

# Encuentros en la **b**iología



1992-2022

30 años de *Encuentros en la Biología*

30 años de Encuentros en la  
Biología

Historia de la Zoología

La varita mágica

Vol XV | No 184  
OTOÑO | 2022

ENCUENTROS EN LA BIOLOGÍA  
Revista de divulgación científica  
Indexada en *Dialnet*

**Entidad editora:**

Universidad de Málaga. EDITADA CON LA COLABORACIÓN DE LA UNIDAD DE IGUALDAD DE GÉNERO DE LA UMA, DEL INSTITUTO DE HORTOFRUTICULTURA SUBTROPICAL Y MEDITERRÁNEA “LA MAYORA” (IHSM-UMA-CSIC) Y EL DECANATO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

Depósito legal: MA-1.133/94

ISSN (versión electrónica): 2254-0296

ISSN (versión impresa): 1134-8496

**Periodicidad:**

4 NÚMEROS ORDINARIOS (TRIMESTRALES) Y AL MENOS  
1 NÚMERO EXTRAORDINARIO MONOGRÁFICO AL AÑO

**Correspondencia a:**

JUAN ANTONIO PÉREZ CLAROS  
DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
29071 - MÁLAGA  
[JOHNNY@UMA.ES](mailto:JOHNNY@UMA.ES)

EQUIPO EDITORIAL

DIRECTOR

- Juan A. Pérez Claros  
[johnny@uma.es](mailto:johnny@uma.es)  
Paleontología  
*Edición Digital*

COMITÉ EDITORIAL

- A. Victoria de Andrés Fernández  
[deandres@uma.es](mailto:deandres@uma.es)  
Biología animal aplicada  
*Ciencia Sin Límites*
- Elena Bañares España  
[elbaes@uma.es](mailto:elbaes@uma.es)  
Biología vegetal
- Juan José Borrego García  
[jjborregouma.es](mailto:jjborregouma.es)  
Microbiología
- Rafael Antonio Cañas Pendón  
[rcanas@uma.es](mailto:rcanas@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética
- M. Gonzalo Claros  
[claros@uma.es](mailto:claros@uma.es)

Biología celular,  
molecular y genética  
*Escribir bien no cuesta  
trabajo. Anecdotario  
científico*

- Juan Carlos Codina  
[jccodina@uma.es](mailto:jccodina@uma.es)  
Microbiología  
*Coordinación y difusión  
(Educación Secundaria)*
- José Córdoba Caballero  
[josecordoba@uma.es](mailto:josecordoba@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética  
*Diseño y maquetación*
- Belén Delgado Martín  
[belendm@uma.es](mailto:belendm@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética  
*Diseño y maquetación*
- Ana Grande Pérez  
[agrande@uma.es](mailto:agrande@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética  
*Jóvenes científicos.  
Mujeres STEM UMA*
- Beatriz Martínez Poveda  
[bmpoveda@uma.es](mailto:bmpoveda@uma.es)

Biología celular,  
molecular y genética

- Miguel Á. Medina Torres  
[medina@uma.es](mailto:medina@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética
- Paul Palmqvist Gomes  
[paulpg21@gmail.com](mailto:paulpg21@gmail.com)  
Biología animal
- Luis Rodríguez Caso  
[caso@eelm.csic.es](mailto:caso@eelm.csic.es)  
Biología vegetal  
*Calidad y difusión*
- Elena Rojano Rivera  
[elenarojano@uma.es](mailto:elenarojano@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética  
*Coordinación. Diseño y  
maquetación*
- Héctor Valverde Pareja  
[hvalverde@uma.es](mailto:hvalverde@uma.es)  
*Edición Digital*
- Enrique Viguera  
[eviguera@uma.es](mailto:eviguera@uma.es)  
Biología celular,  
molecular y genética
- Patricia Zarza Herrero  
[pzherrero03@uma.es](mailto:pzherrero03@uma.es)

Biología celular,  
molecular y genética  
*Coordinación y difusión  
(Alumnos)*

COMITÉ CIENTÍFICO

- Antonio Diéguez Lucena  
[dieguez@uma.es](mailto:dieguez@uma.es)  
*Filosofía de la ciencia.  
Epistemología*
- Juan Antonio Guadix Domínguez  
[jaguadix@uma.es](mailto:jaguadix@uma.es)  
Biología animal
- María Rosa López Ramírez  
[mrlopez@uma.es](mailto:mrlopez@uma.es)  
Astrobiología

COMITÉ EDITORIAL DE HONOR

- Salvador Guirado Hidalgo  
[guirado@uma.es](mailto:guirado@uma.es)  
Biología Celular
- Esteban Domingo  
[edomingo@cbm.uam.es](mailto:edomingo@cbm.uam.es)  
Evolución de virus
- Gonzalo Álvarez Jurado  
[g.alvarez@usc.es](mailto:g.alvarez@usc.es)  
Genética

## La portada



En octubre de 1992, hace ahora 30 años, Salvador Guirado acompañado de seis compañeros de la facultad (Ramón Muñoz-Chápuli, Antonio de Vicente, Jose Carlos Dávila, Francisco Cánovas, Francisca Sánchez Jiménez y Luis Javier Palomo) iniciaron la andadura de la revista Encuentros en la Biología, una de las más bellas iniciativas de divulgación científica que ha engendrado la Facultad de Ciencias de nuestra querida Universidad de Málaga. Treinta años después aquí seguimos, continuando la misma labor y con el mismo propósito de servicio a la sociedad. En esta ocasión la foto de la portada no puede estar dedicada a otro motivo que a nuestra facultad, el nexo común que alberga a muchos (aunque no todos) los involucrados en el desarrollo de esta gran obra.

## Índice

Editorial	3
La imagen comentada	5
Historia de la Zoología a través de los sellos postales	6
La varita mágica	13

## Editorial

Finalizamos 2022 cumpliendo treinta años del nacimiento de nuestra revista. Después del ataque informático proveniente de China, justo después de nuestro manifiesto en contra de la guerra de Ucrania, la web de nuestra revista no ha recuperado la normalidad. Es por ello que, desde el número de invierno de 2021 (marzo de 2022), los restantes números de este año que se acaba no han visto la luz, aunque no han dejado de producirse al ritmo de uno por estación del año. Ayudados del soporte que supone el Blog de la revista, mantenido por nuestro muy querido Ramón Muñoz-Chápuli, vamos a publicar tales números, aunque sea ya en 2023, mientras reparamos este engorro. Para aquellos que no nos conozcan de cerca, nuestra revista no recibe ningún apoyo

económico para su mantenimiento y todo el peso de su edición recae en el comité editorial. La mayoría de los miembros del mismo carecemos de los conocimientos informáticos para devolver la web a su normalidad y sin un apoyo expreso externo es muy difícil reponernos de este contratiempo. La propia búsqueda de contenidos propios o ajenos para la revista es una tarea que conlleva inevitablemente un esfuerzo que ha de añadirse a las crecientes demandas de una cada vez más burocratizada universidad. Toda la energía «invertida»... mejor dicho... desperdiciada en burocracia por el mundo académico es energía que no se emplea en sus tareas genuinas, como por ejemplo la propia edición de revistas independientes como la nuestra. Sin embargo, las dificultades a veces,

---

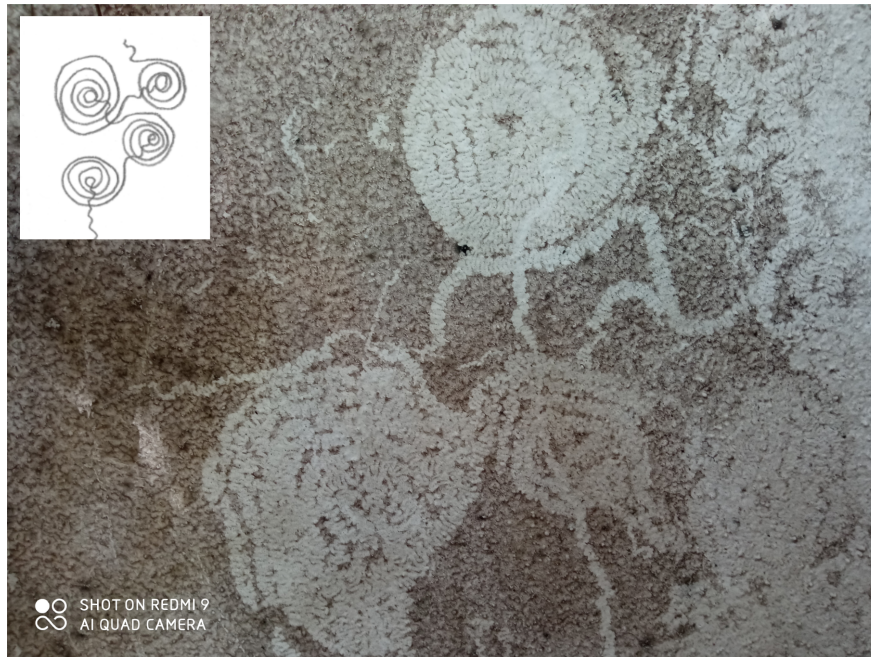
en lugar de ser un freno, suponen un estímulo porque nos hacen conscientes de la necesidad de continuar para adelante. Y es que la aportación personal que cualquiera de nosotros puede hacer a cualquier proyecto que merezca la pena, si no se hace, queda sin hacerse. Por ello seguimos aquí al pie del cañón con *Encuentros en la Biología*.

Juan Antonio Pérez Claros

eb



## La imagen comentada



Crédito de la imagen: José María Blanco Martín.

La curiosidad ante los que nos rodea no sólo es sana para las mentes libres, sino imprescindible para hacer avanzar nuestros conocimientos. No sé si la curiosidad lleva a la observación o la observación a la curiosidad, cuestión similar a qué fue primero, si la gallina o el huevo; lo que sí se puede afirmar es que se retroalimentan. José María Blanco, gran amigo y frecuente autor de artículos para *Encuentros*, compartió un hecho curioso en una reunión matutina de las que somos habituales con la excusa de toma café. Nos expresó que en sus tareas de mantenimiento del jardín había observado en una pared del mismo el rastro de un misterioso organismo que se movía de círculos en círculos, raspando la superficie de algas verdes y musgos que crecían adheridos a las superficies húmedas (verdín, según el DRAE). Motivado por la curiosidad pronto «cazó» al agente de la limpieza del muro... una caracolilla. La foto que nos mandó al día siguiente habla por sí misma. Lo que llama la atención es la forma regular de realizar su labor. Se mueve en círculos y llegado a un punto adopta una trayectoria si-

nuosa hasta llegar a otro punto donde vuelve a moverse en círculos. Para ser justo, el patrón de la pista dejada en la pared por el caracol entraña cierta dificultad de interpretación si no es acompañado de un esquema, el cual nos facilitó el propio José María y que adjunto en la parte superior izquierda de la foto. Como indica el bien conocido manual escrito por Douglas Futuyma<sup>[1]</sup>, si un patrón es complejo entonces es sospechoso de haber sido moldeado por la selección natural. Este punto conecta esta imagen precisamente con un artículo de José María en este número titulado «La varita mágica», en el cual hace referencia al modelo de los «bastones rotos» de Robert MacArthur. La conexión no es otra que este autor americano, un gigante fallecido prematuramente a los 42 años, también está ligado al comienzo de lo que se conoce como teoría del forrajeo óptimo<sup>[2]</sup> (*optimal foraging theory*) la cual postula que los animales adoptan una estrategia de obtención de recursos óptima (mayor beneficio al menor costo) guiada por la selección natural.

Juan Antonio Pérez Claros

## Referencias

- [1] Futuyma, D.J., 2009. *Evolution*, second ed. Sinauer Associates, Sunderland.
- [2] MacArthur, R. H., and E. R. Pianka. On optimal use of a patchy environment. *American Naturalist* 100: 603-9, 1966.

## HISTORIA DE LA ZOOLOGÍA A TRAVÉS DE LOS SELLOS POSTALES

por LUIS JAVIER PALOMO Y JUAN JOSÉ BORREGO

DEPARTAMENTOS DE BIOLOGÍA ANIMAL Y DE MICROBIOLOGÍA. UNIVERSIDAD DE MÁLAGA.

JAVIER.PALOMO@UMA.ES; JJBORREGO@UMA.ES

**Resumen:** Se realiza una revisión de la historia de la Zoología, desde sus primeros pasos hasta su consolidación en el s. XIX a través de los sellos postales. Este es el primer artículo de una serie que pretende, de una forma amena y por las imágenes de los sellos postales, recordar los hitos más importantes de las distintas ramas de la Biología.

**Abstract:** A review of the history of Zoology is carried out, from its first steps to its consolidation in the s. XIX through postage stamps. This is the first article in a series that aims, in a pleasant way and through the images of the postage stamps, to recall the most important milestones in the different branches of Biology.

Palabras clave: Zoología, historia, sellos postales.

Keywords: Zoology, history, postal stamps.

La Zoología es la rama de la Biología que se ocupa del estudio de los animales. El término deriva etimológicamente de los vocablos griegos *zoion* (animal) y *logos* (estudio). En concreto, la Zoología se ocupa del estudio de la anatomía y morfología de los animales, de su embriología y desarrollo, de su comportamiento, evolución, distribución, sistemática, y de cómo interactúan los animales entre sí y con el medio que les rodea. La Zoología es una de las ciencias naturales más antiguas, y es, en cierto sentido, la «madre» de muchas disciplinas científicas que actualmente tienen identidad propia. Este es el caso, por ejemplo, de la Fisiología, la Histología, la Genética, la Ecología o la Parasitología. El rápido desarrollo tecnológico iniciado en el s. XX permitió una mayor especialización de esas disciplinas, lo que condujo a una separación conceptual y metodológica

de la Zoología tradicional. La Zoología, como disciplina científica, está sin embargo desconectada de otras ciencias que se dedican a ciertas especies animales y que se incluyen en las Ciencias de la Salud, como la Veterinaria y la Medicina, aunque comparte con ambas metodologías y orígenes, pues su campo de estudio tiene un propósito bien distinto, ya que se dedican a restablecer y mejorar la salud de animales y humanos. Los primeros humanos tenían un conocimiento muy preciso de los animales, su anatomía y el comportamiento que desarrollaban (por ejemplo el migratorio), lo que les facilitaba su supervivencia. Durante la Prehistoria hay abundantes y muy realistas representaciones pictóricas y escultóricas de bisontes, caballos, ciervos y otros animales salvajes a los que estos humanos daban caza (Figura 1).



**Figura 1.** Pinturas rupestres: bisonte en la Cueva de Altamira, España (1967), catálogo Edifil nº 1782; hombres cazando ciervos en la Cueva de los Caballos, España (1967), cat. Edifil nº 1787.

La domesticación de animales durante el Neolítico y el rápido desarrollo de la agricultura propiciaron la aparición de las primeras civilizaciones en Mesopotamia, India y China, regiones donde aparecen los primeros estudios sobre ciencias naturales. Hay referencias a ciertos animales grabados con escritura cuneiforme en tablillas de más de 3.600 años de antigüedad; una de ellas, de los tiempos de Hamurabi, recoge un inventario sistemático de los animales terrestres. La antigua cultura india Ayurveda clasifi-

caba a los animales en cuatro categorías en función de su forma de nacimiento: del útero materno, de un huevo, de semillas o del calor y humedad ambiental. Sushruta (s. VI AC) está considerado como uno de los primeros cirujanos, y a partir de disecciones y vivisecciones animales describió con gran detalle el desarrollo del feto. En el antiguo Egipto, muchos animales, entre ellos escarabajos, abejas, serpientes o gatos, se consideraban deidades y se representaban habitualmente en forma de jeroglíficos (Figura 2).



**Figura 2.** Animales en jeroglíficos, Mónaco (1990), cat. Yvert et Tellier nº 1740; Reino Unido (1982), cat. Stanley Gibbons nº 1196.

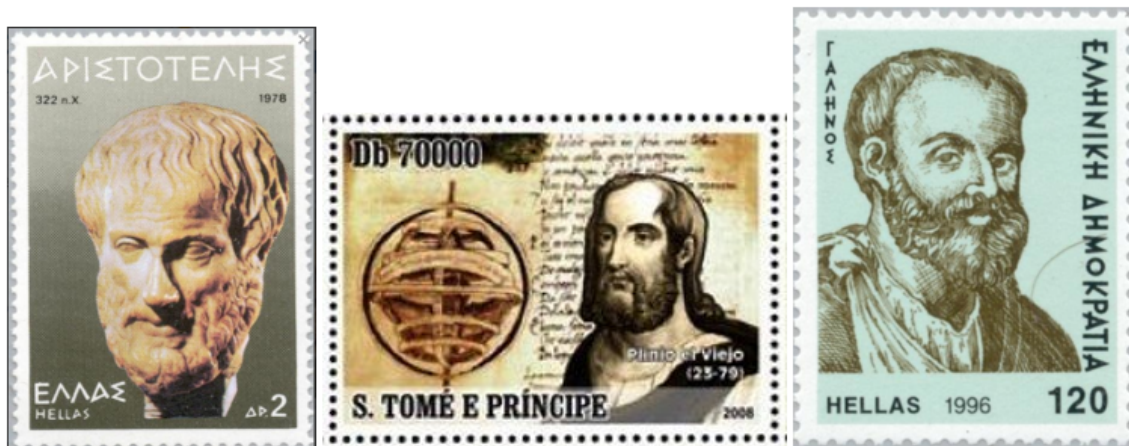
Aunque el concepto de zoología es mucho más reciente, el estudio sistemático de los animales comienza con **Aristóteles** (384-322 AC) (Figura 3A). Sus descripciones tanto de la morfología externa como de la organización interna de los animales, se pueden considerar como los primeros registros relacionados con el estudio de los animales. Aristóteles propuso diversas teorías sobre el metabolismo, la regulación de la temperatura, el desarrollo y la herencia. Fue un infatigable recolector, clasificó 540 especies de animales y diseccionó al menos 50 de ellas. Puso de manifiesto la existencia de diferentes grados de complejidad estructural ascendente, que relacionó con el tipo de vida de los animales, el hábitat donde vivían y las partes de su cuerpo. Los seres vivos se ordenaban en una escala creciente y gradual de complejidad y perfección, su *Scala Naturae*, desde las plantas a los humanos, este último el único con facultad de raciocinio, por lo que ocupaba la posición más alta. Aristóteles dividió a los seres vivos en dos grupos: animales y plantas, y a los primeros en animales con sangre (los actuales vertebrados) y animales sin sangre (invertebrados). Esta clasificación fue aceptada hasta mediados del s. XIX, y su percepción jerárquica del mundo animal sigue vigente en nuestros días.

**Plinio el Viejo** (23-79) (Figura 3B) fue un naturalista y filósofo romano que pasó la mayor parte de su vida estudiando, escribiendo e investigando la

geografía y los fenómenos naturales de su época (de hecho murió durante la erupción del Vesubio). Recopiló todos los conocimientos adquiridos en su obra *Naturalis Historia*, la primera obra enciclopédica que se conoce y que también recogía información extraída de otros autores antiguos. De los 37 libros de su obra, cuatro estaban dedicados a los animales (animales terrestres, marinos, aéreos e insectos). La *Historia Natural* de Plinio se convirtió, por varios motivos, en un modelo para las enciclopedias del Renacimiento: supuso la recopilación de los conocimientos de las culturas romana y griega de su época, por la amplitud de temas abordados, por sus referencias a autores originales y por el índice temático que incorporó. Fue la fuente documental para muchos exploradores occidentales como Marco Polo, Cristóbal Colón, Antonio Pigafetta y Fernando de Magallanes.

Un siglo más tarde, el medicogreco-romano **Galenos de Pérgamo** (129-216) (Figura 3C) estudia anatomía en la ciudad de Alejandría y disecciona animales para conocer su anatomía y la función de sus partes. Empleaba básicamente macacos y cerdos, pues en esa época estaba prohibida la disección de cadáveres humanos. Algunas de sus conclusiones, aún siendo falsas, perduraron durante toda la Edad Media, lo que supuso el estancamiento de los estudios de anatomía humana hasta el Renacimiento.





**Figura 3.** (A) Aristóteles, Grecia (1978), cat. Yvert et Tellier nº 1244; (B) Plinio El Viejo, Sto. Tomé (2008), cat. Michel nº 3392; (C) Galeno de Pérgamo, Grecia (1996), cat. Yvert et Tellier nº 1897.

La caída del imperio romano en Occidente supuso la destrucción de gran parte de las obras clásicas. Sin embargo, en Bizancio y en el mundo islámico los médicos y estudiosos musulmanes tradujeron estas obras al árabe e impidieron su desaparición. Además, entre los siglos VIII y XIII, durante la edad de oro del Islam, médicos, científicos y filósofos hicieron contribuciones significativas a la Zoología. En la ciudad de Basora (en el actual Irak) **Abu Uthman Al-Jahiz** (781-869) (Figura 4A), introdujo ideas tan novedosas para su época, como la lucha por la supervivencia de los animales, las cadenas alimentarias y el medio ambiente. Publicó *Kitāb al-Hayawān* (el libro de los animales) una enciclopedia en siete volúmenes con

anécdotas, descripciones poéticas y proverbios sobre 350 especies de animales.

Durante la Edad Media, **Alberto Magno** (1200-1280) (Figura 4B) se formó en Padua y París donde tradujo, comentó y clasificó textos antiguos, especialmente los de Aristóteles. Añadió a éstos sus propios comentarios y experimentos sobre zoología, botánica y minerales. Su aproximación fue sorprendentemente moderna y entre otras cosas escribió «porque pertenece a la ciencia natural no simplemente aceptar lo que se nos dice, sino investigar las causas de las cosas naturales». Su obra *De animalibus libri, XXVI* fue el estudio más amplio publicado hasta la fecha con observaciones zoológicas.



**Figura 4.** (A) Al-Jahiz, Siria (1968), cat. Yvert et Tellier nº 254; (B) Alberto Magno, R.F. Alemania (1980), cat. Michel nº 1049.

Con el inicio del Renacimiento los estudios zoológicos experimentan un notable desarrollo, con un interés renovado en la experimentación empírica. Artistas como Alberto Durero y Leonardo da Vinci a menudo trabajaron con naturalistas y se interesaron en el cuerpo de los animales, estudiando junto a ellos su anatomía y fisiología, e ilustrando sus obras. Esta época supuso el inicio de la era de los viajeros y recolectores, un período en el que muchas leyendas medievales se confirmaron como ciertas cuando animales vivos o preservados fueron llevados a Europa.

**Conrad Gessner** (1516-1565) (Figura 5), fue un médico y naturalista suizo reconocido como el padre de la bibliografía científica. Su obra *Bibliotheca universalis* fue la primera relación alfabética en la que se enumeraban todos los libros conocidos impresos, en latín, griego o hebreo, durante el primer siglo de imprenta. En su *Historia animalium* introdujo una visión nueva y completa del Reino Animal, con descripciones de todos los animales conocidos. Fue posiblemente la primera obra zoológica moderna y la

primera que incorporaba bibliografía de escritos sobre historia natural. Los cinco volúmenes que escribió sobre animales (cuadrúpedos, anfibios, aves, peces y serpientes) abarcan más de 4.500 páginas y es considerada por muchos autores como el inicio de la Zoología moderna. Gessner combinó datos extraídos de fuentes antiguas, como el Antiguo Testamento, Aristóteles o Plinio, con el folclore popular y los bestiarios medievales, añadiendo sus propias observaciones. Aunque trató de distinguir los hechos observados de los mitos y los errores populares, incluyó muchos animales ficticios como unicornio, basiliscos o sirenas, a los que solo conocía por fuentes indirectas o bestiarios medievales. Sin embargo, cuando Gessner dudaba de la exactitud de dichas opiniones o de la validez de las ilustraciones que incluía, lo mencionaba claramente. El libro, a diferencia de muchas obras de su tiempo, fue profusamente ilustrado con xilografías coloreadas a mano, extraídas de observaciones personales del propio Gessner o de sus colaboradores.



**Figura 5.** Gessner, Rep. Guinea (2016), cat. Yvert et Tellier nº 8114-8117; Sierra Leona (2016), cat. Yvert et Tellier nº BF943.

Durante los s. XVII y XVIII el entusiasmo por la sistematización, la clasificación y la denominación de los animales dominó la Zoología. La investigación de la naturaleza propició la aparición de sociedades académicas en las que se financiaba, discutían y presentaban dichos avances. Pioneras fueron la *Royal Society*, en Londres (1660), la *Académie des Sciences*, en París (1666) y la *Royal Society of Sciences*, en Uppsala (1710). En esta institución sueca, **Carlos Linneo** (1707-1778) (Figura 6A) trabaja en su obra *Systema Naturae* cuya 10ª edición se publicó en dos volúmenes (1758 y 1759). El primero de ellos, dedicado a los animales, marca el punto de partida de la nomenclatura zoológica, un sistema binomial creado por Linneo, en el que cada especie recibe un único nombre científico en latín, no influenciado por los nombres comunes, formado por dos términos, el género y la especie. Linneo también propone otros grupos

clasificatorios superiores: reino, clase y orden, a los que se incorporarán posteriormente el filo y la familia. Su obra recogía la diversidad de los seres vivos conocidos hasta el momento, a los que dividía en seis clases: mamíferos, aves, anfibios (incluía a los reptiles, condriactios y algunos peces óseos primitivos), peces, insectos (todos los artrópodos) y gusanos (restantes invertebrados). Estos grandes grupos se establecían en función del número de aurículas y ventrículos del corazón, de la existencia de sangre caliente o fría, o de la presencia de antenas.

Entre los grandes exploradores y naturalistas de principios del s. XIX destaca el prusiano **Alexander von Humboldt** (1769-1859) (Figura 6B) que viajó extensamente por las Américas, explorándolas y describiéndolas por primera vez desde el punto de vista de un científico occidental. Humboldt fue uno de los primeros en proponer que las tierras que bordeaban



el Océano Atlántico estuvieron unidas en el pasado, también investigó la interacción de los animales entre sí y con el medio ambiente y la forma en que esta relación depende del lugar en el que viven, poniendo los cimientos de la biogeografía, la ecología y la etología.

En esta época los naturalistas comienzan a rechazar el esencialismo y a considerar la importancia de las extinciones y del cambio de las especies a lo largo del tiempo.



**Figura 6.** (A) Linneo, Suecia (1938), cat. Yvert et Tellier n° 276; (B) von Humbolt, Venezuela (1969), cat. Yvert et Tellier n° PA970.

Mientras Linneo concebía a las especies como una parte inamovible dentro de una jerarquía establecida, el otro gran naturalista del s. XVIII **Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon** (1707-1788) (Figura 7A) consideraba a las especies como categorías artificiales y formas vivas adaptables. En el curso de su examen del mundo animal, Buffon percibió que entornos similares de diferentes regiones tienen plantas y animales distintos, un concepto conocido más tarde como Ley de Buffon, y que el cambio climático podía haber facilitado la propagación mundial de especies desde sus centros de creación, mejorando en algunos casos después de dispersarse y degenerando en otros.

Hasta finales del s XVIII la anatomía era una ciencia puramente descriptiva, pero durante el cambio de siglo, **Georges Cuvier** (1769-1832) (Figura 7B) llevó a cabo importantes estudios sobre anatomía comparada y puso de manifiesto la relación existente entre estructura y función. En su teoría de la correlación, postulaba que se podía deducir a partir de una parte adecuada del cuerpo de un animal el conjunto completo de adaptaciones que caracterizaba

al organismo. Para él era obvio que organismos con partes similares estaban próximos en un sistema de clasificación. También puso de manifiesto que los fósiles eran restos de especies que se habían extinguido y no restos de especies que vivían en otras zonas del planeta, como se pensaba hasta entonces.

Todas estas ideas, en cierto modo transformistas, posiblemente influyeron en las teorías evolutivas desarrolladas posteriormente. **Jean-Baptiste Lamarck** (1744-1829) (Figura 7C) fue un naturalista y académico francés que formuló la primera teoría de la evolución biológica. En su obra *Philosophie zoologique* (1809) propuso que la gran variedad de organismos existentes, que en aquel tiempo se aceptaba que eran formas estáticas creadas por Dios, habían evolucionado desde formas simples, postulando que los protagonistas de esa evolución habían sido los propios organismos por su capacidad para adaptarse al ambiente. Los cambios en ese ambiente generaban nuevas necesidades en los organismos, y esas nuevas necesidades conllevarían una modificación de los mismos, que además sería heredable.



Figura 7. (A) Comte de Buffon, Francia (1949), cat. Yvert et Tellier nº 856; (B) Cuvier, Francia (1969), cat. Yvert et Tellier nº 1595; (C) Lamarck, República del Chad (2015), cat. Colnet nº 2015-10/3.

**Charles Darwin** (1809-1892) (Figura 8) combinó los descubrimientos biogeográficos de Humboldt, los geológicos de Lyell, los poblacionales de Malthus y su propia experiencia (acumulada en el viaje que realizó en el Beagle alrededor del mundo entre 1831 y 1836), para confeccionar su «Teoría de la evolución orgánica basada en la selección natural» (1859). Darwin no fue el primero en especular con la idea de que los organismos podían cambiar de generación en generación y de esta forma evolucionar, pero fue el primero

en formular un mecanismo por el cual los cambios se incorporaban. Proponía que las variaciones hereditarias surgían en un contexto de competencia por la supervivencia y que las variaciones que favorecían la supervivencia se preservaban en los descendientes. Con el tiempo, la continua acumulación de variaciones resultaba en la aparición de nuevas formas. Como las variaciones estaban relacionadas con la supervivencia, los supervivientes estaban mejor adaptados al medio.



Figura 8. Darwin, Reino Unido (1982), cat. Stanley Gibbons nº 1175 a 1178.

Casi coetáneo a Darwin, **Alfred Rusell Wallace** (1823-1913) (Figura 9A) fue un naturalista británico que viajó por la Amazonía y sobre todo por el archipiélago malayo, recolectando especímenes para su venta y análisis. Sus investigaciones llevaron a Wallace, de forma independiente, a similares conclusiones que las obtenidas por Darwin sobre evolución

y selección natural. Además, sus observaciones de las marcadas diferencias zoológicas entre diversas partes del archipiélago lo llevaron a marcar una línea que dividía a Indonesia en dos zonas, una donde los animales relacionados con los de Australia eran comunes y otra en la que las especies eran en gran parte de origen asiático. Dicha frontera zoogeográfica se



denomina en la actualidad línea de Wallace.

**Ernst Haeckel** (1834-1919) (Figura 9B) fue un zoólogo y profesor de anatomía comparada alemán. Fue un consumado artista y es considerado uno de los grandes ilustradores del mundo natural del siglo XIX. Ferviente evolucionista, promovió y popularizó el trabajo de Darwin en Alemania. Haeckel es el gran responsable de la integración de la anatomía y la embriología en la teoría evolutiva. Desarrolló la teoría de la recapitulación, hoy desacreditada en su versión literal, según la cual «la ontogenia recapitula la filogenia» es decir que el desarrollo biológico de un organismo individual (su ontogenia), resume y en cierto modo refleja la historia evolutiva de su especie (su filogenia). Así, por ejemplo, la presencia de surcos branquiales en las fases tempranas del embrión de

mamíferos y en la de otros grupos de vertebrados sugiere la existencia de un ancestral común. En 1866 Haeckel propuso un tercer reino, el Protista, que incluía a los «organismos neutros», al que llamó reino de las formas primitivas, aquellas que no eran ni animales ni vegetales. Posteriormente los definió como seres unicelulares, en oposición a los dos reinos de seres multicelulares (animales y plantas) ya descritos por Aristóteles. Esta división en tres reinos se mantuvo hasta el primer tercio del s XX. Haeckel propuso una nueva categoría taxonómica, el filo (que se situaba entre la del reino y la clase), y también acuñó términos como ecología, filogenia, ontogenia, monofilético, y describió, entre otros, el filo de los Cordados, formado por Urocordados, Cefalocordados y Vertebrados.



**Figura 9.** (A) Wallace, Reino Unido (2010), cat. Yvert et Tellier nº 3276; (B) Haeckel, RBS Jena (2008), sello regional sin catalogar.

## LA VARITA MÁGICA

por JOSÉ M<sup>a</sup> BLANCO MARTÍN

DEPARTAMENTOS DE ECOLOGÍA Y GEOLOGÍA. UNIVERSIDAD DE MÁLAGA.

JMBLANCO@UMA.ES

**Resumen:** La ciencia se topa a veces con manifestaciones naturales de cábalas numéricas que ponen a prueba nuestro escepticismo intrínseco. La sucesión de Fibonacci es una de las más conocidas, pero hay otras no menos intrigantes como la que hoy nos ocupa, capaz de explicar el reparto desigual de elementos dentro de conjuntos biológicos y de otras índoles.

Como en episodios anteriores, exploraremos algunas orillas del asunto con ayuda de R y así aprendemos un poco más de este lenguaje a la vez que nos maravillamos con las sospechosas coincidencias entre numerología y biología.

**Abstract:** *Science sometimes runs into natural manifestations of cabalist sequences that defy our intrinsic skepticism. The Fibonacci sequence is one of the famous, but there are others just as striking, as our invited of today, that explains some unequal distribution of elements within biological sets. As in the past, we will explore some shores of the matter with the help of R to learn a little more about this language while marveling with some suspicious coincidences between numerology and biology.*

## Introducción

El kiosquero se encogió de hombros mientras daba el *Sur* y una varita de caramelo al padre de dos energúmenos que miraban voraces hacia arriba. Este sujetó la chuchería por los extremos y, presionando en el centro con los pulgares ¡CRACK! la partió en dos.

—¡Para mí la grande! —gritó Simona.

—¡No! ¡La grande para mí! —chilló Arturo.

—Venga, venga, que son iguales —mintió el progenitor mientras asignaba las dulces fracciones—. Hala, vámonos al parque.

Sentado en su banco preferido, con el rabillo del ojo pendiente de los columpios, hojeó el periódico. Como siempre, solo traía noticias nefastas, aviesas o absurdas: «*El Titanic se hunde frente a Terranova*», «*El Krakatoa devasta la isla de Java*», «*La peste bubónica asola Londres*», «*WC-gate en los madriles*», «*Gengis Khan invade el Imperio austrohúngaro*», «*El boniato por la nubes*», «*El doctor Zhivago se saca el MIR a los ciento tres años*», «*El cine español en su mejor momento*»... Enseguida llegó a la penúltima página, su favorita y la única razón que mantenía el ritual del diario dominguero.

Antes lo hacía, pero ya se había cansado del yunque de platero y de la antigua nota musical, así que pasó directamente al *sudoku*. El fascinante cuadrado aritmético y su magia alrededor del 9. Nueve filas,

nueve columnas, nueve cuadrados, nueve guarismos engarzados en armonía sobrenatural. Enigmático nueve. De haberse conocido en el siglo V a. C. tal vez Pitágoras habría abandonado la *tetraktys*, el 10 y sus triángulos al caer en los brazos del sudoku, el 9 y los cuadrados, fundando la secta de los *nonainos*, seguramente. El 9 le gustaba. Cuando estaba en el colegio siempre sacaba nueves, ¿habría sido más feliz si hubiese sacado dieces? Estaba seguro de que no. El nueve estaba muy cerca de la perfección, lo que suponía un estímulo para perseverar, para mantener el interés, la curiosidad, las ganas de seguir. Y estaba lo bastante lejos como para evitar la soberbia y autocomplacencia del engréido. Sin duda una vida de 9 era mucho mejor que una de diez.

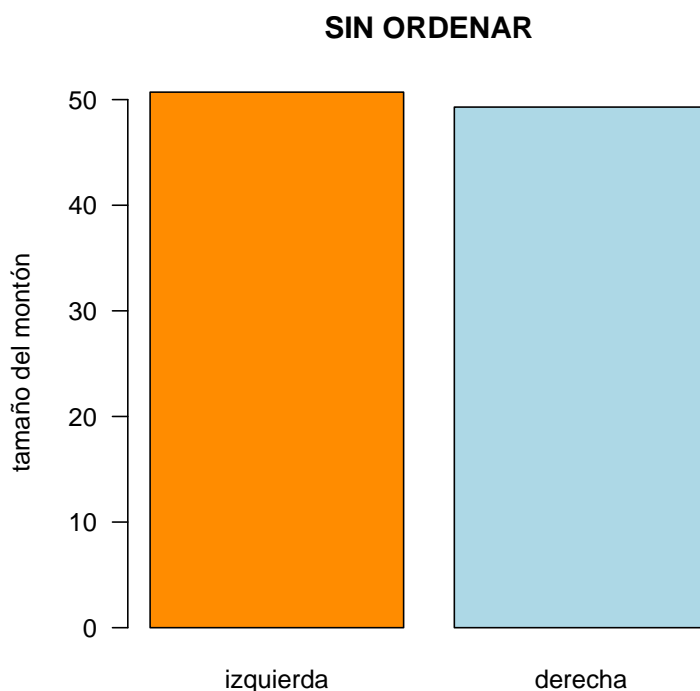
Acabado el rompecabezas, volvió a mirar hacia los columpios. Simona era su preferida. Era la mayor, una mini réplica de su madre, perspicaz y ladina, guapa y encantadora. Arturo era más simplón y se le veía venir; además, cada vez se parecía más al butanero local. Incluso tuvieron que llevarlo al pediatra para revisar una desviación de cervicales y clavícula derecha. Ahora que las ideas de Lamarck habían saltado de nuevo a la palestra científica, la sospecha epigenética no ayudaba precisamente a promover el cariño hacia su supuesto vástago. Aún así, los quería a ambos por igual y no pudo evitar cierta reconcomilla por haber dado el trozo grande a la niña.

Es que era muy difícil partir algo exactamente por la mitad y no podía evitar la preferencia filial. Aún así, tal vez podría entrenarse. Como quedaba

parque para rato, rasgó una tira del borde del diario y la sostuvo con el pulgar e índice de cada mano, en tensión, sujeta por los extremos. Estiró un poco más y ¡*PLAFF* se partió inopinadamente, tal como esperaba, en dos trozos desiguales. Depositó cada trozo a sendos lados del banco y repitió el experimento. La tira se rompía por cualquier sitio, a veces más cerca de la mano izquierda, a veces de la derecha, a veces casi por el centro. Pacientemente, ante la atónita mirada de la pareja de abuelillos del banco vecino, fue amontonando recortes a diestro y siniestro. Al rato, el montón de papelillos a su derecha era prácticamente

igual que el de la izquierda. «Ya me lo imaginaba».

```
#---- Reparto sin ordenar
n <- 100 # número de tiras
izq <- runif(n)
dch <- 1 - izq
monton_izq <- sum(izq)
monton_dch <- sum(dch)
barplot(c(monton_izq, monton_dch),
names.arg = c("izquierda", "derecha"),
col = c("darkorange", "lightblue"),
ylab = "tamaño del montón",
main = "SIN ORDENAR")
```



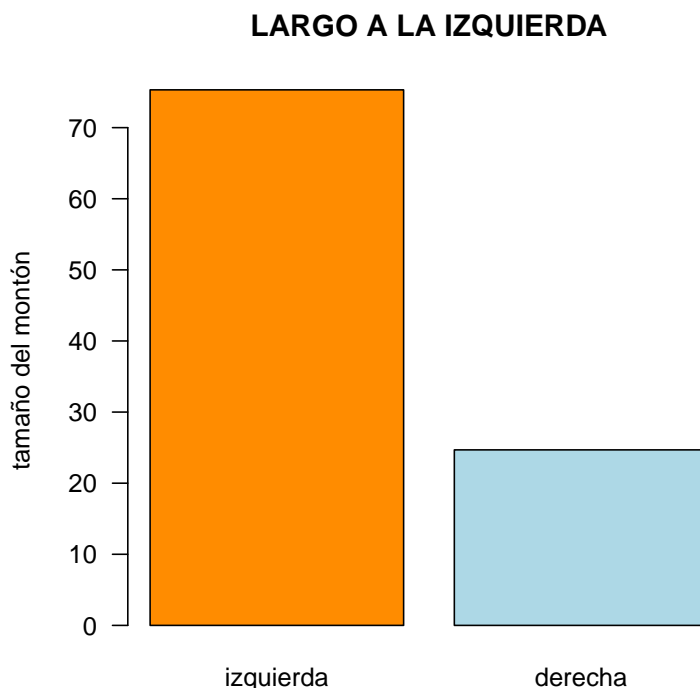
**Figura 1.** Papel acumulado a cada lado cuando se colocan al azar. Como se esperaba, más o menos la mitad en cada montón. El código que genera la figura lo tienes [aquí](#).

Hizo una bola con los recortes y la echó a la papelera. Entonces, con cierta sensación de culpa, cambió el experimento: ahora colocaría el trozo más grande a su izquierda y el más corto a la derecha. Aunque su esperanza como padre estaba en que no hubiera mucha diferencia, al cabo del tiempo el montón de la izquierda triplicaba al de la derecha.

```
#---- El grande a la izquierda
n <- 100 # número de tiras
izq <- numeric()
dch <- numeric()
for (i in 1:n) {
```

```
  izq[i] <- runif(1)
  if (izq[i] < 0.5) {
    izq[i] <- 1 - izq[i]
  }
  dch[i] <- 1 - izq[i]
}
monton_izq <- sum(izq)
monton_dch <- sum(dch)
barplot(c(monton_izq, monton_dch),
names.arg = c("izquierda", "derecha"),
col = c("darkorange", "lightblue"),
ylab = "tamaño del montón",
main = "LARGO A LA IZQUIERDA")
```





**Figura 2.** Papel acumulado a cada lado cuando el largo se pone a la izquierda. Sorprendentemente (o no) el montón de la izquierda triplica al otro. El `script R`, [aquí](#).

«¡El triple!» No se lo habría imaginado aunque, ahora que lo pensaba, la explicación era sencilla: al ordenar los trozos, el más corto siempre sería inferior a la mitad de la tira, es decir, el punto de rotura quedaría entre 0 y 0.5, con una media de 0.25. Por eso el trozo largo era, con 0.75 en promedio, tres veces más largo que el corto. En ese instante se sintió como el *demonio de Maxwell*. A sabiendas de que cometía cierta injusticia, no se imaginaba en qué grado sumo se estaba manifestando. ¡La acumulación de pequeñas preferencias, aparte de infringir la segunda ley de la termodinámica, acabaría con Simona en el dentista!

### Formalización del asunto

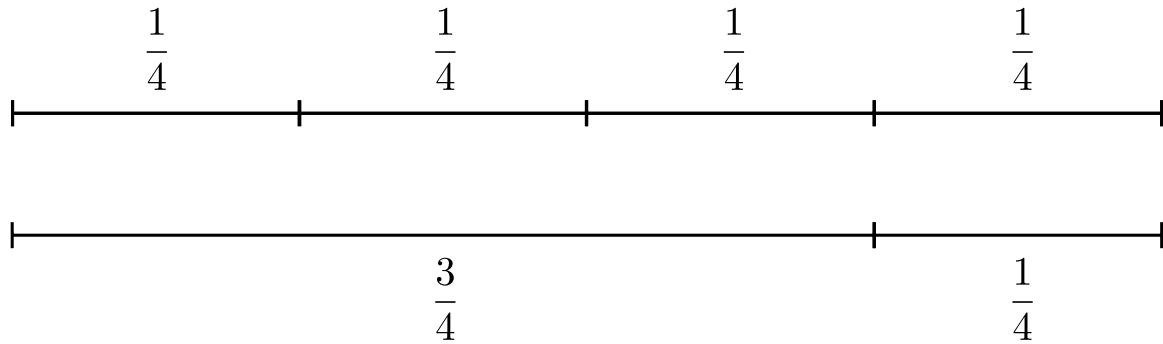
Cuando la varita se parte en dos segmentos  $a_1$  y  $a_2$  según hemos visto, el mayor  $a_1$  tendrá como mínimo una longitud  $\frac{1}{2}$ , a lo que habrá que añadir el trozo que pierda el segmento corto con respecto a la mitad, esto es  $\frac{1}{4}$ . Y al más corto  $a_2$  le quedará el cuarto restante (Figura 3). Es decir,

$$a_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

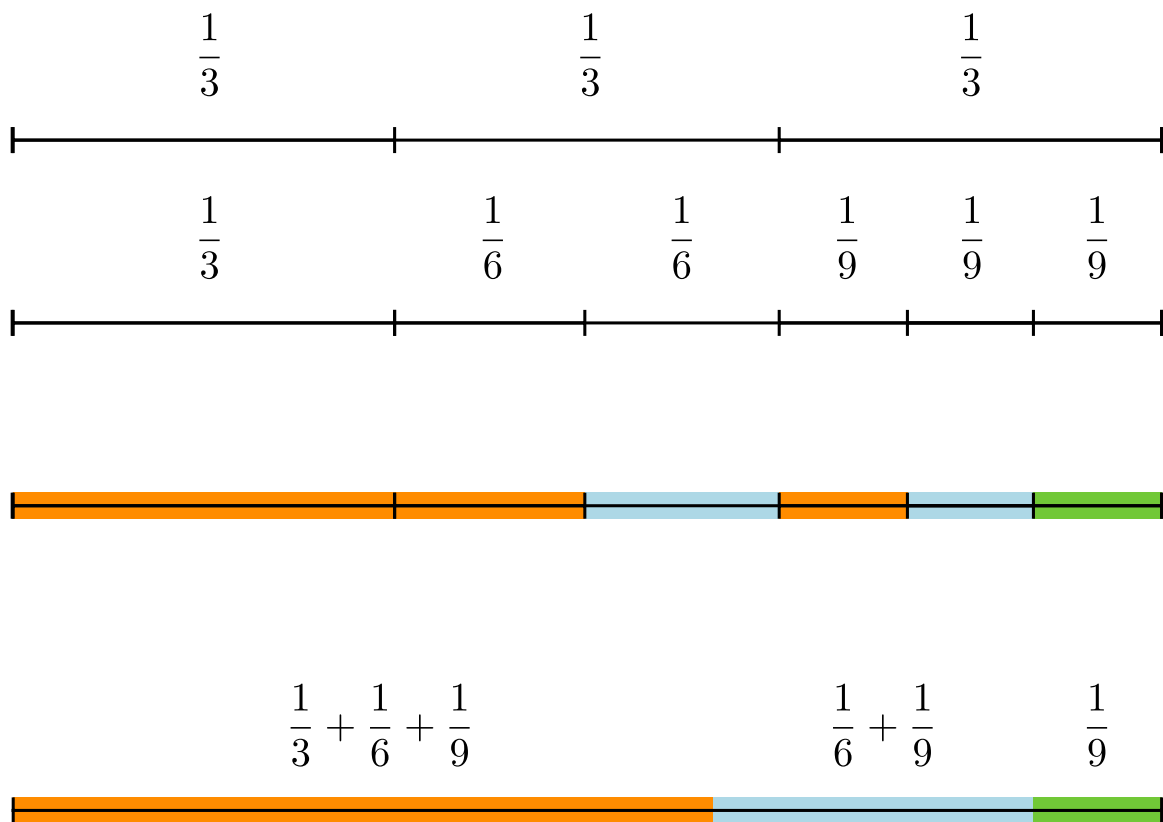
$$a_2 = \frac{1}{4}$$

### Formalización del asunto

La varita se partirá en 3 segmentos si elegimos 2 puntos de fractura. Si no los ordenamos, se esperarían longitudes medias iguales a un tercio. Al ordenarlos, aplicamos el razonamiento de arriba y podemos ver que, en promedio, el trozo más pequeño será  $\frac{1}{3}$  del tercio que le correspondería por azar, es decir,  $\frac{1}{9}$ . El trozo mediano recibiría la mitad de su tercio (esto es,  $\frac{1}{6}$  y, el grande, su tercio completo. Los restos (a saber,  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{6}$ ) se repartirían de modo inicuo, como muestra la Figura 4.



**Figura 3.** Longitudes esperadas con un punto de fractura si siempre se coloca el mayor a la izquierda. Ya no sorprende que el mayor triplique al pequeño.



**Figura 4.** Longitudes esperadas con dos puntos de fractura si se ordenan de mayor a menor. Empieza a vislumbrarse la suma de armónicos.

**Caso general**

Llamaremos  $n$  al número de segmentos y  $a_r$  a la longitud de cada uno ordenados en rango de mayor a menor  $r = 1, 2, \dots, n$ . Ahora aplicamos nuestra intuición al patrón de armónicos y nos tiramos a la piscina:

$$a_r = \frac{1}{n} \sum_{i=r}^n \frac{1}{i}$$

Veámosla en acción:

- $n = 2$ :  $a_1 = \frac{1+\frac{1}{2}}{2} = 0,75$ ;  $a_2 = \frac{\frac{1}{2}}{2} = 0,25$

- $n = 3$ :  $a_1 = \frac{1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}}{3} = 0,61$ ;  $a_2 = \frac{\frac{1}{2}+\frac{1}{3}}{3} = 0,28$ ;  
 $a_3 = \frac{\frac{1}{3}}{3} = 0,11$
- etc.

Como te puedes esperar, esto ya se conocía desde hace mucho tiempo, aunque la formulación original es  $a_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \frac{1}{n-i+1}$  con el rango de menor a mayor longitud. La demostración formal la hicieron Barton y David<sup>[1]</sup> en [este artículo](#) (al final de la página 81) y parece que también está deducida por inducción. Como curiosidad, Cohen<sup>[2]</sup> la deduce a partir de la distribución exponencial y, en el ínterin, también se ha deducido de otras formas, como veremos en un rato. En adelante, a riesgo de parecer petulantes, nos

quedaremos con la forma basada en la suma de armónicos porque me parece más bonita. El código R que la calcula es este:

```
#---- función suma de armónicos
sum_arm <- function(n) {
  a <- numeric(n)
  for (i in 1:n) {
    for (j in 1:i) {
      a[j] <- a[j] + 1/i
    }
  }
  a/n
}
```

### El bestia y la bella

Aunque en este caso no hay motivos para sospechar, siempre es gratificante echar un rato de programación para ir ordenando ideas que luego aparecerán. Vemos si coinciden la aproximación a base de fuerza bruta y la otra más *armoniosa*. Como el código es un poco más largo, lo puedes ver [aquí](#) y la Figura 5 resume el resultado.

### En la distribución entre especies

Muy poco tiempo después del artículo de Barton y David, con mucha vista e intuición, [Robert MacArthur](#)<sup>[3]</sup> pensó que, si la línea representaba el recurso compartido por varias especies similares y estas

se repartían los nichos como fragmentos al azar del recurso, entonces sus abundancias deberían seguir la misma distribución. Este *modelo de MacArthur o del bastón roto* se hizo fugazmente famoso en ecología y se comprobó que, *más o menos*, se cumplía en algunas comunidades de pájaros y peces. Algunos años después se demostró<sup>[4]</sup> que otros axiomas independientes del recurso también conducían a la misma distribución, como cuando los valores proceden de una distribución exponencial, como veremos ahora mismo. Lo anecdótico del caso es que el propio MacArthur repudió su modelo después de algunos encontronazos matemáticos con Evelyn Pielou, ecóloga teórica de tronío famosa por no dar puntada sin hilo.

### La decepción de MacArthur

La interpretación basada en el reparto aleatorio del recurso no se pudo sostener cuando se comprobó que también aparecía la misma distribución cuando las abundancias de  $n$  especies se tomaban al azar de una distribución exponencial y se promediaban por la suma total de individuos. Así,

$$a_i = \frac{X_i}{\sum_{j=1}^n X_j}$$

donde  $X_i$  sigue una distribución exponencial cualquiera. Veamos el resultado por simulación en la Figura 6.

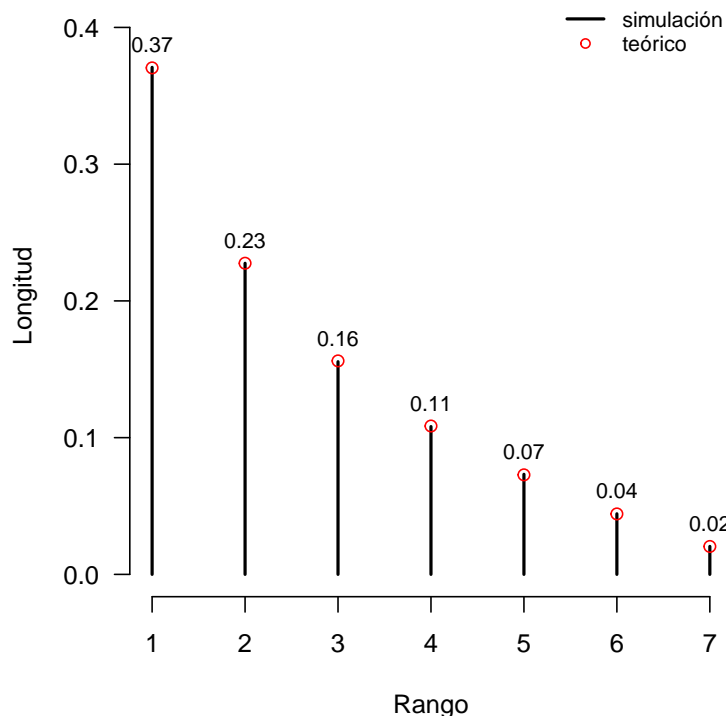
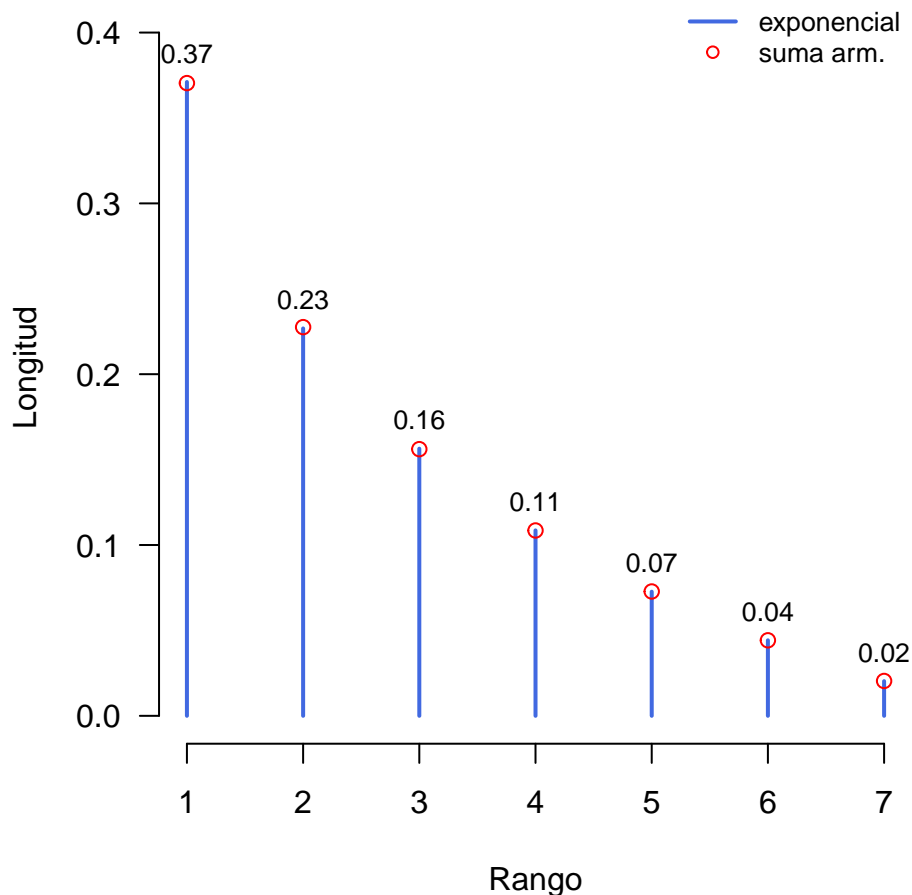


Figura 5. Distribución de longitudes esperadas. La barrita negra representa la media de 10000 simulaciones. El círculo rojo es

el valor según la ecuación teórica. (`script R.`)



**Figura 6.** Las barras azules representan la abundancia promedio de 7 especies independientes que siguen una distribución exponencial (¡con cualquier  $\lambda$ !). Los círculos rojos representan las abundancias según la suma de armónicos. (`script R.`)

¡Cualquiera! Ni siquiera la tasa de la exponencial importa (al dividir por la suma, se cancela el factor de escala). La interpretación ecológica de este principio es más abstracta que el bastón roto de MacArthur y solo requiere poblaciones independientes que hayan crecido de forma exponencial hasta el momento del muestreo: la que haya llegado antes alcanzará la mayor abundancia y, a partir de ahí, el argumento se repite hasta la última colonizadora.

Una de las debilidades de este modelo, en la forma que sea, aplicado a comunidades de especies es la falta de coeficientes que ajustar. El número de especies ya determina sin escapatoria la forma de la distribución. Esto deja poco margen de maniobra cuando se quieren comparar distintos conjuntos de datos que otros modelos más *ajustables* manejan con más soltura, como el lognormal o el geométrico entre la plétora de opciones, que puedes ver revisada [aquí](#) por una tropa de expertos<sup>[5]</sup> en lo que sigue siendo un problema abierto en la ecología: ¿por qué no hay el mismo número de individuos en todas las especies?

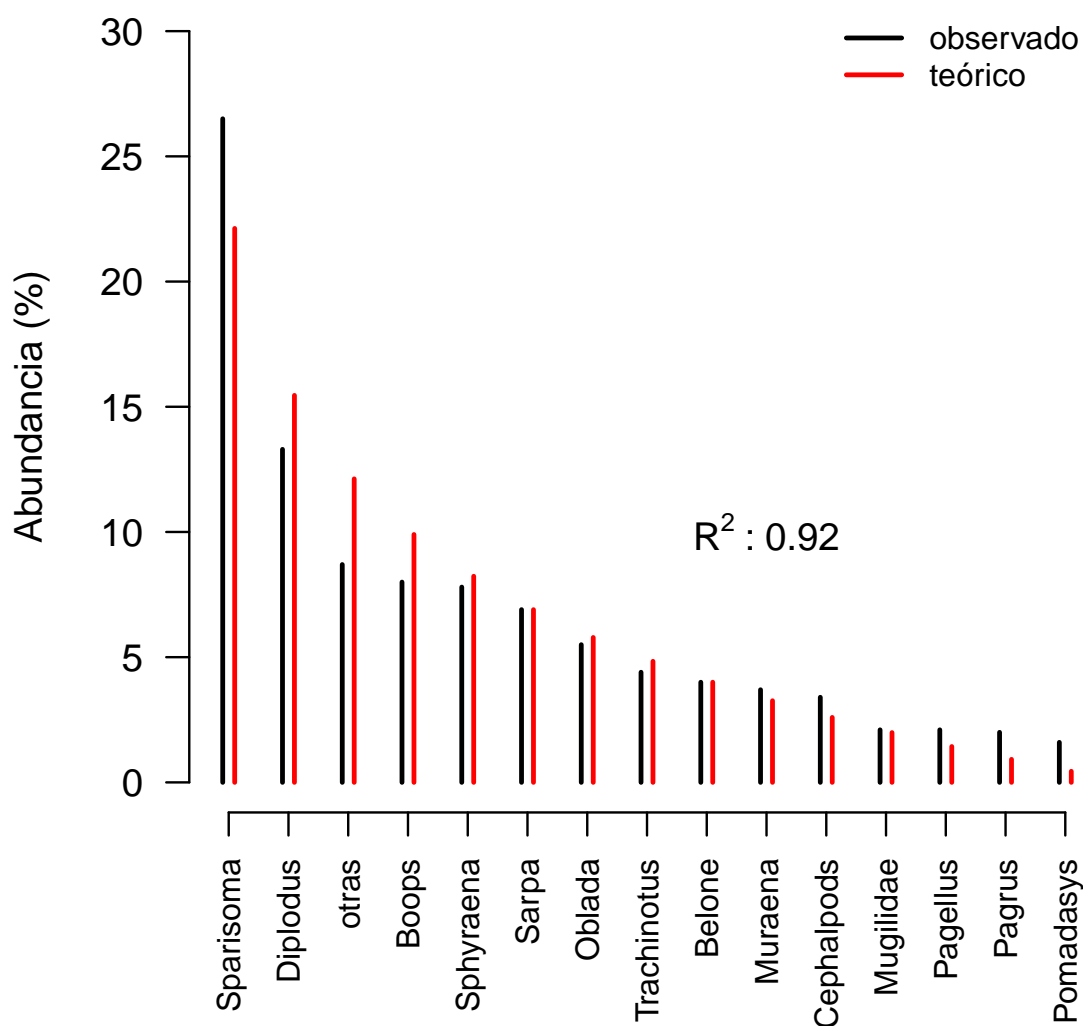
Aún así, esta distribución es más común en la naturaleza de lo que puedas creer. Veamos a continuación unos cuantos ejemplos en distintas discipli-

nas que, deliberadamente, se han elegido fuera de las bases de datos tradicionales en artículos sobre distribución de abundancia en especies.

### En la pesca deportiva costera

Si algunos conjuntos de datos se ajustan a la distribución y otros no, debe de haber algún factor que se escapa. El axioma de partida sugiere que las especies deben ser similares. Por tanto, no es raro que esta distribución no funcione con bases de datos obtenidas por yuxtaposición de distinta procedencia. No obstante, cuando los métodos de muestreo y el hábitat son homogéneos, aparecen parecidos más que razonables.

Por ejemplo, la Figura 7 muestra el conteo de especies costeras obtenidas por un club de aficionados en las islas Canarias que usan artes muy parecidas en un ambiente insular de costa homogénea aislada por el océano profundo de otros hábitats similares. En estas circunstancias, el modelo del bastón roto explica el 92% de la varianza observada en los datos. ¡No está tan mal, Robert!



**Figura 7.** Abundancia de especies capturadas por un club de pescadores deportivos en las islas Canarias (barras negras) y valores teóricos del modelo (en rojo). El código de R que hace el gráfico y calcula la bondad del ajuste está a continuación. (script R).

sean las funciones de un sistema las que se repartan según la relación de armónicos?

### En los sectores laborales

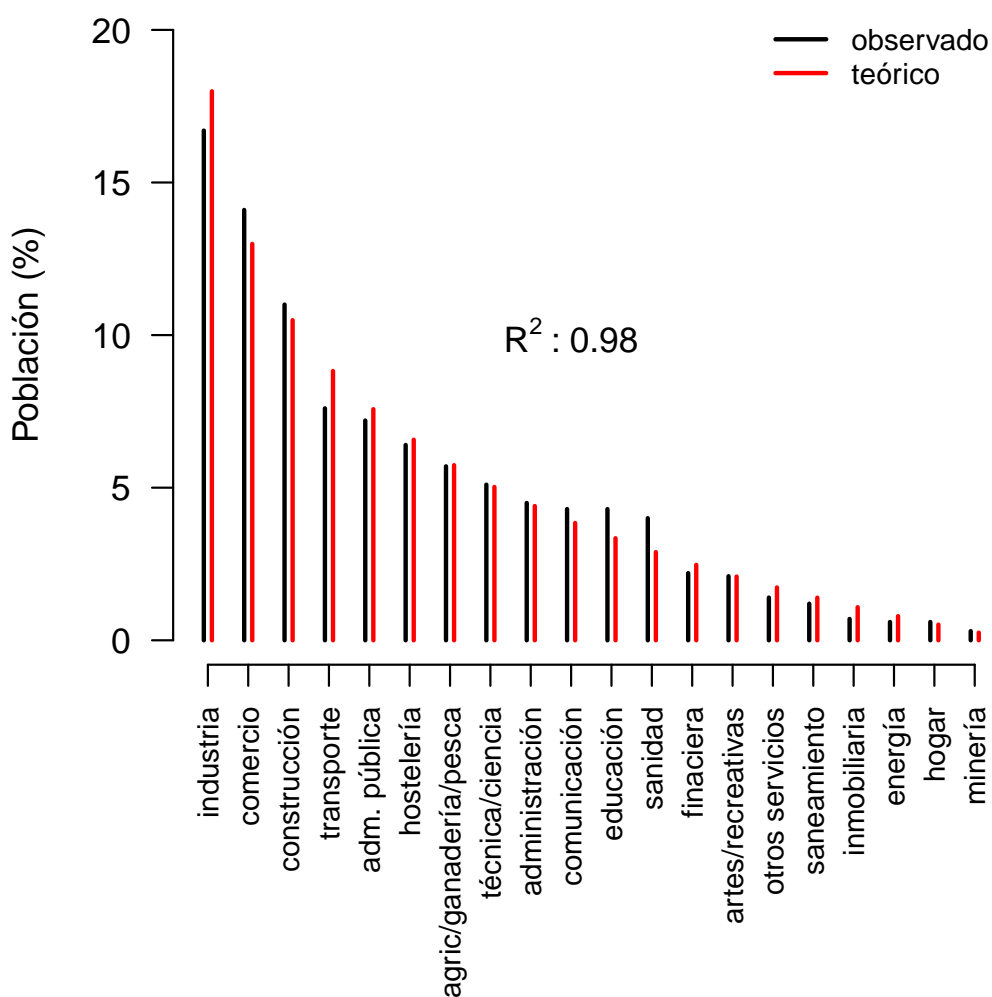
El reparto de la población activa entre distintas profesiones es un caso que también encaja en los axiomas de la varita mágica. Veamos cómo se distribuyeron los oficios en España durante 2021, gracias a la fantásticas bases de datos que el INE pone a disposición de los contribuyentes (Figura 8).

La predicción es sorprendentemente buena. En este caso tenemos un conjunto de datos exhaustivo, muy bien muestreado y sin solapamientos dudosos. Parece que la separación por gremios funciona mucho mejor que por especies. ¿Podría ser que, realmente,

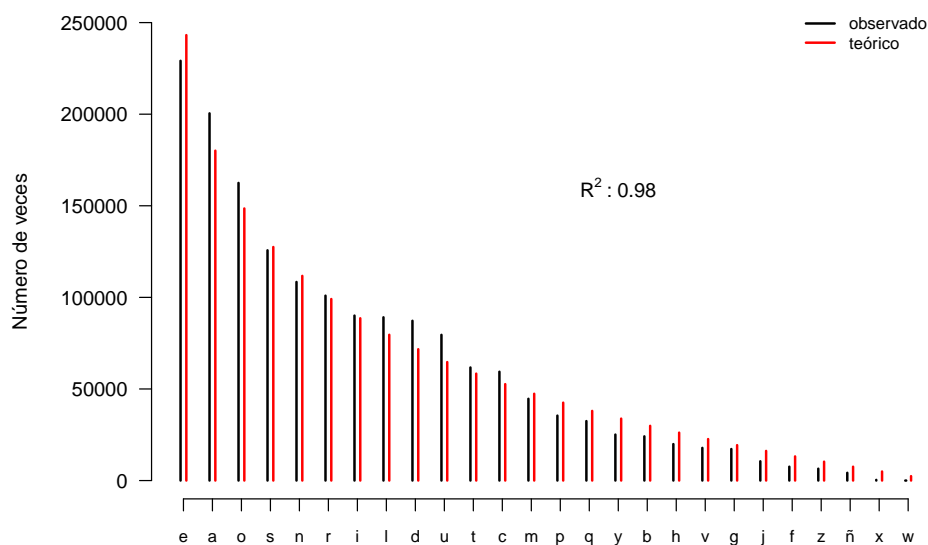
### En el lenguaje

El número de caracteres y la frecuencia de uso en un idioma también se puede interpretar como un sistema formado por partes con distinta función que interaccionan entre ellas. Este enfoque se utiliza como escalón básico en el procesamiento del lenguaje natural, una rama de la inteligencia artificial. Analicemos la frecuencia de letras en un paradigma del español, el Quijote. De nuevo encontramos una sorprendente coincidencia con la partición mágica.





**Figura 8.** Distribución de la población activa por sectores. Los datos corresponden a hombres, porque el INE solo da porcentajes separados por sexos y, como sabemos, no se pueden hacer medias de proporciones. El lector inquieto puede hacer el análisis para mujeres, a ver qué sale. ([script R](#)).

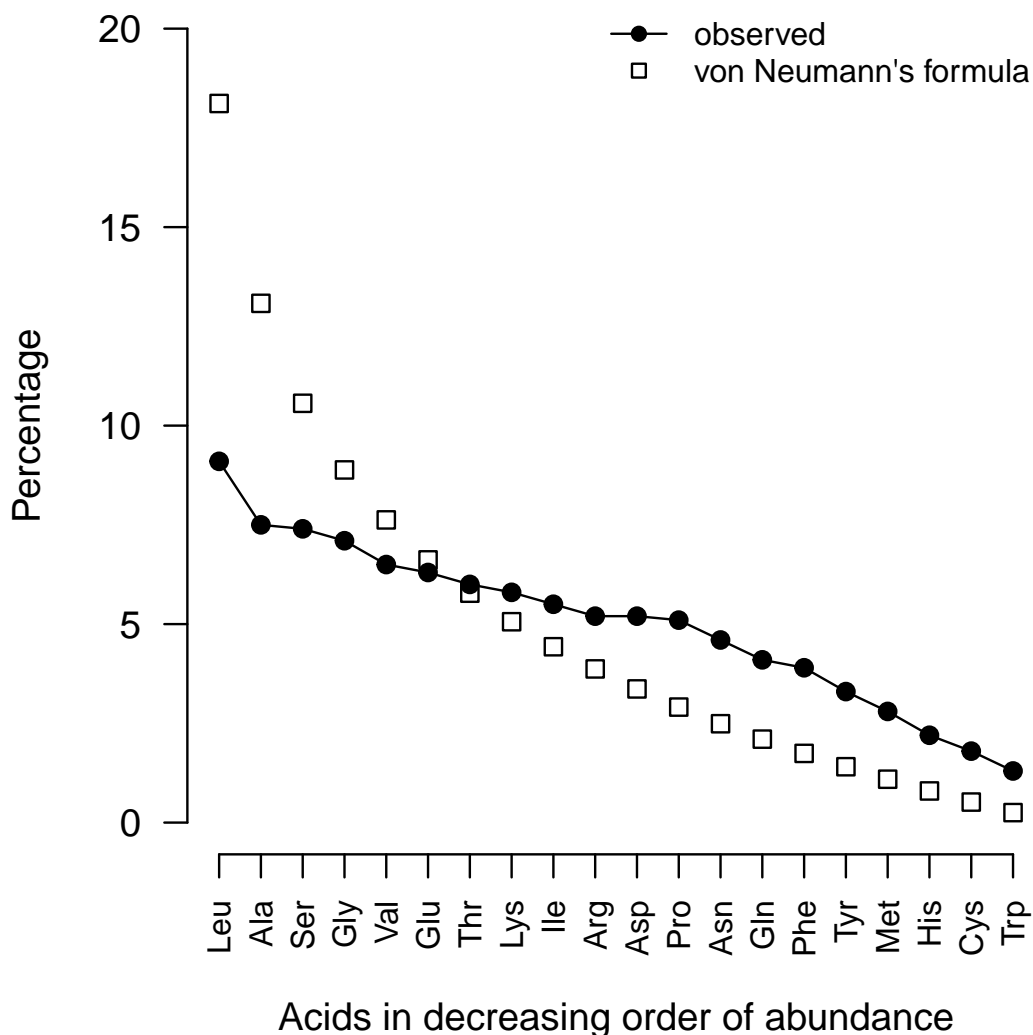


**Figura 9.** Número de veces que aparece cada letra en El Quijote (prólogo + 1ª y 2ª parte). El código R que cuenta las letras a partir del libro electrónico `quijote.txt` está aquí debajo. ([script R](#)).

**En la composición de aminoácidos** Al considerar los aminoácidos de una proteína como elementos con cierta función, también podríamos esperar que la proporción de cada uno siguiera la misma regla. El brillante George Gamow, que estuvo a punto de descubrir la codificación de aminoácidos en el ARN gracias a su gran intuición matemática, ya lo intentó

en 1964 (páginas 528 a 531) [6] pero él mismo reconoce que no se ajustaba muy bien. Eso sí, en esas mismas páginas reproduce una bella demostración de la ecuación de armónicos, que honestamente atribuye a John von Neumann, otro que tampoco era tonto, aunque menos humilde.

Vamos a reproducir el gráfico de Gamow con ayuda de R y datos más recientes (Figura 10).



**Figura 10.** Porcentaje promedio de aminoácidos en proteínas (recreación del gráfico de Gamow). Los círculos negros representan la abundancia relativa de aminoácidos en proteínas (datos extraídos de [aquí](#)). Los cuadrados son las frecuencias teóricas según nuestra protagonista, que Gamow la refiere como *fórmula de von Neumann*. ([script R](#)).

Efectivamente, la similitud es imaginaria. No obstante, parece que cuando los aminoácidos se agrupan funcionalmente (hidrofóbicos, polares y aromáticos), el reparto aleatorio dentro de cada grupo explica bastante bien la distribución, según [estos japoneses](#) [7]. Si he entendido bien, esto significa que la posición en la proteína depende de la función que puede desempeñar el residuo, más que su nombre. Lo mismo ocurre en los ecosistemas: el papel del ciervo europeo

lo desempeña el canguro australiano, por ejemplo.

**Otro enfoque con aminoácidos**

El trabajo de Itoh y sus colegas ha tenido poca repercusión hasta el momento (según *ResearchGate*, cuatro citas en 42 años, cinco con esta). O tenían pocos contactos o, tal vez, solo les picaba la curiosidad cabalística –como a nosotros– o, sencillamente, aque-

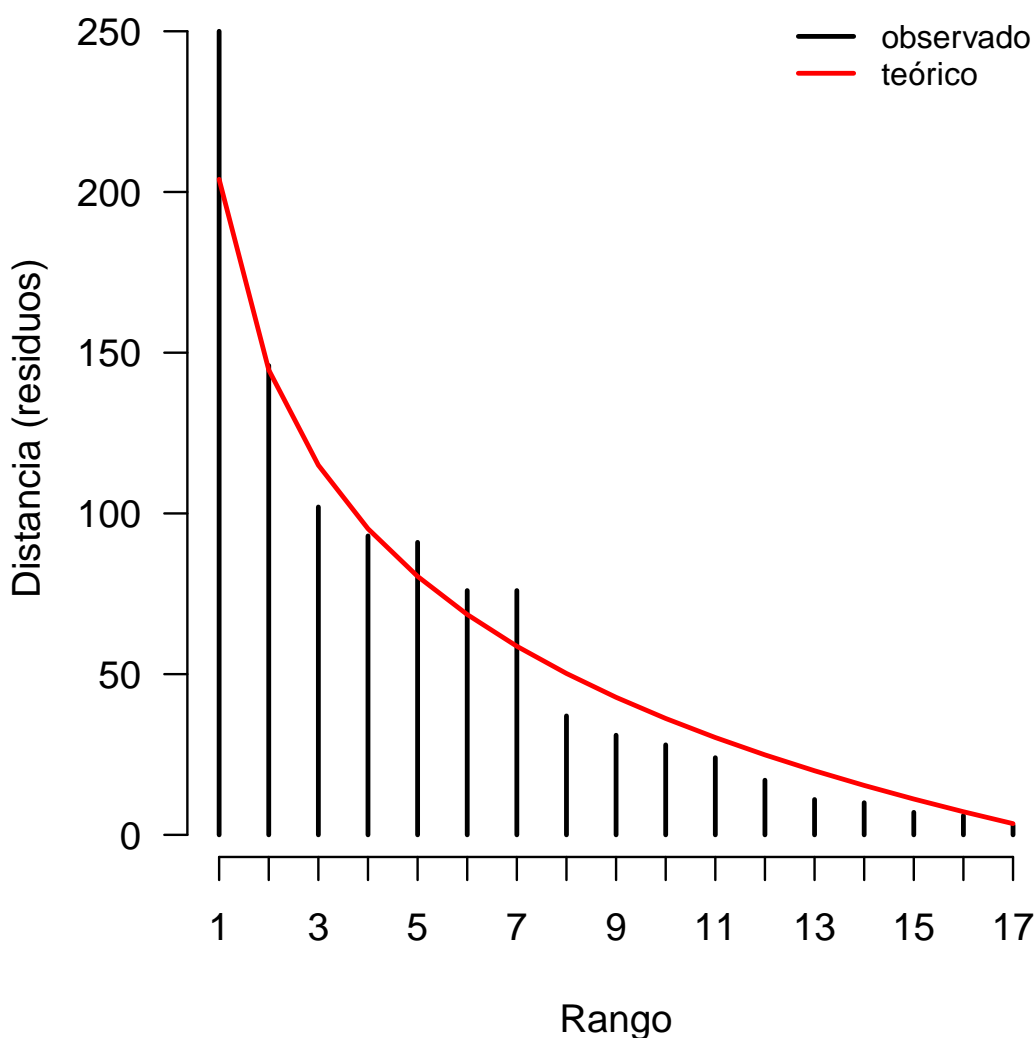
llo no tenía ninguna aplicación práctica ni implicación funcional.

Sin embargo, descubrir que algunos aminoácidos no se reparten al azar, bien en proporción o bien por posición en la secuencia, puede ser una buena pista para buscar un cabo del que tirar en la investigación de la función de algunas proteínas. Por ejemplo, muy recientemente nuestro compañero JC Aledo<sup>[8]</sup> ha descubierto que ciertas proteínas humanas relacionadas con la respuesta al estrés podrían estar moduladas por el estado de oxidación de regiones especialmente ricas en metionina.

**¿Podemos utilizar nuestra varita mágica para detectar agrupaciones anómalas de aminoácidos en una proteína?**

Supongamos que hay  $n + 1$  metioninas repartidas al azar en la secuencia. Entonces las  $n$  distancias entre ellas deben seguir la distribución del bastón roto. En esta analogía, el segmento completo de longitud 1 representa la distancia entre la primera metionina y la última, en vez de la longitud total de la proteína.

Veamos cómo se distribuyen las 18 metioninas en esta proteína cuya secuencia hemos sacado de la magnífica base de datos<sup>[9]</sup> que H Valverde, FR Cantón y el propio JC Aledo han puesto a disposición de todo el mundo (Figura 11).



**Figura 11.** Distancias entre metioninas en la proteína A0AVT1 ordenadas de mayor a menor. Las barras representan las distancias entre dos metioninas consecutivas (en número de residuos) y la línea roja las distancias esperadas según el modelo teórico. ¿Se parecen lo suficiente? (script R).

**Test estadísticos**

Así a ojo, diría que sí pero vamos a asegurarnos. Construiremos varias distribuciones de probabilidad *ad hoc* mediante el método de Montecarlo<sup>[10]</sup> que usaremos para comprobar la hipótesis de aleatoriedad en la posición de las metioninas, aunque el método sirve para cualquiera de los ejemplos anteriores.

**Estadístico: coeficiente de determinación  $R^2$**

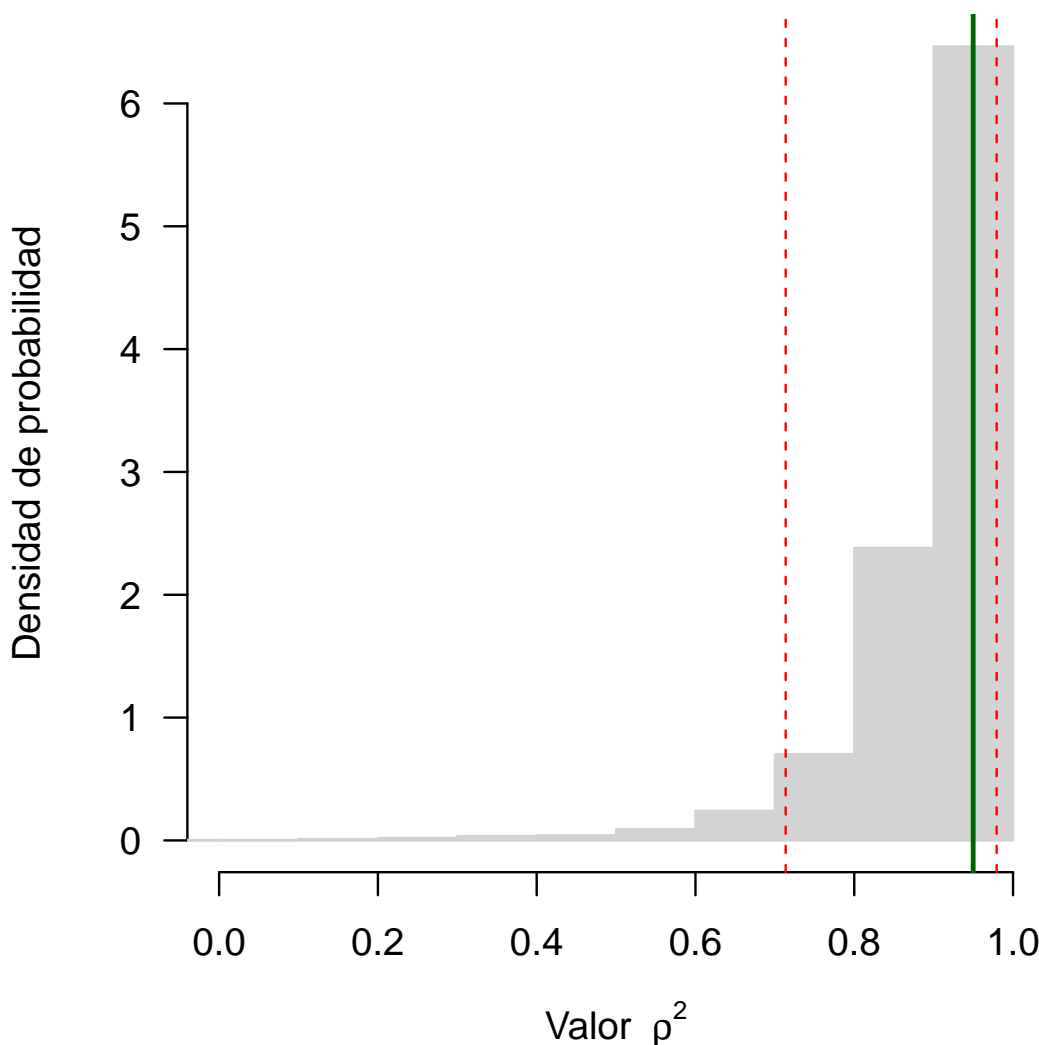
Es el que hemos estado utilizando desde el principio para hacernos una idea de la bondad del ajuste. Cuando está cerca de 1 nos satisface y cuanto más

se aleja, peor. ¿Pero cuánto tiene que estar de cerca? Consideremos el estadístico

$$\rho^2 = 1 - \frac{1}{(n-1)s^2} \sum_{r=1}^n (m_r - a_r)^2$$

donde  $r$ , como antes, es el rango de mayor a menor y  $m_r$  es la distancia de rango  $r$  observada en la proteína, siendo  $a_r$  la distancia teórica dada por la varita mágica;  $s^2$  es la varianza de las distancias observadas. La fórmula es más compleja que su significado intuitivo: la fracción de varianza que es explicada por el modelo teórico.

Calculemos a lo bestia la distribución de  $\rho^2$  cuando se cumple la hipótesis de reparto aleatorio (Figura 12).



**Figura 12.** Distribución de probabilidad y valor del estadístico  $\rho^2$  en la proteína A0AVT1. Las barras rojas representan los percentiles  $0,05 < p < 0,95$  y la barra verde es el valor observado en la proteína  $\rho^2 = 0,95$ . Como prueba, cumple, aunque la distribución acumula muchos casos cerca de la cola derecha que, de hecho, no es cola porque parece terminar abruptamente. (script R).

**Estadístico: suma de diferencias absolutas**

Deberíamos buscar otro estadístico cuya distribución sea más simétrica. Veamos con este:

$$d = \sum_{r=1}^n |m_r - a_r|$$

Calculemos su distribución experimentalmente (Figura 13).

**Estadístico: coeficiente de variación**

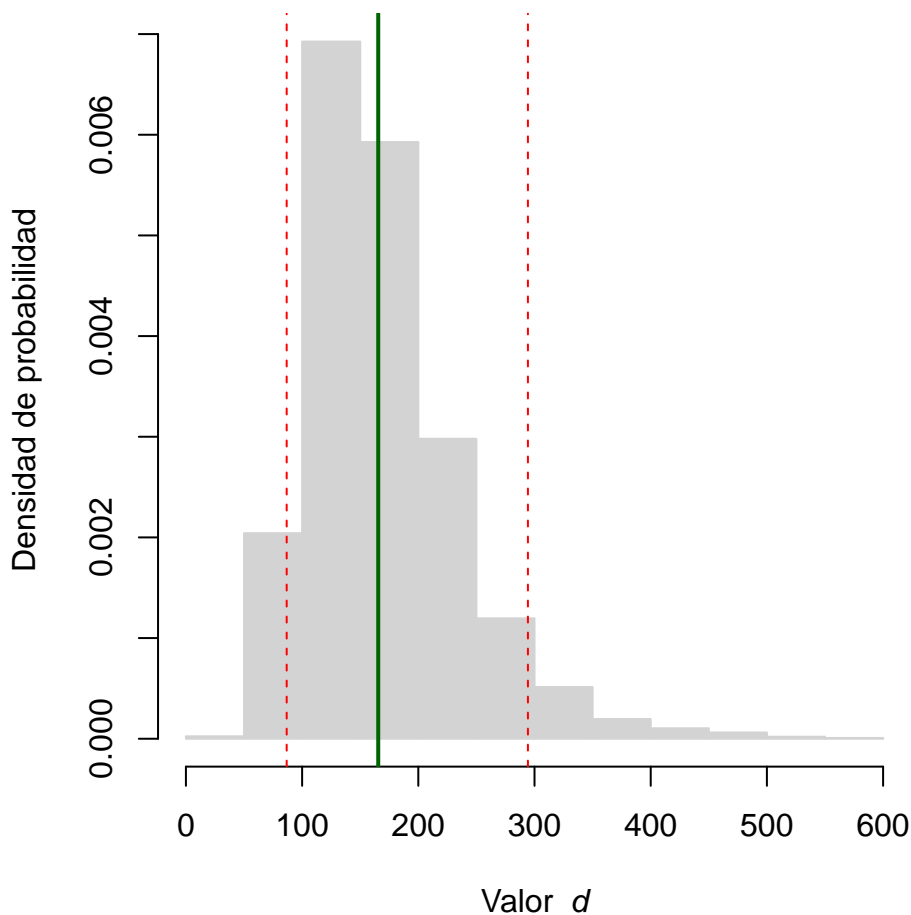
Los dos estadísticos anteriores (y alguno más, como la diferencia de Kolmogorov-Smirnov) son capaces

de identificar una muestra que cumpla la hipótesis de posición al azar. Sin embargo, cuando una proteína tenga las metioninas agrupadas o excepcionalmente espaciadas, ninguno de estos test podrá distinguir entre ambos casos porque se manifestarán con un elevado valor del estadístico correspondiente.

Afortunadamente, la solución se conoce desde hace muchos años. Consiste en calcular el cociente de variación

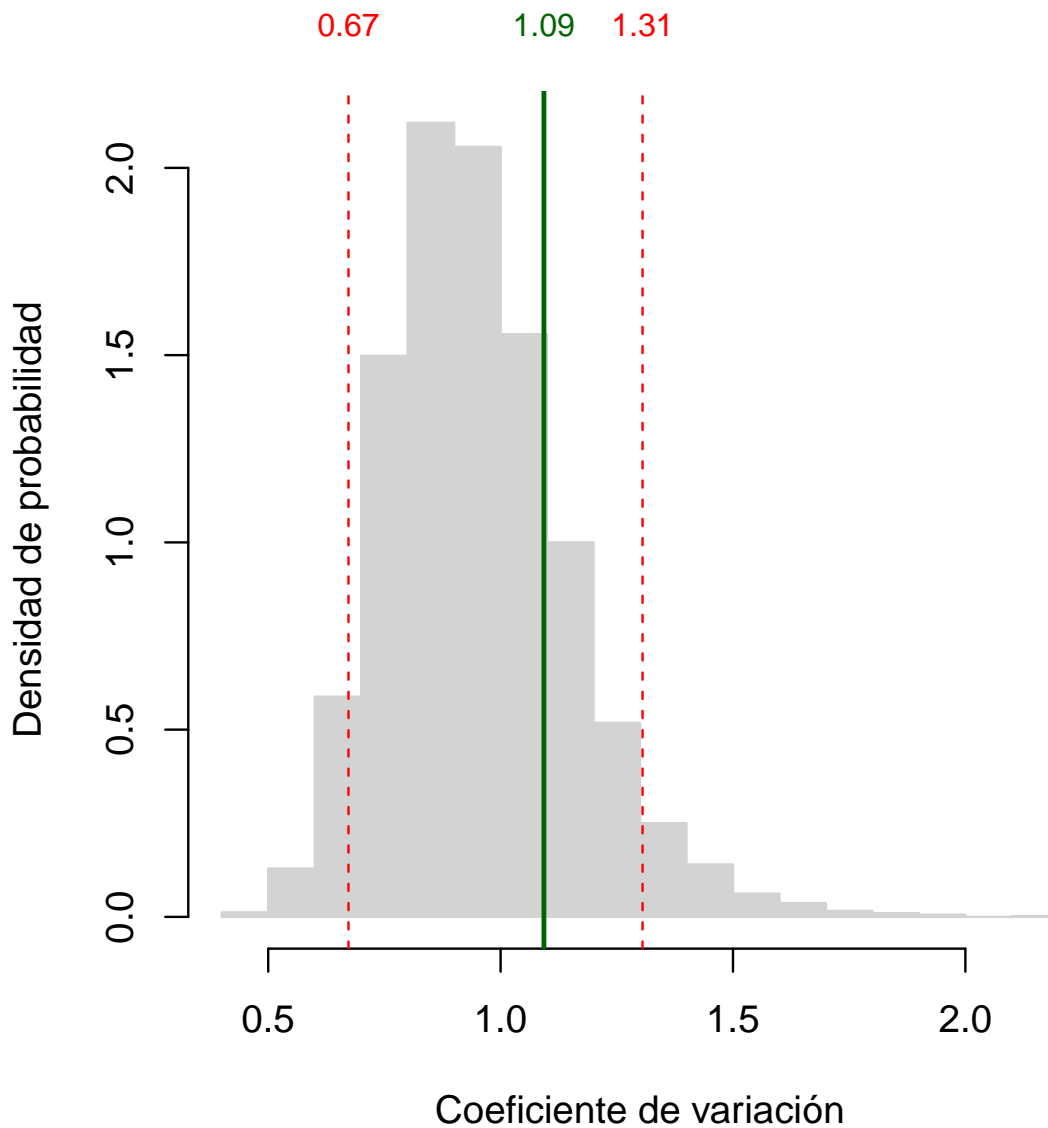
$$c_v = \frac{s}{\bar{x}}$$

Vamos a crear la distribución esperada para este coeficiente adimensional y después la comentamos (Figura 14).



**Figura 13.** Distribución de probabilidad y valor del estadístico  $d$  en la proteína A0AVT1. Las barras rojas representan los percentiles  $0,05 < p < 0,95$  y la barra verde es el valor observado en la proteína  $d = 166$ . (`script R`).

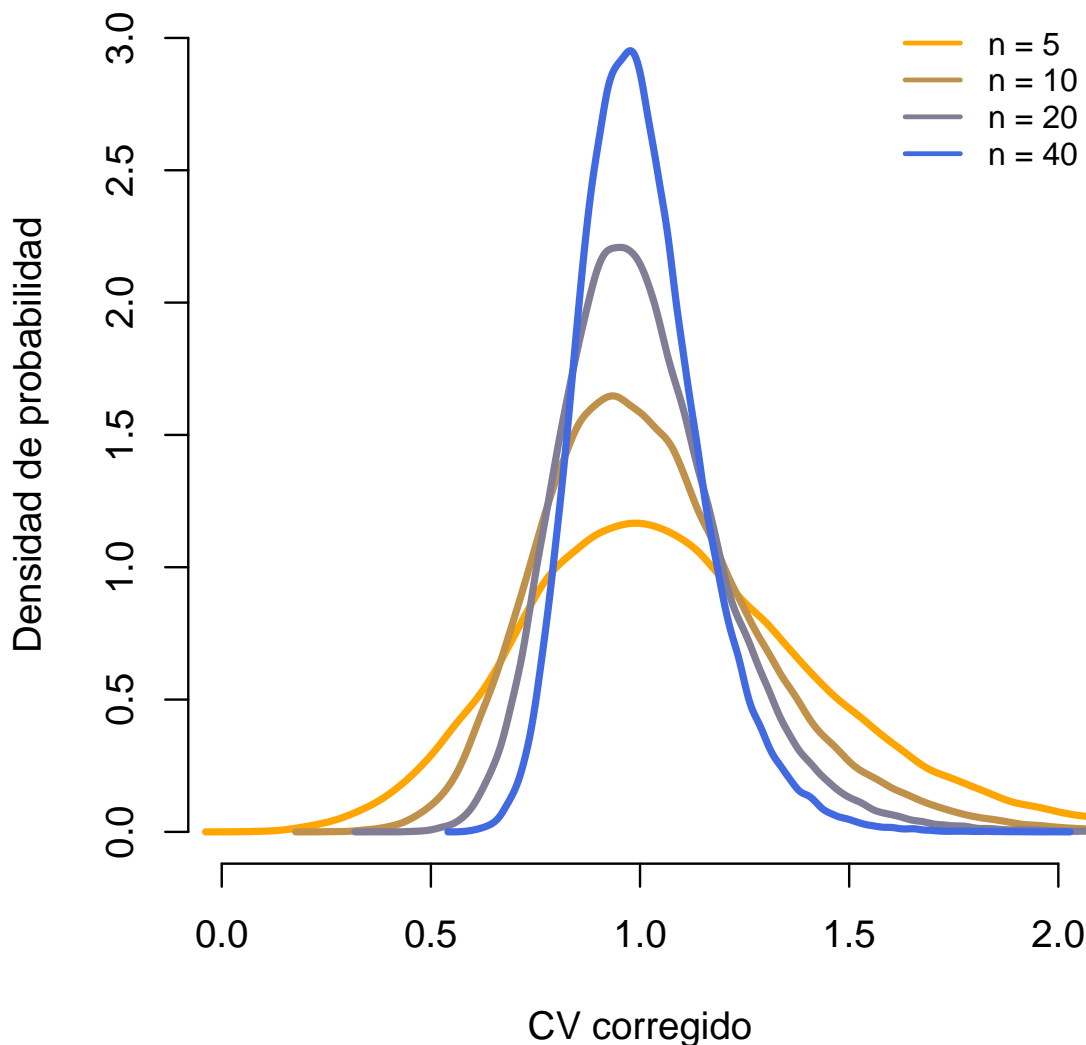




**Figura 14.** Distribución de probabilidad del coeficiente de variación y valor en la proteína A0AVT1. Las barras rojas representan los percentiles  $0,05 < p < 0,95$  y la barra verde es el valor observado en la proteína  $c_v = 1,09$ . (`script R`).

En esta distribución, una proteína con todas las metioninas equidistantes caería en la cola izquierda; por el contrario, su  $c_v$  aparecería a la derecha si las metioninas estuvieran agrupadas. En el caso de A0AVT1, su  $c_v$  queda ente los límites de confianza y, por tanto, podemos aceptar que las metioninas están repartidas al azar.

El coeficiente de variación de la varita mágica, a diferencia de los otros índices, es bastante insensible al número de segmentos y siempre ronda el valor de 1. De hecho, si se corrige su valor por el factor  $\frac{n}{n-1}$  su distribución se centra casi perfectamente en la unidad y la forma se aproxima mucho a una normal (Figura 15).



**Figura 15.** Distribución de probabilidad del coeficiente de variación corregido  $\frac{s}{\bar{x}} \frac{n}{n-1}$  de 100000 simulaciones con distinto número de segmentos. (`script R`).

Esta propiedad resulta muy útil en la práctica: ante una distribución que sospechemos pueda ser una varita mágica, solo tenemos que calcular el  $c_v$  y, si está cerca de 1, hacer un test más detallado. O, a la vista de la incertidumbre en la que nos meteríamos, preguntarnos si hay otra forma de enfocar el problema.

### A partir de aquí

Por qué algunos conjuntos tienen sus elementos organizados como fragmentos al azar parece no tener una explicación única. Especies, empleos, letras, aminoácidos y seguramente muchos otros casos son

de naturaleza tan distinta que es difícil encontrar un motivo más allá del azar. Salvo un detalle: la intervención humana al ordenar el conjunto. Desconocemos hasta qué punto introducimos artefactos en la naturaleza con nuestra manía de clasificar y ordenarlo todo. ¿Estamos seguros de que los dos conjuntos de la Figura 16 son iguales?

Esta excursión por la orilla del mar de cardinales en que vivimos no acaba aquí. Quien, como el autor, se sienta abrumado por el intrincado lenguaje de la estadística, tiene en R un astrolabio para navegar por un mundo donde azar y orden se mezclan en extrañas islas, esquivando los arrecifes de ecuaciones ariscas. Siempre hay un rodeo intuitivo que, a veces, se disfruta más que el trayecto simple.

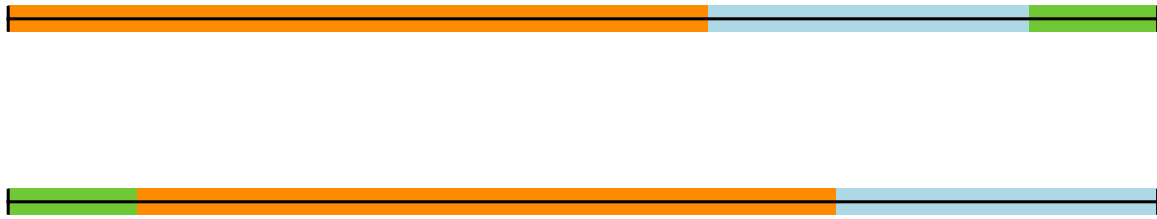


Figura 16. ¿Son iguales estos dos conjuntos?

## Referencias

- <sup>1</sup>Barton DE y David FN. Some notes on ordered random intervals. *Journal of the Royal Statistical Society* 18: 79-94, 1956.
- <sup>2</sup>Cohen JE. Alternate derivations of a species-abundance relation. *The American Naturalist* 102: 165-172, 1968.
- <sup>3</sup>MacArthur RH. On the relative abundance of bird species. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 43: 292-295, 1957.
- <sup>4</sup>Smart JS. Statistical tests of the broken-stick model of species-abundance relations. *Journal of Theoretical Biology* 59: 127-139, 1976.
- <sup>5</sup>McGill BJ y 17 más. Species abundance distributions: moving beyond single prediction theories to integration within an ecological framework. *Ecology Letters* 10: 995-1015, 2007.
- <sup>6</sup>Gamow G. Combinatorial principles in genetics. *Applied Combinatorial Mathematics*. Beckenbach EF (ed.) Wiley, Nueva York. 1964.
- <sup>7</sup>Itoh Y y otros. The broken-stick model for amino acid composition in proteins. *Journal of Molecular Evolution* 16: 69-72, 1980.
- <sup>8</sup>Aledo JC. A census of human methionine-rich prion-like domain-containing proteins. *Antioxidants* 11: 1289, 2022.
- <sup>9</sup>Valverde H, Cantón FR y Aledo JC. MetOSite: an integrated resource for the study of methionine residues sulfoxidation. *Bioinformatics* 35: 4849-4850, 2019.
- <sup>10</sup>Sóbol I. Método de Montecarlo. MIR, Moscú. 1976.

## *Ámbito y política editorial*

La revista *Encuentros en la Biología* (ISSN 1134-8496) es una revista de divulgación científica con carácter interdisciplinar, está editada por la Universidad de Málaga y publica periódicamente (primavera, verano, otoño, invierno) aquellas contribuciones originales que se enmarcan en un ámbito de encuentro entre las ciencias biológicas y las demás fuentes de conocimiento científico; esto es, conocimiento testado experimentalmente y avalado al menos por una fuente primaria de documentación. Aceptará también la edición de biografías de autores relevantes, de reseñas de libros y trabajos especializados, de imágenes para la portada, la sección «La imagen comentada» y otras secciones especializadas, así como noticias, comunicaciones y eventos relacionados con la biología. La editorial valorará positivamente la contribución de los trabajos en un formato ameno y accesible para estudiantes y profesores de todas las áreas de la biología, al igual que la presentación de las últimas novedades científicas en este área.

*Encuentros en la Biología* es un foro de difusión abierto para todas aquellas personas que estén interesadas en enviar sus aportaciones. Las contribuciones así presentadas deberán ajustarse a la política editorial y a las normas que a continuación aparecen como «Instrucciones para los Autores». La revista se reserva el derecho a realizar cuantas modificaciones en forma y diseño estime oportunas.

## *Instrucciones para los autores*

1. Todas las contribuciones serán inéditas o contarán con la autorización expresa del organismo que posea los derechos para su reproducción, en cuyo caso la edición incluirá la referencia de su autoría. Los manuscritos recibidos podrían revisarse con medios técnicos para detección de plagios.
2. Cada contribución constará de un título, el nombre completo del autor o autores, su afiliación (institucional, académica o profesional) y correo electrónico. Para distinguir la afiliación de diferentes autores utilice símbolos (\*, †, ‡, §, ¶, etc.) después del nombre de cada uno.
3. El documento se puede enviar en formato txt, rtf, sww/odt (OpenOffice/LibreOffice), doc/docx (MS-Word) o tex (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X). Manuscritos largos pueden dividirse en varias partes que aparecerían en números distintos.
4. Los nombres de las proteínas se escribirán en mayúsculas y redondilla (ABC o Abc). Los de genes y especies aparecerán en cursiva (*ABC*, *Homo sapiens*). También se pondrán en cursiva los términos que se citen en un idioma distinto al castellano.
5. Los autores que no sean castellanohablantes pueden remitir sus manuscritos en inglés. Una vez aceptado, el equipo editorial elaborará un resumen en castellano.
6. Las tablas, figuras, dibujos y demás elementos gráficos deberán adjuntarse en ficheros independientes. Cuando sea posible, utilice el formato vectorial no propietario pdf, svg, eps o ps. En caso de fotografías o figuras tipo *bitmap* se pueden enviar en formato jpg, tif o png con una resolución mínima de 300 ppp. Existe la posibilidad de incorporar breves animaciones en formato gif a baja resolución.
7. Las referencias bibliográficas se citarán dentro del propio texto, numeradas por orden de aparición, entre corchetes en superíndice<sup>[1]</sup>. Al final del mismo, se incluirá la sección de *Bibliografía* o *Referencias* de acuerdo con el estilo del siguiente ejemplo:  
<sup>1</sup>Einstein Z y Zwestein D. Spatial integration in the temporal cortex. *Res Proc Neurophysiol Fanatic Soc* 1: 45-52, 1974.  
 Si hay más de dos autores, se citará el primero seguido de «y otros».  
 Si el texto principal no incluye referencias bibliográficas, se ruega a los autores que aporten 3-4 referencias generales «para saber más» o «para más información».
8. Se anima a contribuir a la sección *la imagen comentada* con imágenes originales o de libre distribución (300 ppp de resolución como mínimo) acompañadas en documento aparte con un breve comentario de unas 300 palabras relacionado con la misma (descripción, información, técnica, etc.).
9. Se considerará cualquier contribución para las distintas secciones de la revista.
10. Envío de contribuciones: el original se enviará por correo a los coeditores o a cualquier otro miembro del comité editorial que consideren más afín al tema de la contribución. Como último recurso, se pueden enviar por correo postal acompañados de un CD. No se devolverá ningún original a los autores.
11. La aceptación de todas las contribuciones se hará a petición de los miembros del equipo editorial, manteniendo en todo caso los coeditores la decisión final sobre la misma. También se podrá sugerir al autor mejoras formales o de contenido para adaptar el artículo al perfil de la revista. La notificación se enviará por correo electrónico al autor que figure como corresponsal.