar la “A” de arte con todo su poder y su peso para encontrarse con el también poderoso átomo. Pedí a los estudiantes que llevaran a clase material muy simple: una mica, cartón, marcadores indelebles azul y rojo y hojas blancas de papel. Como en cualquier clase dedicada a la enseñanza de modelos atómicos proyecté las imágenes del átomo de Dalton, Rutherford, Thomson, Bohr y hasta el de Schrödinger; no di mayor explicación ni de las partículas, ni de los orbitales o nubes de energía. Después les pedí que se reunieran en grupos de trabajo colaborativo y eligieran el modelo que les parecía más bello. Es importante hacer énfasis en esto, en la belleza, en la estética; esta vez no se trataba del modelo más acertado, interesante, completo o complejo. El objetivo de la actividad era que cada grupo creara un anaglifo con el modelo atómico que más les gustara y además fabricaran con ayuda del cartón, la mica y los marcadores lentes aptos para poder ver su figura en tercera dimensión. Los alumnos se mostraron entusiasmados y en no más de media hora habían fabricado sus lentes y las figuras. Entonces hicimos una pequeña exposición para que todos vieran las figuras propias y de los demás. Cuando se desarrolla una actividad de este tipo, es importante que en esa sesión o en una posterior se hable sobre la experiencia de la elaboración dejando que los estudiantes compartan li-

brememente lo que pensaron, sintieron y observaron. Posteriormente, a través de preguntas guía se analizan los resultados: ¿Cuál creen que sea el modelo que más se acerca a la realidad?, ¿por qué?, ¿creen que hacer modelos es válido para explicar la naturaleza?, ¿qué aprendieron?, ¿por qué creen que el modelo atómico ha evolucionado?, ¿los modelos que dibujaron se parecen a alguna otra cosa que hayan visto en la naturaleza?, ¿podrían proponer un modelo diferente?, ¿podrían dibujar a un ser vivo o a un ser humano con una estructura similar a la del átomo?

“El arte aplicado en una clase de química estimula el pensamiento creativo y la empatía, libera el estrés en los alumnos y genera un ambiente de aprendizaje y colaboración.”

En este punto, los estudiantes comienzan a comprender que la capacidad de dividir la materia en partículas cada vez más pequeñas nos permite comprender muchos fenómenos y explicar el funcionamiento de muchas cosas que hoy son cotidianas. El conocimiento de los modelos atómicos se convierte en algo importante para ellos pues logran llegar a esa primera explicación, vuelven tangible algo que no ven, establecen analogías con cosas que conocen y desarrollan la capacidad de construir argumentos. El conocimiento y la comprensión de los modelos químicos son esenciales en la enseñanza de la ciencia; incorporar actividades artísticas permite a los estudiantes que les cuesta más trabajo comprender conceptos abstractos relacionar estos conocimientos con otra abstracción que les es más familiar: el arte. Permite, además, liberar estrés, estimular el pensamiento creativo y la empatía, crear un ambiente de aprendizaje y de colaboración. No se necesita ser un docente con grandes habilidades artísticas para implementar este tipo de dinámicas; en realidad, se necesita que el docente haga estas actividades constantemente para estimular su propia creatividad y poderla llevar al aula.

Acerca de la autora Sofía López Olalde es Ingeniera Química egresada de la UNAM y Maestra en Planeación Estratégica en Ingeniería y Tecnología por la Universidad Anáhuac. Tiene experiencia docente en secundaria, bachillerato y educación superior.

SOFIA LOPEZ OLALDE

[VOLVER](#)

STAFF

Elementalwatson “la” revista

Revista cuatrimestral de divulgación
Año 9, número 26

Universidad de Buenos Aires
Ciclo Básico Común (CBC)
Departamento de Biología
Cátedra F. Surribas - Banús
PB. Pabellón III, Ciudad Universitaria
Avda. Intendente Cantilo s/n
CABA, Argentina

Propietarios:

María del Carmen Banús
Carlos E. Bertrán

Editor Director:

María del Carmen Banús

Escriben en este número:

Alejandro Ayala
María del Carmen Banús
Ana Borthagaray
Adrián Fernández
Miguel Fuentes
Sofía López Olalde
Pablo Marquet
Hernán Miguel
Víctor Panza

Diseño:

Guillermo Orellana

revista_elementalwatson@yahoo.com.ar
www.elementalwatson.com.
ar/larevista.html

54 011 5285-4307

Todos los derechos reservados;
reproducción parcial o total
con permiso previo del
Editor y cita de fuente.

Registro de la propiedad intelectual
N° 841211

ISSN 1853-032X

Las opiniones vertidas en los
artículos son responsabilidad
exclusiva de sus autores no
comprometiendo posición del editor

Imagen de tapa:

“Génesis creativa”
Acrílico sobre madera
entelada, año 2018
María del Carmen Banús

AGRADECIMIENTO

En agosto visitó la UBA Agustín Courtoisie: ex Director Nacional de Cultura del Uruguay, evaluador de los materiales producidos para el Plan Ceibal, docente universitario, periodista cultural y especializado actualmente en temáticas de CTS, el profesor Courtoisie compartió su vasto conocimiento en el campo educativo, en general; como así también sobre los modos en que las sociedades incorporan a la ciencia y la tecnología, en particular. Agradecemos al Profesor Courtoisie el reconocimiento a nuestra publicación en su página <https://agustincourtoisie.wordpress.com/> y recomendamos la lectura de su libro Ciencia Kiria, donde invita a apropiarse del conocimiento de la ciencia y de la tecnología con sentido práctico, de modo razonable más que racional o especulativo.

Gracias por confiar en nosotros, y a seguir avanzando!



<http://www.elementalwatson.com.ar/larevista.html>

NOS VEMOS EN DICIEMBRE!!

CORREO DE LECTORES (Comunicate con nosotros!)
revista_elementalwatson@yahoo.com.ar