



Dosieres Ecosociales

CIENCIA, ÉTICA Y PAZ: HISTORIAS DESDE EL VALLE DE LOS LÍMITES

Pere Brunet

FUHem

educación+
ecosocial



CIENCIA, ÉTICA Y PAZ: HISTORIAS DESDE EL VALLE DE LOS LÍMITES

Pere Brunet



FUHEM Ecosocial es un espacio de reflexión crítica e interdisciplinar que analiza los retos de la sostenibilidad, la cohesión social y la democracia en la sociedad actual.

Colección Dosieres Ecosociales

Autoría: Pere Brunet

Coordinación: Susana Fernández Herrero

Maquetación: Cyan, Proyectos editoriales, S.A.

Edita: FUHEM Ecosocial
Avda de Portugal, 79, posterior 28011 Madrid
Teléfono: (+34) 914310280
ecosocial@fuhem.es
<https://www.fuhem.es/ecosocial/>

ISSN: 2660-8472
Depósito Legal: M-7817-2020

Madrid, septiembre de 2023.



Licencia Creative Commons 4.0 Reconocimiento – No Comercial- Sin Obra Derivada (by-nc-nd)

A Guillem, Aina y Allan
A Valentina y Violeta

A los nacidos en
el siglo XXI

Índice

Introducción: historias del valle de los límites	9
1. Imperfectos y planetarios (sobre Rosalyn Yalow y Rita Levi-Montalcini).	17
2. El arco iris y lo que no vemos (sobre Dorothy Hodgkin y Rosalind Franklin)	23
3. Los imposibles que nos definen (sobre Mary Cartwright y Kenneth Arrow)	31
4. El infinito y el fin de las cosas (sobre Rózsa Péter y Katrina Spade)	37
5. Belleza y ética (sobre Alicia Boole y Bucky Fuller)	45
6. La mirada de los niños (sobre Rachel Carson y Hertha Marks Ayrton)	53
7. Las máquinas y nosotros (sobre Wangari Muta Maathai y Irmgard Lotz).	61
8. Nuestras restricciones (sobre Katherine Johnson Y Zaha Hadid)	71
9. Estudiando la incertidumbre (sobre Gertrude Cox y Besse Beulah Day)	79
10. Preguntas, dudas y experimentos (sobre Pierrette Paulze y Antoine Lavoisier)	87
11. Los límites (sobre Eunice Newton, Lynn Margulis y muchas otras).	93
Epílogo	101
Agradecimientos	107
Notas finales.	109

Introducción: historias del valle de los límites

Sólo la economía considera una virtud la expansión sin límite. En biología, esto se llama cáncer.

David Pilling

Hay un lugar escondido, más allá del ruido de la civilización, del ajetreo del tráfico cotidiano y del deseo compulsivo de tener. Es un rincón donde la gente cada día se sorprende por lo que ve, se pregunta, observa, compara, descubre, e intenta distinguir los hechos reales de los mitos.

El valle de los límites es ciertamente fértil, aunque sea remoto, extraño y desconocido. Las montañas a su alrededor impiden descubrirlo hasta que ya prácticamente llegamos. De hecho, es transparente para el resto del mundo. La gente que vive en él es invisible y en general no interesa. No deja de ser sorprendente porque son personas que han entendido cosas, las han comprobado y nos las han contado. Son pensadores, filósofos, científicos, gente que convive también con escritores y artistas de todo tipo. Todos dudan, se sorprenden, se hacen preguntas, no aceptan sin más el discurso dominante.

Desgraciadamente, la ciencia y sus protagonistas son casi imperceptibles, como todo lo que plantean y los valores que defienden. La ciencia incluso genera recelo, como la filosofía y otras disciplinas. No es fácil acercarse a ella sin prejuicios. Y si los científicos son invisibles, a lo largo de la historia las mujeres científicas lo han sido aún más.

En los capítulos que siguen nos acercaremos a la vida de personas que fueron protagonistas de avances científicos, muchas de ellas hoy olvidadas, descubriendo algunos de los principios que las guiaron. Son pequeñas historias que nos llegan del valle, sin ruido, como un susurro. Son relatos de gente que entendió que todo es limitado, que nosotros también lo somos, y que, dada nuestra vulnerabilidad, es bueno vivir con mesura y en paz.

Mientras descubrimos la belleza del orden geométrico que cautivó a Alicia Boole y Bucky Fuller, seguramente nos sentiremos transportados a la ética que subyace en la estética, a comprender que somos parte de ese gran equilibrio ecológico que nos incluye, y a descubrir la importancia de defender y promover ideas de paz y convivencia como las del vivimiento.¹ Entendiendo, como nos explicaron Rachel Carson y Hertha Marks Ayrton, que es recomendable mantener la mirada siempre abierta para poder percibir la poesía que se esconde en el mundo fascinante que nos rodea.

Nuestra imperfección intrínseca, la que nos explicaba Rita Levi-Montalcini, nos ayuda a entender que somos vulnerables y que lo mejor que podemos hacer es cuidar de las demás personas y del planeta, aceptando también ser cuidados. Son los condicionantes ecológicos que descubrió Wangari Muta Maathai. Y es la necesidad de convivir con la incertidumbre y el riesgo, como nos recuerda Gertrude Cox. Porque, evitando caer en falsas seguridades, Cox y Besse Day entendieron el peligro inherente de los prejuicios, proponiendo herramientas científicas para limitar su efecto y poder garantizar una observación objetiva de la realidad. Ellas nos han ayudado a entender que la seguridad total es un mito, que el peligro es inevitable, y que debemos aprender a convivir con el riesgo y con nuestra fragilidad.

Por otra parte, Eunice Newton Foote, Lynn Margulis, las personas del comité IPCC² y otras muchas han ido observando y anotando cuidadosamente la evolución de los indicadores ambientales, mostrándonos los peligros de las emisiones de gases de efecto invernadero y explicándonos que hemos sobrepasado ampliamente el techo ecológico y la capacidad del planeta. Gracias a su trabajo vamos entendiendo los peligros de este crecimiento sin límites que nos siguen queriendo vender los tecnotraficantes³ de la

1 Buckminster Fuller defendía la necesidad de que el armamento (*weaponry* en inglés, sistemas destinados a la destrucción) fuera erradicado, mientras defendía que la humanidad debería dedicarse intensivamente a construir vivimiento (*livingry*, tecnología respetuosa con el planeta para el cuidado de las personas)

2 El Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC en inglés) es un organismo internacional que depende de Naciones Unidas, con sede en Ginebra. Está formado por un numeroso equipo de técnicos y científicos que investigan las causas y efectos del cambio climático en el mundo.

3 Desgraciadamente, las opiniones de científicos y expertos en tecnología no suelen aparecer en los medios de comunicación. Sin embargo, estamos rodeados de personas que, sin ser tecnólogos y sin tener conocimientos suficientes en este campo, nos hablan de tecnología sin otro interés que su lucro personal o la consolidación de una posición de dominio. Son los que podríamos llamar tecnotraficantes. Los tecnólogos estudian ciencia y generan tecnología, mientras que el objetivo de los tecnotraficantes no es otro que utilizar la tecnología ya existente como elemento de especulación y para incrementar sus beneficios a corto plazo.

llamada civilización del petróleo, con una estupidez⁴ que desprecia lo que nos llegará antes del final de este siglo.

Queríamos saber cuándo llegaremos a un calentamiento climático de 1,5 grados respecto a la era preindustrial, y nos inquieta pensar los peligros que podría significar subir hasta los 2 grados. Pero si podemos hacerlo es gracias a las personas de ciencia. De no ser así seguramente viviríamos despreocupados, como aquella rana que dicen que fue calentándose muy lentamente en el agua de una olla hasta morir escaldada antes de decidir saltar fuera. Y es que las historias del valle de los límites se han ido gestando lentamente en la cocina de las medidas y experimentos.⁵ Con ellas hemos aprendido que la realidad, al ser medible, es limitada, finita y sólo parcialmente comprensible, a diferencia de los mitos y la imaginación.

Unos mitos como los que, alimentados por la vanidad, el orgullo y la codicia, nos han llevado por el camino de la desmesura, con propuestas de expansión permanente y continuada que inevitablemente colonizan el espacio vital de los demás y de la naturaleza. Propuestas que, desde una retórica de libertad y de ausencia de límites, acaban limitando de forma estricta la vida de los desposeídos y de los que tienen menos poder en el mundo.⁶ Los mitos nos hacen volar, pero sólo son historias. En el mundo real debemos permanecer atentos para no ser engañados. Los mensajes que nos llegan de la ciencia nos ayudan, guiándonos hacia la medida por el camino de la medida.⁷

Cierto es que esta defensa de la contención y la prudencia viene de lejos. La frase “nada en exceso” de los muros del oráculo de Delfos, atribuida a Solón de Atenas, resumía uno de los pilares de la cultura griega. La moderación es la actitud inteligente que mantiene los límites de todas las cosas, decía Solón. Es, como explica el filósofo Emilio Lledó, la lección que los griegos aprendieron⁸ cuando, siglo tras siglo, fueron pasando del concepto de bienestar basado en el *bientener* (tener más de todo, acaparando, si era necesario con violencia, los bienes de los demás) al bienestar que salía del *bienser*, de la conciencia de la propia finitud, de la paz y del cuidado de las personas. Y el *bienser* es justamente la idea de bienestar que nos llega del valle de los límites, aquél que brota de la austeridad del epicureísmo, el del placer que rechaza lo innecesario.

4 Según Carlo Maria Cipolla, la persona estúpida provoca daños a otras personas o grupos de personas sin obtener ninguna ganancia personal, e incluso perjudicándose a sí misma.

5 Para entender críticamente la realidad y hacer previsiones es conveniente disponer de una cuantificación de los fenómenos. La medida y la cuantificación son rasgos diferenciales de la ciencia, que nos dan referentes y nos ayudan a comprender.

6 Giorgos Kallis, *Límites*, Ed. Arcàdia, Madrid, 2021, traducción del original inglés, 2021.

7 La actitud científica de medir (medurar) la realidad lleva a la constatación de la finitud y de la limitación de todo aquello que vemos, porque lo medible es limitado. Todo ello puede ayudarnos a vivir con medida en el actual entorno de total desmesura. Es la medida que conduce a la medida.

8 Emilio Lledó, *Elogio de la infelicidad*, Ed. Cuatro, 2013.

Las personas de las historias de este libro miraron, experimentaron y midieron. Sin hacer caso a quienes decían que el conocimiento numérico puede apartarnos de la poesía del mundo, fueron adentrándose en la belleza matemática de los equilibrios planetarios y en la de los sistemas y relaciones que conforman la poesía misteriosa que encontramos en su valle. Ante el deseo incontrolado de poder de aquellos que acabarán siendo los más ricos del cementerio, estas personas casi invisibles nos explicaron que somos frágiles y finitos, que todavía debemos humanizarnos, y que más nos vale colaborar unos y otros, empezando a tener conciencia de especie si queremos evitar la extinción.

Muchos de esos principios de vida que encontramos en las historias que siguen son también los de la literatura, las artes y las humanidades. Son los que surgen de la duda y las preguntas, los que nos llevan a trabajar, aquí y ahora, por los derechos de todas las personas, los del respeto a su dignidad. Es la actitud de sorpresa constante, la mirada abierta, la observación pausada, el espíritu crítico, la habilidad para detectar mitos y discursos interesados. Umberto Eco, por ejemplo, se acerca también a estos principios del humanismo científico cuando defiende que “la dimensión ética empieza cuando el otro entra en escena”.⁹ Argumenta que si viviéramos en una comunidad donde sistemáticamente todo el mundo hubiera decidido no mirarnos nunca y hacer como si no existiéramos, podríamos morir o enloquecer. Por tanto, siendo como somos animales sociales de posición erecta que necesitamos de los demás y que no podemos entender quiénes somos sin la mirada y la respuesta del otro, debemos respetar los derechos y la dignidad de todos sin distinción de género, raza o pensamiento. Debemos cuidar y ser cuidados.

Pero con el descubrimiento del código biológico y genético, la ciencia nos ha demostrado además que no existen diferencias esenciales entre unas y otras personas. La decodificación del ADN y la constatación de la igualdad genética ha enviado el racismo al cajón de los discursos acientíficos. Porque nuestro origen evolutivo nos habla de corporeidad, de nuestra mortalidad, de igualdad en la vulnerabilidad. Es la igualdad que llevó a Hertha Marks Ayrton y a otras muchas a la militancia sufragista y feminista.

En los capítulos que siguen he intentado, aunque no siempre lo he conseguido, minimizar las referencias y explicaciones científicas, con el objetivo de centrarme en los mensajes que las personas de ciencia nos han ido regalando. Siempre que he podido, he incluido las observaciones de carácter más preciso como notas a pie de página.

Por último, el epílogo recoge algunos rasgos comunes de estas científicas. Y mira por dónde, en este rumor que nos llega del valle de los límites descubrimos también que la ciencia se va tiñendo de feminismo y que el ecofeminismo va incorporando los

9 Umberto Eco y Carlo Maria Martini, *En qué creen los que no creen*, Planeta de Libros, 1997: <https://www.planetadelibros.com/libro-en-que-creen-los-que-no-creen/12324>

nuevos descubrimientos científicos. Porque la esperanza se está tejiendo con las mujeres de ciencia y con las creadoras de sistemas tecnológicos inclusivos enfocados al planeta y a las personas.

Este trabajo incluye al final un conjunto de notas largas que profundizan en algunos de los aspectos más científicos y tecnológicos tratados en los relatos, siempre desde una perspectiva divulgativa. Cada historia suele tener asociada una de estas notas, que pueden leerse de manera independiente dado que se mueven en un plano paralelo al de los once capítulos. Son pinceladas que intentan desvelar esa misteriosa belleza oculta que cautivó a las protagonistas de las historias. Y es que hay un hecho fundamental, a menudo olvidado: lo que guía a las personas que trabajan en ciencia no suele ser ni el poder ni el dinero. Es casi siempre la emoción y el sentido de la belleza.

HISTORIAS



Imperfectos y planetarios

Una historia protagonizada por Rosalyn Yalow y Rita Levi-Montalcini

En 1959, Rosalyn tenía 38 años y dos hijos, Elanna y Benjamin, de cinco y siete años. Trabajaba en el laboratorio de medicina interna del hospital de veteranos del Bronx, y no tenía una vida fácil. Iba al trabajo por la mañana, habitualmente volvía a casa al mediodía a hacer la comida para su marido y sus dos hijos, y después de comer volvía a continuar el trabajo en el laboratorio del hospital de veteranos. Durante 12 años, había hecho el recorrido de su casa en el hospital cuatro veces al día, añadiendo el trabajo doméstico al profesional.

Ya de pequeña, Rosalyn Yalow, que había ido a una escuela para niñas de Nueva York, se enfrentó a sus padres cuando le propusieron que estudiara para maestra de escuela primaria. Les contestó diciéndoles directamente que ella quería ser física. Y lo consiguió. Porque, como ella misma reconoció años más tarde, uno de los rasgos de su carácter era el de ser muy terca. El comentario que ponía en boca de su madre era muy explícito: “me decía que tuve la suerte de saber elegir entre opciones aceptables, porque si hubiera escogido lo contrario, nadie habría podido desviarme de mi camino...”. De hecho, para entrar a hacer un postgrado en Columbia, tuvo que primero entrar como mecanógrafa y aprender taquigrafía. Lo odiaba, pero no desistió. Así pudo terminar su postgrado y prepararse para lo que quería: ser profesora de física.

En un escrito autobiográfico, Rosalyn Yalow cuenta la anécdota de cuando, tras su etapa en Columbia, ingresó en la Universidad de Illinois¹ como profesora asistente mientras hacía su tesis doctoral en física nuclear. Era el año 1941. En la primera reunión plenaria de la Escuela de Ingeniería, la sala estaba llena. Eran cuatrocientos

1 Ver: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1977/yalow/biographical/>

hombres y ella. Y el decano comentó en público que la escuela no había tenido ninguna mujer profesora desde 1917 (los años 1917 y 1941 fueron momentos convulsos de guerra mundial, en los que muchos jóvenes profesores eran llamados a filas). La falta de chicos, dice Rosalyn, es lo que facilitó que la admitieran.

Pero volvamos a 1959. En el laboratorio del hospital del Bronx trabajaba y hacía muy buen equipo con Solomon Berson. Como Rosalyn explicaba, cada uno aprendía del otro siendo intencionalmente muy críticos y severos con todas las propuestas y resultados de uno y otro. Trabajaban con técnicas de radioinmunoensayo para medir con gran precisión la concentración de ciertas hormonas (antígenos) en la sangre. La idea era inyectar anticuerpos marcados con isótopos radiactivos, dejar que se produjeran las reacciones antígeno-anticuerpo, y medir la radiación de los compuestos resultantes para poder determinar la concentración del antígeno que estaban estudiando. Finalmente, un día lo consiguieron. Pudieron medir, con altísima precisión, la concentración de insulina en la sangre. Y lo pudieron hacer dinámicamente, detectando la cantidad de esta hormona que había en cada momento en el suero sanguíneo. Algo que nunca antes se había conseguido.

Rosalyn Yalow trabajó conjuntamente con Solomon ("Sol", como ella le llamaba) durante 22 años. Todo se truncó con la muerte de Berson 1972, cuando justamente estaban terminando el artículo científico conjunto que explicaba su hallazgo. Y entonces, además del dolor por la muerte de su compañero profesional, Rosalyn tuvo que padecer el sufrimiento de la duda científico-machista. Hasta ese momento, nadie había cuestionado que ambos fueran autores de los artículos que escribían. Pero tan pronto desapareció Solomon, Rosalyn se vio forzada a demostrar que no era cierto que él fuese el cerebro y ella "las manos".² Fue duro, pero lo consiguió. Su tozudez la ayudó una vez más y el artículo se publicó.

Rita, a diferencia de Rosalyn, de pequeña ya le había dicho a su padre que de mayor no quería ser ni madre ni esposa, que quería dedicarse a la ciencia y utilizar sus pocas capacidades para ayudar a la gente. Tuvo que luchar años y años en un entorno hostil lleno de hombres, pero finalmente consiguió llegar donde quería. Y en el camino, además de ciencia entendió muchas otras cosas. Cuando era ya mayor, explicaba que el futuro del planeta depende de la posibilidad de que todas las mujeres puedan acceder a la instrucción y al liderazgo, añadiendo además que siempre había pensado que si las mujeres no podían hacer nada era porque el poder existente, el de los hombres, se imponía por la fuerza física y no por la mental. Decía que con la fuerza física puedes ser un maletero, pero no un genio.

En 1946, a los 37 años, Rita Levi-Montalcini dejó su Italia para ir a investigar en la Universidad Washington de San Luis en Estados Unidos. Allí estuvo treinta años antes de

² Rocío P. Benavente: <https://mujeresconciencia.com/2019/09/19/rosalyn-yalow-la-biofisica-testaruda-que-descubrio-como-medir-la-insulina-en-la-sangre-y-gano-un-nobel-por-ello/>

volver definitivamente a vivir a Roma. El descubrimiento científico de su vida fue un regalo que le llegó a los seis años de trabajar en su laboratorio de San Luis, tras muchos meses haciendo pruebas con rigor, constancia y esfuerzo, analizando y aislando algunas sustancias de tumores de ratones que creía que podían estar relacionadas con el crecimiento tumoral desmedido. Un día, hizo el experimento de inyectar una de estas sustancias en algunos embriones de pollo, y quedó sorprendida y maravillada: el compuesto aceleraba fuertemente el crecimiento del sistema nervioso de aquellos embriones. Algo importante había descubierto.

Entusiasmada, trabajó intensamente durante meses con su colega Stanley Cohen hasta aislar e identificar la cadena proteínica NGF, que es la responsable de estimular el crecimiento y la renovación de nuestras células nerviosas. La NGF nos salva un poco cada día, alejándonos de la demencia senil y evitándonos muchos otros problemas médicos. El descubrimiento de Levi-Montalcini hizo crecer el conocimiento médico y nos ayudó a entender mejor los complejos mecanismos bioquímicos que nos mantienen vivos.

Rita Levi-Montalcini, conocida popularmente en Italia como la “Signora della Scienza”, siempre estuvo además comprometida con una visión laica, ética y solidaria de la ciencia. Tenía una sólida confianza en el futuro y en las capacidades innovadoras de los humanos y defendía la igualdad entre las personas y entre hombres y mujeres. Reivindicó siempre el derecho de las mujeres a estudiar, investigar y gobernar. La Fundación que creó en 1994 trabaja en pro de la educación de las mujeres jóvenes en el tercer mundo y fundamentalmente en África.³

Los ensayos radioinmunes y el descubrimiento de la cadena de proteínas NGF han permitido mejorar la salud y la calidad de vida de millones de personas en todo el mundo. Por eso, Rosalyn Yalow recibió el premio Nobel de medicina en 1977 y por ello, Rita Levy Montalcini lo recibió nueve años más tarde, en 1986. En el discurso de recepción del premio Nobel, Rosalyn Yalow se dirigió a las mujeres, diciéndoles que “tenemos que creer en nosotras mismas porque nadie más lo hará”, mientras explicaba la necesidad y la obligación de hacer que el camino de las futuras mujeres fuera más fácil.

El título del librito de memorias de Rita Levy-Montalcini es sin duda sugerente: *Elogio de la imperfección*.⁴ En unos momentos en los que a menudo se ignora y se desprecia la ciencia a la vez que vemos actitudes pseudo-científicas arrogantes y dogmáticas, Rita Levi nos recoloca diciéndonos que debemos ser conscientes de la propia imperfección para poder mejorar, avanzar y superarnos y para poder ejercer la facultad creadora, esencial en los humanos. La ciencia, mucho más cercana a la filosofía de lo que pensamos, nos puede alumbrar, pero Rita nos avisa de que debemos ser conscientes

3 Ver: <https://www.ritalevimontalcini.org/>

4 Rita Levi-Montalcini, *Elogio de la imperfección*, Tusquets, Barcelona, 2011.

de que no sabemos nada, y que nunca acabaremos sabiendo el por qué de todo. Lo paradójico es que, en este camino que avanza por los paisajes de la imperfección y la ignorancia, los humanos somos capaces de ir creando centellas de conocimiento que además pueden proporcionarnos herramientas tecnológicas para mejorar nuestra vida. Pero no debemos olvidar, como bien explica Levy-Montalcini en sus memorias, que “el resultado final del programa que tenemos escrito en esta máquina fabulosa y compleja que es el cerebro es la imperfección, no la perfección”.

Los descubrimientos de Rosalyn Yalow y Rita Levy Montalcini fueron de ámbito global. Y en este sentido, Priyamvada Natarajan,⁵ profesora y cosmóloga de la universidad de Yale que ha hecho interesantes descubrimientos sobre la distribución de la materia y energía oscuras en base a determinadas mediciones cosmológicas,⁶ nos habla de la universalidad de la ciencia y de la importancia de la colaboración entre los científicos de todo el mundo. Porque, como bien dice, la ciencia no tiene fronteras. Priyamvada remarca que la ciencia trasciende las fronteras sin que importe lo que ocurra en la esfera política observando que, cuando intentas entender la inmensidad del cosmos, encuentras absurdo que en la Tierra no podamos convivir bien entre nosotros respetando el planeta. Priyamvada explica que la ciencia es un gran ejemplo de cómo la colaboración entre personas no sólo es posible, sino imprescindible: la mezcla de conocimientos y visiones dispares permite llegar a resultados formidables, fomenta la creatividad, y es lo que nos puede permitir abordar la infinidad de problemas complejos y globales que tenemos (como el del cambio climático), que sólo podremos resolver cooperando entre todos. Norbert Bilbeny habla en términos similares.⁷

Las científicas Rosalyn Yalow y Rita Levy Montalcini nos mostraron el camino de la universalidad, este camino que nos recuerda también Priyamvada Natarajan. Los científicos colaboran con otros investigadores de todo el mundo, publicando sus resultados en artículos que, una vez refrendados y revisados por expertos anónimos, pueden ser consultados y estudiados por cualquier otra persona de la comunidad científica mundial. No puede haber resultados científicos secretos o restringidos. Todo ha poder ser accesible a nivel global y planetario. El premio Nobel de Rosalyn Yalow y Rita Levy Montalcini fue público y universal. La universalidad es un rasgo definitorio de la ciencia (aunque también lo es de la literatura, la filosofía y las artes creativas) que a su vez es muy estricto. Porque implica que no es posible hablar de “ciencia militar” o de ciencia restringida a determinados ámbitos nacionales, geográficos o económicos. Si los resultados de un determinado proyecto o estudio sólo son accesibles para

5 Priyamvada Natarajan: “el concepto de genio está obsoleto, existe el pensamiento colectivo”: https://elpais.com/elpais/2019/08/16/ideas/1565947933_166850.html

6 Véase la nota al final sobre las mediciones cosmológicas y la curvatura del espacio.

7 Norbert Bilbeny, “De la Luna a la Tierra”, *La Vanguardia*, 2019, hablando de los 50 años de la llegada a la Luna, Bilbeny dice que, con inteligencia social y suprimiendo las fronteras, podríamos acabar con la crisis climática, con la carrera armamentista, y con las migraciones del hambre. Comenta que si hemos llegado a la Luna, ahora deberíamos saber llegar de vuelta a la Tierra, liberándonos del pensamiento sectario cromañón e implantando una economía mundial que sea equitativa y sostenible: <https://www.lavanguardia.com/opinion/20190811/463991564841/de-la-luna-a-la-tierra.html>

las personas de un cierto grupo empresarial o social, no estamos hablando de ciencia, aunque algunas personas nos lo quieran hacer creer. La ciencia es universal o no es.

Las personas científicas nos enseñan que deberíamos poner límites a esta absurda tendencia que nos empuja a controlar y guardarnos el conocimiento. Porque, como bien nos mostraron Rosalyn Yalow y Rita Levy-Montalcini, tanto el acceso al conocimiento como la colaboración entre las personas son cosas beneficiosas e imprescindibles. En este sentido, Priyamvada Natarajan se lamenta de la ausencia del sentimiento social de vernos ciudadanos del mundo, un sentimiento que es en cambio inherente a la actitud científica. Y plantea una propuesta que debería hacer reflexionar a los dirigentes mundiales: la de crear un pasaporte humano para todas las personas⁸, como elemento visualizador de su igualdad esencial en dignidad y derechos. Un pasaporte humano que podría ayudarnos a conectar y empatizar con todas las personas de todos los lugares del planeta, contribuyendo a sentirnos parte de la comunidad global que somos y cuestionando este nuestro funesto afán de poseer y secretizar.

8 Priyamvada Natarajan, *op. cit.*

El arco iris y lo que no vemos

Una historia protagonizada por Dorothy Hodgkin y Rosalind Franklin

El arco iris seguramente nos cautiva por su magia sorprendente, por su perfección y multiplicidad de apariencias, por su carácter inesperado y caduco. Será por eso que la mayoría de libros sagrados del mundo antiguo lo mencionan, y será por eso que aparece en muchas mitologías. Pero durante siglos, nadie pudo comprender sus secretos. Continuaron vigentes las teorías de Aristóteles, que había escrito que todos los colores salían de la mezcla de cuatro: los de la tierra, el agua, el aire del cielo y el agua.

Los colores del arco iris fueron un misterio hasta hace sólo 350 años, cuando Newton escribió la primera teoría científica sobre la luz y los colores y la envió a la Real Sociedad de Londres.¹ Era el año 1672. Con Newton entendimos que la luz blanca contiene todos los colores y que todos estos colores no son más que una propiedad de la luz. Luego, con Goethe, Maxwell, Einstein y muchas otras personas, hemos aprendido que cada color del arco iris es una respuesta perceptiva, que lo es a una determinada radiación electromagnética, y que cualquiera de los colores que vemos en el mundo no es más que una mezcla de radiaciones electromagnéticas de diferentes frecuencias,² al igual que la música es una mezcla de sonidos de frecuencias también distintas.

Nuestro mecanismo perceptivo ha ido evolucionando durante millones de años, perfeccionando un sistema visual que nos filtra y procesa las señales que captan los

1 Carta de Isaac Newton a la Royal Society en la que presenta su teoría sobre el color (26 de marzo de 1672): <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1672.0011>

2 Ver la nota al final sobre la información, la percepción, los colores y los fotones.

millones de conos y bastones de nuestra retina. Finalmente, todos nuestros recuerdos visuales se basan en las tonalidades de oscuridad que han captado estos bastones y en los estímulos cromáticos generados por los conos que tenemos básicamente concentrados en la zona de la fóvea. Vemos los colores que conocemos porque nuestra genética nos ha construido con tres tipos de estas células cono: las sensibles a las zonas roja, verde y azul del espectro lumínico. Y es que no necesitamos más. Nos sirve y nos es suficiente para sobrevivir.

No todos los seres vivos ven el arco iris de la misma manera. Algunas serpientes, como las pitón, boa y otras, pueden percibir la radiación infrarroja. Por tanto, notan que el arco iris es más ancho, continuando más allá del rojo. Algunos reptiles y muchos pájaros tienen cuatro tipos de conos, uno más que nosotros; los pájaros pueden percibir los colores de la zona ultravioleta,³ de manera que su arco iris es también más ancho y rico en cromaticidad. En cambio, muchas especies de mamíferos tienen sólo dos tipos de conos en su retina. Los humanos nos encontramos a medio camino entre las vacas y los gorriones.

Pero nos gusta jugar con lo invisible. Hemos aprendido a construir máquinas para generar radiaciones electromagnéticas no visibles, y por eso tenemos hornos de microondas, televisores y teléfonos móviles. Y además, queremos verlas. Queremos saber qué “se ve” allí donde ya no hay colores en el arco iris, y deseamos poder escuchar todas las radiaciones invisibles del Universo. Por eso hemos creado sensores que pueden captar la radiación en canales y frecuencias más allá de nuestra percepción, y hemos aprendido a construir cámaras que nos muestran los colores no visibles: desde las cámaras de infrarrojos a los radiotelescopios. Hay una cámara óptica usada en la investigación espacial, la Aviris, que capta imágenes con 224 canales que cubren desde el violeta hasta bien entrado el infrarrojo.⁴ Las Aviris son ojos artificiales con más de doscientos tipos distintos de “conos” en sus sensores.

Los rayos X son una de estas radiaciones invisibles. Se encuentran en la banda de los ultravioletas, mucho más allá de los colores que podemos ver.⁵ Cuando Wilhelm Röntgen los descubrió en 1895, no sabía qué eran. Por eso los bautizó con una «X», y por eso todavía lo hacemos. Gracias a sus rayos, Röntgen obtuvo el premio Nobel en 1901. Pocos años después nacían Dorothy Hodgkin y Rosalind Franklin. Dorothy vino al mundo en 1910 en El Cairo, y Rosalind en Londres en 1920.

3 Ver por ejemplo: Anders Ödeen y Olle Håstad, “The phylogenetic distribution of ultraviolet sensitivity in birds”, *BMC Evolutionary Biology*, vol. 13 (36), 2013: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3637589/>

4 La Aviris capta imágenes calibradas con información policromática en 224 canales espectrales de radiación electromagnética que van desde el violeta hasta bien entrado el infrarrojo. Ver la nota al final sobre la información, la percepción, los colores y los fotones.

5 Lo que observamos en el arco iris son las radiaciones solares comprendidas entre los 700 nanómetros de longitud de onda del rojo hasta los 400 del violeta. En cambio, cuando estudiamos los rayos X, estamos hablando de valores comprendidos entre los 10 nanómetros y una centésima de nanómetro. Ver la nota al final sobre la información, la percepción, los colores y los fotones.

Dorothy Crowfoot Hodgkin pasó sus primeros dieciséis años entre Egipto, Inglaterra y Sudán, mientras sus padres trabajaban en arqueología y botánica básicamente en Sudán. Durante la Primera Guerra Mundial, y para evitar viajes y peligros, ella y sus hermanas tuvieron que quedarse en casa de sus abuelos en Worthing. Luego, en 1922, pudieron reencontrarse con sus padres en Jartum. Y allí, a los doce años, empezó su interés por la química y los minerales. A ello contribuyó el doctor Joseph, químico y amigo de sus padres, que le regaló productos químicos y le enseñó a analizar aquellos guijarros que Dorothy se traía cada día de un arroyo cercano. Dorothy terminó teniendo todo un kit portátil de análisis de minerales.⁶ Los estudiaba, los clasificaba, separaba componentes, preparaba disoluciones, hacía crecer cristales. Su madre, viendo el interés y fascinación de Dorothy, cuando ésta cumplió los 15 años le regaló un libro de Sir William Henry Bragg⁷ que acababa de publicarse y que trataba de la posibilidad de entender, con rayos X, la estructura espacial de los átomos dentro de los materiales. Aquellos tres años, entre 1922 y 1925, definieron su vocación.

Ya de vuelta a Inglaterra, Dorothy Crowfoot pudo estudiar química y cristalografía en el Somerville College de Oxford. No fue fácil. En Oxford, el porcentaje de chicas era del 20% (en Cambridge era peor: un 12%). Las estudiantes no podían participar en los debates de la Universidad, y no podían entrar en el restaurante si no iban acompañadas de algún chico o tenían autorización expresa del decano. Por suerte, la directora del College, Margery Fry, y su tutor, el doctor Brewer, descubrieron muy pronto su capacidad intelectual. Pudo estudiar cristalografía y orientar sus estudios hacia la cristalografía con rayos X. Una vez graduada en Oxford, y tras una estancia en Cambridge entre 1932 y 1934, volvió a Oxford, se estableció allí, y poco a poco fue consolidando su laboratorio de investigación para el estudio de los materiales con cristalografía de rayos X.

Desgraciadamente, 1934 no fue sólo el inicio de su carrera como investigadora autónoma en Oxford. Ese mismo año, comenzó a sufrir fuertes inflamaciones en las articulaciones de pies y manos. Le diagnosticaron una artritis reumatoide que la acompañó los siguientes sesenta años. Sin embargo, sabemos que Dorothy rara vez comentaba sus problemas físicos; soportaba el dolor como podía mientras sus deformaciones articulares iban avanzando.

A los tres años de este diagnóstico de la artritis, se casó con el historiador Thomas Hodgkin. Tuvieron tres hijos y una vida familiar realmente armoniosa. Dorothy Crowfoot Hodgkin pudo compatibilizar el trabajo profesional de investigación con las tareas familiares, porque su marido pronto vio y reconoció que en aquella familia, la creativa era ella. Thomas ejerció de padre, mucho más de lo que era habitual en la época.

6 Biografía de Dorothy Crowfoot Hodgkin: <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/dorothy-crowfoot-hodgkin>

7 William Henry Bragg, *Concerning the nature of things*, Bell & Sons Eds, London, 1925.

Cuidaba los niños por la noche mientras ella, casi a diario y tras la cena, volvía a su laboratorio a trabajar.

Las técnicas de cristalografía de rayos X son complejas. Primero, con la ayuda de disolventes o geles, hay que conseguir que la sustancia que queremos estudiar cristalice. Las técnicas son diversas y, en el caso de grandes moléculas, nada evidentes. Luego, una vez ya disponemos de estos cristales, la técnica consiste en estudiar los patrones de difracción que aparecen cuando los cristales son atravesados por un haz de rayos X. Salvando las distancias, es como intentar reconstruir el mundo tridimensional exterior a partir del análisis de las sombras que veían los habitantes de la caverna de Platón. Por suerte, Dorothy pudo utilizar aquellos primeros ordenadores que algunas Universidades empezaban a tener, realizando los cálculos matemáticos nada triviales que le iban desvelando la estructura tridimensional de las moléculas a partir de los patrones de difracción. Una de sus técnicas consistía en ir cambiando la dirección del haz de rayos sin modificar la posición del cristal, para así agregar la información que le iban dando las diferentes imágenes de difracción que obtenía.

Dorothy Crowfoot Hodgkin supo determinar la estructura y la disposición espacial de los átomos de muchas moléculas relacionadas con nuestra salud. El mismo año que se casó, descifró la estructura del colesterol. Después, con su trabajo continuado durante los tres años de guerra entre 1942 y 1945, reconstruyó la estructura tridimensional de la penicilina. Terminada la guerra, estuvo analizando cristalográficamente la vitamina B12 durante seis años. Y, a pesar de que muchos químicos creían que las técnicas disponibles no permitirían descubrir su arquitectura, en 1954 lo consiguió. Entender la estructura de moléculas como las de la penicilina y la vitamina B12 permitió fabricarlas de manera sintética o semi-sintética, pudiendo así tratar masivamente a las personas que lo necesitaban. En 1969 descifró la estructura de la insulina.

En 1947 y con sólo 37 años, Dorothy Crowfoot Hodgkin fue admitida en la Real Sociedad de Londres. Era la tercera mujer que entraba, en los 287 años de historia de la prestigiosa asociación científica inglesa. Luego, en 1964, fue galardonada con el Premio Nobel de Química.⁸ Dorothy Crowfoot Hodgkin se convertía así en la tercera investigadora de la historia en recibir el Nobel de Química, tras Marie Curie e Irene Joliot-Curie.

A pesar del deterioro físico que le iba causando la artritis reumatoide, Dorothy Crowfoot Hodgkin se mantuvo activa hasta su muerte en Londres a los 84 años. En plena guerra fría y en silla de ruedas, viajaba por todo el mundo participando en debates y dando conferencias sobre temas científicos y sobre la necesidad de llegar a la paz mundial. Se preocupaba por las personas perseguidas en diversos países, y luchaba

⁸ Dorothy Crowfoot Hodgkin, Biografía, NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020: <https://www.nobel-prize.org/prizes/chemistry/1964/hodgkin/biographical/>

a nivel mundial por la libertad de todas las personas científicas. Durante doce años, entre 1976 y 1988, presidió el movimiento Pugwash, inspirado en el manifiesto de 1955 de Albert Einstein y Bertrand Russell.⁹ El objetivo de las conferencias Pugwash era (y es) el desarme y la reducción del riesgo de conflictos armados.¹⁰ Por ello, por sus esfuerzos en pro del desarme nuclear mundial, el movimiento Pugwash recibió el premio Nobel de la Paz en 1995. Dorothy Crowfoot Hodgkin había muerto un año antes.

Rosalind Franklin era más joven que Dorothy. Como ella, era también inglesa. Desgraciadamente, su vida fue más corta, y tuvo mala suerte con algunas de las personas que la rodearon. Nació en 1920 en Londres, siendo la segunda de cinco hermanos. Durante la adolescencia, descubrió su vocación por las matemáticas y la ciencia. Logró superar las resistencias de su padre, y consiguió estudiar física y química. A pesar de que la Segunda Guerra Mundial afectó profundamente sus estudios, en 1946 pudo terminar la tesis doctoral en química física en la Universidad de Cambridge. A continuación, viajó a París a aprender las técnicas de análisis de cristales basadas en la difracción de rayos X.

Para Rosalind Franklin, el período entre 1951 y 1953 fue extremadamente productivo. Volvió a Londres y entró a trabajar en el laboratorio de John Randall, en el Kings College. Pronto se dio cuenta de que los sistemas de difracción por rayos X del laboratorio eran poco precisos y anticuados. Trabajando con su estudiante de doctorado Raymond Gosling, consiguió perfeccionarlos, y obtuvo imágenes de patrones de difracción de cristales de ADN que mostraban una nitidez desconocida hasta aquel momento. Rosalind, intuyendo que estaba descubriendo algo realmente importante, cogió las fotos y se fue a Oxford a mostrarlas a Dorothy Hodgkin. Ésta confesó que eran las mejores fotos de difracción que había visto en su vida. Las estuvieron analizando con mucho cuidado y, de las tres hipótesis de estructura tridimensional del ADN que proponía Rosalind Franklin, Dorothy Hodgkin descartó dos. En cambio, la hipótesis de la arquitectura en forma de hélice fue tomando forma, sobre todo a partir de una imagen (la número 51) que Franklin y Gosling habían obtenido en mayo de 1952. No podemos saber si Rosalind Franklin dedujo la estructura en forma de doble hélice del ADN antes de que James Watson y Francis Crick publicaran su artículo en la revista *Nature* el mes de abril de 1953, pero, como reconoció Francis Crick más tarde,¹¹ si no lo hizo, estuvo muy cerca de ello.

Rosalind Franklin tuvo siempre el apoyo de su estudiante Raymond Gosling, y cuando lo necesitó, disfrutó de la proximidad científica y humana de Dorothy Crowfoot Hodgkin. Pero algunos se apropiaron de los resultados de sus experimentos y la trataron

9 Biografía de Dorothy Crowfoot Hodgkin: <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/dorothy-crowfoot-hodgkin>

10 Las Conferencias Pugwash: <https://pugwash.org/>

11 Biblioteca Nacional de Medicina, E.E.U.C (National Library of Medicine, USA), Biografías de ciencia: <https://profiles.nlm.nih.gov/spotlight/kr/feature/biographical>

indignamente. Un compañero suyo, Maurice Wilkins, cogió algunas de sus imágenes de difracción (entre ellas, la número 51) y fue a enseñarlas, sin permiso, a Watson y Crick.¹² Éstos nunca confesaron a Rosalind Franklin que habían estado trabajando a partir de sus imágenes, y en el artículo de abril de 1953 en el que desvelaban la estructura doblemente helicoidal del ADN, artículo que les valió el premio Nobel, ni tan solo citaron los trabajos de Rosalind. Curiosamente, en este mismo número de la revista *Nature*, unas páginas más adelante, la revista publicaba un artículo muy técnico de Franklin y Gosling que explicaba las famosas imágenes y que sí citaba el modelo propuesto por Watson y Crick.¹³

En el Kings College, Rosalind Franklin sufrió todo tipo de discriminaciones por parte de sus compañeros. No podía entrar en la sala de profesores. La consideraban demasiado “francesa”, criticaban su manera de vestir y sus intereses intelectuales. James Watson, en su libro de divulgación sobre la doble hélice, se atrevió a decir que Rosalind “no quería destacar sus atributos femeninos... nunca llevaba los labios pintados para resaltar el contraste con su cabello liso y negro, y, a sus 31 años, sus vestidos mostraban una imaginación propia de las adolescentes empollonas inglesas”. Afortunadamente, más de veinte años después, Anne Sayre escribió una biografía de Rosalind Franklin¹⁴ que dejaba las cosas en su lugar, desvelando también el juego sucio que había sufrido.

A Rosalind Franklin le diagnosticaron un cáncer de ovario en 1956, tal vez causado por su excesiva exposición a los rayos X. Murió dos años después, a los 37 años. Cuatro años más tarde, en 1962, James Watson y Francis Crick recibían el premio Nobel por sus estudios sobre la estructura del ADN. Ninguno de los dos, en su discurso de aceptación, mencionó a Rosalind Franklin. Dorothy Crowfoot Hodgkin lo recibió dos años más tarde.

Desde 1996, la Universidad Birkbeck de Londres dedica uno de sus laboratorios a Rosalind Franklin.¹⁵ Un detalle poco conocido es que Rosalind Franklin también estuvo trabajando en el estudio los virus, publicando un total de 21 artículos científicos sobre su estructura. Una investigación que seguramente hubiera sido mucho más fructífera si no hubiera fallecido tan joven.

La historia de la ciencia está llena de personas invisibles. Porque, aunque los humanos nos guste identificar a unos pocos “famosos”, la ciencia va construyendo los hallazgos con infinidad de pequeñas contribuciones individuales que aprenden unas de

12 Ver: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/ten-historic-female-scientists-you-should-know-84028788/?page=10>

13 Eduardo Angulo, sobre Rosalind Franklin, 2014: <https://mujeresconciencia.com/2014/05/09/el-caso-de-rosalind-franklin/>

14 Anne Sayre, *Rosalind Franklin and DNA*, W.W. Norton & Company Eds, New York, 1975

15 Birkbeck University of London: The Rosalind Franklin Laboratory: <http://www.bbk.ac.uk/biology/our-research/research-facilities/rosalind-franklin>

otras. Y porque muchas de estas personas han estado y están más interesadas en su trabajo de investigación que en la notoriedad. Pero también porque la vanidad de unos ha hundido injustamente muchísimas otras personas, sobre todo mujeres. Muchas de ellas quedaron cautivadas por la belleza y misterios del Universo.¹⁶ Caroline Herschel, la primera mujer que descubrió un cometa, tuvo un reconocimiento realmente sorprendente: en 1787 consiguió un sueldo del rey Jorge III para trabajar como ayudante de su marido.¹⁷ A pesar de ser oficialmente sólo una ayudante, descubrió, por su cuenta, ocho cometas y 14 nuevas nebulosas. Lo que le ocurrió a Maria Winckelmann Kirch¹⁸ no fue muy distinto: su marido se atribuía tanto los resultados conjuntos como los de su mujer, por miedo al ridículo y la crítica social. Y cuando Vera Cooper Rubin¹⁹ quiso entrar en la Universidad de Swarthmore para estudiar astronomía, le recomendaron que se dedicara a pintar escenas astronómicas. Joan Feynman²⁰ tuvo la lucidez de pactar con su hermano Richard que ella estudiaría las auroras boreales y él, el resto del Universo; gracias a este pacto, pudo trabajar en lo que la cautivaba mientras su hermano recogía fama y reconocimiento. Williamina Fleming,²¹ que llegó a la astronomía desde su trabajo de asistenta en casa del astrónomo Edward Pickering, terminó descubriendo 52 nebulosas y más de 300 nuevas estrellas variables, catalogando también más de diez mil estrellas. Podríamos hablar también de Ruby Violet Payne-Scott, la primera radioastrónoma,²² o de Cecilia Payne-Gaposchkin,²³ que descubrió que las estrellas estaban formadas básicamente por hidrógeno y helio. Ninguna de ellas ha tenido el reconocimiento social que merecían. El nombre de muchas otras, ni nos ha llegado. Es sólo una pequeña muestra de la injusticia de la invisibilidad, concretada en unas pocas personas que estudiaron las radiaciones electromagnéticas del cielo.

El arco iris nos recuerda nuestros límites, con sus bordes transparentes que se visten de color en los ojos de los ruiseñores. Bajo el arco, tras el violeta, empieza nuestra oscuridad perceptiva. Sabemos que la luz es color, pero debemos aceptar que la luz visible es una ínfima parte de esta multitud de ondas electromagnéticas que llenan el Universo sin que nos demos cuenta. La ciencia está llena de invisibles. Pero también, la ciencia es un inmenso mar de científicas invisibles y de muchas personas que han quedado injustamente olvidadas.

16 Véase la nota del final sobre el cielo, los globos y los sumideros.

17 Caroline Herschel: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/ten-historic-female-scientists-you-should-know-84028788/?page=2>

18 Maria Winckelmann Kirch: <https://scientificwomen.net/women/winckelmann-kirch-maria-93>

19 Vera Cooper Rubin: <https://mujeresconciencia.com/2014/10/29/vera-la-espia-de-las-estrellas/>

20 Cuando Joan Feynman, a los ocho años, le dijo a su madre que quería ser científica, recibió esta respuesta: "las mujeres no pueden hacer ciencia porque su cerebro no está preparado para ello". Joan estuvo llorando durante horas. Y nunca olvidó aquella frase. Biografía de Joan Feynman: <https://mujeresconciencia.com/2016/03/31/joan-feynman-astrofisica/>

21 Williamina Paton Stevens Fleming: <https://www.britannica.com/biography/Williamina-Paton-Stevens-Fleming>

22 Ruby Violet Payne-Scott: <https://mujeresconciencia.com/2017/02/23/ruby-violet-payne-scott-la-radioastronoma-pionera/>

23 Cecilia Payne-Gaposchkin: <https://www.aps.org/publications/apsnews/201501/physics/history.cfm>

Los imposibles que nos definen

Una historia protagonizada por Mary Cartwright y Kenneth Arrow

¿Es posible hacer predicciones fiables del tiempo con más de una semana de antelación? ¿La ciencia nos lo llegará a explicar todo? El sistema solar, ¿continuará siempre como ahora, con los planetas girando armoniosamente alrededor del Sol? Cuando nos cruzamos una persona en la calle, ¿podemos prever qué hará al cabo de cinco minutos? ¿qué es posible y qué es imposible?

En 1942, Mary Cartwright impartió una conferencia en Cambridge. Habló sobre los estudios que había hecho, junto con John Littlewood, en relación a unas extrañas inestabilidades que sufrían los amplificadores de los radares. Entre el público se encontraba un joven estudiante: Freeman Dyson.¹ Años después, Dyson diría: «cuando escuché a Cartwright... fui consciente de la belleza de sus resultados, pero no entendí su importancia. Me dije: ‘Esta es una obra preciosa. Lástima que sólo sea un problema práctico que surge en tiempos de guerra’... No supe decirme: ‘Este es el nacimiento de un nuevo campo dentro de las matemáticas’. [Desgraciadamente,] compartí los gustos y prejuicios de mis contemporáneos”.² Dyson decía que Littlewood tampoco entendió la importancia de aquellas explicaciones de Cartwright sobre la imposibilidad de realizar determinadas predicciones. “Sólo ella lo entendía”, confesó.

Mary Cartwright nació en diciembre de 1900 en Aynho, Inglaterra, donde su padre era el vicario del pueblo. Tenía dos hermanos mayores, John y Nigel. Luego vinieron dos más: Jane y William. Hasta los once años disfrutaba jugando por las calles y prados del

1 Artículo de la revista *Nature* sobre Freeman Dyson: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00747-5>

2 Véase: BBC Magazine, 2013: <https://www.bbc.com/news/magazine-21713163>

pueblo mientras estudiaba en casa con institutrices. A finales de 1911, el día de su cumpleaños, le regalaron un libro con el lema “Sé una dulce buena doncella y deja [hacer a] quienes pueden ser inteligentes”. Ella misma lo recordaba, irritada, años más tarde. Afortunadamente, a los pocos meses pudo salir de Aynho para ir a estudiar a la escuela de Leamington. Permanecía allí de lunes a viernes, viviendo en casa de sus primos y volviendo con sus padres los fines de semana. Lo hizo durante tres años, de 1912 a 1915. Fue su primer contacto con el mundo real. Empezó gustándole la historia, pero fue desanimándose al ver la inmensa lista de acontecimientos del pasado que le hacían aprender de memoria. Por encima de todo, lo que le gustaba era aprender. Tras Leamington, pasó un año en la escuela de Boscombe y finalmente terminó sus estudios secundarios en la escuela Godolphin de Salisbury durante los tres años comprendidos entre 1916 y 1919. Fueron años durísimos, y la primera guerra mundial le robó sus dos hermanos mayores. Pero mientras tanto, Mary iba descubriendo el mundo escondido de las matemáticas de la mano de una de sus profesoras, Miss Hancock, que entendía perfectamente los fundamentos teóricos³ y los sabía transmitir con especial entusiasmo. La influencia de Miss Hancock marcó toda la vida de Mary Cartwright.

En octubre de 1919 pudo ir ya a Oxford, al St. Hugh College. Estuvo estudiando matemáticas hasta el año 1923, cuando consiguió su título universitario. Sus recuerdos de aquellos años fueron una mezcla de luces y sombras. Aulas llenas de chicos que habían vuelto de la guerra, dificultades y escasez, poquísimas chicas (cinco en toda la carrera de matemáticas), junto con ciertas actividades realmente inspiradoras. En todo caso, su decisión de continuar estudiando matemáticas no le hizo mermar el interés por la historia, y muchos de los artículos científicos que escribió durante su vida posterior incluirían interesantes referencias históricas (cosa bastante insólita en su área) que lo ratifican. Pero lo que más la marcó fueron los seminarios que daba Godfrey Hardy tras la cena de los lunes. Aquellas presentaciones y los coloquios nocturnos que las seguían eran todo un ejercicio de creatividad en equipo. Hardy, los lunes por la noche, la ayudó a volar, abriéndole, además, las puertas de la inspiración.

Tras obtener el título, Mary Cartwright empezó a trabajar como maestra durante cinco años, probablemente para ayudar a su familia, que, además de los dos hermanos, había sufrido la muerte del padre. En 1928, cuando las cosas mejoraron, Mary volvió a Oxford para estudiar las funciones integrales y hacer su tesis doctoral bajo la dirección de Godfrey Hardy. La leyó dos años después, en 1930. Su examinador fue el profesor John E. Littlewood. Nadie en aquel momento podía imaginar que Cartwright y Littlewood trabajarían juntos durante los siguientes diecisiete años: primero como profesores en Cambridge (Mary Cartwright terminó siendo la directora de estudios de matemáticas del Girton College), y a partir de 1938, investigando las ondas de radio y radar en el marco de varios proyectos en el Departamento de Investigación Científica

3 W. K. Hayman, *Biografías de los miembros de la Royal Society*, Londres, vol. 46, págs. 19–35: Biografía de Mary Cartwright, 2000: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsbm.1999.0070>

e Industrial del gobierno del Reino Unido.⁴ Luego, terminada la Segunda Guerra Mundial, Mary Cartwright fue encontrando su propia línea profesional y de investigación. En 1947 fue la primera matemática de la historia que era aceptada miembro de pleno derecho de la Royal Society, y el año siguiente pasaba a dirigir el Girton College en Cambridge.

En todo caso, tras aquella conferencia de Mary Cartwright en Cambridge en 1942, hubo que esperar veinte años para que Edward Lorenz redescubriera la teoría del caos. Fue mientras estaba estudiando simulaciones meteorológicas para la predicción del tiempo con uno de esos ordenadores de principios de los 60. En un cierto momento decidió repetir los cálculos y cometió un error casi inapreciable, permutando el orden de dos cifras decimales en la temperatura de aquel momento. Con gran sorpresa por su parte, vio que las predicciones del tiempo al cabo de dos o tres días le salían radicalmente distintas. Lorenz, por pura casualidad, había descubierto que el tiempo atmosférico es caótico, en el sentido de que un cambio inicial insignificante en los datos nos lleva, al cabo de pocos días, a resultados altamente discordantes y totalmente imprevisibles.⁵ Tras entenderlo en toda su magnitud, dijo aquello de que “el aleteo de una mariposa en Brasil puede acabar generando un tornado en Texas”.

Poco después de la muerte de Mary Cartwright, Freeman Dyson, decía: “continúo afirmando que ella fue la primera descubridora del caos”. Comentaba asimismo una carta que ella le había enviado, indignada, en 1983, riñendo a Dyson porque la estaba presentando en público mejor de lo que ella creía que merecía.⁶

Los sistemas caóticos, aunque su comportamiento a corto plazo sea comprensible, a partir de un cierto momento se convierten en inexplicables, de tal modo que su predicción se hace imposible.⁷ En este sentido, que es el de la teoría matemática del caos, podemos afirmar que las personas somos caóticas, que lo son las predicciones del tiempo, que lo es la bolsa, y que incluso lo es el sistema Solar, porque la órbita de Plutón es caótica.⁸ Sólo cambia la escala de tiempo. Nosotros somos imprevisibles a

4 Biografía de Mary Cartwright, Universidad de St. Andrews: <http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Cartwright.html>

5 Los sistemas caóticos son sistemas en los que su evolución queda fuertemente influenciada por ínfimos cambios en las condiciones iniciales, de manera tal que la predicción de su estado futuro a partir de un cierto momento se hace imposible. En palabras de Edward Lorenz, “El caos es cuando el presente determina el futuro, pero cuando, en cambio, el presente aproximado no determina aproximadamente el futuro”. Véase la nota al final sobre las predicciones, el caos y Lyapunov.

6 Comentarios de Freeman Dyson sobre Mary Cartwright, en su biografía publicada por la Universidad de California Los Ángeles, UCLA: http://cwp.library.ucla.edu/Phase2/Cartwright,_Mary_Lucy@951234567.html

7 Es interesante observar que, si conociéramos con absoluta exactitud la situación actual, los sistemas caóticos serían explicables y su futuro sería predecible. Su carácter caótico viene de la imposibilidad de conocer el estado actual de las cosas con total precisión. Y dado que los errores, aunque pequeños, son inevitables, la predicción a largo plazo en estos sistemas se hace imposible.

8 Sobre el carácter caótico de Plutón y de todo el sistema Solar, véase por ejemplo: <https://virvig-blogs.cs.upc.edu/2015/01/21/el-sistema-solar-es-estable/>

los pocos segundos, el tiempo meteorológico lo es a los pocos días, Plutón y todo el sistema Solar lo serán dentro de un centenar de millones de años.

Y en 1942, mientras Freeman Dyson escuchaba en Cambridge a Mary Cartwright hablando de temas que ninguno de los dos sabía identificaba con el caos, Kenneth Arrow acababa de obtener su máster en matemáticas en Nueva York.

Kenneth Arrow nació en Nueva York en agosto de 1921. Por suerte, sus padres sabían de la importancia de la educación y el conocimiento. Con grandes sacrificios económicos familiares pudo estudiar primero en una de las escuelas públicas de la ciudad, consiguiendo luego su primer título universitario, en ciencias sociales con intensificación en matemáticas. Esta extraña mezcla, que fue emergiendo casi por casualidad, le acompañó toda la vida, como él mismo explicaba años más tarde.⁹ En 1941, en la Universidad de Columbia, recibió su título de máster en matemáticas. Y la misma Universidad le concedía, diez años más tarde, el título de doctor. Siguiendo con sus intereses cruzados y gracias también a los consejos e influencia de su mentor Harold Hotelling, entró como profesor en el departamento de economía y esto definió su vida profesional. Primero en Columbia, luego en Stanford, más tarde en Harvard y finalmente, de nuevo en Stanford hasta su retiro en 1991. Se casó en 1947 con la economista y psicoterapeuta Selma Schweitzer y tuvieron dos hijos, David y Andrew, que orientaron su vida al mundo del espectáculo.

Kenneth Arrow estudió con gran rigor los mercados. En los años 50 concluyó que los mercados totalmente competitivos y simétricos podían funcionar bien y ser útiles. Luego, como explica Joseph Stiglitz,¹⁰ fue demostrando que los que no son simétricos (cuando una de las partes tiene más poder que la otra y cuando estas partes no comparten toda la información) no pueden ser perfectos.¹¹

Pero su aportación más rompedora la hizo en 1951, en su tesis doctoral, cuando demostró que es imposible diseñar un sistema electoral que sea perfecto. Es lo que se conoce como el teorema de imposibilidad de Arrow.¹² Aunque dediquemos todo el tiempo que queramos a estudiar cómo mejorar las leyes electorales, ahora tenemos

9 Kenneth Arrow, notas autobiográficas, Fundación Nobel: <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/1972/arrow/biographical/>

10 Obituario de Kenneth Arrow, *New York Times*, febrero de 2017: <https://www.nytimes.com/2017/02/21/business/economy/kenneth-arrow-dead-nobel-laureate-in-economics.html>

11 Decía, por ejemplo, que el hecho de formalizar un contrato con un compañía aseguradora modifica de manera sistemática el comportamiento de las dos partes firmantes.

12 El teorema de imposibilidad de Arrow demuestra que, si las preferencias individuales de la gente siempre son ordenables, y si estas preferencias individuales son transitivas (si prefiero A más que B y si prefiero B más que C, es que prefiero A más que C), entonces no hay ningún sistema electoral que garantice estos cinco enunciados: 1) que el conjunto de los representantes elegidos sea un reflejo de las opiniones de los votantes - 2) que si todos los votantes prefieren A más que B, los representados preferirán A más que B - 3) que no hay imposición de opiniones particulares - 4) que hay libertad de voto - 5) que las preferencias en un tema no deben ser afectadas por las preferencias en otros temas.

la certeza, gracias a Arrow y su teorema, de que el resultado será imperfecto y que no resolverá todos los problemas.

Mary Cartwright nos explicó que muchos fenómenos son imposibles de predecir, y Kenneth Arrow demostró que es imposible tener una reglamentación electoral que garantice unos mínimos requisitos que parecen obvios. Ambos lo lograron con recursos de las matemáticas, y ambos llegaron a resultados irrefutables que nos muestran algunas de las cosas que nunca podremos conseguir. Pero no fueron los únicos. Kurt Gödel, por ejemplo, demostró la existencia de proposiciones ciertas que nunca podremos probar, viendo que todo sistema matemático es necesariamente incompleto. Con su teorema matemático, Gödel cortó de raíz las pretensiones de bastantes de sus compañeros de disciplina.

Kenneth Arrow ganó el premio Nobel de Economía a los 51 años, en 1972, siendo el economista más joven en obtenerlo.

Mary Cartwright fue la primera mujer que recibió la medalla Sylvester y la primera mujer que entró en el Consejo de la Royal Society. Cartwright fue presidenta de la London Mathematical Society durante los años 1961-62, siendo también su primera mujer presidenta y recibiendo su medalla De Morgan en 1968. El año siguiente, la reina de Inglaterra la nombró Dama Mary Cartwright y comandante de la Orden del Imperio Británico (sic). En 1986, Kenneth Arrow recibió el premio John von Neumann por sus trabajos en el campo de la investigación operativa. Fue, durante poco tiempo, uno de los asesores económicos de John F. Kennedy. En 2004 se le concedió la medalla nacional de ciencia de los Estados Unidos.

Mary Cartwright se mantuvo activa, dando ideas y participando en trabajos de investigación hasta pasados sus 80 años.¹³ Luego continuó viviendo en Cambridge hasta su muerte en 1998. Kenneth Arrow, que supo modelizar matemáticamente y por primera vez diversos fenómenos económicos y sociales, nos dejó en 2017.

Una de las primeras personas que nos consta que quedó desconcertada ante la evidencia de la imposibilidad fue Pitágoras, cuando demostró que la diagonal de un cuadrado no era ninguna fracción de la longitud de su lado. Y es que la raíz de dos, como el número pi, es imposible de calcular de manera exacta, es inabordable. Tanta fue la extrañeza de quienes lo descubrieron, que estos números fueron denominados *irracionales*. Luego, con los siglos, los humanos hemos ido aprendiendo que vivimos rodeados de imposibles. Hemos comprendido la imposibilidad de volar con nuestra propia energía y hemos descubierto que somos polvo de estrellas, porque la vida no puede haber surgido de la actividad del Sol.¹⁴ Sabemos que el crecimiento ilimitado es un mito que no tiene cabida en el mundo real, y que el mundo cuántico

13 W. K. Hayman, 2000, *op. cit.*, p. 25.

14 Véase, por ejemplo: <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2019/09/14/tres-impossibilitats/>

es intrínsecamente inescrutable porque, entre otras cosas, ciertas propiedades de las partículas subatómicas no existen antes de que las midamos. Como dice John Barrow,¹⁵ debemos aprender a vivir entendiendo que algunos fenómenos son imposibles de entender, imposibles de hacer o imposibles de alcanzar. La evolución ha ido conformando un cerebro humano que sabe manejar lo que ocurre en nuestro entorno cercano, pero justamente por eso, lo que está fuera del pequeño círculo de lo que nos rodea puede que también quede fuera de todo lo que podremos llegar a entender.¹⁶ Y tampoco sabemos si sabremos. Desconocemos si, algún día, nuestros descendientes podrán llegar a entender la naturaleza del tiempo o qué es la conciencia.¹⁷

Nos llegan preguntas inquietantes sobre lo posible y lo inalcanzable, también desde Pepe Mujica: ¿Estamos llegando al límite biológico de nuestra capacidad política? ¿Seremos capaces de reconducirnos como especie y no como clase o país? En otras palabras, ¿es imposible, biológicamente, la democracia global y el respeto a la dignidad y a los derechos de todas las personas? Para poder sobrevivir todos juntos, ojalá podamos superar y dejar atrás los instintos atávicos de reptil que aún llevamos en lo más profundo de nuestro cerebro.

Jürgen Habermas decía, durante la pandemia, que nunca habíamos sabido tanto de nuestra ignorancia ni de la necesidad de actuar en medio de la inseguridad.¹⁸ Y es que, gracias a la cultura y al conocimiento, podemos entrever que no existen las soluciones simples, que debemos convivir con el riesgo y la incertidumbre, que la seguridad absoluta es un mito, y que no es bueno dejarse llevar por los instintos primarios. Tal vez sea por ello que Pepe Mujica acababa preguntándose: “¿Mirará lejos la política para hacer maridaje con la ciencia?”.¹⁹

15 John Barrow, *Impossibility: The limits of Science and the Science of Limits*, Oxford University Press, NY., 1998.

16 *Ibidem*.

17 Marcus du Sautoy, *Lo que no podemos saber: exploraciones en la frontera del conocimiento*, Acantilado, 2018, págs. 307-453, trad. de Eugenio Gómez Ayala.

18 Javier Ruiz Sánchez y otros, “Tiempo de ignorancia e incertidumbre”, sobre Jürgen Habermas, *Diario.es*, 2020: https://m.eldiario.es/3cd9d182_1020907906/

19 Pepe Múgica, *Público*, 4 de mayo de 2020: <https://www.publico.es/politica/emergencia-coronavirus-pepe-mujica-pudiera-crear-dios-diria-pandemia-advertencia-sapiens.html>

El infinito y el fin de las cosas

Una historia protagonizada por Rózsa Péter y Katrina Spade

Es curioso. Sabemos que somos finitos pero nos resistimos con todas nuestras fuerzas a aceptarlo.¹ Nos inventamos todo tipo de teorías sobre la muerte y lo que puede haber después. Decimos que es el gran misterio. ¿Seguro que lo es?. Algunos poetas se han atrevido a abordar el tema. Escuchemos a Joan Margarit: “Cuesta entender la vida, no la muerte / En la muerte no se esconde ningún enigma”.²

Rózsa Péter tuvo una vida difícil. Nacida en 1905 en Budapest, fue primero a una escuela para niñas y luego, siguiendo la voluntad de su padre, empezó estudios de química en la universidad. Pero la química incipiente de principios del siglo XX no le interesaba, y el aburrimiento no tardó en llegar. Lo que le gustaba eran las matemáticas. Insistente y persuasiva, supo convencer a su padre, y a los veintidós años pudo graduarse en matemáticas en la universidad Pázmány Péter. Marcada por la Primera Guerra Mundial y cuando en los años 30 las perspectivas volvían a oscurecerse, supo cambiar a tiempo su apellido judío alemán Politzer por el húngaro Péter. Fue viviendo como pudo hasta el final de la Segunda Guerra Mundial, soltera y apartada, mientras daba clases particulares a niños y niñas de bachillerato. Incluso intentó escribir y traducir poesía. No encontraba ningún trabajo fijo.

1 Albert Einstein, en una carta en febrero de 1950, decía esto: “Los humanos somos parte del mundo, de eso que llamamos Universo, una parte limitada en espacio y tiempo. Experimentamos los pensamientos y sentimientos como algo independiente del resto del mundo, en una especie de ilusión óptica de la conciencia. El único objetivo de la verdadera religión es liberarse de esta ilusión, no alimentarla, sino intentar superarla. Este es el camino para conseguir la verdadera paz de espíritu”.

2 Joan Margarit, *Cálculo de Estructuras*, Ediciones Visor, Madrid, 2005. Poema: “Paisaje de la Conca Solivella, Blancafort”.

Durante la guerra, Rózsa quedó confinada durante años en el gueto de Budapest. Pero supo convertirlo en una oportunidad para empezar a escribir, trabajando en un libro de divulgación sobre lógica, números y geometría que después ha sido fuente de inspiración para muchísimas personas. Se llama *Jugando con el infinito*, y es maravilloso. El libro presenta las matemáticas como algo divertido y emocionante, intentando mostrar que son parte de una ciencia que es imprescindible para la humanidad.³ Lo terminó en 1943, aunque no se pudo vender y difundir hasta finalizada la guerra. Ha sido traducido a catorce idiomas y continua siendo actual. Fruto de los años de horror que le supusieron la muerte de un hermano y otros familiares, el libro de Rózsa Péter nos transporta a la belleza y a la magia curativa de un mundo, el del infinito, que ella nos va enseñando a imaginar, construir y recorrer.

El primer trabajo profesional remunerado de Rózsa Péter no le llegó hasta 1945, terminada la guerra, y fue en la escuela de maestros de Budapest. Esto le permitió continuar trabajando en el tema de las funciones recursivas, mejorando las ideas que ya había presentado en el congreso internacional de matemáticas de Zurich de 1932 y que tres años más tarde le habían permitido obtener el título de doctora en matemáticas. Y es que las funciones recursivas, un campo que contribuyó a fundar, terminaron siendo la pasión de su vida.

Hay términos más fáciles de definir que otros. Si tenemos que explicar qué es un “triángulo” seguramente podremos hacerlo con menos palabras que si nos piden que digamos qué significan los conceptos “amarillo” o “entusiasmo” a personas que no los conocen. En el campo de las relaciones familiares, algunas explicaciones son cortas y claras. Los abuelos son los padres de los padres, y los bisabuelos son los padres de los abuelos. Pero, para no quedarnos sin nombres cuando ascendamos por el árbol genealógico, también podemos decir que los padres (2) son los padres de los padres (1) y en general, que los padres (n) son los padres de los padres (n-1), si entendemos que los padres (n) son aquellos antecesores que tenemos a n generaciones de distancia. Se trata de una definición recursiva, una de las que estudió Rózsa Péter, que incluyen el término definido en la definición para extenderlo o refinarlo.⁴

Rózsa Péter publicó el primer libro sobre funciones recursivas, que reunía y condensaba sus trabajos de dos décadas, en 1951. Se llamaba *Rekursive Funktion*. Cuatro años más tarde, cuando la escuela de maestros de Budapest cerró, consiguió una plaza de profesora en la Universidad Loránd Eötvös de Budapest, donde trabajó hasta su jubilación en 1975.⁵

3 Véase la nota al final sobre los infinitesimales y la velocidad.

4 En matemáticas encontramos muchas definiciones recursivas. Podemos afirmar, por ejemplo, que el factorial de 1 es 1, y que el factorial de cualquier entero n mayor que 1 es igual al producto del factorial de n-1 por n. La función factorial (n) es recursiva.

5 Maths History: Biografía de Rózsa Péter: <http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Peter.html>

La naturaleza rebosa recursividad. La col romanesco, por ejemplo, es un conjunto de partes más pequeñas e idénticas a toda la col que se van superponiendo en caminos espirales mientras van reduciendo su tamaño. En otras palabras, está formada por muchas coles romanesco colocadas y escaladas adecuadamente. Y no es un caso único en el reino vegetal. Las ramas de muchos árboles tienen formas parecidas a la de todo el árbol, y es por ello que no es fácil saber si, por las fiestas navideñas, nos están vendiendo un abeto o sólo una de sus ramas. Las coles romanesco y los abetos, con sus formas recursivas en las que algunas de sus partes son similares al todo, se denominan auto-similares.⁶ Son ejemplos de los llamados fractales.

No es difícil crear imágenes recursivas, reproduciendo el llamado efecto Droste. Fue la casa holandesa de este nombre, Droste, la que, a principios del siglo XX, lanzó al mercado unas conocidas cajas de chocolate decoradas con el dibujo de una enfermera que llevaba una bandeja con una taza y una de estas cajas de chocolate. Evidentemente, la caja que se veía en la bandeja mostraba la enfermera con una bandeja mucho más pequeña que tenía la taza y el mismo dibujo. El efecto de la recursividad genera una serie de infinitas cajas de chocolate en una especie de remolino que acaba desapareciendo en un punto. Es un efecto que podemos reproducir fácilmente si nos situamos ante un espejo con otro espejo en las manos enfrentado al primero, o bien si nos hacemos una “selfie” con el teléfono enfocado para que capte nuestra imagen reflejada en el espejo. El resultado es un sinfín de auto-imágenes, unas dentro de otras.

Pero, ¿cuántas imágenes vemos en el espejo? ¿cuántas cajas de chocolate hay, una dentro de otra, en el anuncio de la casa Droste? ¿cuántas mini-coles romanesco encontramos en una col?⁷ Teórica y matemáticamente, la respuesta es: infinitas. Decir que un objeto (una imagen, un vegetal) incluye una o más copias más pequeñas de sí mismo es claro y conciso, pero nos lleva a un vértigo de reducciones de tamaño que no acaba nunca. Por ello, la riqueza geométrica de estos objetos matemáticos es inacabable. Los fractales son infinitos,⁸ pero sólo pueden existir en nuestra mente. La realidad, en cambio, es finita. El número de imágenes nuestras que vemos reflejadas en el espejo puede parecernos innumerable, pero esto sólo es cierto en nuestro pensamiento. Porque en el Universo y en el mundo el infinito no existe. Las partes de la col que vemos similares a toda la col no pueden reducirse infinitamente: su tamaño debe ser al menos el de una célula. Y las imágenes que vamos viendo dentro de otras imágenes dejan de existir cuando se proyectan en un área inferior a la de las células

6 Véase la nota al final sobre los fractales.

7 La forma de la col romanesco, como la de la costa de Menorca y la de muchas otras formaciones naturales, se denomina fractal. Sobre los fractales y la longitud de la costa de Menorca, véase (en catalán): <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2012/06/21/quina-es-la-longitud-de-la-costa-de-menorca/> - Véase también la nota del final sobre los fractales.

8 Sobre los fractales y la longitud de la costa de Menorca, véase (en catalán): <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2012/06/21/quina-es-la-longitud-de-la-costa-de-menorca/>

bastón de nuestra retina, del mismo modo que, en una foto, todo aquello de tamaño menor a un píxel desaparece.

La mente humana puede volar, llegando a imaginar algunas propiedades del infinito. El infinito nos ha llevado al concepto de derivada, al cálculo infinitesimal de Leibnitz y Newton,⁹ a poder calcular velocidades y hacer cuidadosas simulaciones aerodinámicas y de todo tipo. Pero el infinito no puede salir del cerebro humano. Todo es limitado, incluyéndonos a nosotros como parte de esta totalidad. Las funciones recursivas deben incluir una condición de finalización, porque si no fuera así serían no calculables.¹⁰ Rózsa Péter, las velocidades, los fractales y los sistemas recursivos nos recuerdan que la imaginación es nuestro oasis de infinitud en un Universo donde todo es finito.

Y si en el mundo todo es finito, parece evidente que los humanos, como parte del mundo, no podemos ser otra cosa que finitos y limitados. Como dicen que explicaba Zeus, somos efímeros y caducos como las hojas de los árboles. Es algo que no deberíamos rehuir. Carolyn Steel comenta que acepta su final, que trabaja para integrarse en los ciclos de la naturaleza, y que disfruta con ello.¹¹ Javier Gomá nos recuerda que la muerte es un hecho meramente biológico, que es previsible y común a todos los seres vivos. Pero dice que, en cambio, la mortalidad es un privilegio moral específicamente humano, que hace que podamos aceptar que vamos a morir, apropiándonos positivamente de nuestra finitud y superando la vanidad. Porque el hecho de aceptar que somos mortales nos predispone para poder asumir los límites éticos y cívicos que van conformando nuestro Yo,¹² y nuestra conciencia de mortalidad es lo que nos permite valorar y apreciar los placeres de cada día. ¿O es que no son especialmente intensas las emociones en las horas anteriores a una larga despedida?

Nadie discute que nacemos en un cierto momento y que antes no existíamos. De hecho, nos es también fácil aceptar que nuestro Yo nace más tarde, cuando empezamos a ser conscientes y tener recuerdos. Tenemos un origen en el tiempo, pero el concepto de inmortalidad implica no tener fin. Es lo que en matemáticas llamaríamos una vida semi-infinita, que comienza y luego es eterna. Ahora bien, es bien conocido que todo conjunto semi-infinito (por ejemplo, una semi-recta) es infinito. Disfrutar de la vida eterna es ser infinito. Pero, si somos infinitos, ¿por qué nacemos? ¿por qué no

9 Véase la nota del final sobre los infinitesimales y la velocidad.

10 Las funciones recursivas de Rózsa Péter incluyen una condición de finalización, porque si no fuera así serían no calculables. Lo mismo ocurre con la curva fractal de Koch. Para dibujar una curva de Koch podemos empezar con un triángulo y, para cada uno de los segmentos rectos que se corresponden con sus lados, substituirlo recursivamente por 4 sub-segmentos que extiendan en un factor de 1/3 su longitud; sólo tenemos que ir repitiendo un proceso de sustitución. Pero, si no queremos quedar atrapados en un dibujo que nunca terminaría, debemos especificar el número máximo de iteraciones: <http://mathworld.wolfram.com/KochSnowflake.html>

11 *Entrevista a Carolyn Steel, La Vanguardia*, 30 de julio de 2019: <https://www.lavanguardia.com/lacontra/20190730/463773216561/hemos-pasado-de-compartir-la-comida-a-competir-por-dinero.html>

12 Javier Gomá: *Filosofía mundana: microensayos reunidos*, Galaxia Gutenberg, 2016.

estábamos aquí hace cinco siglos? ¿dónde estábamos, cuando nuestros abuelos se casaron? ¿por qué no tenemos una memoria infinita?

Es aconsejable seguir el principio de proporcionalidad, según el cual las propuestas y teorías extraordinarias, aquellas que nadie nunca ha podido comprobar en base a los hechos, requieren pruebas extraordinarias. Lo explica Michael Shermer.¹³ Habría que abordar las grandes preguntas con actitud científica y en base a este principio de proporcionalidad, estudiando los hechos objetivos y prefiriendo las explicaciones más probables a las menos probables, sean cuales sean las alternativas. Coherente con esta línea de pensamiento, Shermer concluye que nuestra pervivencia después de la muerte es altísimamente improbable.

Preguntarse donde estaré después de muerto es idéntico preguntarse dónde estaba yo hace cien o doscientos años. Pero la realidad nos dice que yo no era, ahora soy, y que no seré. Somos efímeros. El concepto de vida eterna es un oxímoron porque la vida es parte del mundo, y el mundo es finito. Hemos evolucionado a partir de los animales, que todos creemos finitos. Si los seres vivos no muriesen no habría evolución y no habríamos podido llegar a existir, porque todos empezamos como bacterias. La evolución sólo existe en la medida en que hay renovación, y la muerte forma parte de esta dinámica. Somos cuerpos, somos materia, somos química y física. Somos limitados y desaparecemos porque todo en el Universo es limitado y acaba desapareciendo. ¿Seguro que somos la excepción?¹⁴

Rózsa Péter jugó con el infinito durante la guerra y toda su vida, mientras escribía y divulgaba la belleza de lo que nunca termina. Intuyó los fractales y los sistemas actuales de búsqueda en internet, entre otras muchos temas que todavía nos maravillan. Pero con sus funciones recursivas, supo volver a aterrizar en el mundo finito y limitado de todos los seres vivientes.¹⁵

13 Michael Shermer, "What is truth anyway", 2017: <https://michaelshermer.com/2017/04/what-is-truth-anyway/>

14 Hay dos creencias que suelen ir de la mano, sobre todo en nuestra cultura occidental: la de la existencia de un ser superior, y la de la continuidad, de alguna manera, después de la muerte. Son aspectos muy personales, y por tanto no opinables desde la ciencia. Pero lo sorprendente es que haya poca gente que crea en la existencia de un ser superior y que a la vez acepte su finitud, el carácter efímero de su existencia, y su desaparición con la muerte. Sobre todo si pensamos que lo lógico, desde la perspectiva de que somos producto de la evolución a partir de unos animales que desaparecen al morir, es aceptar que somos finitos y efímeros como ellos. Somos animales y somos parte de la naturaleza, algo que hemos ido entendiendo gracias a la ciencia. Y en este contexto, se hace difícil de entender que el creador no nos haya hecho iguales al resto del Universo: finitos y mortales. ¿Seguro que somos tan esencialmente diferentes? ¿No será que todavía hay restos de aquella vanidad que nos hizo pensar durante siglos que estábamos en el mismo centro del Universo?

15 La ciencia nos recuerda constantemente que todo es limitado y que nosotros no somos una excepción, los neuro-científicos nos cuentan que nuestro Yo consciente ha de ser finito porque nuestro cerebro es finito, los filósofos nos hablan de la belleza efímera de las hojas que caen en otoño, y los matemáticos y geómetras nos explican que los semi-infinitos son infinitos y que por tanto son imposibles en este mundo real y finito en que vivimos. Nos encontramos en el mundo real de los árboles, plantas y coles, no en el mundo mágico de los fractales. Pero la fantasía humana es inmensa, y es bien fácil dejarse llevar por la ilusión del infinito y de la ausencia de límites.

Aparte de otros premios, Rózsa Péter fue elegida académica de la prestigiosa Academia Húngara de Ciencias en 1973. Fue la primera mujer en toda la historia de esta Academia.

El mismo año de la muerte de Rózsa Péter, 1977, nació Katrina Spade. Durante su infancia y juventud en un pueblo cercano al Canadá, Katrina fue definiendo su identidad apoyada y animada sobre todo por una abuela encantadora, mientras jugaba y disfrutaba al aire libre con más de doce hermanos. Al acabar los estudios locales, se matriculó en Amherst para estudiar arquitectura y cursó sus estudios sin problemas.

De joven, Katrina pasó momentos difíciles. Sufrió la muerte y desaparición de personas cercanas. Meditaba sobre esta rueda que nos hace surgir de la naturaleza y que, al final, nos vuelve a ella. Viendo que la sociedad occidental y americana vivía de espaldas a la muerte y observando lo absurdo de muchos procesos funerarios, tomó la decisión de escribir su tesis de máster proponiendo alternativas sostenibles para estos procesos.

Ver y sentir la espiritualidad que llena cada rincón de la naturaleza. Es lo que, en los años 80, aprendió Katrina Spade de sus padres, que, sin ser religiosos, veían el mundo como este entorno que nos ha dado la vida, entorno que nos acoge y al que volveremos.

Sólo podemos “vivir” un hecho o un acontecimiento si lo sobrevivimos y recordamos. La risa de los niños la disfrutamos al cabo de uno o dos segundos, y lo mismo ocurre cuando vemos un rayo o tenemos un susto. La persona que sufre un accidente grave habitualmente no recuerda los últimos momentos antes del choque porque su cerebro, al quedar inconsciente, deja de recordar. La consecuencia, como ya explicaba Montaigne, es que la muerte es siempre dulce. Los últimos pensamientos antes de morir se pierden, y nadie es consciente del momento de su muerte del mismo modo que no recordamos ni el instante preciso en que caemos dormidos ni el inicio de nuestra vida consciente. Y esto es lo que iba pensando Katrina Spade mientras iba dando forma a su proyecto: si la muerte es dulce para la persona que se va, debería serlo también para los que se quedan y para el planeta.

Katrina Spade decidió hablar de recomposición y no de descomposición, porque la muerte es fuente e inicio de toda la vida que vendrá detrás nuestro. Y vio que era posible diseñar sistemas de compostaje que se nutriesen de los cuerpos de los fallecidos. Como ella misma explica, se trata de repetir, a mayor escala, el proceso natural de fabricación de nutrientes que aparece en la capa superficial del suelo de los bosques o lo que ya se hace actualmente en las granjas de ganado. El cuerpo de la persona fallecida se entierra, durante la ceremonia con los familiares y amigos, en una pila de serrín y trozos de madera, se moja ligeramente para incrementar la humedad, y las bacterias se encargan del resto. Pronto la temperatura sube por encima de los 60 grados, desaparecen los microbios patógenos, y en un proceso limpio, sin olores y

muy bajo en emisiones en comparación con la cremación, en pocas semanas finaliza el proceso de recomposición. Todo, incluidos los huesos, se convierte en abono. La familia puede recoger parte del mismo, si lo desea, para dar vida a alguna planta o árbol en recuerdo de la persona fallecida. De manera similar a lo que comenta Carolyn Steel, aceptando un final que nos integra en los ciclos de la naturaleza.

Katrina Spade inició el proyecto que ella misma denomina “muertes urbanas” en 2014,¹⁶ y tres años más tarde creó la corporación de interés público “Recompose”. Fue nombrada *Fellow* de la asociación “Echoing Green Climate”. Es una buena divulgadora de los principios que inspiran una visión digna y sostenible de nuestra muerte.¹⁷

Volviendo a este privilegio moral de la mortalidad que según Javier Gomá nos puede ayudar en el camino hacia la ética, descubrimos lo que su maestro Emilio Lledó ya nos contaba: que la creencia en la ausencia de límites y en la infinitud a menudo puede ir de la mano del afán desmedido de poder, del fanatismo, de la intolerancia y de las ganas de destruir al Otro,¹⁸ con planteamientos basados en una ilusoria omnipotencia. Necesitamos un cambio de paradigma que equilibre la razón y los sentimientos: en lugar de concebirnos como seres autónomos, racionales y capaces de ganar y dominar cualquier fenómeno adverso, deberíamos vernos como seres relacionales e interdependientes, empáticos con los demás y atentos a los requerimientos del planeta que estamos deteriorando. Porque lo que nos define a los humanos es la dependencia y la vulnerabilidad.¹⁹

Habrà un día en que no seremos y no lo sabremos, del mismo modo que no éramos hace cien años y no sabíamos. Por eso, cada mañana y mientras podamos hacerlo, vale la pena decirnos: “¡aún vivo!”.

16 Echoing Green Climate: Biografía de Katrina Spade: <https://fellows.echoinggreen.org/fellow/katrina-spade/>

17 Conferencia TED de Katrina Spade, “Cuando muera, recomponedme”: https://www.ted.com/talks/katrina_spade_when_i_die_recompose_me/discussion?c=38968

18 Emilio Lledó, 2005, *op. cit.*

19 Victoria Camps, *Tiempo de cuidados*, Arpa Editores, 2021, págs 11 y 26. La definición según la cual lo que nos define como humanos es la dependencia y la vulnerabilidad es de Alasdair MacIntyre (p. 26).

Belleza y ética

Una historia protagonizada por Alicia Boole y Bucky Fuller

Alicia Boole no tuvo una infancia fácil. Nacida en Cork, Irlanda en 1860, quedó huérfana de padre a los cuatro años. Ante las dificultades económicas, su madre tuvo que mudarse a Londres con sus cuatro hermanas, dejándola a ella con su abuela en Cork. Fueron años duros. De mayor, explicaba que aquellos años no fue feliz, que la controlaban y que no le dejaban hacer nada. Finalmente, a los once años, pudo volver a vivir con su madre y hermanas. El calor del amor materno la ayudó a recuperarse y mejorar su estado anímico, aunque aquél lugar donde vivían era “oscuro, sucio, incómodo y pobre”.¹

Un día, a los 18 años, jugaba con cubos de madera con sus dos hermanas más pequeñas y Charles, el marido de su hermana mayor. Ethel y Lucy se aburrían, pero Alicia, maravillada, tomó los cubos, empezó a colocarlos de diferentes maneras, escuchó algunos comentarios de Charles sobre la cuarta dimensión, e hizo algo inaudito: imaginó objetos geométricos en el espacio de cuatro dimensiones, y entrando en este espacio que sólo existe en la mente de unas pocas personas, lo explicó.² La sorpresa de Charles y de su madre Mary fue indescriptible.

Cabe decir que la ayuda materna, aquellos años en Londres, fue esencial. Porque Alicia no pudo ir a la escuela. Aprendió de su madre Mary Everest, que le dedicó un tiempo, un amor y una pasión que su padre (reconocido matemático) seguramente

1 Biografía de Alicia Boole Scott. School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland: <http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Stott.html>

2 Edwin Abbott Abbott, en su libro *Flatland*, presenta de forma amena y sencilla las paradojas asociadas a las dimensiones del espacio.

no le hubiese podido dar. Y es que la señora Everest, que mientras criaba sus cinco hijas estuvo trabajando de bibliotecaria en el Queen's College y como secretaria del que más tarde sería su consuegro, era experta en pedagogía de la ciencia. Le permitieron, extra-oficialmente, que hiciera de tutora de las estudiantes del Queen's College, y mientras lo hacía iba tomando notas. Después, cuando sus hijas ya se hicieron mayores, publicó sus teorías en un buen puñado de libros que escribió entre 1890 y 1916. Algunos de los títulos son bien explícitos: *La preparación de los niños para la ciencia*, *Lógica explicada con amor*, *La filosofía y la diversión del álgebra*, *Escritos sobre la lógica de la aritmética*. En este último, explicaba por ejemplo que lo mejor era no ser demasiado categórica, porque lo ideal era ayudar a los niños con preguntas hasta que ellos mismos encontrasen las soluciones y entendiesen las cosas. Por otra parte, en *La preparación de los niños para la ciencia*, decía que había que fomentar que los niños experimentaran con la regla, el cartabón, la escuadra y el compás hasta que los encontraran tan familiares como la cuchara y el tenedor. Aunque Alicia Boole no pudo ir a la escuela, aprendió a disfrutar de la geometría, a pensar sobre la forma de los objetos y a trabajar con el compás y otras herramientas de dibujo geométrico con tanta destreza como la que mostraba cuando pelaba la fruta o se abrochaba los zapatos.

Alicia Boole introdujo la palabra politopo para referirse a los objetos sólidos convexos que ella era capaz de imaginar en el espacio de cuatro dimensiones.³ Entendió su forma, y supo dibujar y construir, con métodos basados simplemente en la antigua metodología de Euclides, algunos cortes de aquellos objetos que iba imaginando.

Los dibujantes trabajan en las dos dimensiones del papel, y los escultores juegan con todas las posibilidades de las tres dimensiones del espacio. Cuando dibujamos, el papel, mágicamente, va incorporando árboles, el mar, figuras humanas o incluso figuras geométricas como círculos, polígonos y trazos abstractos. De pequeños aprendimos los nombres de muchos polígonos, y nos explicaron que algunos de ellos, los que tienen todos los lados y ángulos iguales, reciben el nombre de regulares. Aprendimos también que hay infinitos polígonos regulares: el triángulo, el cuadrado (que no el rectángulo), el pentágono y el hexágono regulares... la lista no termina porque siempre podemos añadir un lado más para acabar creando un nuevo polígono regular.

Si dejamos el plano del papel y pasamos al espacio del escultor, junto a las formas más variadas encontramos objetos con caras planas. Las cajas, las casas, muchos muebles y las esculturas que llamamos "geométricas"⁴ son poliedros. Pero no son regulares. Y es que de poliedros regulares hay pocos. Platón, en sus diálogos, ya explica que sólo hay cinco: el tetraedro, el cubo, el octaedro, el icosaedro y el

3 Para ser rigurosos deberíamos usar el término "4-politopo"

4 La geometría es ubicua, porque incluye lo plano y lo curvo, lo grande y lo minúsculo: encontramos geometría en la Tierra, en sus paisajes, en la vegetación, en las nubes, en los pájaros que surcan el cielo y en nosotros mismos. Los poliedros son objetos que sólo tienen caras planas.

dodecaedro.⁵ Ninguno más. En el plano del papel podemos dibujar infinitos polígonos regulares, pero en el espacio de los escultores, sólo cinco. Es algo que debió sorprender extraordinariamente a aquellos que lo descubrieron (seguramente, los pitagóricos). ¿Por qué sólo cinco?⁶

La geometría no es fácil de entender. Pero podríamos ser más amigos de las formas poliédricas si hiciésemos caso a lo que proponía Mary Everest, la madre de Alicia. Mary escribió que todos los niños deberían jugar manipulando sólidos platónicos desde pequeños, para así poder ir descubriendo su belleza oculta.

Y Alicia Boole no sólo la descubrió, sino que fue más allá. Demostró que, si pudiéramos vivir en un mundo de cuatro dimensiones, veríamos que hay seis 4-politopos regulares, ni más ni menos. Gracias a ella y otros matemáticos de hace más de cien años, ahora sabemos que el conjunto de objetos regulares con lados y caras planas tiene infinitos elementos en 2D, cinco en 3D, y sólo seis en 4D. A continuación, y pensando en los juegos que hacía con su madre, Alicia razonó con acierto que, si las secciones resultantes de los cortes de un poliedro son polígonos, las secciones que resultan del corte de los 4-politopos tendrían que ser poliedros.⁷ Luego, imaginando aquellas formas politópicas que su mente le permitía ver, pudo dibujar y construir en cartulina un buen número de las secciones que resultan de cortar por la mitad y en cualquier dirección los seis politopos regulares. Alicia pensaba que estas secciones poliédricas podían ayudar a entender aquellos politopos que nos es imposible imaginar. Lo consiguió gracias a su mente privilegiada, con la sólida base de las enseñanzas de su madre, y con esfuerzo, tiempo e imaginación.

La vida de Alicia Boole fue dura y penosa. A los treinta años, en 1890, se casó con Walter Stott. Tuvieron dos hijos, Mary y Leonard, al cabo de uno y dos años. Alicia tuvo que criarlos y educarlos con unos ingresos muy escasos, no haciendo otra cosa que cuidar de la casa y los niños. En 1911, en una carta a su sobrino Geoffrey Taylor, le

5 Los poliedros regulares son aquellos en los que todas sus caras son polígonos regulares y que tienen la misma forma y aspecto no importa desde donde los miremos. Son los llamados sólidos platónicos (Platón, el filósofo que decía que había que saber geometría, fue el primero que lo dejó escrito), y sólo hay cinco: el tetraedro, el cubo, el octaedro, el icosaedro y el dodecaedro. Ver por ejemplo: https://www.mathsisfun.com/platonic_solids.html. Ver la nota al final sobre poliedros y politopos.

6 Sobre la demostración de que este grupo selecto de objetos sólo tiene cinco miembros, véase la nota al final sobre poliedros y politopos - Por cierto, ¿cómo es que el espacio sólo tiene tres dimensiones?

7 Cuando cortamos un poliedro regular, los dos trozos resultantes son poliedros no regulares, y las dos nuevas caras (secciones) que surgen del corte, una en cada trozo, son polígonos. El razonamiento de Alicia Boole consistió en decir que, si el corte de un poliedro 3D crea dos nuevas caras que son polígonos 2D (una en cada uno de los dos trozos poliédricos resultantes), los cortes de un 4-politopo crearán dos nuevas hiper-caras (una en cada uno de los dos trozos politópicos resultantes), que serán poliedros 3D. Los cortes o secciones siempre son un espacio de dimensión inferior en una unidad a la del objeto geométrico que hemos cortado. Imaginemos ahora que cortamos un pedazo de patata con la forma de un sólido platónico. A continuación, la dividimos en dos con un cuchillo, en cualquier dirección. El resultado serán dos trozos poliédricos que ahora ya no serán regulares, limitados por caras planas y poligonales. Pero estos trozo, con sus formas a menudo inesperadas, nos podrán ayudar a entender un poco más el espacio geométrico, tan cercano y tan desconocido. El mérito de Alicia Boole fue imaginar ese corte de trozos de patata no en 3D, sino en 4D.

explicaba que durante bastante tiempo, su vida había transcurrido entre diversas tareas del trabajo doméstico y el cuidado de suelos muy deteriorados. Pero sí es cierto que la geometría la salvó, porque era su refugio secreto. Por la noche y en los momentos difíciles, volaba lejos, a unos espacios que sólo eran suyos y en los que podía disfrutar de la recóndita belleza que pocas personas pueden captar. Su placer brotaba de la sorpresa, de la contemplación, de la comprensión, de la medida y de la deducción, de la visión poética y relajante de los polítopos que destilaban cortes tridimensionales y del proceso creativo que, mágicamente, los acababa materializando.

Y en 1911, mientras Alicia escribía aquella carta a su sobrino, Buckminster Fuller tenía dieciséis años. Se llevaban 35 años. Cuando ella murió en 1940, él tenía 45. No está claro si llegaron a conocerse. Pero compartieron su admiración por las matemáticas y los objetos geométricos, además de una inmerecida invisibilidad después de su muerte.

De joven, Buckminster Fuller, Bucky como todos le llamaban, admiraba los globos terráneos. Seguramente los sacaba de su soporte, girándolos con las manos y mirándolos para aprender y captar todo aquello que no nos cuentan los mapas planos. Pronto entendió que, en la Tierra, el camino más corto no es ni puede ser la línea recta, y descubrió cómo encontrar este camino más corto que podría transportarlo desde su barrio de Boston hasta las ciudades europeas. No era difícil. Sólo tenía que marcar los puntos origen y destino en un globo del mundo, girarlo hasta verlos alineados con la posición de su centro, y pintar directamente, sobre la esfera del globo, el camino que los une. No solo había descubierto la existencia de las geodésicas,⁸ sino que había quedado cautivado por esta palabra que le acompañó toda la vida. Lo explicó en 1927 en su escrito *Un mundo que es una única ciudad*,⁹ donde argumentaba que la mejor manera de transportar mercancías por avión de Boston a Europa era pasando cerca del Polo Norte.

De su triple admiración por las esferas, las geodésicas y los sólidos platónicos surgieron infinidad de propuestas como la del icosaedro subdividido de la famosa cúpula geodésica del pabellón de Estados Unidos en la exposición universal de Montreal del año 1967¹⁰ y el mapa Dymaxion.¹¹ Observando que el problema de representar la superficie de la Tierra sin distorsión en un mapa plano es insoluble, Bucky Fuller descubrió que si la proyectaba sobre un icosaedro lograba dos objetivos a la vez: minimizaba la distorsión y además evitaba que el mapa tuviese zonas del planeta privilegiadas y amplificadas que aparentaban ser mayores de lo que eran en realidad.

8 El camino más corto entre dos puntos situados sobre una superficie no es una recta. Es una curva denominada geodésica. En las esferas (la Tierra es casi esférica), las geodésicas son segmentos de círculos máximos.

9 Instituto Buckminster Fuller, *Biografía de Buckminster Fuller*: <https://www.bfi.org/about-fuller/biography>

10 <http://www.bbc.com/culture/story/20140613-spaceship-earth-a-game-of-domes>

11 Mapa Dymaxion: <https://www.bfi.org/about-fuller/big-ideas/dymaxion-world/dymaxion-map>

El icosaedro, el poliedro regular que más caras tiene, fue la herramienta perfecta para Fuller; el icosaedro aplanado del mapa Dymaxion, el resultado. El Dymaxion es un mapa que puede ser re-configurado libremente para ver mejor unos u otros continentes y regiones, porque en él, el norte y el sur no son importantes y no hay arriba y abajo. Según Bucky Fuller manifestaba en 1946, su idea de mapamundi podía ayudar a la humanidad a resolver los problemas planetarios porque facilitaba la comprensión real de nuestro planeta. Curiosamente, muchos años después, las escuelas continúan explicando geografía con mapas que tienen el Polo Norte en la parte superior y en los que Europa queda sobredimensionada mientras el continente africano aparece más pequeño de lo que es en la realidad.

La molécula del fulereno C-60 es una de las formas estables del carbono, como los cristales de diamante, el grafeno o los nano-tubos. Está formada por sesenta átomos de carbono. Sólo carbono. No contiene ningún otro elemento. Es perfectamente simétrica y estable, con los átomos dispuestos en doce pentágonos regulares y veinte hexágonos regulares, siguiendo la distribución de los vértices y las caras de un icosaedro. Es como una pelota de fútbol de tamaño nanoscópico. Fue descubierta en 1985 y lleva el nombre de en Bucky Fuller. Desgraciadamente, Fuller no pudo admirar la perfección de esta molécula del fulereno ni supo de su nombre, que llegó en forma de reconocimiento póstumo. Había muerto dos años antes, en 1983. Y ahora, muchos años después, se ha descubierto que los fulerenos (también llamados “buckminsterfulerenos”) son anti-oxidantes y buenos fijadores de antibióticos, además de tener aplicaciones en la producción de cristales líquidos, foto-detectores y catalizadores. Seguramente, pronto los encontraremos en algunos medicamentos.

Por otra parte y poco a poco, Alicia Boole pudo ir deduciendo, demostrando y calculando la estructura de los seis 4-politopos que había descubierto.¹² Finalmente, cuando Bucky Fuller era todavía muy joven, Alicia, animada por Pieter Schoute,¹³ pudo publicar algunos de sus trabajos en dos artículos científicos,¹⁴ aunque muchos otros resultados no salieron del cajón. Cuando ya tenía setenta años, conoció el matemático Harold S. MacDonald Coxeter, se hicieron amigos, conectaron bien, y estuvieron colaborando durante algunos años en ciertos trabajos de investigación geométrica. Coxeter, que era amigo de Geoffrey Taylor, llamaba a Alicia, por extensión, “la tía Alice” y afirmaba que tanto la fuerza y simplicidad de su carácter como la amplitud de sus

12 Alicia Boole demostró que los seis 4-politopos regulares que había descubierto tenían, respectivamente, 5 caras tetraédricas, 16 caras tetraédricas, 600 caras tetraédricas, 8 caras cúbicas, 24 caras octaédricas y 120 caras dodecaédricas. Ver la nota al final sobre poliedros y politopos.

13 Alicia conoció al matemático y geómetra Pieter Schoute en 1895. Schoute creyó en ella desde el primer momento, animándola y apoyándola hasta su muerte en 1913.

14 Los dos artículos, que fueron publicados en Amsterdam 1900 y el 1910, eran: “On certain series of sections of the regular four-dimensional hypersolids” y “Geometrical deducción of semiregular from regular polytopes and space filling”.

intereses la hacían una amiga realmente inspiradora.¹⁵ Aquellos años, próximos al final, fueron maravillosos para Alicia.

La Universidad de Groningen concedió a Alicia Boole el doctorado a título honorario en 1914, y la invitó a recibirlo durante los actos de celebración del tercer centenario de la Universidad. Sin embargo, el grado de doctora “honoris causa” se le tuvo que conceder “in absentia” porque Alicia, que incluso tenía habitación reservada, no asistió al acto. Probablemente había quedado afectada por la muerte, poco antes, de su compañero de investigación Pieter Schoute. En todo caso, Alicia está todavía muy presente en Groningen. El museo de la universidad conserva un buen número de sus modelos y dibujos, hechos en colaboración con su colega y profesor Schoute.

Volviendo a Bucky Fuller, es obvio que fue un visionario. Quiso siempre aprender de la Naturaleza, que era su fuente continua de inspiración. Sus cúpulas geodésicas fueron un buen ejemplo de su objetivo de hacer más con menos, para construir grandes estructuras con un bajo gasto de materiales. Fuller decía que los creadores y diseñadores deberían inspirarse en la eficiencia de las soluciones naturales. Quedaba maravillado con los barcos de vela, que transportaban personas y mercancías hasta su puerto de destino sin gastar energía y sin afectar el medio ambiente. Y, mezclando geometría y planeta, denominó «geometría sinérgica» a sus trabajos de exploración de las leyes de diseño de la Naturaleza. Norman Foster explica que, cuando se encontraron por primera vez, le comentó uno de sus proyectos. Bucky, ya anciano, le respondió con una pregunta demoledora: “¿cuánto pesa su edificio, señor Foster?”.¹⁶ Foster no supo qué responder. No había pensado que seguramente, parte de los materiales era superflua. Se podía hacer lo mismo con menos materiales, con menos energía, con menos afectación al planeta. Foster ha recordado siempre aquella pregunta que explicaba toda la filosofía de diseño de Bucky Fuller: el principio de “menos es más” que no es sólo una cuestión estética, sino que nos lleva a la ética, en un mundo de grandes desigualdades y recursos limitados. Seguramente, Norman Foster ya no ha dejado de querer calcular el peso de sus edificios.

Alicia Boole admiró y entendió el orden y el equilibrio secreto de las formas geométricas. Su creatividad, surgida de la matemática, le permitía generar nuevas formas que plasmaba en esculturas poliédricas mientras recortaba y doblaba, lentamente, las cartulinas de sus nuevos modelos. El proceso creativo de Bucky Fuller cuando diseñaba sus mapas, cúpulas y otros objetos, no fue demasiado distinto. Fueron procesos creativos muy cercanos a la poesía. La poesía de la belleza escondida del mundo. Puede parecer algo que sólo está al alcance de pocos privilegiados, pero no es cierto.

15 Irene Polo-Blanco, “Alicia Boole Stott, a geometer in higher dimension”, *Historia Mathematica*, vol. 35, 2008, pp. 123-139: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0315086007000973>, Harold Scott McDonald Coxeter, *Regular polytopes*, Methuen and Co, London, 1948, segunda Ed.; Macmillan, New York, 1963.

16 Antonio Muñoz Molina, *El visionario razonable*, 2010: <http://antoniomuñozmolina.es/2010/09/el-visionario-razonable/>

Seguramente, si jugáramos con nuestros niños como proponía Mary Everest, la situación podría ir cambiando. Porque, como nos explicaba George Steiner, los tres grandes lenguajes de la creatividad humana y de la humanización son la música, la matemática y la poesía.¹⁷ Tres caras de la creatividad, más cercanas de lo que parece. Tres visiones de aquella Belleza que puede salvar el mundo, en palabras de Steiner.

La belleza oculta del orden natural y geométrico, aquella que cautivó a Alicia Boole, a su madre Mary Everett y que continúa maravillando a muchas personas, es la que probablemente terminó guiando, en el camino de la estética hacia a la ética, a personas como el mismo Bucky Fuller. Y es que estética y ética, dos conceptos que se refieren a la esencia de la humanidad, son probablemente lo mismo, como defendía Ludwig Wittgenstein.

Fuller, en una visión profética de la globalización, insistía en explicar que somos pasajeros de la “nave espacial Tierra”. Es una imagen que quería remarcar la importancia de cuidar el sistema integral planetario, conectado y en equilibrio, sugiriendo que debemos cuidar nuestra nave planetaria y que es recomendable que estamos bien avenidos. Desde su visión de que nuestra tribu ocupa ya todo el mundo, explicaba que la Tierra es un ínfimo punto azul en el espacio, una nave que nos lleva por el espacio galáctico a velocidades vertiginosas. Y, del mismo modo que los astronautas de cualquier estación espacial saben muy bien que, para sobrevivir, deben convivir sin pelearse y sin violencia, Fuller explicaba que estamos obligados a hacer lo mismo si no queremos destruirnos junto con el planeta. Proponía hacer menudo este ejercicio de perspectiva para ver la pequeñez de una Tierra que nos acoge mientras nos transporta por el vacío del espacio interplanetario. Un planeta que requiere propuestas a la vez éticas y estéticas como las de la economía de la dignidad de Marilyn Waring¹⁸ y muchas otras.

Bucky Fuller detestaba el mal uso de las herramientas de doble uso, la utilización perversa de instrumentos y sistemas que podríamos usar para mejorar las condiciones de vida de las personas y que en algunos casos se acaban convirtiendo en medios de destrucción. En una visión profética de la globalización, hablaba de sostenibilidad y de la falacia de un pretendido crecimiento ilimitado que sólo beneficiaba a unos pocos. E inventó el término “vivimiento” (*livingry* en inglés) en contraposición a armamento, o “*weaponry*.”¹⁹ Decía que hacía falta una fuerte reconversión tecnológica que redirigiera los recursos que ahora se destinan al armamento global, sacándolos de los presupuestos militares y destinándolos a soluciones avanzadas de vivimiento que revirtieran en toda la humanidad. El orden geométrico y la estética lo llevaron a una

17 George Steiner, *Trítos: Els tres llenguatges de l'home*, Ed. Arcàdia, 2016: <http://www.arcadia-editorial.com/lilibre.php?id=54>

18 La economía de la dignidad de Marilyn Waring: Anit N Mukherjee, Marilyn Waring, Meena Shivdas, Robert Carr, *Who Cares?: The Economics of Dignity*, Commonwealth Secretariat. 2011.

19 Instituto Buckminster Fuller, *op. cit.*

visión ética que era planetaria y profética a la vez. Lo estuvo explicando, con vehemencia y en conferencias en todo el mundo, hasta su muerte.

La idea de equilibrio planetario conecta perfectamente con el orden geométrico que maravilló a Alicia Boole y a Bucky Fuller. Pero desgraciadamente, no es lo que parece que tengamos en el mundo. Hay quien explica, como Javier Gomá, que estamos todavía en la prehistoria²⁰ y que solo saldremos de ella, si antes no nos hemos suicidado como especie, cuando seamos capaces de actuar globalmente en función de este de equilibrio ecológico que nos incluye: “Se está gestando un cambio en los fundamentos de nuestra civilización. Un cambio de tal dimensión que habría que ir hasta la última glaciación para ver algo parecido... somos los hombres prehistóricos de una cultura de nuevas bases que todavía se está empezando a dibujar”. ¿Será la del binomio ética - belleza que marcó las vidas de Alicia Boole y Bucky Fuller?

²⁰ Javier Gomá, *Todo a mil: 33 microensayos de filosofía mundana*, Ed. Galaxia Gutenberg, 2012, Barcelona, 2012, p. 159.

La mirada de los niños

Una historia protagonizada por Rachel Carson
y Hertha Marks Ayrton

Albert Einstein, en el libro divulgativo que escribió en 1939 con Leopold Infeld,¹ considera a Galileo como el iniciador de la disciplina de la física al ser el primero en descubrir y usar metódicamente el razonamiento científico. Según Einstein, los descubrimientos de Galileo nos muestran que no nos podemos dejar llevar por conclusiones intuitivas basadas en la observación inmediata, porque pueden ser erróneas. No todo es lo que parece. Por ello es recomendable intentar que nuestra mirada sea como la de los niños: sorprendiéndonos por lo que vemos cada nuevo día y observando siempre como si fuera la primera vez, en vez de darlo todo por hecho y explicado. Sin esta mirada de sorpresa que desea descubrir el por qué de lo que vemos a nuestro alrededor, estaríamos todavía sin entender qué es el arco iris y por qué los objetos caen al suelo. Lo encontraríamos normal, como muchos hicieron durante milenios.

Rachel Carson nació en 1907 en Springdale, en Pensilvania. Era la pequeña de tres hermanos. En la granja de su familia vivió las primeras contradicciones de su vida. La granja se encontraba entre dos grandes centrales eléctricas de carbón que dejaban carbonilla y polución por todas partes. Pero también pudo disfrutar profundamente de la vida en el campo. Su madre le transmitió una pasión por la naturaleza y el mundo vivo que la acompañó toda la vida.² Le gustaba leer y escribir, y antes de los diez años ya escribía pequeños cuentos sobre animales. A los veintidós años se graduó en biología marina en la Universidad para mujeres de Pensilvania (actualmente

1 Albert Einstein y Leopold Infeld, *La física, aventura del pensamiento*, Editorial Losada, Buenos Aires, 1939, tercera edición, p. 14. Traducción del original inglés *The Evolution of Physics* por Rafael Grinfeld.

2 Biografía de Rachel Carson: <https://www.rachelcarson.org/Bio.aspx>

denominada Universidad Chatham). Y tras una estancia en el laboratorio Biológico Marino, obtuvo su máster en zoología en la Universidad Johns Hopkins en 1932.

Fueron años difíciles. La gran depresión había dejado a su padre, vendedor de seguros, sin trabajo. Rachel tuvo que trabajar, ejerciendo de maestra, para llevar algún dinero a casa. Desgraciadamente, en 1934 se vio forzada a abandonar sus estudios de doctorado, y al año siguiente su padre murió repentinamente. Tuvo que hacerse cargo de su madre. Y eso no fue todo. Dos años después, en 1937, murió su hermana mayor. En dos años se había quedado sin padre y sin hermana y había pasado a tener que cuidar de su madre y dos sobrinas. Ya no podía trabajar de maestra.

Por suerte, en medio de todas estas penurias y desconuelos, consiguió un contrato temporal en la Oficina de Pesca de los Estados Unidos para escribir 52 guiones para un programa educativo de radio sobre la vida marina. El éxito de estos textos hizo que le ofrecieran presentarse a un examen para optar a un contrato indefinido. Se presentó, sacó la mejor nota de todos los candidatos, y consiguió ser la segunda mujer de la historia en tener un contrato de tiempo completo en la Oficina. Era el año 1936 y ella tenía 29 años.³ Al cabo de trece años, en 1949, se convertiría en la editora jefe de la mencionada Oficina de Pesca.

Entre 1941 y 1955 Carson publicó varios libros, como *Under the Sea Wind* (1941), *The Sea Around Us* (1951) y *The Edge of the Sea* (1955). El segundo de ellos lo preparó durante un viaje de diez días junto con su editora Marie Rodell, en el barco de pesca e investigación marina Albatross III, en las cercanías de la costa de Maine. Mientras soporaba burlas de la tripulación, Rachel iba escuchando los sonidos submarinos con un hidrófono, estudiaba los peces, medía profundidades, y observaba el plancton con su microscopio.⁴ Recopilaba material para escribir el libro que preparaba. *The Sea Around Us* fue todo un éxito, manteniéndose 86 semanas en la lista de ventas del New York Times. Rachel, dudosa, tomó una decisión complicada: dejó el trabajo de la Oficina de Pesca para dedicarse por completo a escribir.

En 1953, Rachel Carson se trasladó a Maine con su madre. Una vez allí, empezó a investigar sobre los efectos de los insecticidas y del DDT en particular. Lo que iba encontrando era muy preocupante. Decidió entrar a fondo en el tema, y durante cuatro años se concentró en lo que sería su gran libro: *La Primavera Silenciosa*, publicado en 1962.⁵ Aquellos cuatro años fueron agotadores. Meses y meses de análisis de artículos científicos e informes oficiales, de entrevistas, de búsqueda de asesoramiento hablando con científicos y expertos, de estudio de los ecosistemas y de la ecología de

3 Eduardo Angulo, *El caso de Rachel Carson*, Cuaderno de Cultura Científica, 2014. <http://culturacientifica.com/2014/04/14/el-caso-de-rachel-carson/>

4 Ginger Wadsworth, *Rachel Carson: Voice for the Earth*, Lerner Publications Co. Eds., Minneapolis, 1993.

5 El libro *The Silent Spring* de Rachel Carson ha sido traducido al castellano por Joandomènech Ros y publicado por Planeta de Libros (Crítica, colección Drakontos) con el título *La primavera silenciosa*.

las especies. Pero el resultado fue un libro visionario, riguroso, basado en sólidas bases científicas,⁶ y también polémico. El mismo título del libro era ya profético.

La primavera silenciosa imagina futuras primaveras sin ruido, sin pájaros insectívoros y sin abejas que polinizan las flores, y futuros otoños en los que las pocas abejas que queden habrán fabricado miel tóxica con el néctar venenoso que tendrán las flores. Rachel Carson introdujo el término “biocidas”, aclarando que era así como había que denominar a los pesticidas, porque no afectaban sólo a los insectos que se pretendía atacar, sino a todas las especies vivas de la zona. Y fue también profética con su advertencia de que el sistema evolutivo y los mecanismos de supervivencia de los más fuertes nos llenarían de insectos y plagas más resistentes y difíciles de atacar. Su predicción se ha corroborado posteriormente tanto con el análisis de los efectos de muchos de estos biocidas como con el descubrimiento de la resistencia microbiana a los antibióticos y otros tratamientos tras infecciones y epidemias.

Pero el libro amenazaba los negocios de la industria de los insecticidas y el DDT, y no se lo perdonaron. La reacción fue terrible. Intentaron impedir la publicación del libro. Dijeron que los datos no eran ciertos. Atacaron el libro y la atacaron a ella. Un ex-Secretario de Agricultura de los Estados Unidos llegó a escribir, en una carta al presidente Eisenhower que posteriormente se hizo pública, que “como que no se ha casado, a pesar de ser físicamente atractiva, probablemente sea comunista”.

Rachel Carson sufrió todo tipo de insultos y calumnias. Cuando le criticaban su oposición al uso del DDT, ella insistía una y otra vez que no era cierto, diciendo que lo que ella defendía era una racionalización en su uso, moderando las dosis que se utilizaban. Explicaba, además, que los biocidas que todo lo mataban (tanto los animales nocivos como los que no lo eran), debían substituirse por pesticidas dirigidos específicamente a combatir las plagas. No la escucharon porque el objetivo era acallar su voz. Los últimos años de su vida lo pasó muy mal, con una incomprensión que se iba sumando a un cuerpo cada vez más débil.

Cuando fue a vivir a Maine con su madre, conoció a Dorothy Freeman. Fue el inicio de una relación amorosa clandestina que duró hasta el fin de sus días. Rachel Carson murió de cáncer cuando aún no había cumplido los 57 años, en 1964. Aunque casi todas las cartas secretas que se escribieron fueron quemadas por voluntad expresa de las dos, años más tarde, la nieta de Dorothy recopiló algunas de las que había podido salvar, publicándolas en 1995.

Rachel Carson, ahora considerada como una de las fundadoras del movimiento ambientalista a nivel mundial, no pudo disfrutar del reconocimiento de sus trabajos. Cinco años después de su muerte, y gracias a sus trabajos, el Congreso de Estados

6 Joandomènec Ros Aragonès, “Rachel Carson, Sensitive and Perceptive Interpreter of Nature”, en *Contributions to science*, 2012, págs. 23-32: <https://www.raco.cat/index.php/Contributions/article/view/76890>

Unidos promulgó la Ley Nacional de Protección Ambiental que fue precursora de toda la legislación ambiental en EEUU y Europa. Luego, en 1980, Carson fue galardonada a título póstumo por Jimmy Carter con la Medalla presidencial de la Libertad, el más alto honor que se concede en los Estados Unidos.

Hertha Marks Ayrton hubiese podido ser, por su edad, la abuela de Rachel Carson. Había nacido 53 años antes, en 1854. Era la tercera de ocho hermanos. Sus padres, judíos ingleses, le habían puesto el nombre de Sarah. Desafortunadamente, su padre, Levi Marks, relojero y joyero en Petworth (cerca de Sussex), murió cuando ella sólo tenía siete años, dejando a su mujer embarazada del último hijo y a la familia en situación muy precaria. La madre, Alice, cosía para ganar algo de dinero mientras los niños iba creciendo. Luego, ya de joven, Sarah dejó las creencias religiosas de su infancia, se declaró agnóstica y se cambió el nombre, pasando a llamarse Hertha. Ignorando el disgusto de su madre, dejó el judaísmo y se convirtió definitivamente en Hertha Marks.

Debido a las dificultades económicas de la familia, Hertha tuvo que ir a Londres a los nueve años a vivir con su tía Marion Hartog, que regentaba una escuela. Fue difícil tanto para ella como para su madre. Pero, como ésta decía, las chicas necesitan una educación mejor que la de los chicos, porque en la vida lo tendrán más difícil. Y, gracias a Marion, consiguió la formación que su madre deseaba. Con sus tíos y primos pudo estudiar música, matemáticas, latín y francés.⁷ Continuó estudios en Cambridge, y en 1881 se graduó en matemáticas, mediante un examen externo, en la Universidad de Londres, una de las pocas universidades inglesas que en aquellos momentos permitían estudiantes femeninas. Lo había conseguido.

Había tenido que hacer de todo. A los dieciséis años, Hertha había empezado a trabajar como criada en Londres, enviando dinero a casa. Conoció a un tal Karl Blind, emigrante judío-alemán, y se hizo muy amiga de su hija Ottilie. Justamente fue Ottilie quien la animó a cambiarse el nombre por el de Hertha, la Madre Tierra de la mitología Teutona, probablemente inspirándose en un poema de Algernon Swinburne que presenta a Hertha como símbolo de madre y vida en contraposición a algunas diosas.⁸ Fue el momento del gran cambio, el de su paso al agnosticismo, y el de su entrada en los movimientos sufragistas. De la mano de Ottilie, Hertha conoció a Bárbara Bodichon, la feminista que junto con Emily Davies había fundado el primer colegio universitario para mujeres en Cambridge. Bárbara Bodichon contribuyó a pagarle los estudios de matemáticas avanzadas⁹ hasta que Hertha obtuvo su título en Londres.

Tres años después de graduarse, se apuntó a clases nocturnas de electricidad en la Universidad Técnica de Finsbury, donde se enamoró de su profesor, William Edward

7 Véase el artículo de Joan Mason sobre Hertha Marks Ayrton (*Royal Society Publ. Co.*) 1991: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsnr.1991.0019>

8 Algernon Charles Swinburne: Hertha: <https://www.poetryfoundation.org/poems/45290/hertha>

9 Science Museum, Londres: <http://journal.sciencemuseum.ac.uk/pdf/article/10358/the-life-and-material-culture-of-hertha-ayrton>

Ayrton, viudo y con una niña de cuatro años, Edith. Se casaron al año siguiente, y en 1886 nació la hija de ambos. Hertha le puso el nombre de pila de Bárbara Bodichon, en honor de su mentora. Durante los siguientes veinte años, Hertha fue esposa, madre de las dos niñas y feminista, pero también matemática, ingeniera, inventora y física. En 1914 Hertha contribuyó a formar la Unión de Sufragistas junto con su hija Barbara Bodichon Ayrton, que había heredado de su madre el activismo y las convicciones feministas. Ésta terminó siendo diputada parlamentaria por el Partido Laborista a partir del final de la guerra, en 1945.

Durante aquellos años de las clases nocturnas en Finsbury, Hertha Marks inventó el “divisor de líneas”, que patentó en 1884. Se trataba de un sistema basado en dos reglas dispuestas en ángulo que permitían dividir un determinado segmento S en un número cualquiera de partes iguales.¹⁰ Hertha lo presentó al año siguiente en una conferencia en la Sociedad de Física y luego escribió un artículo que fue publicado por el *Philosophical Magazine*. Su sistema se hizo muy popular, siendo fabricado y comercializado por W F Stanley.¹¹

Después, ya casada con William, Hertha empezó a interesarse por el estudio del arco eléctrico. Y lo hizo con la misma actitud de sorpresa y el mismo deseo de preguntarse que veríamos en Rachel Carson 60 años después. Los arcos eléctricos se utilizaban, antes de las bombillas de filamento incandescente, para iluminar las calles y para tener luz por las noches en casa. Pero tenían muchos problemas. Eran peligrosos por la alta tensión, se gastaban y duraban poco, eran poco estables y además hacían un ruido continuo que llegaba a ser realmente desagradable. El trabajo sistemático que desarrolló entre 1894 y 1902 le permitió encontrar relaciones (funciones) entre el voltaje, la distancia entre los electrodos, el oxígeno consumido por minuto, el ruido, la presión del aire y los fenómenos de oxidación química de los electrodos de carbón, desarrollando una teoría que conectaba la longitud del arco con la presión y el voltaje, y descubriendo que el ruido no era debido a ningún fenómeno de evaporación, sino a la oxidación. Tras publicar varios artículos previos entre 1895 y 1899, en 1902 Hertha Marks Ayrton pudo publicar su principal artículo sobre este tema: “The Electric Arc.”¹²

10 El divisor de líneas se basaba en el teorema de Tales y en la relación lineal existente entre los segmentos que definen un conjunto de rectas paralelas en otras dos rectas secantes. Si tenemos dos reglas en ángulo (una de ellas graduada) y deseamos dividir un segmento S de la regla no graduada en N partes iguales, sólo tenemos que situar el segmento S empezando en el vértice común entre las dos reglas, unir el punto final de S con la marca de los N centímetros en la regla graduada, e ir dibujando rectas paralelas, centímetro a centímetro, en la regla graduada. La relación entre los sub-segmentos definidos por estas rectas paralelas en una y otra regla es una función lineal. Véase la nota, al final de este trabajo, sobre las funciones y las rectas.

11 Museo de la Ciencia de Londres. Véase: <http://journal.sciencemuseum.org.uk/browse/issue-10/the-life-and-material-culture-of-hertha-ayrton/dividing-and-conquering-ayrton-s-line-divider-patent-in-1884/>

12 Véase el artículo ya citado de Joan Mason (1991) sobre Hertha Marks Ayrton (*Royal Society Publ. Co.*)

Entre 1902 y 1906, la relación de Hertha Marks Ayrton con la Royal Society fue un ejemplo paradigmático de lucha entre el trabajo bien hecho y los prejuicios y poderes machistas en aquel momento. En 1902, Hertha fue propuesta para entrar como miembro de pleno derecho en la Royal Society, pero su candidatura se descartó porque “era una mujer casada”. Y luego, cuando en 1906 la misma Royal Society le concedió la Medalla Hughes por sus investigaciones en el campo de los arcos eléctricos y de las ondulaciones de la arena, la polémica estuvo servida. William Huggins llegó a decir que Hertha obtuvo la medalla gracias a que él tenía un resfriado, porque si él se hubiera encontrado bien y hubiera podido ir a votar, hubiese votado en contra y ella no habría recibido la medalla. Tanto las opiniones de William Huggins como los comentarios que sobre él hicieron Hertha y Margaret (la mujer de William) en las cartas que ambas intercambiaron, no tienen desperdicio.¹³

Después, Hertha Marks Ayrton se dedicó, entre otros temas, a estudiar el porqué de las ondulaciones que hace la arena en zonas poco profundas cerca de la playa. Lo hizo entre 1901 y 1911. Trabajaba en casa, en un periodo en el que su marido enfermó y murió, compatibilizando la investigación, el trabajo de la casa, la educación de las hijas y el cuidado de William. Tras la muerte de su marido en 1908, trasladó su laboratorio de la planta superior de la casa al salón del piso principal. Mientras Rachel Carson corría y jugaba en su granja, ella iba concibiendo y montando diversos sistemas que balanceaban rítmicamente peceras con agua y arena, para así poder ir estudiando el efecto de las ondas estacionarias de varias longitudes de onda. El artículo que publicó en la Royal Society en 1910 analiza además la relación entre los pequeños obstáculos (guijarros y otros), los remolinos, y la formación de las ondas de arena.¹⁴ Luego continuó patentando inventos hasta su muerte, en 1923. Los experimentos que Hertha Marks hizo con agua y arena no pudieron repetirse con la misma precisión hasta 1940.

Hertha Marks Ayrton nunca dejó de ser feminista y sufragista. Apoyó a muchas científicas a las que su condición de mujeres las hacía invisibles. Incluso tuvo que apoyar

13 La esposa de Huggins, Margaret Huggins, escribió a Hertha Ayrton: “No espero ni un momento para felicitarla calurosamente por la concesión de la Medalla Hughes por parte de la *Royal Society*. Ha trabajado duro y bien, y merece una recompensa, aunque estoy segura de que usted nunca ha trabajado para obtener una recompensa. Simpatizo profundamente con la satisfacción que usted tiene todo el derecho a sentir; y me alegro sinceramente del estímulo y del ánimo que este éxito le traerá”. Tras recibir la carta de Margaret Huggins, Hertha Ayrton escribió a una persona amiga: “He recibido la carta más encantadora de Lady Huggins que podía recibir, enviada en cuanto se enteró. Es particularmente generosa por su parte, porque ella misma ha hecho un espléndido trabajo en astronomía, con su marido, y no ha tenido ni un ápice de reconocimiento por ello, sólo porque nadie creerá que si un hombre y una mujer hacen algo de trabajo juntos la mujer realmente hace algo. Y ahí es donde vemos la generosidad que siempre ha tenido el profesor [su marido]. Nunca ha colaborado conmigo en ningún trabajo, obviamente porque él sabía que todo se le atribuiría a él. Y quería que yo recibiera todo el reconocimiento por todo lo que hice, no sólo por mi bien, sino por el bien de todas las mujeres”. Para más detalles: http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Extras/Ayrton_Hughes_Medal.html

14 Extracto del artículo original del año 1910, *Royal Society*: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/royprsa/84/571/285.full.pdf>

y defender a su amiga Marie Curie, cuando muchos empezaron a proclamar que su trabajo era en realidad obra de su marido.¹⁵

Rachel Carson y Hertha Marks Ayrton investigaron relaciones. La relación entre las concentraciones de DDT y biocidas y la degradación ecológica y de biodiversidad, la relación entre el ruido y la presión del aire en el arco eléctrico, la relación entre la fauna marina y la profundidad, la que hay entre los pequeños remolinos y las ondulaciones en la arena. Observaron, estudiaron, descubrieron relaciones que nadie antes había visto. Supieron mirar y ver, viviendo entre las funciones.¹⁶

Años después de la muerte de Hertha Marks, en 1956, la revista *Ideas hombre companion* pidió a Rachel Carson si podía escribir un artículo. El artículo original, "Help Your Child to Wonder", fue más tarde editado por la editorial Harper y desde hace poco existe en versión traducida al castellano.¹⁷ El libro es una pequeña joya. Recoge las reflexiones que se hacía mientras cuidaba de su sobrino Roger, pasando horas con él en los bosques y en la orilla del mar en Maine. Rachel Carson quedó cautivada por la "sencilla y entusiasta acogida de la naturaleza" que veía en Roger mientras éste iba creciendo entre los 20 meses y los 4 años, admirando ante todo su capacidad de sorpresa. Una sorpresa que era además la capacidad de maravillarse y de preguntarse el por qué de todo aquello que veía y escuchaba, como bien indica el término *wonder* en inglés. Una sorpresa que lo miraba todo como si fuera la primera vez, que llevaba al ansia de comprender, en contra de aquella otra mirada "anciana" que no se pregunta nada porque todo lo ve normal. Rachel Carson observó que, más que enseñar ciencia, lo importante para los niños era potenciar que les surgiera esta sorpresa, llevándoles a lugares donde pudiesen entusiasmarse con el ruido del mar, los olores tras una tormenta, el ruido del viento o las estrellas en el cielo oscuro de la noche. Se trata de acompañarlos para reconocer, juntos, la belleza innata del mundo. Porque lo esencial es estar atentos, saber ver, dejarse sorprender, preguntarse.

Carson decía que una manera de abrir los ojos a la belleza inexplorada es imaginar que nunca habíamos visto lo que estamos viendo, y, sobre todo pensar por un momento que quizás nunca más lo volveremos a ver. Creía, además, que aquellos científicos y personas creativas que siguen la belleza y los misterios de la naturaleza nunca se encontrarán solos ni hastiados, porque sus pensamientos les llevarán por el camino de la alegría interior y del entusiasmo vital. Y consideraba que la sorpresa ante la belleza no podía coexistir con el afán de destrucción. Su receta era continuar toda la vida mirando como los niños. La de Hertha Marks, también.

15 Véase: <https://mujeresconciencia.com/2018/05/24/hertha-de-la-diosa-madre-a-la-madre-de-la-ciencia/>

16 Véase la nota del final sobre las funciones y las rectas

17 Rachel Carson, *El sentido del asombro*, Ed. Encuentro, Libros de bolsillo, núm. 91, 2012. Traducción y prólogo de M. Ángeles Martín R-Ovelleiro.

El desconcierto global durante los inicios de la pandemia de 2020 surgió, en parte, del hecho de ser incapaces de ver sin prejuicios los pequeños detalles que nos iban avisando. Vivimos tan atareados que hemos olvidado aquella mirada transparente que se sorprende ante lo cotidiano. Pero Rachel Carson y Hertha Marks nos recuerdan que la actitud científica implica asombrarse, saber ver, dudar, y luego pensar y analizar. Contemplar, medir, descubrir las relaciones que se esconden tras la perpetua danza de los fenómenos naturales, descubrir los límites que la naturaleza respeta rigurosamente, entender que no podemos cruzarlos porque somos naturaleza. Ver apuntando cuidadosamente todo lo que miramos, tanto si es lo que creíamos que pasaría como si no. Mirar y ver como los niños. Porque, de lo contrario, sólo acabaremos viendo lo que esperábamos encontrar.¹⁸

¹⁸ Véase, por ejemplo: Douglas Adams, *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*, Pan Books, Londres, 1979

Las máquinas y nosotros

Una historia protagonizada por Wangari Muta Maathai
y Irmgard Lotz

La vida se autorregula, y tenemos un buen ejemplo en nuestro cuerpo. Si no tenemos fiebre, los mecanismos metabólicos mantienen nuestra temperatura corporal constante con una precisión de décimas de grado, pase lo que pase en el exterior. Somos un gran y complejo sistema biológico que regula de manera admirable su temperatura, la tensión arterial, la composición de la sangre y todas las demás constantes vitales. Pero no somos un fenómeno aislado. Las plantas se adaptan buscando la luz del Sol, los árboles frutales regulan la composición en azúcar de la fruta, y los pájaros regulan perfectamente su vuelo. La Naturaleza está llena de ejemplos similares que hemos ido observando y entendiendo. Lentamente y gracias a ello, hemos aprendido a crear sistemas tecnológicos cada vez más automáticos y sofisticados.

Decimos que un sistema es autorregulado cuando se mantiene estable y en equilibrio sin necesidad de ninguna intervención externa. Nuestro planeta, los últimos siglos y desde la pequeña edad de hielo, ha ido regulando perfectamente la temperatura y las variaciones del clima. Sus ecosistemas, según nos explica esta nueva disciplina llamada ecología, son ejemplos maravillosos de autorregulación. Las especies animales y vegetales interactúan, se alimentan las unas de las otras, pero todo ello se mantiene estable, con sólo pequeñas variaciones en sus poblaciones.

Wangari Muta nació en 1940 en la región rural de Nyeri, en Kenia, en el seno de una familia de etnia kikuyu. Gracias a sus padres, que quisieron escolarizar a todos sus hijos, Wangari Muta tuvo más suerte que muchas otras niñas de su región que acabaron trabajando en el campo. Pudo ir a la escuela a los ocho años, en Ithite. Luego siguió estudios en la escuela primaria católica de Nyeri y en la secundaria de Limuru (la única de Kenia que aceptaba chicas). La suerte hizo que el primero de estos internados

la salvara de los conflictos que produjo la revuelta de los “mau-mau”, que obligaron a su madre a huir y protegerse en un refugio de emergencia. Wangari Muta era buena estudiante y sacaba muy buenas notas, como sus educadores iban constatando. Tanto, que a los veinte años fue una de las trescientas chicas y chicos que consiguieron una beca para continuar estudios en los Estados Unidos.¹

Muy ilusionada, hizo las maletas y voló a Kansas, donde empezó a estudiar biología. Después, cuando se graduó en 1964, consiguió una nueva beca, esta del Instituto África-América, para cursar un máster en ciencias biológicas en Pittsburgh. Tras solo seis años de estancia en Estados Unidos, volvía a su país con un título de máster y habiendo conocido a otro estudiante keniano, Mwangi Mathai. Se casaron en 1969 y tuvieron tres hijos: Waweru (1970), Wanjira (1971) y Muta (1974). Pero el matrimonio terminó haciendo aguas, y se separaron en 1977 tras un largo divorcio y un juicio turbulento que la llevó a la cárcel durante tres días por insultos al juez. Su marido Mwangi decía que se veía “incapaz de controlarla” y que tenía “una mentalidad demasiado fuerte para ser mujer”. Ya divorciada, Wangari Muta Mathai se cambió el nombre, añadiendo una letra a su apellido para diferenciarse de su ex-marido en su nueva vida. Se convirtió en Wangari Muta Maathai.

El período de cinco años entre 1966 y 1971 fue muy fructífero científicamente para Wangari. Trabajó en el Departamento de Anatomía Veterinaria de la Universidad de Nairobi, marchó a Alemania para seguir estudiando en las Universidades de Giessen y Munich, y volvió a Kenia donde se doctoró en 1971 en anatomía veterinaria. Era la primera mujer de la historia en África central y oriental que conseguía un doctorado. Cuatro años más tarde pasó a ser la primera mujer jefe de Departamento de la Universidad de Nairobi.

Su actividad de investigación la llevó al ecologismo y a preocuparse por aquellas actividades humanas que rompían el gran sistema autorregulado de la Naturaleza. Como ella misma explicó, “durante mi trabajo de investigación sobre los problemas alimentarios, emprendí estudios sobre el ciclo de la vida del parásito que se transmitía a través de las garrapatas, y mientras recogía muestras me di cuenta de que los ríos iban llenos de limo. Era algo que no pasaba cuando yo era pequeña. Había poca hierba y no contenía los necesarios nutrientes. El suelo no cumplía sus funciones”.²

La degradación ambiental afectaba a los ríos, éstos llevaban menos agua, y las consecuencias las acababan sufriendo sobre todo las mujeres, que se veían obligadas a ir cada vez más lejos a buscar agua y leña. Wangari constató que los hombres causaban desastres naturales que caían sobre las mujeres. Entró a formar parte del Consejo Nacional de Mujeres de Kenia (NCWK) con el objetivo de empoderar a las mujeres de

1 Aitziber López sobre Wangari Muta Maathai, 2016: <https://mujeresconciencia.com/2016/11/16/wangari-muta-maathai-woman-tree-la-mujer-arbol/>

2 *Ibidem*.

su país, siendo directora del mismo entre 1981 y 1987. Durante los años 80, luchó con todas sus fuerzas en pro de la democracia, los derechos humanos y la situación de las mujeres, trabajando activamente en contra de la especulación de la tierra y de la destrucción de los bosques.

En 1977, Wangari Muta Maathai había fundado el Movimiento del Cinturón Verde (Green Belt Movement). Quería frenar la degradación ambiental y volver al equilibrio ecológico, empoderando a la vez a las mujeres. Wangari fue creando toda una estructura cuya organización se basaba en recoger semillas de árboles en los bosques, hacerlas germinar y crecer en viveros protegidos, y finalmente ir a plantar los árboles en las zonas que deseaban reforestar. Aunque los inicios no fueron fáciles, todo cambió cuando finalmente Wangari Muta Maathai empezó a recibir apoyo económico de gobiernos y organizaciones de mujeres de todo el mundo. Las mujeres que recogían semillas y trabajaban en los viveros recibían formación y un salario, mientras aprendían a leer y escribir y iban entendiendo la importancia de restablecer el equilibrio ecológico. El Cinturón Verde fomentaba el trabajo de las mujeres en equipo, ayudando a mejorar su situación personal mientras iba remediando la erosión y la sequía. Gracias a este movimiento, en África ahora hay más de 3000 viveros gestionados por más de treinta mil mujeres, y se han plantado más de 50 millones de árboles.³

El Universo está lleno de sistemas dinámicos que van evolucionando mientras se mantienen en equilibrio. La estabilidad que estudió Wangari Muta Maathai en los entornos naturales africanos la encontramos en los ecosistemas marinos e incluso en la Vía Láctea. Todo se mueve, todo cambia, pero manteniendo un equilibrio fascinante. Las galaxias espirales parecen detenidas en el tiempo, como los bosques cuando los miramos día tras día o el agua del fondo de los estanques. Pero bajo esta apariencia tranquila y estática, sabemos que se esconde el ruido de los sistemas que interactúan y se adaptan sin parar. Lo han estudiado expertos en campos tan diversos como la biología, la astronomía y las matemáticas. Un siglo antes del inicio del movimiento Cinturón Verde, una joven matemática de 24 años, Sófía Kovalévskaya, escribía un artículo científico sobre los anillos de Saturno. Con la ayuda del desarrollo en series de Fourier y usando aproximaciones sucesivas, Sófía Kovalévskaya modelizó los anillos, dedujo un sistema de ecuaciones con infinitas incógnitas, lo supo resolver, y demostró tanto la estabilidad de aquellos anillos como su forma elíptica. Sófía entendió que los sistemas autorregulados que observamos se encuentran en equilibrio porque son estables, que esto se cumple tanto si hablamos de los ecosistemas, de Saturno o de cualquier galaxia lejana, descubrió que estos sistemas pueden modelizarse

3 El movimiento "Cinturón Verde": <https://www.greenbeltmovement.org/what-we-do>

matemáticamente, y definió las condiciones para su estabilidad.⁴ Durante los siglos XX y XXI hemos podido estudiar la estabilidad y la sostenibilidad de muchos ecosistemas naturales en base a ecuaciones similares a las de los sistemas dinámicos de Sófía Kovalévskaya.

En 1889, un año y medio antes de su muerte, Sofia Kovalévskaya recibió el premio Bordin de la Academia Francesa de Ciencias y fue elegida miembro de la Academia de Ciencias Imperial Rusa, siendo la primera mujer de la historia que entraba en la misma.

Muchos años más tarde, en 2004, Wangari Muta Maathai recibía el premio Nobel de la Paz por “su contribución al desarrollo sostenible, a la democracia y a la paz.”⁵ Era la primera mujer africana y la primera ambientalista que recibía el Nobel.

Y después del Nobel, Wangari continuó su activismo. Fue mensajera de Paz de la ONU, ponente del grupo de trabajo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible del Milenio, parlamentaria en Nairobi, co-impulsora del grupo de mujeres Nobel y ayudante del ministro de medio ambiente y recursos naturales de Kenia hasta 2007. Continuó impulsando el movimiento Cinturón Verde hasta su fallecimiento en septiembre de 2011.

Pero la autorregulación no es algo exclusivo de la Naturaleza, y nuestros antepasados pronto aprendieron a construir artilugios que se autorregulaban. Uno de los problemas que debían resolver era el de medir el paso del tiempo durante las noche. Y muchas culturas, de manera independiente, acabaron encontrando soluciones basadas en relojes de agua. Los indios de América del Norte hacían pequeños barcos con un agujerito en el fondo que con el paso del tiempo se hundían, pero también utilizaban recipientes de barro con un pequeño agujero en la parte inferior y con marcas a diferentes alturas en su pared interior. Los llenaban de agua cuando se hacía de noche, el agua iba goteando poco a poco, y el nivel de agua en su interior iba bajando, dejando al descubierto las marcas que indicaban las horas. Los habitantes de la India, Babilonia, Egipto y China utilizaban relojes de agua no demasiado distintos: parece

4 Sófía Kovalévskaya nació en Moscú en 1850 en una familia rica y noble. Desde pequeña tuvo muy claro que quería estudiar matemáticas, y en su entorno no era nada fácil. Por eso, sabiendo que si se casaba podría estudiar y salir de Rusia, a los 18 años, logró casarse por conveniencia con Vladimir Kovalevsky. La pareja se mudó a vivir a San Petersburgo. Pronto, Karl Weierstrass la descubrió y no dudó en dirigirla la tesis. Sófía la defendió “in absentia” en 1874 en la Universidad de Gotinga y se convirtió en la primera mujer europea en tener un doctorado en matemáticas. Tras sufrir el suicidio (por problemas económicos) de su marido, se fue a vivir a Suecia. En 1889 ganó una cátedra en la Universidad de Estocolmo, siendo una vez más la primera mujer europea en conseguirlo. Fue también la primera mujer elegida miembro de la Academia Imperial Rusa de Ciencias (la Academia tuvo que cambiar las reglas para permitir su entrada). Luchó fuertemente por los derechos de las mujeres y por la mejora de su situación en Rusia. Es conocida sobre todo por el teorema de Cauchy-Kovalévskaya sobre la existencia y unicidad a las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que rigen el comportamiento de muchos sistemas dinámicos. Ver por ejemplo: <https://fme.upc.edu/ca/la-facultat/activitats/2018-2019/arxiu/sofia-kovalevskaya-vida.pdf>

5 Premios Nobel, biografías: Wangari Maathai: <https://www.nobelprize.org/prizes/peace/2004/maathai/biographical/>

ser que los chinos ya los construían hace seis mil años.⁶ En todo caso, el más antiguo que se conserva procede de Karnak, tiene forma de tronco de cono, y puede verse en el museo egipcio de El Cairo. Fue cortado a partir de un bloque de calcita, incluyendo varios grupos de doce marcas para indicar las 12 horas de la noche en las diferentes épocas del año (los egipcios dividían la noche en doce horas tanto en verano como en invierno, de manera que sus horas eran más largas en las noches invernales). Más tarde, gracias a los griegos y concretamente a Ctesibio, los relojes de agua evolucionaron y se ganaron el nombre de clepsidras. Probablemente fueron los primeros sistemas autorregulados concebidos por los humanos, hace más de 2.200 años.

La clepsidra de Ctesibio se basaba en dos recipientes, uno de los cuales “robaba” el agua al otro; por ello, su nombre combina “klepto” con “hydro”. El superior tenía un agujero de entrada en su parte superior y un agujerito debajo, cerca de la base, por donde iba saliendo el agua que caía en el recipiente inferior. El recipiente superior mantenía un nivel de agua razonablemente estable gracias a un flotador que hacía de válvula y que, cuando el nivel subía, tapaba el orificio de entrada de agua (esta solía venir de un tercer depósito, situado encima del recipiente superior y que a la vez se alimentaba de algún canal o conducción, para garantizar que este recipiente superior recibiese agua siempre que la válvula se abría). De este modo, el sistema aseguraba que el ritmo de goteo del agua que iba pasando del recipiente superior al inferior fuese estable. La forma cilíndrica del recipiente inferior hacía que la subida de nivel de agua fuera proporcional al tiempo transcurrido. Y finalmente, con un segundo flotador y un pequeño engranaje, la subida de nivel de este recipiente inferior se convertía en giro de la aguja del reloj. La precisión de las clepsidras se basaba en la regularidad de la caída del agua, ésta era debida a la constancia del nivel de agua en el depósito superior, y esto último se garantizaba mediante el flotador-válvula: su mecanismo de autorregulación. La prueba de su utilidad es que las clepsidras se utilizaron durante siglos y siglos hasta que Christiaan Huygens⁷ inventó el reloj de péndulo en el siglo XVII.

Trescientos años después del invento de Huygens, concretamente en 1973, la Universidad de Maryland otorgaba el doctorado honoris causa en ciencias a la profesora Irmgard Flügge-Lotz. La mención que se hacía de la galardonada indicaba que Flügge-Lotz había tenido un papel central en el desarrollo de la industria aeronáutica, que su obra manifestaba una indiscutible inteligencia junto con una inusual dedicación personal, y que su trayectoria demostraba el valor de una visión intuitiva que le había permitido encontrar soluciones a problemas complejos de la ingeniería de control en un campo básicamente dominado por los hombres.

6 En relación con la historia de la Clepsidra, ver por ejemplo: <https://www.britannica.com/technology/clepsydra>

7 Sobre las clepsidras de Ctesibio y los relojes: ver el artículo en “Historia de la información”: <http://www.historyofinformation.com/detail.php?id=1946>

Durante su vida, Irmgard Flügge-Lotz se dedicó a investigar intensamente en aerodinámica y mecánica de fluidos, pero también en métodos numéricos de cálculo y en sistemas de control automático.⁸ Su investigación de casi treinta años en este último campo quedó plasmada en dos libros fundamentales que publicó en 1953 y 1968, que trataban con el máximo rigor el análisis de los algoritmos de regulación discontinua.⁹ Irmgard supo distinguir entre los sistemas de control que actúan de manera continua (como los que estabilizan el vuelo de los aviones) y los que trabajan con esquemas del tipo todo-o-nada (como es el caso de los termostatos que apagan o encienden la caldera). Y, en este último caso, estudió cómo se podía lograr su control estable. Podríamos decir que con Irmgard Flügge-Lotz y tras dos mil doscientos años, la clepsidra encontró su marco teórico.

Irmgard Lotz fue la primera mujer elegida *Fellow* del American Institute of Aeronautics and Astronautics en 1970. El año siguiente fue seleccionada para impartir la prestigiosa conferencia von Karman. Era la primera vez que la impartía una mujer.

En todo caso, con precursores como la clepsidra y el regulador de Watt, la mayoría de edad de los sistemas automáticos y de la ingeniería de control no llegó hasta el siglo XX. Los aviones, las centrales eléctricas, los termostatos de los sistemas de aire acondicionado, los robots de las cadenas de fabricación automática, los sistemas de control de los reactores químicos en las empresas farmacéuticas e incluso los marcapasos son ejemplos de ello. Todos ellos cumplen dos características que los definen: son inventos tecnológicos que nos ayudan (o que pueden ayudarnos) a vivir mejor, y son sistemas que, con algoritmos adecuados,¹⁰ se regulan de manera automática. Los marcapasos no sólo regulan su ritmo, sino que estabilizan el corazón de la persona que los lleva. Los pilotos automáticos de los aviones ejecutan la maniobra de aterrizaje sin

8 Véase per ejemplo la biografía de Irmgard Flugge-Lotz: <http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Flugge-Lotz.html>

9 Los libros que Irmgard Flugge-Lotz publicó sobre control automático discontinuo son *Discontinuous Automatic Control* (1953) y *Discontinuous and Optimal Control* (1968). Irmgard Lotz nació en julio de 1903 en Hameln, Alemania, y pudo entrar en la Universidad de Hannover para estudiar matemáticas aplicadas e ingeniería. Era la única mujer en muchas de las clases. Pero a los 26 años había ya conseguido sus dos títulos de ingeniería. A los 35 años se casó con el también ingeniero Wilhelm Flügge. Vivieron primero en Berlín, durante la guerra se trasladaron a Saugau (al sur de Alemania), y tras una corta estancia en París, en 1948 se establecieron en Estados Unidos, en Stanford. En 1961, Irmgard llegó a ser la primera catedrática de ingeniería de la historia de esta Universidad. Irmgard y Wilhelm no tuvieron hijos, pero lo compensaron acogiendo a numerosos profesores, visitantes y estudiantes. Sus encuentros con gente de lo más diverso para tomar el té en su casa de Stanford fueron famosos. Véase: <http://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Flugge-Lotz.html>

10 Los sistemas que vemos que evolucionan, sean naturales o artificiales, se denominan sistemas dinámicos. Es importante que sean estables y que no salgan de su equilibrio. La autorregulación natural hace que muchos de estos sistemas se comporten de manera estable sin intervención exterior alguna: los sistemas forestales, el metabolismo de nuestro cuerpo, los anillos de Saturno. La mayoría de sistemas que observamos son estables por el simple hecho de que aquellos que no lo fueron cuando las condiciones externas cambiaron, acabaron desapareciendo (por ejemplo, el ecosistema de los dinosaurios) y no han llegado a nuestros días. Curiosamente, los humanos hemos aprendido a regular determinados fenómenos mientras que en otros casos somos la causa de su desregulación: regulamos el caudal de los ríos con presas mientras no cesamos en la destrucción de la biodiversidad. En todo caso, muchos de los sistemas automáticos se basan en algoritmos de control, que trabajan para mantener su estado dentro de los límites deseados. Véase la nota del final sobre los algoritmos.

intervención humana (aunque los pilotos los supervisan y pueden desconectarlos si es preciso). Y los aviones y helicópteros teledirigidos son relativamente fáciles de manipular gracias a los algoritmos de su sistema interno de control¹¹ que aseguran la estabilidad de su vuelo, facilitando, por ejemplo, que puedan permanecer quietos en el aire.

Pero recientemente, además de los sistemas automáticos y de los algoritmos de regulación, están apareciendo los llamados sistemas autónomos, que incluyen algoritmos de inteligencia artificial que aprenden de los datos.¹² Ciertamente es un escenario completamente nuevo. Un sistema autónomo es aquel que puede funcionar sin ser controlado directamente por personas humanas.¹³ En otras palabras, así como los sistemas automáticos trabajan siempre bajo supervisión humana realizando tareas rutinarias, previsibles y programadas desde su construcción, el objetivo de los sistemas autónomos puede llegar a ser el de substituir a las personas, aprendiendo y actuando sin control humano significativo de tal manera que pueden acabar actuando de manera imprevisible. Se habla de coches autónomos, de sistemas autónomos de diagnóstico médico, de sistemas autónomos de decisión. Eso sí, estos sistemas con “autonomía constructiva” y por tanto capacidad para ser autónomos, pasan a ser simples sistemas automáticos si la última palabra queda en manos de alguna persona. La autonomía aparece cuando nosotros decidimos dejar de supervisarlos, aceptando y dejando que ellos lo hagan todo.

Los sistemas autónomos plantean muchos problemas éticos porque por primera vez en la historia, estos sistemas basados en algoritmos de inteligencia artificial son máquinas que pueden equivocarse. ¿Qué pasa si un coche autónomo atropella a un peatón? ¿Quién es el responsable? ¿Es ético pensar en sistemas de diagnóstico médico autónomos y no supervisados? El caso más dramático de sistemas autónomos es, sin embargo, el de las llamadas armas letales autónomas (las “LAWs”, en inglés) que algunos países ya están desarrollando. Son máquinas que podrán matar sin una intervención humana clara, con técnicas que son especialmente preocupantes si pueden seleccionar automáticamente los objetivos a atacar, como bien explica Amanda Sharkey.¹⁴ Porque en este caso (como en el de todos los sistemas, sean automáticos o autónomos) habrá errores, con la diferencia de que sus errores serán vidas humanas. La realidad es que se quiere construir una falsa e interesada narrativa que habla sólo de las bondades de la inteligencia artificial y que ignora que los sistemas militares autónomos tienen una probabilidad de error no despreciable que pondrá en riesgo vidas humanas, muchas de ellas civiles. Por esta razón, muchos expertos dicen que la aparición de sistemas militares autónomos es ética y jurídicamente inaceptable,

11 Véase la nota al final sobre los algoritmos.

12 Véase la nota del final sobre los algoritmos.

13 Definición de sistema autónomo: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/autonomous>

14 Amanda Sharkey, “Autonomous weapons systems, killer robots and human dignity”, *Ethics and Information Technology*, 21, 2019, págs. 75-87: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10676-018-9494-0>

argumentando que delegar en una máquina la decisión de matar es algo que va en contra de la dignidad humana y de los derechos de las personas.¹⁵

¿Por qué tenemos esta mezcla de miedo y admiración ante un hipotético futuro con sistemas autónomos y máquinas y artilugios «inteligentes»? Nos fascina lo que podrá llegar a pasar, pero tememos que nos controlen. Y no deberíamos tener miedo de estos mitos que nos llegan sobre el futuro poder de las máquinas, porque quien nos quiere y nos querrá controlar y manipular son personas, no máquinas. Tendremos que prepararnos y mantenernos alerta.

Necesitaremos clarividencia para pedir supervisión y control humano, valentía para exigir respeto a la dignidad y a la privacidad de las personas y sus datos, atención para escuchar a los científicos cuando nos explican que los sistemas cometen errores y que además sus decisiones y resultados son a menudo no explicables. También cuando comentan que es por ello imprescindible una supervisión humana de los resultados, supervisión que además es la que deberá permitir la rendición de cuentas en caso de mal funcionamiento. Necesitaremos una educación que asegure que nuestros jóvenes crezcan con el espíritu crítico que les ha de permitir discernir entre las informaciones objetivas y las malévolas, comprobando, investigando las fuentes y no quedándose con el universo reducido de las informaciones “a medida” que irán recibiendo.¹⁶ Tendremos que estar atentos a las personas más que a las nuevas tecnologías. Porque con las máquinas, siempre tendremos el recurso de desenchufarlas.

Steven Pinker comenta que muchos de estos miedos son simplemente un desperdicio de energía emocional. Y entiende que las distopías sobre la inteligencia artificial provienen de “una psicología parroquial alfa-masculina aplicada al concepto de inteligencia”. Es significativo, dice, que muchos de estos *tecno-profetas* no consideren la posibilidad de que la inteligencia artificial se desarrolle en base a valores femeninos, siendo totalmente capaz de resolver problemas, pero sin necesidad de aniquilar personas o de dominar civilizaciones.¹⁷ Ciertamente revelador. Ojalá nuestra futura relación con las máquinas y la tecnología se desarrolle en base a valores femeninos y esquemas feministas.

Sofia Kovalévskaya y Irmgard Flügge-Lotz pudieron plantear las ecuaciones matemáticas inherentes a la regulación y estabilidad de determinados sistemas, mientras que Wangari Muta Maathai estudió y supo regular y estabilizar grandes regiones africanas. Irmgard Flügge-Lotz nos dio las herramientas para diseñar nuevos sistemas automáticos

15 Véase por ejemplo el informe *Nuevas armas contra la ética y las personas. Drones armados y drones autónomos*, Pere Brunet, Tica Font, Xavi Mojal y Joaquín Rodríguez, Centro Delàs de Estudios para la Paz, Informe 39, 2019: http://www.centredelas.org/images/INFORMES_i_altres_PDF/informe39_DronesArmados_CAST_web_DEF.pdf

16 Entrevista a Carme Torras (2016): <https://www.elperiodico.com/es/cuaderno/20161127/carme-torras-evolucionamos-tanto-tan-rapido-que-no-hay-control-5649905>

17 Steven Pinker (2015), “The Psychologist”: <https://thepsychologist.bps.org.uk/volume-28/march-2015/what-do-psychologists-think-about-machines-think>

que han ido mejorando la vida de las personas. Con su trabajo, demasiadas veces desconocido e infravalorado, todas ellas hicieron importantes aportaciones al conocimiento y a la cultura desde la visión ética del humanismo científico,¹⁸ creando, construyendo (no destruyendo) y dirigiendo sus trabajos a todas las personas sin distinción. Por ello, ahora que los sistemas automáticos van dando paso a sistemas que cada vez son más autónomos, no deberíamos perder de vista la ética y la dignidad de todos los seres humanos. Porque en este proceso de invención de máquinas cada vez más sofisticadas hemos acabado diseñando máquinas que son “inteligentes” pero que se equivocan, como nosotros. Y ello, en algunos posibles escenarios, puede ser realmente peligroso. Nos lo explica la también Nobel de la Paz Jody Williams¹⁹ cuando reflexiona sobre la aberración de los sistemas autónomos de armamento y afirma que es imprescindible llegar a un acuerdo internacional que prohíba las armas autónomas.

18 Véase el relato sobre preguntas, dudas y experimentos.

19 Jody Williams y otros 19 premios Nobel de la Paz avalan la prohibición preventiva de los robots asesinos: <https://nobelwomensinitiative.org/nobel-peace-laureates-call-for-preemptive-ban-on-killer-robots/#sthash.gXkiskQE.dpuf> - Véanse también sus declaraciones a la Campaña “Stop Killer Robots”: <https://www.stopkillerrobots.org/endorsers/>

Nuestras restricciones

Una historia protagonizada por Katherine Johnson Y Zaha Hadid

La vida es una constante referencia a los límites. La imaginación es libre, soñamos con grandes proyectos, pero la realidad nos recuerda nuestra energía limitada, el agotamiento físico, los derechos de los demás, los costes, la sostenibilidad del planeta. Todos los seres viven entre los muros de sus propios lindes. Los árboles crecen para optimizar y maximizar la luz solar que les dará la vida, pero con las restricciones de proximidad que les imponen sus vecinos del bosque. Los pájaros tratan de volar lo más lejos posible, pero no pueden evitar las fronteras de su propia naturaleza: energía limitada, hambre, dificultades con el frío y mal tiempo. Nuestro cuerpo trata de aprender y vivir lo mejor posible, pero el tamaño y capacidad de su cerebro le obligan a eliminar mucha información no esencial.

Katherine Johnson sufrió durante muchos años las absurdas fronteras que a menudo imponen las personas. Durante su vida, larga pero nada cómoda, tuvo que soportar todo tipo de problemas por el hecho de ser afroamericana.

Katherine Coleman (este era su nombre de joven antes de adoptar el apellido Johnson) nació en 1918 en un pueblecito llamado White Sulphur Springs, en el estado de Virginia de Estados Unidos. Siendo la pequeña de cuatro hermanos, pronto se hizo evidente su interés por las matemáticas. Jugaba a contar y medir. Sus padres, granjero y maestra de escuela, decidieron ayudarla como fuese. Y como que en la escuela del pueblo las leyes de segregación obligaban a los niños afroamericanos a dejar la escolaridad tras el sexto grado, cargaron el coche y se mudaron a más de 190 kilómetros, cerca del instituto West Virginia Colored, específico para niñas y niños de color. Gracias al sacrificio de sus padres Katherine pudo terminar la escuela, entró en el West Virginia State College, y a los 18 años pudo graduarse en matemáticas y francés.

Era tan extraordinaria que uno de sus profesores, el Dr. William Waldron Schieffelin Claytor (la tercera persona de color que había obtenido el doctorado en matemáticas en las universidades de los Estados Unidos) preparó un curso de geometría analítica sólo para ella. Se lo fue explicando en una experiencia única para ambos.

Desde que se graduó y hasta los treinta y cinco años no lo tuvo nada fácil. En la Virginia de la mitad del siglo XX la segregación se respiraba a diario. Vivió la separación en los autobuses y en los lugares de trabajo, con oficinas, comedores y baños independientes. Las mujeres afroamericanas se veían separadas del resto, algo que se añadía a la segregación de género de las mujeres blancas.¹ Era una doble frontera de confinamiento. La realidad la obligó a tomar conciencia, y sólo encontró trabajo como profesora de matemáticas, música y francés. Luego, ya madre, tuvo que quedarse en casa cuidando de sus hijas. Las dificultades continuaron. En 1956, la muerte de su primer marido por cáncer cerebral la dejó, a los 38 años, viuda con tres hijas adolescentes. Afortunadamente, tres años después volvió a casarse con James A. Johnson, de quien adoptó el que sería el apellido de la segunda parte de su vida.

Katherine Johnson no pudo empezar su vida profesional hasta 1953, cuando sus hijas empezaron a necesitar menos cuidados de madre. Este año consiguió un contrato con la NACA, predecesora de la NASA, para calcular trayectorias de satélites y cápsulas tripuladas.² Su trabajo incluía el cálculo de las ventanas de lanzamiento³ y la predicción de los puntos de llegada a la Tierra al final de las misiones. Lo hacía con muy pocas herramientas además de papel, lápiz y una regla. Y al poco tiempo se hizo imprescindible. Gracias a su capacidad intelectual y a su extremada pulcritud y rigor, entró en el Grupo de Control de naves espaciales de la NASA. Fue parte del equipo que calculó la trayectoria del vuelo que llevó a Alan Shepard al espacio en 1959, del grupo que diseñó el vuelo orbital de John Glenn en 1962, y del que llevó al Apolo 11 a la Luna⁴ siguiendo un camino de fascinante precisión. Sus matemáticas estuvieron en la base de los primeros vuelos espaciales.

Hay una anécdota divertida. En 1962, John Glenn, pocos días antes de su vuelo orbital a la Tierra, estaba revisando la planificación de su trayectoria. Los cálculos venían de uno de los ordenadores de aquellos tiempos, bisabuelos de los actuales y que poco a poco iban incorporando tareas de cálculo de las personas del Grupo de Control. Todo era muy nuevo, tal vez demasiado. John Glenn no estaba tranquilo dejando su vida en manos de aquella extraña máquina hecha de metales y lucecitas. Fue a ver a

1 Las mujeres blancas, en los trabajos de cálculo a los que ella quería acceder, también sufrían segregación y eran relegadas por parte de los ingenieros y científicos blancos.

2 Yvette Smith: "*Katherine Johnson, The Girl Who Loved to Count*". NASA: <https://www.nasa.gov/feature/katherine-johnson-the-girl-who-loved-to-count>

3 Las ventanas de lanzamiento son aquellos períodos de tiempo en los que éste es viable, en función de la posición relativa de la Luna y los astros.

4 Katherine Johnson calculó y revisó la trayectoria que permitió que el Apolo 11 llegase a la luna, la orbitase mientras Neil Armstrong caminaba por su superficie, y que luego pudiese volver a la. Véase el artículo sobre Katherine Johnson en "*Black Ladies*": <http://www.black-ladies.org/katherine-johnson-nasa/>

Katherine Johnson y le pidió que por favor repasara los cálculos a mano, indicando que “estaré preparado para marchar cuando ella lo repase y nos confirme que los cálculos están bien hechos.”⁵

En la NASA luchó y logró romper muchas barreras raciales y de género. Un día, cuando le comentaron que no podía entrar a una reunión científica de la Agencia porque era mujer, preguntó: “¿hay alguna ley que diga que no puedo estar ahí?”. El debate estuvo servido, aunque sus compañeros finalmente tuvieron que admitir que la respuesta era negativa. A partir de aquél momento ya participó en las reuniones, siendo además la primera mujer de la historia que fue autora de informes de la NASA.

Tras su jubilación, Katherine estuvo defendiendo la educación matemática con vehemencia, dando conferencias y dando charlas en las escuelas. Vivía la belleza de las matemáticas y de la geometría, necesitaba transmitirlo. Decía que muchas cosas desaparecerán, pero que siempre habrá ciencia y matemáticas.⁶ Se mantuvo activa hasta muy mayor, muriendo a principios de 2020 a los 101 años.

En 2015, el presidente Barack Obama le concedió la Medalla Presidencial de la Libertad. En la ceremonia de entrega, dijo que Katherine Coleman Globe Johnson “se negó a quedar limitada por las expectativas sociales de género y raza, al tiempo que expandió los límites de lo que la humanidad puede abarcar.”

El gráfico del modelo matemático que le permitió a Katherine Johnson simular y ajustar la trayectoria del Apolo 11 en su viaje a la luna en 1969 es muy ilustrador. Muestra toda la complejidad de las diferentes fases de la trayectoria⁷ con la belleza propia de las soluciones matemáticas en entornos críticos. Y es que el objetivo de Katherine Johnson no fue nunca el de navegar derrapando por el espacio, sino el de deslizarse pendiente abajo por los campos gravitatorios, aprovechando las fuerzas del universo en vez de pretender dominarlas.

Por otra parte, los puentes son unas de estas construcciones, útiles y ligeras, donde también cristalizan los límites. En ellos confluyen el arte, el diseño funcional, la arquitectura, la ciencia y la ingeniería. Muchos de los puentes construidos por los romanos,

5 NewYorkTimes, obituario de Katherine Johnson, 24-2-2020: <https://www.nytimes.com/2020/02/24/science/katherine-johnson-dead.html>

6 Heather S. Deiss, “Katherine Johnson: A Lifetime of STEM”, 2013: <https://www.nasa.gov/audience/foreducators/a-lifetime-of-stem.html>

7 El gráfico nos muestra la solución óptima a un problema que está lleno de restricciones y límites. Una solución que permitió que la nave fuera y volviera con un nulo consumo de combustible casi todo el tiempo (uno de los límites más estrictos de las naves espaciales es el de la cantidad de combustible que pueden llevar y usar). Se encuentra en la página web <http://www.black-ladies.org/katherine-johnson-nasa/> y puede descargarse como imagen: https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/54d81455e4b0ed3e694933d1/1427570474423-KGBBMBVBR7DODP33L3CL/ke17ZwdGBToddI8pDm48kHnx5O9lCinC6A3FaDAd-LwUqsxRUqqr1mOJYKfIPR7LoDQ9mXPOjoJoqy81S2I8N_N4V1vU-b5AoI1lbLZhVYxCRW4BPu10St3TBAUQYVKck91iT2S3Dy0vF43z9Zt_AMGTu3jkaZrBlrgjIA8qqRrKuzxt_y3o8cshn9R-tDP2/image-asset.png?format=1500w

como el puente de Limyra en Licia con sus 26 arcos aplanados, nos muestran su dignidad constructiva tras dieciocho siglos. Algunos nos son todavía útiles, como los de Alcántara, Mérida y muchos otros.

El diseño de los puentes no es trivial. Deben aguantar el peso de las personas y mercancías que los cruzarán, deben poder resistir las posibles riadas, deben ser funcionales. Pero, además, han de sostener su propio peso durante la construcción sin caer ni romperse, a lo largo de aquellas semanas o meses en las que los arcos van creciendo lentamente desde ambos lados antes de encontrarse en el centro. Por ello, los romanos aprendieron que debían utilizar mortero, y por ello entendieron que el diseño de un puente incluye lo que será pero también lo que va siendo durante su construcción.

Siglos después, gracias a la revolución industrial, con el uso generalizado de los metales y nuevos materiales y con los nuevos métodos computarizados de cálculo y optimización, el diseño de puentes ha sabido cruzar el río que a menudo separaba la ingeniería de la arquitectura y el arte. El resultado tiene la elegancia que resulta de mezclar los condicionantes constructivos con la belleza. Muchos de estos puentes lo han conseguido; nos atraen, no podemos dejar de mirarlos, son como poemas visuales. Un buen ejemplo es el puente de Brooklyn, finalizado por Emily Warren Roebling. Otro podría ser el pabellón puente que cruza el Ebro en Zaragoza, que Zaha Hadid y su equipo diseñaron para la exposición universal de 2008.

Emily Warren Roebling nació en Cold Spring en 1843. A pesar de pertenecer a una familia socialmente destacada, fue a una escuela conventual de Washington y a diferencia de su hermano no tuvo acceso a la educación superior. En 1865 se casó con el ingeniero Washington Roebling, hijo del también ingeniero John Augustus Roebling, quien había diseñado el puente de Brooklyn. Dos años más tarde acompañó a su marido a Europa para estudiar las últimas técnicas de construcción de cimientos bajo el agua. Pero las cosas empeoraron. El suegro de Emily murió en 1869, y Washington Roebling tuvo que asumir la dirección del proyecto. Washington, activo y decidido, además de dirigir los trabajos participaba en la construcción de los cimientos bajo el agua. Pero su falta de precaución fue fatal. Los accidentes de descompresión le afectaron gravemente, y en 1872 quedó prácticamente inválido. Emily le cuidaba, primero en su casa y después en una residencia de Brooklyn Heights, mientras hacía de enlace entre su marido y el equipo de ingeniería e iba aprendiendo. Poco después ya ejercía todas las funciones de dirección del proyecto de construcción.⁸ En la inauguración del puente,⁹ en 1883, fue la primera en cruzarlo en su carruaje.

8 Véase, por ejemplo, este artículo en la Enciclopedia Británica: <https://www.britannica.com/print/article/1323373>

9 El puente de Brooklyn tiene una longitud de 1825 metros y una distancia entre pilares de 486,3 metros. Cuando se inauguró era el puente colgante más largo del mundo.

Emily murió en 1903 tras recibir el título honorario en derecho de la Universidad de Nueva York.

Años más tarde, Zaha Hadid nacía en el Bagdad tolerante de 1950. El ambiente era progresista y lleno de oportunidades para las mujeres. Sus padres, musulmanes, decidieron llevarla a una escuela católica. Zaha lo recordaba apenas años más tarde, comentando que, por muy asentadas que creamos tener nuestras libertades, no deberíamos nunca darlo todo por hecho.

Estudió matemáticas en la universidad de Beirut para luego terminar la carrera de arquitectura en Londres a los 27 años. Sin embargo, la extraña mezcla entre árabe, inmigrante, arquitecta, matemática, artista y mujer no era una buena tarjeta de presentación. Sufrió muchos episodios de discriminación en el Reino Unido durante más de veinte años. Uno de los más conocidos fue el de 1994 en el país de Gales. A pesar de que ganó el concurso para la construcción de la Ópera de Cardiff, los ataques lanzados por las propias autoridades políticas de Gales impidieron su construcción y el proyecto fue cancelado. “Fue una experiencia horrible, como un asesinato público”, decía años más tarde.

Zaha Hadid se entusiasmaba con la geometría y las curvas. Su inspiración, decía, eran tanto las matemáticas como las dunas y ríos de los alrededores de Bagdad. Pero sus diseños, en los años 80 y 90, eran demasiado atrevidos. Le llamaban la arquitecta de papel porque nadie se atrevía a construir sus proyectos. En todo caso, aquellos que no confiaban en sus ideas no tuvieron ningún problema en aceptar los diseños rompedores de los Frank (Wright y Gehry) para los museos Guggenheim de Nueva York y Bilbao, diseños que justamente incorporaban la filosofía creativa de Zaha. Tras su graduación tuvo que esperar veinte años de incompreensión, hasta que Frank Gehry le abrió las puertas del reconocimiento mundial en 1997, pudiendo finalmente materializar unos proyectos que mezclan todas las facetas de su carácter y formación. Por citar sólo dos ejemplos, podríamos mencionar las estaciones Nordpark del tren que pasa por la sierra del norte de Innsbruck en Austria, y el Centro Heydar Aliyev de Bakú. Sus cubiertas curvadas de hormigón, ligeras y que surgen como continuación del entorno nevado o de las dunas del desierto, son paisaje, arquitectura e ingeniería. Nos llevan, con una esbeltez que sólo las matemáticas puede crear, a su infancia en Bagdad.

Zaha Hadid diseñó también el puente sobre el Ebro en Zaragoza, con una forma que recuerda las vainas vegetales.¹⁰ A menudo le preguntaban por qué, en sus edificios y

10 El puente de Zaragoza, de 280 metros, tiene dos grandes tramos de 125 y 155 metros de luz, a banda y banda de un gran pilar central anclado en el cauce del Ebro. Consta de cuatro grandes pasillos curvados como las vainas, que se interconectan definiendo espacios de paso y exposición, a la vez que permiten distribuir el peso haciendo que toda la estructura pueda ser más ligera. La estructura de hormigón pesa 5.700 toneladas. El cierre de los laterales del puente se resolvió con veintinueve mil piezas triangulares de cemento y fibra de vidrio en diferentes tonalidades de gris, que además aprovechan las ráfagas del cierzo para la ventilación y climatización.

puentes, no había paredes planas ni ángulos rectos. Su respuesta era que cuando salimos de pueblos y ciudades, no vemos planos. En el campo y en la montaña, las formas curvadas, no uniformes y no regulares, son las que nos hacen sentir bien. “La vida no es cuadrículada”, decía. La geometría de la naturaleza es curva.

En 2004, Zaha Hadid fue la primera mujer en recibir el premio Pritzker de Arquitectura.¹¹ Creía que podría construir lo imposible, y podemos confirmar que, cuando pudo, lo hizo. Desgraciadamente, nos dejó el 31 de marzo de 2016, sólo diecinueve años después de que la inauguración del Guggenheim de Bilbao le ayudara a romper sus cadenas.

Falleció joven, cuatro años antes que Katherine Johnson. Diferentes en muchos aspectos, ambas tenían rasgos comunes. Como Emily Warren Roebling, supieron superar graves dificultades familiares y de discriminación. Utilizaron simulaciones y cálculo para resolver problemas muy complejos que incorporaban límites estrictos. Lo consiguieron porque eran matemáticas.

Desde la distancia entre ambas temáticas, hay bastantes puntos en común entre las cubiertas y puentes de la Zaha Hadid y los cálculos de la Katherine Johnson. Ambas imaginaban y calculaban lo que debía ser pero aún no era.¹² Para ello, utilizaron dos elementos básicos: los modelos matemáticos y la simulación.¹³ Los modelos matemáticos son conjuntos más o menos complejos de fórmulas que permiten reproducir, en papel o con ordenadores, lo que pasará en determinadas situaciones del mundo real. La ley de la palanca de Arquímedes es un buen ejemplo de ello. Con simple fórmula nos explica, entre otras cosas, que si queremos cortar un cartón grueso es conveniente cortarlo, poco a poco, por la parte más interna de las tijeras.¹⁴

Usamos conocimientos de la ciencia para crear nuevos instrumentos que nos permitan vivir mejor. Pero siempre hay límites que debemos considerar. La construcción del puente de Brooklyn, terminado gracias a Emily Warren Roebling, estuvo llena de restricciones, como las que dejaron inválido a su marido. En sus cálculos, Katherine Johnson debía tener en cuenta que las naves espaciales llevan una cantidad de combustible que es limitada. Y los puentes de Zaha Hadid, que debían ser suficientemente resistentes para no caer, eran además ligeros, porque el poco grosor y el menor peso ayudan a utilizar menos recursos naturales y facilitan el proceso constructivo.

11 Biografía de Zaha Hadid: <https://www.pritzkerprize.com/biography-zaha-hadid>

12 Las cubiertas se diseñan antes de su construcción, y las trayectorias se calculan y refinan cuando los cohetes están en tierra.

13 Véase la nota del final sobre modelos matemáticos, simulación y optimización con restricciones

14 Para cortar un cartón grueso es aconsejable abrir bien las tijeras y entrarlo hasta cerca de la articulación, de tal modo que el brazo de palanca que lo acabará cortando sea mucho más corto que el que hay entre la articulación y nuestros dedos. El modelo de la palanca nos permite incluso calcular la fuerza que deberemos ejercer con unas determinadas tijeras y con un cartón concreto. La simulación consiste en aplicar y resolver las fórmulas y ecuaciones del modelo matemático en un determinado caso concreto, con el objetivo de saber, con antelación, qué va a pasar.

Por ello, el equipo de Zaha Hadid optimizaba las cubiertas, y por ello, Buckminster Fuller le preguntó a Norman Foster cuál era el peso de su edificio.¹⁵ Y es que no podemos soslayar los límites: siempre hay algo que desearemos mejorar y siempre nos encontraremos con fronteras (físicas, biológicas, éticas) que no podremos obviar.¹⁶

Zaha tuvo la suerte de vivir en el momento histórico en que los modelos computacionales ya podían optimizar y calcular lo que ella imaginaba y dibujaba. Hablando del puente de Zaragoza, dijo: "nuestro objetivo de crear estructuras fluidas, dinámicas y complejas se ha visto ayudado por las innovaciones tecnológicas. El hecho de poder aplicar estos conocimientos en el pabellón puente ha sido algo muy gratificante."¹⁷ Pudo y supo conectar arte, matemática y arquitectura.

Pero nunca podremos asegurar la supervivencia de lo que hacemos, porque el riesgo nulo tiene un coste infinito. Por eso, y aunque estén bien calculadas, sabemos que las estructuras del puente de Brooklyn, las cubiertas y los puentes diseñados por Zaha Hadid y todas las demás construcciones, acabarán cayendo algún día al igual que las naves espaciales que Katherine Johnson ayudó a calcular no fueron eternas.

La ciencia intenta descubrir leyes de la naturaleza mientras cuantifica sus límites. Luego, en íntimo maridaje con la ingeniería (sea de puentes, agrícola o de naves tripuladas), nos regala el conocimiento de las restricciones que descubrimos en cualquier herramienta tecnológica.

15 Véase el relato sobre belleza y ética.

16 La tecnología es también optimización con restricciones, como vemos por ejemplo en el problema de la mochila. Ver la nota del final sobre modelos matemáticos, simulación y optimización con restricciones.

17 Entrevista a Zaha Hadid: <https://www.worldarchitecturenews.com/article/1501428/crossing-boundaries>

Estudiando la incertidumbre

Una historia protagonizada por Gertrude Cox y Besse Beulah Day

“El trabajo experimental es fascinante. Mientras investigamos lo desconocido buscando nuevas verdades, vamos encontrando el misterio, la aventura y la emoción del descubrimiento”. Gertrude Cox pronunció esta frase en 1940, cuando era ya una reconocida experta en el diseño de experimentos estadísticos. La estadística es nuestra herramienta para interpretar todo tipo de fenómenos del mundo real que son difícilmente evaluables, decía, incluyendo los experimentos científicos de otras áreas. En otro momento, contestando la carta de una joven que se interesaba por la posibilidad de estudiar en su Instituto, le mostró algunos ejemplos de problemas en los que había estado colaborando y en los que había encontrado soluciones basadas en la estadística: entender los problemas nutricionales de los niños indígenas de Guatemala, ver cuál es el mejor método para cultivar flores en un invernadero, comparar sistemas para congelar pasteles, evaluar la efectividad de los insecticidas para moscas o seleccionar las mejores variedades de maíz, entre otros.¹

Gertrude Cox nació, en enero de 1900, en el estado de Iowa, en Estados Unidos. Su familia, religiosa y muy unida, vivía en una granja cerca de Dayton, donde pasó su infancia jugando por los bosques cercanos al río y por las colinas de los alrededores. Tenía una hermana y cuatro hermanos. Años más tarde, Gertrude, hablando de su madre Emma, decía que de ella había aprendido el valor y la alegría de hacer cosas para ayudar a los demás.² La vida era tranquila y sin especiales obstáculos. Pero para

1 Sharon L. Lohr, “Gertrude M. Cox and Statistical Design”, *Notices of the American Mathematical Society*, marzo 2019: <https://www.ams.org/publications/journals/notices/201903/rnoti-p317.pdf>

2 Anderson, Richard L., “Gertrude Mary Cox 1900-1978”: *Biographical Memoir*, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1990: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/cox-gertrude.pdf>

poder ir a la escuela tuvo que esperar a que sus padres dejaran la granja y a que se trasladaran a Perry, en el condado de Dallas. Tras esta primera experiencia, modesta y en una clase unitaria para todos los niños, continuó estudios en la escuela nacional de enseñanza bíblica de Iowa.

A sus 24 años, Gertrude, mientras cuidaba dieciséis chicos en un orfanato de Montana, fantaseaba con prepararse para ser diaconisa de la iglesia Episcopal metodista y superintendente del orfanato. Pero, dado que le pedían un título universitario, decidió matricularse en el Iowa State College. Ella misma, en una entrevista 50 años más tarde, contaba su entrada al mundo universitario. Lo primero que tuvo claro fue apuntarse a cursos de matemáticas: le gustaban y eran “las asignaturas más fáciles”. Además, en el tiempo sobrante podría asistir a las clases de psicología y manualidades que creía necesarias para el orfanato. Pero tenía que pagarse los estudios, y para ello aceptó la oferta de su profesor de cálculo, George Snedecor, entrando a trabajar como becaria en su laboratorio estadístico.³ Aquél trabajo le cambió la vida. Como explicaría años más tarde en la misma entrevista, “tan pronto aprendí a utilizar el conocimiento matemático para las personas y para poder ayudarlas, el conocimiento tomó vida”.

Tras estudiar y sacarse el grado universitario en matemáticas entre 1924 y 1929, cursó un máster en la Universidad Estatal de Iowa. Lo terminó en 1931 bajo la dirección de Snedecor con el trabajo: “Una investigación estadística sobre las capacidades del profesorado, en base al éxito de sus estudiantes en cursos posteriores”. Fue la primera persona de la historia en obtener un título de máster en estadística en aquella Universidad.

Su pasión por la estadística le había ido eclipsado el interés por volver al orfanato. Tras continuar estudios de estadística psicológica en Berkeley durante dos años, volvió con Snedecor a la Universidad Estatal de Iowa para trabajar en diversos proyectos. Y con la experiencia, fue entendiendo la importancia del rigor metodológico. Muy pronto, en 1934, comenzó a impartir un curso sobre diseño de experimentos que surgía del análisis serio, detallado y preciso de multitud de ejemplos y casos prácticos que había estado estudiando. En aquél momento no era consciente de la importancia que aquél curso llegaría a tener.

Seis años más tarde, a los cuarenta años, Gertrude Cox se independizó profesionalmente. Todo empezó cuando el rector de la Universidad de Carolina del Norte, Frank Graham, decidió crear un programa en estadística similar al que ya existía en Iowa. Necesitaban una persona para dirigir el nuevo Departamento, y Graham pidió a Snedecor nombres de posibles candidatos. Snedecor preparó una primera lista con cinco expertos, todos hombres, que mostró a Gertrude. La respuesta, directa y clara, «¿por qué no me has incluido en la lista?»⁴ hizo vacilar a George, que se justificó

3 En esta entrevista de 1975, Gertrude Cox decía que Snedecor la acogió probablemente por su paciencia y meticulosidad en el trabajo. Era la única mujer en su clase.

4 Sharon L. Lohr, 2019, *op. cit.*, p. 318.

diciendo que nadie haría caso a una mujer jefe de Departamento, y menos en una Universidad del Sur. Pero la conversación no le dejó indiferente. Y cuando finalmente envió la carta a Graham con la lista de candidatos, agregó que si estaba dispuesto a escoger a una mujer, en este caso su deber era informarle de que no había persona más cualificada que Gertrude Cox.⁵ Cox fue elegida en otoño de 1940, pasando a ser la impulsora y primera directora del Departamento de Estadística Experimental de la Escuela de Agricultura de la Universidad Estatal de Carolina del Norte.

Gertrude era una gran trabajadora, conocía los fundamentos matemáticos de la disciplina y estaba convencida de la importancia de su trabajo. Sabía crear grupos de trabajo y transmitía pasión y entusiasmo a todas las personas de su equipo. Su grupo pronto se situó como uno de los referentes a nivel internacional. A los pocos meses de entrar en Carolina del Norte reorganizó las ideas del curso que ya estaba haciendo, diseñando un primer curso de verano sobre diseño de experimentos de seis semanas durante los meses de junio y julio de 1941. Luego preparó muchos más, algunos más básicos y otros avanzados, contando con George Snedecor y otros conocidos estadísticos como profesores. Uno de los ponentes previstos en aquel curso de 1941 era el británico Ronald Fisher, que finalmente no pudo viajar por problemas derivados del estado de guerra. Sin embargo, el curso se impartió y fue todo un éxito, con sesiones en grupo y actividades de tutoría para resolver problemas concretos.

Cox no lo tuvo fácil, por ser pionera y por ser mujer. Los prejuicios de los compañeros, pero sobre todo los de las administraciones y organismos que le podían dar dinero eran constantes. Ella, pragmática, aprendió a cortar por lo sano. Cuando lo veía complicado, pedía ayuda a alguno de sus colegas para que fueran ellos los que presentarían sus puntos de vista y propuestas.

En 1949, Gertrude Cox fue la primera mujer que entró en el International Statistical Institute. Dos años antes había sido una de las fundadoras de la Sociedad Biométrica, de la que luego fue presidenta en 1968-69. En 1958, la Universidad Estatal de Iowa le concedió el doctorado honoris causa.

Todo había ido surgiendo de aquél curso que había empezado en 1934, poco después de la finalización de su máster. Mientras el curso se consolidaba año tras año, su libro *Experimental Designs* iba tomando forma, apoyándose en numerosos ejemplos y en el análisis y crítica de diseños experimentales concretos, pero exponiendo también algunos principios esenciales: la randomización,⁶ la replicación, el uso de

5 Eva Ferreira, "Gertrude Cox, la primera dama de la estadística", Mujeres con Ciencia, 2014: <https://mujeresconciencia.com/2014/06/09/gertrude-cox-la-primera-dama-de-la-estadistica/>

6 Gertrude Cox y Besse Day defendieron el principio de randomización como uno de los aspectos más esenciales a considerar y como la norma básica que todo estadístico debe siempre seguir. Se trata, por decirlo en pocas palabras, de hacer que el azar sustituya nuestras decisiones, evitando así los prejuicios que podrían terminar distorsionando los resultados.

bloques,⁷ los controles para garantizar la corrección de todos los pasos y la estimación de la magnitud de los errores experimentales. Insistía en tenerlos siempre presentes y que antes de iniciar cualquier experimento era imprescindible elaborar un esquema de cómo luego se analizarían los datos.⁸ Años más tarde, complementaría estas normas con preguntas tan esenciales como estas: ¿Qué es lo que queremos obtener? ¿Queremos entender lo que pasa o bien necesitamos calcular estimaciones? Los resultados que obtenemos, ¿para qué gama de condiciones experimentales son válidos? ¿Hace falta desarrollar un análisis que compare con resultados anteriores? Los recursos disponibles, ¿permitirán que el experimento tenga un tamaño tal que garantice la utilidad de los resultados obtenidos? ¿Disponemos de los materiales necesarios para realizar la prueba?⁹

Gertrude Cox se jubiló de la Universidad en 1960, pero continuó dirigiendo la división de investigación en estadística del Instituto RTI en Carolina del Norte hasta 1965. Y luego continuó sin pausa. Su atracción por países como Egipto y Tailandia la llevó a hacer un buen número de viajes en los que mezclaba placer, conocimiento de los lugares y trabajo.¹⁰ Aprovechando estos viajes, ayudó a establecer un programa de estudios en estadística en la Universidad de El Cairo. Se mantuvo activa profesionalmente hasta su muerte, por leucemia, en 1978.

No tuvo hijos, pero siempre consideró que su familia la formaban sus compañeros y sus familias. Les invitaba a menudo a cenar (era una excelente cocinera) y siempre que viajaba volvía con regalitos.

Besse Beulah Day era once años mayor que Gertrude Cox. Había nacido en Chapel Hill, Missouri, en 1889. Estudió matemáticas en Warrensburg. En 1927, mientras Gertrude ya estaba estudiando matemáticas, logró el título de máster en matemáticas y estadística en la Universidad de Michigan. Durante su trabajo profesional, primero en el Servicio Forestal y después en los Laboratorios Navales federales, fue consolidando sus conocimientos estadísticos. Terminada la Segunda Guerra Mundial, fue directora del área de estadística de la estación experimental de ingeniería naval de Estados Unidos y publicó varios trabajos científicos sobre el uso de la estadística en la planificación de pruebas y experimentos en ingeniería forestal y diseño naval.

7 La replicación supone repetir los experimentos para reducir errores, mientras que el uso de bloques comporta agrupar los elementos que presentan comportamientos similares. El libro presentaba gran cantidad de ejemplos, incluyendo un análisis para cada uno de ellos sobre si el diseño era apropiado y discutiendo con detalle cómo se podía aplicar la randomización. Por otra parte, enfatizaba algunos principios básicos: 1) Los estadísticos deben involucrarse desde el principio en el diseño de los experimentos, junto con los expertos de las otras disciplinas; 2) La randomización es esencial, y es preciso randomizar el máximo número de pasos del experimento, incluso cuando ello no parece necesario; y 3) Para reducir los efectos de la variabilidad, hay que usar bloques siempre que sea posible. Para más detalles, véase Sharon L. Lohr, 2019, *op. cit.* págs. 319-320.

8 Algo que no todo el mundo hace, decía.

9 Anderson, Richard L., 1990, *op. cit.*, p. 120.

10 Biografía de Gertrude Cox, del Agnes Scott College, Decatur, Georgia, EEUU: <https://www.agnesscott.edu/lriddle/women/cox.htm> - Véase también: Anderson, Richard L., 1990, *op. cit.*

Besse fue elegida miembro de la Asociación Americana de Estadística en 1951 por sus méritos en las aplicaciones de la teoría estadística en campos muy dispares. Luego, en 1958, se incorporó como miembro de la Academia de Ciencias de Washington “en reconocimiento a su trabajo pionero en el diseño estadístico de experimentos en muchos campos, especialmente los de la silvicultura y la ingeniería y por los sus logros únicos en la divulgación de métodos estadísticos”.¹¹

Gertrude Cox fue nombrada socia de honor de la Royal Statistical Society en 1957. Ejerció como presidenta de la American Statistical Association en 1956, y más tarde, en 1975, fue elegida miembro de pleno derecho de la National Academy of Sciences de los Estados Unidos. En 1977, la Universidad de Carolina del Norte decidió establecer la beca de investigación Gertrude M. Cox.

Pocos meses tras la muerte de Gertrude, su colaborador William Cochran dijo: “dudo que alguien haya contribuido más que Gertrude Cox a construir la profesión de estadística tal como la conocemos hoy.” William la conocía bien. Habían trabajado juntos en un buen número de proyectos y en 1950, habían escrito el libro sobre diseño de experimentos estadísticos que todavía hoy es texto de referencia.¹²

Besse Day diseñó experimentos estadísticos muy cuidadosos en temáticas tan diversas como los bosques y la industria naval; Gertrude Cox lo hizo en aplicaciones relacionadas con la agricultura y las ciencias de la vida entre otras muchas. El enfoque de Cox era más académico; el de Day, más industrial. Pero desde sus ámbitos, complementarios, ambas fueron claves en el desarrollo de los métodos estadísticos modernos. Besse sobrevivió a Gertrude Cox ocho años, hasta su muerte en 1986. Se conocieron,¹³ pudiendo compartir sus placeres matemáticos.

Cox explicaba que la preparación de experimentos requiere grandes dosis de trabajo y mucho rigor, dado que los prejuicios pueden malbaratar los resultados incluso en puntos del experimento que a primera vista pueden parecer totalmente neutros. Para saber a qué personas debemos preguntar en un sondeo electoral, ahora sabemos que necesariamente debemos utilizar una muestra aleatoria de población,¹⁴ mientras que para entender la evolución y los mecanismos de contagio de las pandemias hay que hacer tests aleatorios en diferentes muestras de población en cada

11 Véase por ejemplo: <https://peoplepill.com/people/besse-day>

12 William G. Cochran, Gertrude M. Cox, *Experimental Designs*, Wiley Classics Library, 1950, segunda edición de 1957, edición posterior de 1992.

13 Véase el artículo de Nancy Hall (en inglés): “Ronald Fisher and Gertrude Cox: Two Statistical Pioneers Sometimes Cooperate and Sometimes Collide”, *The American Statistician*, vol. 64, núm. 3 (agosto de 2010), pp. 212-220: <https://doi.org/10.1198/tast.2010.10043>

14 Véase la nota al final sobre las muestras y los intervalos de confianza.

territorio.¹⁵ Si la gente debe intervenir en un experimento que tiene dos partes, mejor decidir el orden cada vez a cara o cruz. Y si una encuesta incluye varias preguntas, su disposición ha de ir cambiando y ser aleatoria. Porque, como bien explicaba Gertrude Cox, el orden puede esconder nuestros deseos e influir en los resultados. Nunca debemos fiarnos de nosotros mismos.

Pero además de Gertrude Cox y Besse Day, la estadística está llena de personas científicas casi desconocidas que han ido creando el entramado riguroso que hoy nos permite entender algo mejor las sociedades, las pandemias o los desastres naturales. Podríamos hablar, entre otras muchas,¹⁶ de Evelyn Christalla Pielou, de Elisabeth Scott, de M. Jesús Bayarri, de Charlotte Kipling...

La complejidad del mundo, como la de la vida misma y la de las sociedades y especies vivas, es inmensa. Hay cosas que sabemos medir bien, como nuestra tensión arterial, mientras que otras, como las pandemias, se nos escapan o nos cuestan de entender. Alessio Figalli dice que es probable que el mundo sea mucho más complejo que nuestra capacidad para entenderlo, añadiendo que tampoco hay que entenderlo todo.¹⁷ Para entender aquello que se nos escapa debemos simplificar. Y aquí es donde la estadística nos puede ayudar, destilando determinados parámetros objetivos que nos iluminan algunos aspectos de la inmensidad de lo desconocido.¹⁸

El hecho de poder disponer de datos objetivos nos ayuda a comprender e incluso puede ser un camino hacia el sosiego, el silencio y el reencuentro con nosotros mismos, en la medida en que elimina el ruido externo que nos invade.¹⁹ La necesaria simplificación, sin embargo, no siempre es objetiva y desinteresada. Ciertamente es que la

15 Sorprendentemente, en 2020 y durante la pandemia del Covid'19, no se empezó a hablar seriamente de estudios estadísticos ni de tests aleatorios hasta pasadas siete semanas tras el inicio del estado de alarma en España. Y desgraciadamente, sin pruebas aleatorias, el conocimiento objetivo de la realidad no podía ser otra cosa que sesgado.

16 Podríamos hablar de Evelyn Christalla Pielou con sus trabajos sobre ecología matemática y su índice cuantitativo de equidad, de Elisabeth Scott (que estudió los sesgos observacionales en la detección de cúmulos galácticos lejanos), de M. Jesús Bayarri y el análisis Bayesiano, de Brigitte Escotier-Cordier y el análisis de correspondencias, de Charlotte Kipling con sus aplicaciones de la estadística a la pesca ecológica, de Evelyn Fix con su análisis de riesgos y la regla del vecino más cercano, y de muchas otras. Véase el libro de Guadalupe Gómez, Conxita Arenas *et al.*, *L'alfabet de l'estadística. Amb conceptes il·lustrats i notes biogràfiques de científiques eminentes* (en catalán), Ediciones de la Universidad de Barcelona 2020: <http://www.edicions.ub.edu/ficha.aspx?cod=12715>

17 Entrevista a Alessio Figalli. La Vanguardia, 6 de marzo de 2020: <https://www.lavanguardia.com/lacontra/20200306/473981064953/el-mundo-es-mas-complejo-que-nuestra-capacidad-de-entenderlo.html>

18 La estadística intenta descubrir patrones y leyes de comportamiento en grandes cantidades de datos. De hecho, el nombre "estadística" viene "de Estado", de los estudios que los Estados empezaron a realizar en el siglo XIX para empezar a entender sus sociedades. Del cálculo de las medias y varianzas se pasó al estudio de las probabilidades individuales y, con el tiempo, a la inferencia estadística y a la previsión de lo que puede llegar a pasar.

19 Ruido debido al exceso de información, a la banalidad comunicativa y la publicidad a todos niveles. Ruido que desaparece cuando lo filtramos para sólo quedarnos con aquello que hemos podido comprobar y con algunas pocas informaciones objetivas basadas en los hechos. Desaparición que posibilita el silencio y nos acerca a la meditación (notas de una conversación privada con Francisco de Paula Baró Rius, 27 de febrero de 2020).

estadística nos ayuda a simplificar y entender la realidad de manera no sesgada. Pero, como bien recuerda Josep Ramoneda, “la razón estadística nunca ha sido suficiente para calmar la sinrazón”.²⁰ Siempre existe el peligro de simplificar demasiado el mundo de manera subjetiva porque en determinadas circunstancias tendemos a distorsionar la realidad como mecanismo de defensa. Y en todo caso, y en palabras de Vicenç Fisas, deberíamos estar siempre atentos, porque con esta simplificación cognitiva la polarización social está servida.²¹

Cierto es que los análisis estadísticos son fácilmente manipulables y que sus resultados a menudo terminan degradándose en argumentos en manos de personas con extraños intereses. Pero Gertrude Cox, Besse Day, Charlotte Kipling, Helen Mary Walker y muchas otras nos dirían que éstos ocultan parte de los procedimientos estadísticos, despreciando interesadamente las precauciones metodológicas que Cox explicaba en los cursos y en su libro. Y nos recordarían que hay que aceptar la realidad tal como es, dejando los prejuicios cada mañana en la mesita de noche y reconociendo que la vida es probabilidad y riesgo, no una supuesta seguridad total. En este mundo que no podemos abarcar, el mañana es siempre un probable.

20 Josep Ramoneda, “La peste y el horror al vacío”, *El País*, 29-2-2020: https://elpais.com/ccaa/2020/02/28/catalunya/1582891915_370597.html

21 Vicenç Fisas, “El risc de jugar a crear imatges d’odi” (en catalán), *Ara*, 15-5-2020: https://www.ara.cat/opinio/vicenc-fisas-risc-jugar-crear-imatges-odi_0_2453154801.html

Preguntas, dudas y experimentos

Una historia protagonizada por Pierrette Paulze y Antoine Lavoisier

Hace casi dos mil quinientos años, Empédocles afirmó que la Tierra sólo contenía cuatro elementos básicos: el aire, el agua, la tierra y el fuego. Así como el aire con el agua producía espuma y el agua con el fuego creaba vapor que se diluía en el aire, los antiguos descubrieron que determinadas tierras, si se calentaban fuertemente al fuego, goteaban cobre o estaño fundido, los dos componentes que les permitirían fabricar bronce. Y ello les llevó a pensar que podrían encontrar procedimientos para que las tierras y piedras pudiesen rezumar otros metales fundidos como el oro y la plata. Así nació la alquimia.

No deja de ser chocante que a mediados del siglo dieciocho la gente continuara creyendo en los métodos de la alquimia y en los cuatro elementos de Empédocles. El Renacimiento y la Ilustración habían aportado luz en muchos ámbitos del conocimiento, pero no en el de la química. Y una de las teorías alquimistas de aquellos años era la de la existencia del flogisto. El flogisto era una misteriosa substancia que poseían la madera, el papel, al alcohol y todo lo inflamable. Cuando los objetos ardían, el flogisto formaba las llamas y desaparecía con el humo.

Durante siglos y siglos, nadie se preguntó el por qué de la combustión y nadie intentó entender, con experimentos y observaciones cuidadosas, sus mecanismos.

Pierrette Paulze nació en 1758 a Montbrison, un pueblo al este de Lyon. Su familia era acomodada, y todo hacía pensar en una infancia envidiable. Pero desgraciadamente, cuando tenía tres años, su madre murió. El padre, trastornado, decidió que lo mejor era separarla de sus tres hermanos y enviarla a un convento donde vivían algunas de sus tías. Aquellos años hubiesen podido convertirse en algo parecido a un encarcelamiento,

pero de hecho fueron su gran suerte. Creció bien atendida y cuidada, en un ambiente culto y con mujeres que la querían y que se preocupaban por su educación. Aprendió a escribir, estudió matemáticas, música, historia, geografía y otras materias, todo mientras dibujaba.¹ Iba creciendo y mejorando en la tranquilidad del convento.

Luego, a los 13 años, cuando ya había vuelto a casa, descubrió la realidad del mundo. Un influyente abate, Joseph Terray, la quería casar con un conde mucho mayor que ella, odioso e insensible. Por suerte, su padre (Jacques Paulze, señor de Chasteignolle) supo escuchar las quejas de Pierrette y encontró una solución: decidió casarla con Antoine Laurent Lavoisier, de 28 años. Antoine también había perdido su madre a los tres años y, amigo de Pierrette, compartía con ella intereses que iban desde la música hasta la astronomía y la química. Todo se desencadenó en pocos meses. El padre supo convencer al abad Terray, y éste les acabó casando en diciembre de 1771. Por decisión de su padre, Pierrette se había convertido en Marie-Anne Pierrette Paulze-Lavoisier un mes antes de cumplir los 14 años. Por cierto, Antoine Lavoisier era también de familia acomodada; heredó de su padre un cargo importante en la "Granja General", la institución que recaudaba impuestos para el gobierno de la monarquía francesa.

Los Lavoisier, Antoine y Marie-Anne, compartieron intereses científicos y culturales durante casi 23 años. No tuvieron hijos. Su objetivo y su razón de vivir fue la química. Ella quería aprender, él pensaba que difícilmente podía explicarle lo que él mismo no sabía, y ambos fueron descubriendo y avanzando juntos. Marie-Anne Paulze-Lavoisier dibujaba y tomaba nota de los experimentos mientras hacía de secretaria científica, de traductora y de publicista de lo que iban encontrando. Anotaba protocolos y resultados, dibujaba los aparatos y los montajes, lo documentaba todo. Pero debido a su modo de trabajo conjunto, se hace difícil separar las aportaciones individuales de Marie-Anne de las de Antoine. Y de hecho, aunque las publicaciones sólo llevan el nombre de Antoine, se supone, con fundamento, que una buena parte del trabajo de Antoine Lavoisier lleva las huellas de Marie-Anne Paulze.² Por ello, Antoine ha recibido el nombre de padre de la química mientras que a Marie-Anne se la conoce como la "madre de la química".

Marie-Anne y Antoine elevaron la química a la categoría de ciencia. En 1787, Antoine Lavoisier publicó (con otros colaboradores) la nomenclatura química que todavía utilizamos para explicar la composición de las sustancias (cloruro de sodio, fosfato de calcio, sulfato de cobre, nitrato de plata), estableciendo las bases de la química moderna. Gracias a Lavoisier sabemos que hay elementos químicos puros y compuestos y que las propiedades de los compuestos quedan determinadas por su fórmula, que los define cuantitativamente a partir de los elementos puros que los conforman.³

1 Dale DeBakcsy, "Marie-Anne Lavoisier And The Birth of Modern Chemistry", 2020: <https://women-youshouldknow.net/marie-anne-lavoisier-birth-modern-chemistry/>

2 Ver: Casandra T. Eagle y Jennifer Sloan, "Marie Anne Paulze Lavoisier: The Mother of Modern Chemistry", *Chemistry Educator*, vol. 3, 1998, págs. 1-18: <https://doi.org/10.1007/s00897980249a>

3 Ver la nota al final sobre los elementos y los compuestos químicos

Pero lo importante del método de trabajo de los Lavoisier eran sus cimientos, basados en el escepticismo, en preguntárselo todo, en comprobar una y otra vez, en los experimentos meticulosos y reiterados, en el rigor máximo en los procesos de medición. Su actitud escéptica y de constante duda les llevó a no aceptar como dogmas las “certezas” que venían de los tiempos de Empédocles. ¿Por qué sólo cuatro elementos? ¿A qué venía aquella extraña idea del flogisto? ¿Por qué ardían, algunos objetos? Las dudas les llevaron a las preguntas y las preguntas a la observación experimental.

Los Lavoisier tenían claro que toda afirmación debía basarse en una observación cuidadosa de la realidad. Supieron aplicar a la química los métodos que Galileo había empleado en el estudio de la mecánica de los cuerpos y los que habían llevado a Copérnico a descubrir que no estábamos en el centro del Universo. Gracias a ello, Antoine Lavoisier publicó una de sus grandes aportaciones: la del principio de conservación de la masa, que afirma que en toda reacción química, el peso conjunto de todas las sustancias antes y después es idéntico.⁴ Lo dedujeron tras muchos experimentos en los que pesaban todas las sustancias antes de empezar y una vez terminada la reacción, tanto si eran sólidos, líquidos o gases. Y además del principio de conservación de la masa descubrieron los mecanismos de la oxigenación, eliminando la necesidad del flogisto, descubriendo la existencia del oxígeno, y mostrando que la combustión, al igual que la oxidación, no es más que una reacción química con el oxígeno del aire.

Un buen porcentaje de lo que tendemos a dar por seguro se acaba demostrando que es falso e ilusorio. Hay quien nos dice que debemos creer sus dogmas y verdades “reveladas”, los medios de comunicación y las redes sociales nos apabullan con supuestas certezas. No es fácil detenerse, comprobar, pasarlo todo por el tamiz, estudiar la realidad. Marie-Anne y Antoine Lavoisier lo hicieron sistemáticamente con muchas ideas que la gente daba por ciertas. Gracias a sus comprobaciones, ahora hablamos de oxígeno y no de flogisto.

Y es que la ciencia es una actitud ante la vida. Lo explicó Atul Gawande, más de dos siglos más tarde, en el discurso de graduación que impartió a los estudiantes del Instituto de Tecnología de California.⁵ Les dijo que “si las cosas se han hecho bien, ahora todos os habéis convertido en científicos”. Ante la extrañeza de los que no eran de ciencias, continuó diciendo: “Y todos significa todos, incluso los de historia y los de filología inglesa.” Porque, añadió, “la ciencia no es una carrera sino un compromiso con una manera sistemática de pensar, es la lealtad a una actitud que desea construir el conocimiento y explicar el universo a través de pruebas y de la observación de los hechos.” El mensaje de Atul Gawande recordaba el legado de los Lavoisier: la ciencia

4 Arthur L. Donovan, sobre Antoine Lavoisier, Enciclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/biography/Antoine-Lavoisier>

5 Atul Gawande, discurso de graduación dirigido a los estudiantes del Instituto de Tecnología de California, 2016: <http://www.newyorker.com/news/news-desk/the-mistrust-of-science> – Sobre la actitud científica, véase también el libro de Lee McIntyre, *The Scientific Attitude: Defending Science from Denial, Fraud, and Pseudoscience*, MIT Press, mayo de 2019.

confiere una manera crítica de ver la realidad, y la actitud científica implica no creerse nada, dudar, preguntarse y mantener la mente abierta, observando los hechos y midiendo con rigor y sin prejuicios.

Freeman Dyson explica una anécdota que involucra a Albert Einstein y a Henri Poincaré.⁶ Comenta que Einstein pudo crear y proponer su teoría de la relatividad porque no creyó que la mecánica de Newton y la teoría del éter fueran dogmas inmutables; Poincaré, en cambio, a pesar de intuir lo mismo que Einstein, no se atrevió a refutar las creencias establecidas y terminó perdido en absurdas teorías.

La frase del militar que arrestó a Antoine Lavoisier el 28 de noviembre de 1793, “la república no necesita científicos”, desgraciadamente tenía mucho más de fanatismo que de postura científica. Y en pocos meses, Antoine fue juzgado y condenado a muerte por su implicación y trabajo en la institución de recaudación de impuestos que había heredado de su padre. Quién le iba a decir que la herencia de su padre le costaría la vida. De nada sirvieron las declaraciones de Marie-Anne durante el juicio, remarcando la relevancia de sus trabajos científicos y la importancia que éstos podían tener para Francia, e insistiendo también en que los beneficios de su trabajo en la “Granja General” habían sido empleados en los experimentos de su laboratorio. Antoine Lavoisier murió en la guillotina el 8 de mayo de 1794, y Marie-Anne fue condenada a prisión por su actitud desafiante durante el juicio. Tras dos meses, sin embargo, todo cambió. Cuando el guillotinado fue Robespierre, ella pudo salir de la cárcel. En pocas semanas el régimen del terror había matado no solo a su marido sino también a su padre.

Poco a poco, Marie-Anne Pierrette Paulze fue recuperando lo que le habían confiscado, incluyendo los equipos de laboratorio y la biblioteca de su padre. Pudo recopilar sus notas y dibujos y fue organizando lo que aún no habían podido publicar. El resultado fue el libro póstumo *Mémoires de Chimie*,⁷ en el que el único autor, curiosamente, es Antoine Lavoisier. Marie-Anne se volvió a casar, esta vez con Benjamin Thompson, pero la pareja se divorció en 1809. Luego, durante los 25 años que transcurrieron hasta su muerte, la casa de Marie-Anne Pierrette Paulze se convirtió en uno de los lugares europeos de encuentro y acogida de eminentes científicos como Laplace, Lagrange, Poisson, Monge, Humboldt y otros, que la frecuentaban para compartir y discutir nuevas ideas. Fue la casa de las preguntas, del debate y del conocimiento.

Somos seres realmente peculiares, como indica Carlo Rovelli.⁸ Rovelli explica que durante cientos de milenios, nuestros antepasados se reunían por la noche alrededor del fuego contando relatos y mitos fantásticos, fruto de una imaginación que los transportaba hacia el infinito. Pero por la mañana, aquellos mismos humanos

6 Freeman Dyson, *El científico rebelde*, Editorial DeBolsillo, 2010, p. 225.

7 Antoine de Lavoisier (1803, 1805), *Mémoires de Chimie*. Ver por ejemplo: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/library/R411ZWB4/index.meta&viewMode=index>

8 Carlo Rovelli, *Siete breves lecciones de física*, Ed. Anagrama, 2016. Traducción del italiano de J. Ramos Mena. Capítulo sobre “Nosotros”. Los mitos y las historias nos ayudan a vivir, pero únicamente nos son útiles cuando somos realmente conscientes de lo que son: mitos.

buscaban el rastro de los antílopes, escrutando los detalles de la realidad para deducir lo que no podían ver, siempre dispuestos a cambiar si encontraban un nuevo rastro. Por las noches inventaban historias, por las mañanas ya miraban con ojos de la ciencia. Porque para ser eficientes en la caza y para asegurarse el sustento, sabían que debían dejar los mitos en casa. Nos gusta inventar mitos e historias imaginarias, pero debemos mantener los pies en el suelo. Marie-Anne Pierrette Paulze-Lavoisier y Antoine Lavoisier supieron dejar los cuatro elementos y el flogisto en el rincón de los mitos, para dirigir su mirada hacia el rastro de los elementos químicos y las sustancias compuestas. Su disposición ante el mundo fue la misma que ahora nos recuerda Rovelli.

El modo de proceder de los Lavoisier fue también el de Maria Sibylla Merian que, hábil con el lápiz como Marie-Anne, un siglo antes ya había hecho observaciones muy precisas sobre la metamorfosis de las mariposas, dibujándolas y convirtiéndose en una de las iniciadoras de la entomología moderna.⁹ Fue también la actitud de muchos científicos rebeldes que en un momento u otro se opusieron a las guerras y al armamentismo.¹⁰ Y la de científicos como Hans Joachim Schellnhuber, que llevan décadas midiendo y analizando datos y advirtiéndonos sobre el gran peligro del calentamiento del planeta.¹¹ Pero es también la de todas aquellas personas que dudan, se preguntan, y comprueban. Cierto es que el lenguaje científico, formal y preciso, no siempre es comprensible; la ciencia puede ser difícil y complicada (necesitamos mucha más divulgación). Pero en cambio, la actitud científica está al alcance de todas las personas.¹²

Y de hecho, esta voluntad de duda y verificación nos lleva al concepto de humanismo científico, que surge de la constatación de que formamos parte de la naturaleza y de que los fenómenos sociales, morales y cognitivos humanos son parte de este mundo que esperamos poder llegar a entender. Se estructura a partir del estudio riguroso de lo que son y desean la gran mayoría de las criaturas conscientes,¹³ estudio que nos

9 Hay nueve mariposas y cinco plantas que llevan su nombre. Véase la biografía de Maria Sibylla Merian : <https://mujeresconciencia.com/2014/10/22/maria-sybilla-merian-una-valiente-entomologa/>

10 Freeman Dyson, *El científico rebelde*, Editorial DeBolsillo, 2010, págs. 93-171.

11 Hans Joachim Schellnhuber, exdirector del Instituto de Investigación de Potsdam sobre el Impacto Climático. Entrevista realizada por Physics.org, 2018: <https://phys.org/news/2018-08-earth-hothouse-state.html>

12 Véase por ejemplo: Lee McIntyre, *The Scientific Attitude: Defending Science from Denial, Fraud, and Pseudoscience*, MIT Press, mayo de 2019

13 El concepto de humanismo científico lo explica Michael Shermer (2019) en su artículo "Stein's Law and Science's Mission". Explica que los científicos sociales han descubierto que todo el mundo anhela y busca la libertad, y que también han comprobado que la pena capital no reduce las tasas de homicidio. Analizando objetivamente los hechos, explica que hemos podido ir descubriendo que la vida es mejor que la muerte, que la salud es mejor que la enfermedad, que poder comer es mejor que pasar hambre, que la felicidad es mejor que la depresión, que la riqueza es mejor que la pobreza y que la libertad es mejor que la esclavitud. Indica que ha podido constatar que el principio de ser amable y ayudar a los demás ha sido una estrategia exitosa durante toda la evolución humana, porque ha ido usando nuestra energía para ordenar, construir y sobrevivir juntos. Podemos construir el sistema ético del humanismo científico en base al estudio riguroso de lo que desean la gran mayoría de las criaturas conscientes y en base a la dignidad y los derechos de todas las personas, dice Shermer. El objeto de la ética que emana de la ciencia debe incluir todas y cada una de las personas del planeta, ahora y aquí. Porque todo lo que ahora es injusto y hace sufrir a alguien, debe corregirse ahora mismo y no en otra vida: <https://michael-shermer.com/2019/01/steins-law-and-sciences-mission/>

desvela tanto las bases éticas de este humanismo como los valores universales que debemos respetar: la dignidad y los derechos de todas y cada una de las personas del planeta. Este es el principio ético esencial del humanismo científico. Porque los que sufren hambre o violencia y quienes malviven o ven limitada su libertad son personas que viven en nuestro planeta y por tanto cerca de nosotros. Su sufrimiento lo está causando alguien. Y todas ellas tienen derecho a que los responsables corrijan la situación ahora y aquí, en palabras de Michael Shermer. No fue el caso de Antoine Lavoisier ni el de otras muchísimas personas.

En todo caso, esta actitud basada en el escepticismo es uno de los grandes regalos que nos viene de la ciencia. Como explica Simona Levi,¹⁴ es una forma de vida.

14 Simona Levi, *FakeYou: Fake news y desinformación*, Ed. Rayo Verde, Colección Ciclogénesis, 2019. La autora explica que es necesario actuar de manera efectiva contra las fake news. En democracia, dice, no pueden juzgar la libertad de información los mismos que invierten en crear desinformación: los gobiernos, los partidos políticos, los "mass media", las grandes corporaciones y las grandes fortunas. Necesitamos más rendición de cuentas y verificación y menos impunidad, paternalismo desinformado y monopolio de los medios y de los recursos informativos. Y por nuestra parte, debemos comprobarlo todo: "si tu madre dice que te quiere, no te lo creas; compruébalo!". En resumen, debemos comprobar, no solo para ver si lo que nos llega es falso, sino para descubrir quien nos quiere engañar, para entender el por qué, y para luego poder denunciar impunidades y pedir rendición de cuentas. Porque la responsabilidad de analizar sistemáticamente la publicidad (comercial o política) de manera crítica y contrastada es solo nuestra.

Los límites

Una historia protagonizada por Eunice Newton, Lynn Margulis y muchas otras

Eunice Newton nació el 17 de julio de 1819 en Goshen, un pequeño pueblo en Connecticut. Tenía seis hermanas y cinco hermanos. A los 17 años entró en el seminario femenino de Troy en el estado de Nueva York, y tuvo la suerte de encontrarse con buenos maestros, que la ayudaron. Además, supo aprender ciencias y en particular química y biología en una facultad de ciencias cercana. Poco después, a los 22 años, se casaba con Elisha Foote, juez, matemático e inventor, adoptando el nombre de casada de Eunice Newton Foote. La pareja tuvo dos hijas y seis nietos.

Eunice se interesaba y entusiasmaba por todo. Pintaba, leía, aprendía, observaba. Quería entender lo que veía a su alrededor, y pronto empezó a experimentar. Con Elisha hacían buena pareja y se ayudaban. A los 30 años y siendo ya madre, se hizo una de esas preguntas extrañas que interesan a determinadas personas con inquietud científica. Viendo que el Sol calienta el aire y sabiendo que el aire es una mezcla de gases y vapor de agua, pensó: la luz solar, ¿calienta todos los gases de la atmósfera por igual?

Para comprobarlo, diseñó varios experimentos con parejas de tubos de vidrio de unos 70 cm. de largo, tapados por ambos extremos y con termómetros que atravesaban los tapones y permitían medir la temperatura interna. En uno de los experimentos preparó uno de los tubos con aire seco mientras que en el segundo tubo, idéntico al primero, se aseguró que contuviera aire húmedo. En un segundo experimento, usó el mismo primer tubo de aire seco pero en el segundo sustituyó al aire por dióxido de carbono, CO_2 .¹ Una vez preparados, Eunice cerraba herméticamente los dos tubos. El

¹ Eunice Newton Foote realizó también experimentos con hidrógeno y otros gases, siempre comparando resultados en dos tubos de vidrio idénticos.

experimento consistía en dejarlos primero en el interior de su casa hasta que los termómetros de ambos tubos indicaban la misma temperatura ambiente. Acto seguido, los sacaba al exterior, los dejaba al Sol durante unos pocos minutos, e iba midiendo minuto a minuto la evolución de la temperatura dentro de cada uno de ellos. El resultado fue claro: el aire húmedo se calentaba más que el aire seco, pero el que más subía de temperatura, con gran diferencia, era el dióxido de carbono. De hecho, en sus experimentos, el tubo con CO₂ pronto alcanzó los 51 grados de temperatura. Aunque el vapor de agua absorbía calor, el dióxido de carbono era el gas que más atrapaba el calor del Sol, amplificando el efecto invernadero que todos los tubos de vidrio producían en su interior.

Eunice intuyó que había hecho un hallazgo importante. Animada por Elisha, escribió un artículo² y lo envió al congreso de la Asociación Americana para el avance de la ciencia de 1856. Su conclusión era que la concentración de CO₂ en el aire influía en la temperatura atmosférica, de tal modo que si en algún momento de la historia de la Tierra hubiera habido una mayor concentración atmosférica de CO₂, la temperatura forzosamente debería haber sido más elevada. El artículo fue aceptado, pero pronto topó con un muro: siendo mujer, no le permitieron presentarlo. Que una mujer hablara en un congreso científico en aquellos momentos era inaceptable. Finalmente, la “solución” fue que lo acabó explicando un profesor de la Smithsonian Institution, Joseph Henry.

En todo caso, a Eunice Newton Foote este hecho no la sorprendió. Unos años antes, en julio de 1848, había ya participado activamente en la primera convención para debatir los derechos “sociales, civiles y religiosos” de la mujer, en Seneca Falls y era consciente de la marginación social de las mujeres. Eunice se encuentra en la lista de personas asistentes a la convención junto a Elisha, uno de los pocos hombres que participaron.³ Eran tiempos muy difíciles para mujeres creativas en campos como el de la ciencia.

El trabajo de Eunice quedó olvidado mientras que pocos años después, el investigador irlandés John Tyndall obtenía resultados similares al otro lado del océano. Tyndall pudo publicarlos en los Proceedings of the Royal Society, pasando a ser reconocido como el descubridor del efecto invernadero.

En todo caso, y también en 1856, la revista *Scientific American* publicó un artículo en apoyo de las mujeres científicas. Se criticaba la discriminación y la idea generalizada en ese momento según la cual “las mujeres no poseen la fuerza mental necesaria para la investigación científica”. El artículo reconocía asimismo la tarea y el mérito de Eunice Newton Foote, observando que sus experimentos demostraban la capacidad de la mujer para investigar cualquier tema “con originalidad y precisión”.

2 El título del artículo era: “Circumstances affecting the Heat of the Sun’s Rays”

3 Ver por ejemplo: <https://www.nps.gov/wori/learn/historyculture/signers-of-the-declaration-of-sentiments.htm>

Eunice Newton Foote murió en septiembre de 1888, cinco años después de la muerte de su compañero de vida Elisha y sin prácticamente reconocimiento alguno por su hallazgo científico. Faltaba medio siglo para el nacimiento de Lynn Margulis y más de 80 años para la publicación del primer informe Meadows del Club de Roma. En aquellos momentos, a finales del siglo XIX, hablar de calentamiento global era imposible así como defender los derechos de las mujeres era inaudito.

Lynn Margulis nació en Chicago en 1938, siendo la mayor de cuatro hijas. Sus padres, abogado él y empresarios ambos, quisieron darle una buena educación, aunque durante el bachillerato no hacía caso de nada y muchas veces terminaba castigada. Después, en la universidad, empezó a gozar con la ciencia, se licenció en biología, y a los veintidós años obtuvo su título de máster en genética y zoología.

Se casó con Carl Sagan antes de los 20 años, pero se separaron siete años más tarde, en 1964, después de tener dos hijos. Su segundo matrimonio, con el cristalógrafo Thomas N. Margulis, duró trece años, de 1967 a 1980, durante los cuales tuvieron otro hijo y una hija. Pero sufrió fuertemente los efectos de querer ser mujer y científica a la vez. Decía a menudo que las mujeres lo tienen muy difícil, lamentando haber tenido que dejar su trabajo dos veces “para ser mujer” y observando que “es humanamente imposible ser una buena esposa, una buena madre y una científica de primer nivel”.

Su carrera profesional se intensificó a partir de la separación con Carl Sagan, comenzando un contrato de profesora titular en la Universidad de Brandeis en 1964 y terminando el doctorado en la Universidad de California, Berkeley en 1965. Ya doctora, estuvo investigando y enseñando biología en la Universidad de Boston entre 1966 y 1988, los primeros años ejerciendo como madre y esposa ya partir de 1980 ya separada.

Margulis es conocida por sus estudios que la condujeron a formular la teoría endosimbiótica sobre el origen de las células eucariotas⁴ a partir de la simbiosis entre dos células, publicada en 1967 tras una larga carrera de obstáculos. Pero también por plantear la hipótesis Gaia sobre el equilibrio planetario y el sistema ecológico global que la vida ha ido regulando y adaptando a lo largo de millones de años. El artículo de 1974 de Lynn Margulis con James E. Lovelock indicaba que la vida, ya desde sus inicios, había generado una homeostasis atmosférica⁵ que era beneficiosa para su continuidad. Con su trabajo, Margulis y Lovelock fueron los primeros en plantear los mecanismos de autorregulación de la biosfera y en proponer que toda la Tierra (océanos,

4 La teoría endosimbiótica sobre el origen de las células eucariotas a partir de la simbiosis entre dos células pudo ser publicada en 1967 tras una larga carrera de obstáculos.

5 El artículo de Margulis y Lovelock se titula “Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis”, *Tellos*, 26- 1-2, págs.. 2-10 y se encuentra en este enlace: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v26i1-2.9731> . El artículo explica la hipótesis de que, en palabras de los autores, “las condiciones físicas y químicas de la mayor parte de la superficie planetaria han sido siempre las más favorables para la vida. Fueron siguiendo un camino cuyos límites son las condiciones que favorecen la continuidad de la vida. [Podríamos decir que] al comienzo de la vida, ésta adquirió el control del entorno planetario con una homeostasis de la biosfera y para la biosfera que ha perdurado desde entonces”.

rocas, atmósfera y seres vivos) funciona como un inmenso sistema viviente que va modificando su composición para garantizar su perpetuación. Margulis explicaba que fueron los vegetales los que llenaron el planeta primitivo refrescándolo y fabricando el oxígeno que ahora respiramos, cuando la atmósfera estaba cargada de dióxido de carbono y el calor pronosticado por Eunice Foote se hacía insoportable.

Lynn Margulis hablaba de cooperación, tanto a nivel planetario como a nivel celular. Decía que la simbiosis es un pacto, en el que la recombinación siempre genera algo nuevo. A partir de 1989 ejerció como catedrática en el departamento de Geociencia de la Universidad de Amherst (Massachusetts), viajando y dando conferencias por todo el mundo. Nunca paró de trabajar. Falleció el 22 de noviembre de 2011 en su domicilio, a consecuencia de un accidente cerebrovascular.

Y Eunice Newton Foote no quedó perdida definitivamente en el océano del olvido gracias a una casualidad. En 2010, Ray Sorenson, geólogo jubilado, encontró por azar el artículo de Eunice de 1856 en un volumen de recopilación de descubrimientos que se había publicado en 1857. Sorenson, que conocía los trabajos de John Tyndall, mientras iba leyendo el artículo de Eunice vio que la descubridora del efecto invernadero había sido ella y no Tyndall, porque la publicación de Eunice Newton Foote era tres años anterior a la de Tyndall. Ray, emocionado, escribió y publicó su hallazgo en la revista *Search and Discovery*, en un artículo que acabó siendo el más leído de todos los que Sorenson escribió durante su vida.

Aún existe un debate abierto sobre si Tyndall aprovechó y se apropió en cierto modo de los trabajos de Eunice. Pero esto ya no es importante. El tiempo ha puesto las cosas en su sitio. Todo ello gracias a un doble regalo del azar: el descubrimiento del artículo original de Eunice Newton Foote de 1856, y el hecho de que quien lo encontró, Ray Sorenson, sabía lo suficiente del tema como para entender que el mérito era de Eunice Newton Foote, pudiendo así reescribir este pequeño pedazo de historia.

Eunice Newton Foote no tuvo suerte. El artículo de 1856 sobre mujeres científicas en el *Scientific American* fue uno de los pocos reconocimientos que recibió en vida. Pero ahora sabemos que, de los 16 artículos de física que fueron publicados por mujeres de Estados Unidos durante el siglo XIX, sólo dos se publicaron antes de 1889. Ambos fueron escritos por Eunice Foote.

Eunice Foote nos avisó del peligro que podía comportar el efecto invernadero derivado de emitir demasiado dióxido de carbono en la atmósfera, mientras que Lynn Margulis nos recordaba que la vida en nuestro planeta hasta ahora ha sabido modificar el entorno para garantizar su perpetuación. Pero la humanidad, con un consumo enloquecido de combustibles fósiles y de todo tipo de recursos naturales, en sólo un siglo le ha puesto las cosas difíciles al equilibrio ecológico de Gaia. Nos lo han recordado 234 científicos de 66 países, en un informe muy riguroso publicado en agosto

de 2021.⁶ Explican que el calentamiento del planeta es antropogénico, que está generando una crisis ambiental sin precedentes, y que sus efectos se dejarán sentir las próximas décadas. Unos efectos que pueden ser devastadores tanto para la especie humana como para toda la biosfera, pero que sobre todo, a largo plazo, caerán como una maldición sobre nuestras generaciones futuras. Porque la Tierra saldrá adelante, y el sistema homeostático del planeta seguro que dará paso a nuevas formas de vida. La humanidad, no lo sabemos.

Lynn Margulis fue admitida en la National Academy of Sciences de Estados Unidos en 1983. Entre otras muchas distinciones, recibió la medalla Nacional de Ciencia de manos del presidente Bill Clinton en 1999.⁷

En los últimos siglos nos hablan de codicia por los recursos, de colonialismo e incluso de esclavitud. Después, y desde hace un siglo, hemos ido siendo cautivados por la civilización del petróleo y sus promesas de prosperidad y crecimiento sin límites. En los países del Norte global tenemos de todo, podemos viajar donde queremos y podemos comprar lo que no necesitamos. Pero no hemos entendido algo tan sencillo como que ya no podemos colonizar más tierras y que Gaia tiene unos límites que debemos respetar. Y es que, desgraciadamente, hemos terminado saliendo del círculo de los límites ecológicos de la Tierra. En 2021, el 29 de julio la humanidad ya había gastado todos los recursos planetarios que ecológicamente podía utilizar durante todo el año.⁸

Pero la historia de Eunice Foote, la de Lynn Margulis, así como la de Paola Arias, Nicolas Bellouin, Erika Coppola y el resto de las más de 750 personas que compartieron el trabajo del IPCC con ellas, es la historia de la medida y del descubrimiento de los límites. Como también lo es el trabajo de Sergey Nurk, Sergey Koren, Arang Rhie y otros 96 compañeros que descodificaron toda la secuencia de 3.055 millones de pares de

6 Documento del primer grupo de trabajo (WGI) en el sexto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), publicado el 9 de agosto de 2021. Resumen técnico de 159 páginas elaborado por 234 científicos de 66 países con la ayuda de 517 científicos adicionales: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf

7 Ver por ejemplo: <https://science.nasa.gov/lynn-margulis-1938-2011>

8 Lo explica la organización *Earth Overshoot Day*: <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-june-2021-english/> - La misma organización ofrece gráficos por países y de la evolución temporal de este día del desbordamiento global en los que se ve que algunos países, como Qatar o Liechtenstein, en febrero ya han utilizado todos los recursos del año: <https://www.overshootday.org/newsroom/infographics/>

nucleótidos de los más de 63 mil genes de nuestro ADN,⁹ y que nos mostraron la cruda realidad de nuestro límite biológico: el ADN nos describe y codifica tanto nuestros rasgos físicos como nuestras carencias y la predisposición a contraer determinadas enfermedades. Lo podemos guardar en formato digital, ocupando menos de un gigabyte. Somos tan limitados que podemos almacenar nuestro ADN en cualquier lápiz de memoria. Esto es lo que somos.

Con múltiples datos y medidas, Paola Arias y sus compañeros nos están explicando que ya nos hemos salido de los límites y que la humanidad ha logrado alterar el sistema homeostático de la Tierra. Y es que cuando medimos u observamos los hechos sin prejuicios, encontramos esos límites que hasta entonces nos negábamos a ver. Límites biológicos de nuestro ADN, límites en la concentración de gases de efecto invernadero, límites en el equilibrio de la biosfera que no deberíamos romper, límites en los recursos que estamos extrayendo de la Tierra, límites que nos demuestran que ya hemos cruzado las líneas rojas.

Se habla demasiado de objetivos y de tasas de crecimiento, y muy poco de límites. Se habla de mejorar el nivel de vida pero no del concepto ecofeminista de subsistencia.¹⁰ Todo son intereses, beneficios, incremento del PIB, expansión comercial, pero nadie hace caso al profético informe del Club de Roma, que escribió el matrimonio Meadows.¹¹ ¿Hasta dónde queremos llegar? Aunque en el mundo todo es limitado, casi nadie piensa en ello porque la sociedad occidental se ha instalado en la desmesura¹²

9 El gran resultado del trabajo de Sergey Nurk, Sergey Koren, Arang Rhie y sus 96 compañeros publicado en 2021 fue la decodificación completa de toda la secuencia de 3.055 millones de pares de nucleótidos que conforman nuestros más de 63 mil genes. Y es que, en menos de un siglo, la humanidad ha pasado de descubrir la existencia de la molécula de ADN en saber leerla en su totalidad. Lo ha hecho con una historia apasionante que supera en mucho lo que podamos llegar a imaginar. El ADN es la historia de la vida y de esas ramas de la evolución que nos han ido construyendo, una historia que tantas veces nos sorprende a pesar de que la llevamos en nuestro interior. Porque compartimos partes del ADN con los primates, pero también con los ratones, las aves, los peces, las moscas e incluso con las plantas (el 61% de los genes de enfermedades humanas que conocemos los encontramos ya en el ADN de la mosca del vinagre). La vida se ha ido escribiendo en el ADN durante todo el camino evolutivo, incrementando lentamente su información con un sistema de codificación química que la naturaleza acabó encontrando hace millones de años. El resultado ha sido este increíble libro de la cultura de vida que nos define y que es el ADN. Un producto de la evolución que, en un proceso fascinante, ha ido abriendo la puerta a la humanización hasta permitir que pudiéramos descifrar nuestra codificación. A finales de mayo de 2021 supimos aprender por primera vez, pudiendo disfrutar del maravilloso poema evolutivo que nos ha hecho creativos, escritores, artistas, matemáticos y filósofos: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.05.26.445798v1.full>

10 “La búsqueda de la libertad... pasa por concentrarse en el desarrollo de una concepción de la libertad, de la felicidad, de la ‘buena vida’ dentro de los límites de la necesidad y de la naturaleza... Hemos designado esta visión como la perspectiva de la subsistencia, porque el empeño de ‘trascender’ la naturaleza ya no es justificable, sino que, por el contrario, debemos alimentar y conservar el potencial de subsistencia de la naturaleza en todas sus dimensiones y manifestaciones. La libertad... puede universalizarse para abarcar a todos y todas”, María Mies y Vandana Shiva, *Ecofeminismo* (en catalán), Icaria, 2014, p. 51. Una subsistencia que es intrínsecamente sostenible porque se plantea mantener y respetar los equilibrios ecológicos, protegiendo así la vida y las criaturas del futuro.

11 Informe Meadows, *The limits to growth*: <https://clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>

12 Sobre el exceso, la desmesura y la arrogancia (*hybris*), véase por ejemplo “Convivialisme: Per un món postneoliberal”, segundo manifiesto de la internacional convivialista (en catalán, www.convivialisme.org), Editorial Montaber, 2020

del negocio. Eso sí, cada vez más hay gente que nos avisa y nos dice que deberíamos cambiar, empezando por saber dónde queremos ir como especie, por encontrar y aceptar nuestros límites, por exigir cambios a quienes pretenden enriquecerse con políticas y actividades que nos están destruyendo, y por pedir responsabilidades. Son actitudes que pueden parecer exóticas en un momento en que lo habitual es la desmesura. Pero en su teoría económica del estado estacionario, Herman Daly constataba que la economía clásica no dispone de ningún mecanismo para registrar el coste económico cuando el crecimiento nos acerca a los límites de la biosfera, proponiendo medidas como limitar el crecimiento demográfico, ir hacia una economía ecológica y establecer un salario máximo,¹³ porque en un entorno de límites, los máximos son esenciales. Casi nadie le escuchó.

13 Véase la nota final sobre los modelos, la simulación y la optimización.

Epílogo

Los colonizadores y la sociedad han adoptado una postura de superioridad y por tanto de responsabilidad con respecto al futuro de la Tierra y a otros pueblos y culturas. De esta supuesta superioridad deriva la realidad de las cargas que el hombre blanco ha impuesto a la naturaleza, a las mujeres y a otras personas.

Vandana Shiva

Las personas que protagonizan las historias de este trabajo tuvieron que luchar contra todo tipo de dificultades y prejuicios, pero acabaron descubriendo pequeños rincones de belleza inaudita mientras descifraban párrafos del gran libro del conocimiento del universo. Algunas pudieron ver reconocido su trabajo, otras fueron descubiertas casi por casualidad. Muchas continuarán desconocidas para siempre.

Aparte de lo que nos legaron, además de su lucha vital y de los hallazgos científicos que he intentado ir presentando en pinceladas, nos dejaron el regalo de su actitud y de sus principios éticos. Lo hicieron en silencio, sin ningún afán de protagonismo social. Pero estos principios no pueden ser más actuales. Incluyen la sorpresa constante frente a lo que vemos en el mundo, sorpresa que nos lleva a observar con la mirada de los niños sin dejar de plantear preguntas, pero que también trata con el máximo escepticismo las informaciones de origen dudoso. Significan una voluntad constante de entender los hechos de forma objetiva, con experimentos rigurosos y mediciones que nos desvelan la ubicuidad de los límites, porque todo lo medible es limitado. Implican ser conscientes de que hay cosas que nunca podremos hacer y otras que nunca podremos saber. Las personas de los relatos, siendo plenamente conscientes de los límites, nos hablaron de moderación, equilibrio, imperfección y finitud. Conceptos

que ahora deberían protegernos de la desmesura y la destrucción. Porque somos parte de ese equilibrio ecológico de Gaia que no tenemos derecho a romper, porque debemos cuidar de la biosfera, porque todas las personas merecen una vida digna, porque la violencia deshumaniza a los demás, porque el privilegio de entender nuestra mortalidad nos lleva a comprender la absurdidad de conquistar, depredar y violentar.

Justamente ahora empezamos a darnos cuenta de que tenemos retos hasta ahora desconocidos, y que los más importantes afectarán a toda la especie humana. Tras siglos de razonar en términos de países y fronteras, sorprendidos, empezamos a ver que muchos de los grandes problemas que tenemos y tendremos serán globales y transfronterizos: el calentamiento global, la crisis climática, las pandemias, la destrucción de la biodiversidad y muchos otros. Problemas que estamos descubriendo que no son ni independientes ni casuales. Al mismo tiempo, vamos entendiendo que buena parte de las responsabilidades se concentra en entidades no democráticas que se mueven con el objetivo de conseguir el máximo beneficio económico despreciando la dignidad de las personas. El negocio en vez de la gente.

¿Pero de dónde viene este afán por el negocio, el poder desmedido y la violencia? Mirando más allá, Virginia Woolf ya explicaba que las causas hay que buscarlas en lo que ella llamaba cualidades viriles.¹ Decía que son los valores masculinos los que generan el deseo incontrolado de poder, la desmesura que afecta al planeta y las generaciones futuras, la violencia y la guerra, la necesidad de vencer a los Otros, el interés por detener a los prescindibles a las fronteras. Y es que en el origen de la voluntad de conquista y de la colonización global de recursos, en el origen de los sistemas de seguridad militar que garantizan su continuidad, encontramos, escondidos, los esquemas patriarcales, como ella nos hizo notar. Unas estructuras que se nos han hecho tan naturales que casi nadie les cuestiona.

El actual modelo de sociedad occidental es éticamente injusto con las personas despojadas de la Tierra, ignora su dignidad, e incluso llega a considerarlas prescindibles. Sus esquemas de crecimiento desprecian los mensajes que vienen tanto de la ciencia como de los movimientos sociales, “garantizando” por la fuerza y con violencia nuestro artificial nivel de vida, enriqueciendo a los poderosos y manteniendo un ritmo de depredación de recursos que puede acabar haciendo inhabitable el mundo de nuestros bisnietos.

1 Virginia Woolf en *Three Guineas*, Hogarth Press (en inglés), 1938, p. 98 y páginas 129-130, dice: “Se nos impone una imagen. Es la figura de un hombre; algunos dicen, otros niegan, que es el propio Hombre, la quinta esencia de la virilidad, cuyo tipo perfecto todos los demás son sólo sombras... Su cuerpo, en posición poco natural, está bien encajado en un uniforme. Sobre el pecho de este uniforme lleva cosidas varias medallas y otros símbolos místicos... Detrás de él hay casas en ruinas y cadáveres: hombres, mujeres y niños... Sin guerra no habría salida para aquellas cualidades viriles que la lucha desarrolla, puesto que luchar es una característica sexual que ella no puede compartir, con la contrapartida del instinto materno que él no puede compartir”.

En cambio, muchas de las personas protagonistas de este trabajo vivieron lejos de las riquezas, se descubrieron frágiles. Vivieron con medida,² decidieron cuidar, quisieron ser cuidadas. Y escondidas en el valle de los límites, lo explicaron. Aunque muchos de sus mensajes se perdieron, algunos, muy actuales, nos han llegado. Su actitud nos ayuda a entender nuestro lugar en el mundo, desenmascarando los discursos que ignoran las fronteras ecológicas y convergiendo con los del ecofeminismo,³ los movimientos por el clima y la sociedad civil. Porque el equilibrio ecológico y la sostenibilidad del planeta y su biosfera conecta con el principio ecofeminista de la subsistencia.⁴ Así mismo, los mensajes de rechazo de la violencia y de respeto a la dignidad esencial de todas las personas nos hablan de pacifismo, mientras que la mortalidad y la conciencia de nuestra vulnerabilidad nos llevan a los cuidados del feminismo y el análisis tanto de la crisis climática y ambiental como de sus perspectivas nos hermana con los movimientos por el clima.

El conjunto de actitudes y principios que hemos ido encontrando en las personas de ciencia, que personas como Michael Shermer o Atul Gawande engloban en el concepto de actitud científica, pueden ser muy recomendables a nivel personal. Pero también tienen una dimensión política esencial. Y es que muchas de las decisiones que la humanidad tome en los próximos años incidirán directamente en la vida de nuestros nietos y de sus descendientes. En ese contexto, no podemos olvidar la fuerza de todos estos principios de vida. Tal vez es por eso que el pintor Antonio López decía que “habría que escuchar a los hombres de ciencia más que a los banqueros; así debe ser para el bien de toda la gente”.⁵ Ciertamente, habría que escuchar y hacer política teniendo en cuenta lo que dicen los hombres de ciencia y sobre todo las mujeres de ciencia, atendiendo también a los mensajes que llegan desde posiciones alejadas de los intereses dominantes en el mundo.

Otro mundo es posible y necesario,⁶ un mundo que deje atrás el miedo ancestral que tantos mitos ha ido creando y que nos ha llevado, por el camino de los valores patriarcales, al empeño desmedido de poder, a la violencia, a la dominación, a creer que somos mejores que los otros, a la destrucción, las armas y las guerras. Otro mundo y

2 La palabra “medida” tiene el doble significado de medir el valor de algo y de usar los medios de forma proporcionada a los fines. Para descubrir los límites hay que observar y medir de forma rigurosa, como hacen las personas científicas. Por otra parte, la cultura de los límites se relaciona con mantener una actitud comedida y mesurada.

3 Mientras que la ciencia nos explica que es necesario volver a poner a las personas y al planeta en el centro para restablecer el equilibrio ecológico, Cara Daggett insiste en la relación entre “las masculinidades tóxicas, el negacionismo climático y el racismo, así como de la relación entre extractivismo, combustibles fósiles, autoritarismo y patriarcado”.

4 “Debemos alimentar y conservar el potencial de subsistencia de la naturaleza en todas sus dimensiones y manifestaciones. La libertad... puede universalizarse para abarcar a todos y todas”, María Mies y Vandana Shiva, *op. cit.*, p. 51. La subsistencia es intrínsecamente sostenible porque se plantea mantener y respetar los equilibrios ecológicos, protegiendo así la vida y las criaturas del futuro.

5 “Entrevista a Antonio López”, *El País*, 2011: https://elpais.com/diario/2011/06/17/cultura/1308261601_850215.html

6 Arcadi Oliveres, véase por ejemplo *Paraules d’Arcadi: què hem après del món i com podem actuar* (en catalán), Angle Editorial, 2021.

otra cultura que escuchen las voces de las personas de ciencia, que acepten de una vez que formamos parte de la naturaleza, que somos iguales y vulnerables, que no podemos hacer lo que queremos y que debemos convivir, dialogar y cuidarnos en un mundo que, en lugar de dominar, debemos respetar. O cambiamos ahora o nos destruiremos.

El camino que puede salvarnos incluye tanto la visión científica como la ecofeminista. Escuchar y aprender con mente abierta nos puede ayudar, atendiendo también a los pueblos del Sur y los indígenas; con un respeto que se traduzca en detener la depredación de recursos, en la acogida de las personas migrantes y en la reparación de los daños coloniales. Porque, como dice Carol Gilligan, en un contexto patriarcal, los cuidados son una ética femenina, pero en un contexto democrático, el cuidado de las personas es la ética humana. Es un camino que implica aceptar nuestra pequeñez y fragilidad. Un camino que podremos recorrer con los recursos de la cultura femenina, como explicaba Giulia Adinolfi.⁷

Y en ese camino, deberíamos asumir nuestra responsabilidad planetaria. No podemos quedarnos tranquilos cambiando sólo nuestra actitud personal. Deberíamos ser políticos, indignarnos, y exigir a los poderosos que acepten los límites y retrocedan, porque de lo contrario el desastre global está servido.

¿Podemos continuar instalados en la actual civilización del petróleo? La ciencia nos dice que es extremadamente urgente dotarnos de una nueva geopolítica de salvación de la especie humana, de la biosfera y del planeta que pase por eliminar los combustibles fósiles, superando las inmensas resistencias y presiones que vendrán de los grandes poderes transnacionales del negocio fósil. Como manifestaban más de 15 mil científicos en 2017,⁸ “la actual obstinada [e interesada] oposición puede ser superada con una gran ola de esfuerzos que vengan de organizaciones surgidas desde los pueblos, para que los líderes políticos se vean obligados a hacer lo correcto”. Las personas científicas del movimiento Extinction Rebellion⁹ ya han empezado a actuar.

¿Tiene algún sentido la actual carrera armamentística? Debemos oponernos a que se gasten miles de millones de euros en armas, pidiendo en cambio que los gobiernos atiendan las necesidades reales de las personas. Ante acuerdos inauditos de incremento de los presupuestos militares como el que la OTAN ha tomado en 2022, es necesario exigir una reducción del gasto militar. Porque en el siglo XXI los conflictos

7 Giulia Adinolfi, “Sobre las contradicciones del feminismo”, *Mientras Tanto*, vol 1, noviembre 1979. Recopilación en *Mientras Tanto*, núm. 94, especial dedicado a Giulia Adinolfi, primavera de 2005: <http://mientrastanto.org/sites/default/files/mt94.pdf>

8 William Ripple, Christopher Wolf y otros, “World Scientists’ Warning to Humanity: A Second Notice”. *Bioscience*, 67, 12, 2017, 1026–1028: <https://academic.oup.com/bioscience/article/67/12/1026/4605229?login=false>

9 Científicos del movimiento “Extinction Rebellion”: <https://www.scientistsforxr.earth/>

deberían tener soluciones dialogadas y post-violentas, y porque la gran crisis ambiental nos exige todos los recursos disponibles. Ya nos lo dijeron más de 1700 científicos en 1992:¹⁰ es necesario trasladar dinero del complejo militar hacia lo que ahora importa. Esta reducción de los presupuestos militares, propuesta por el IPB,¹¹ muchos premios Nobel y tanta otra gente, debería servir también para nutrir los sistemas educativos, de salud y de cuidados. Y es que proteger el clima y el bienestar de las personas cuesta menos que perpetuar la violencia.¹²

¿Se está actuando a favor de la gente? Es imprescindible que los gobiernos reviertan las prioridades, escuchando las voces que llegan desde las humanidades, las artes y la ciencia. La emergencia actual requiere un esfuerzo común coordinado y solidario a nivel planetario, con un nuevo orden mundial que sea respetuoso con la gente y al planeta, que cuide la biosfera y que deje atrás la actual plutocracia para ir hacia las soluciones realmente democráticas.

¿Debemos aceptar el paradigma del bienestar basado en el crecimiento? Más bien deberíamos movilizarnos para que la política incorpore los mensajes científicos de los límites, con soluciones sostenibles y de decrecimiento que nos permitan volver a entrar en el círculo del equilibrio ecológico que hemos sobrepasado con absoluta imprudencia.

¿Estamos construyendo un futuro digno? En realidad deberíamos exigir y hacer un gran esfuerzo educativo para que las nuevas generaciones comprendan que debemos convivir en paz, que todos somos “Nosotros”, y que debemos enterrar los esquemas patriarcales, el racismo y la xenofobia. Caminando hacia una nueva cultura inclusiva con perspectiva ecofeminista.

Vemos que los retos actuales, como ya nos explicaron Virginia Woolf, Buckminster Fuller y otras muchas personas, son imposibles de alcanzar sin cambiar y superar el

10 En noviembre de 1992, unos 1.700 científicos del mundo, incluyendo la mayoría de premios Nobel en ciencias que vivían en aquel momento, hicieron una advertencia a la humanidad. Dijeron que las actividades humanas provocan daños que a menudo son irreversibles para el medio ambiente, y que muchas de nuestras prácticas actuales ponen en grave riesgo el futuro que deseamos para la sociedad humana. Y dijeron textualmente: “El éxito de este esfuerzo mundial requerirá una gran reducción de la violencia y de la guerra. Los recursos dedicados actualmente a preparar y hacer las guerras, que ascienden a más de un billón de dólares anuales, serán muy necesarios para las nuevas tareas, y deberíamos desviarlos por tanto hacia estos nuevos retos”

11 Joan Margarit decía que “Debemos tomar todo el dinero que se dedica a los oficios que se hacen con un disfraz, como jueces y militares, y destinarlo a la educación. Es lo único que puede salvarnos de la dictadura” (https://www.ara.cat/cultura/joan-margarit-guanya-premi-premio-cervantes_1_1144230.html). Por otra parte, el *International Peace Bureau* (IPB), con su campaña GCOMS, pide la reducción del gasto militar y mundial para dedicarla a las necesidades reales de las personas: (<https://www.ipb.org/global-campaign-on-military-spending/>). Y a finales de 2021, más de 50 premios Nobel pidieron que todos los gobiernos del mundo redujesen cada año un 2% su presupuesto militar per poder atender las necesidades de la gente, con una reducción del 10% en cinco años (<https://peace-dividend.org/>).

12 Véase: Denise Garcia, “Redirect military budgets to climate and pandemics”, *Nature*, 584, 2020, 521-523: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-02460-9>

actual sistema militarizado de poder y seguridad,¹³ y que éste no se puede desmantelar desde una visión patriarcal. La labor no es fácil. Necesitaremos nuevas herramientas pensadas desde un enfoque de tecnología feminista, una tecnología que debería ser post-machista, post-violenta, eco-feminista y de paz positiva, centrada en el cuidado de todas las personas y del planeta y en el respeto a las generaciones futuras. Como dice Wendy Faulkner,¹⁴ debemos construir una alternativa a la tecnología patriarcal dominante.

Alicia Boole explicaba que durante mucho tiempo no había podido hacer gran cosa aparte de cuidar hijos, limpiar, remendar y hacer todo tipo de trabajos domésticos. Sin embargo, gracias a que muchas mujeres están empezando a romper finalmente los techos de cristal,¹⁵ la explosión de avances científicos va deviniendo más creativa. Y es que la esperanza pasa también por las mujeres de ciencia y por las creadoras de sistemas tecnológicos inclusivos pensados desde el planeta y para las personas. Son muchas. Ellas podrán salvarnos, dejando atrás la violencia de los viejos esquemas patriarcales e indicándonos el camino hacia la humanización y la convivencia sostenible y hacia una conciencia global de especie¹⁶ en equilibrio ecológico con la biosfera y el planeta.

13 Pasando del armamento (*weaponry*) al vivimiento (*livingry*), como proponía Buckminster Fuller.

14 Wendy Faulkner decía que no podemos transformar las relaciones de género [y violencia] sin meternos en tecnología. Véase: Wendy Faulkner, "The technology question in feminism: A view from feminist technology studies", *Women's Studies International Forum*, vol. 24, Issue 1, January–February 2001, págs. 79-95: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277539500001667> - Ver también: "Masculinities and Technologies: Some Introductory Remarks", 2004: <https://doi.org/10.1177%2F1097184X03260956>

15 Los techos de cristal que han estado dificultando la actividad científica de las mujeres y que incluso han estado impidiendo su promoción. La escritora Marilyn Loden ideó y usó por primera vez este término en 1978 en una de sus conferencias.

16 Eudald Eudald Carbonell define una serie de retos cara culminar el proceso de socialización de la especie, y lo hace pensando en el planeta y en el universo que le rodea, entendiendo la planetización no como un proceso de globalización, sino como un proceso natural en el que la intervención humana prioriza nuestra conciencia de especie y la autoconciencia como planeta. Seremos humanos cuando el azar sea sustituido por la lógica. No se trata de ser más humanos, sino simplemente de ser humanos, porque todavía no lo somos, debemos humanizarnos. Hacerse humano es un proceso que lleva a tener conciencia de especie, a integrar la diversidad, a que nosotros seamos los responsables de nuestra propia evolución. "Nos haremos humanos": https://www.researchgate.net/publication/331115094_Ens_Farem_Humans_Un_Homo_sapiens_amb_consciencia_critica_d%27especie

Agradecimientos

A mi padre Pere, entusiasta de la ciencia y de la tecnología. A mi abuelo Pau. A mi primera familia.

A mi madre.

A mis tías Rosita y Rosa, solteras y hedonistas.

A Fina, compañera de juventud, una vida demasiado corta.

A Ferran y Marta. A Bego.

A Julieta y a Tatiana.

A Montse, confidente, amiga y compañera de vida.

Al abuelo Francesc, clarividente a sus 103 años.

A mis maestros y mentores en la universidad, Martí Vergés y Gabriel Ferraté

A Isabel, Àlvar, Xavier, Carlos, Toni, Nuria, Pere Pau, Marta, Eva y demás compañeros de la UPC y del ViRVIG. A Lázaro.

A las mujeres de Can Serra. A Justí, Elvira, Laura, Eloísa, Amparo. A Gloria. A Juana y su Pablo. A Jaume Botey, Pilar Massana, Andreu, Ma. Pau, Jaume Salas, Montserrat, Martí Bayó, Lupe Monzoncillo y demás "vosotros". A todas con las que compartí las "Escoles d'Estiu" en Orrius. A Esther Mallo y a Joaquina, mis otras maestras.

A Jordi, Xavier, Vicens y a los dos Ricard.

A Jarek, a Hans-Peter, a David, a Roberto, a Roger y a tantos más con los que fui cosmopolita científico.

A Carme Torras.

A Arcadi Oliveras. Con él tuve el privilegio de entender que este mundo no nos sirve pero que otro mundo es posible, necesario y factible.

A Eli, Maria de Lluç, Ainhoa, Anna, Dúnia, Nora, Chloé, Camino, Gemma, Arés, Tica, María Vázquez. Investigadoras y activistas del Delàs, feministas y amigas, altavoces del vínculo esencial entre patriarcado, violencia y militarismo. A Alejandro. A Teresa y a Xavier. A Pere i a Jordi. A Edu Aragón, Pepo, Xema y Quique.

A Enric, Carme, Dolors, Lluís y Montse, Mercè, Josep María, Totón y Xavier, aquellos que empezamos a entender el mundo de la mano de Jaume Botey. A Victoria Vidal.

A José Alberto Pardos, a Xavier y a todas aquellas personas que despertaron en mí la pasión por caminar.

A Emma y Miquel, a Ferran Ràfols, a Jordi Baró Ruibal, a Isa y Jose, a Susi, a Clara y José, a Noemí, a Pili y Javier, a Lupe y Àlvar, a Núria Molist y Albert, a Anna Martínez, a Oriol Bayó, a Isabel y a Martina, a Emilia. A Josefina Gómez Mendoza, José Antonio Martín Pereda, Miguel Losada, Jaime Torroja. A Eusebi, Joaquín y Ma. Teresa Miras. A Marga e Ignacio, a Robert, a Juan Carlos Torres, a Josep y Carme, a Pilar Ruibal, a Ma. Àngels Cerveró. A Rafi Serra y Helena, a Juanan, a Vera, a Joan i Rosina, a Francina Roca. A Mercè Manyé. A todas las personas que han acabado formando parte de mí y que han hecho posible este trabajo.

NOTAS FINALES



El cielo, los globos y los sumideros

Las personas afortunadas que observan la explosión de una supernova que está a mil años luz de distancia están viendo una explosión de hace mil años, los que la luz ha tardado en llegarnos. Y es que mirar el cielo de noche es un viaje al pasado. Un pasado que sabemos dinámico, tras el descubrimiento de Edwin Hubble en 1928. Las galaxias que vemos en el cielo huyen de nosotros (y nosotros de ellas) siguiendo la ley de Hubble,¹ del mismo modo que los puntos de un globo se separan mientras lo vamos hinchando. Las galaxias se alejan constantemente.

Podemos hacer el ejercicio mental de rebobinar el tiempo mientras aplicamos la ley de Hubble. Retroceder en el tiempo es como deshinchar el globo: todas las estrellas y galaxias se nos van acercando. Cuanto más retrocedemos, más cerca lo tenemos todo. Y calculando hacia atrás, podemos encontrar fácilmente el momento del Big Bang, aquél en que el Universo era ínfimo. Gracias a Hubble y a su ley,² ahora sabemos que el Universo tiene unos trece mil ochocientos millones de años.

1 La ley de Hubble muestra una relación de proporcionalidad entre la distancia y la velocidad de las galaxias. Fue formulada por Edwin Hubble en 1929 tras casi una década de observaciones, y liga además con la solución de las ecuaciones de Einstein de la relatividad general. Su ley afirma que las galaxias se alejan a una velocidad proporcional a su distancia, según la constante de Hubble. El Universo es como la superficie de un globo que se va hinchando, pero en 3D en vez de en 2D.

2 La ley de Hubble añade relieve y movimiento al cielo de noche. El desplazamiento de las líneas espectrales de la luz que nos llega de las estrellas nos permite calcular a qué velocidad se alejan de nosotros, y la constante de Hubble nos permite estimar su distancia (que luego podremos terminar de ajustar con cefeidas o con técnicas de paralaje). En definitiva, para cada estrella del cielo podemos calcular lo lejos que está, lo rápido que se está alejando, y de qué momento del pasado es la luz que ahora vemos. Véase por ejemplo: *La Poesía del Universo*, de Robert Osserman, traducido por Mercedes García y editado en castellano por Grijalbo Mondadori. En todo caso, la posibilidad de poder estimar de manera precisa la edad del Universo depende de si sabemos calcular el valor de su aceleración expansiva en cada momento del pasado.

Las galaxias se alejan,³ sabemos que su velocidad depende de la distancia, y hemos descubierto además que cada vez lo hacen más rápidamente. Pero, ¿por qué? (según la ley de gravitación universal debería ser al revés, de la misma manera que cuando lanzamos una piedra al aire, cada vez sube más lentamente). La idea más extendida es que esta aceleración expansiva es debida a una cierta materia (y energía) oscura, que aún no hemos podido detectar. Pero tenemos otras hipótesis, como la que afirma que el Universo está repleto de sumideros invisibles. La teoría, propuesta por Juan García-Bellido y Sébastien Clesse,⁴ se basa en la fase de expansión increíblemente prodigiosa que siguió al Big Bang.⁵ La amplificación de fluctuaciones durante esta inflación pudo producir millones y millones de “agujeros negros primordiales” (PBH) que todavía se encontrarían repartidos por todo el Universo, con masas que irían de la centésima parte de la del Sol a la de diez mil veces la del Sol, y que podrían explicar perfectamente la aceleración expansiva que ahora observamos. Si esta hipótesis fuera cierta, la solución del misterio de la aceleración del Universo nos vendría de la mano de la geometría, con una infinidad de singularidades que se extienden por todo el Universo y que funcionarían como sumideros.

Las leyes del Universo que rigen nuestras vidas son las de la física, que vamos sabiendo que se basa fuertemente en la estructura geométrica del espacio. En definitiva, y en cierto modo, somos bioquímica edificada con elementos fabricados por las estrellas,⁶ sin olvidar que somos también física y geometría. Ante la belleza del cielo nocturno cuesta entender la arrogancia, dogmatismo, orgullo y vanidad de la condición humana.

3 Si nos imaginamos como hormigas en algún punto del globo mientras éste se va hinchando, no veremos cambiar las posiciones “en el cielo” de los otros puntos, porque las direcciones se mantienen durante el proceso de hinchado. Las estrellas y las galaxias no cambian de posición en la esfera del cielo, sólo van hacia “atrás”, se alejan siguiendo la recta que las une a nosotros.

4 Artículo de Juan García-Bellido y Sébastien Clesse, 2016: <https://arxiv.org/pdf/1603.05234.pdf>

5 Esta fase de expansión increíblemente prodigiosa hizo que después de una diezmilésima de una millonésima de una millonésima de una millonésima de una millonésima de segundo, dos puntos separados menos de un radio atómico se encontrasen a una distancia de cuatro años luz.

6 Muchos elementos esenciales para la vida, como el yodo y el molibdeno, sólo pudieron ser fabricados durante la explosión de alguna supernova.

Los elementos y los compuestos químicos

Todo lo que vemos son aglomerados de moléculas y átomos: corpúsculos que se encuentran entre la física y la química. Demócrito ya lo propuso hace más de 2.400 años, cuando dijo que todo estaba formado por átomos indivisibles. Durante 1.900 años nadie le hizo caso.

Lo cierto es que en 1670 sólo se conocían 14 elementos puros. Nueve de ellos nos llegaron de los antiguos (el oro, la plata, el cobre, el hierro, el estaño, el plomo, el mercurio, el azufre y el carbono) mientras que los otros cinco fueron descubiertos por los alquimistas: el zinc, el arsénico, el antimonio, el bismuto y el fósforo. No había ninguna conexión aparente entre ellos.

El método científico llegó con el descubrimiento de los compuestos químicos y su composición por parte de Antoine Lavoisier y Marie-Anne Pierrette Paulze, junto con las primeras propuestas de clasificación de los elementos puros que John Dalton hizo a principios del siglo XIX. Luego, en 1868, Dmitri Mendeleiev, observando que los elementos puros presentaban propiedades repetitivas, propuso la tabla periódica que aún está vigente. Gracias a estos científicos y a muchos otros, ahora sabemos que el orden de los elementos en la tabla de Mendeleiev es el de su número atómico, que no es otra cosa que el número de protones y electrones que tienen sus átomos. La composición atómica en partículas sub-atómicas que estudia la física es la que justamente determina las propiedades mecánicas y químicas de todo lo que vemos.

El reloj de Oliver Sacks mostraba este orden sublime de los elementos químicos. Lo fotografió Tomas Muscionico durante una entrevista que le hizo Guillermo Altares.¹ En él, cada hora lleva el nombre de un elemento químico. La una es el hidrógeno, las dos y las tres son el helio y el litio (sus átomos tienen justamente dos y tres protones), las seis de la mañana son el carbono que nos conforma (cuyos átomos contienen seis protones y seis electrones), y las nueve llevan el nombre del flúor que nos protege los dientes. Una vez pasada la hora del magnesio del mediodía (12 protones), saltamos al círculo interior. Comemos entre la hora del aluminio, la del silicio y la del fósforo, y por la tarde y noche nos llegan el azufre, el cloro, el argón, el potasio, ... junto con el vanadio y el cromo. Cada día termina con el cromo, de número atómico 24 y luego, a la una de la madrugada, volvemos a la ligereza del átomo de máxima simplicidad.

Los elementos químicos que vemos tanto en nuestro planeta como cualquier otro rincón del Universo, se agrupan y forman moléculas. Los metales se combinan con el oxígeno del aire y forman óxidos como el de hierro (Fe_2O_3) o el de sodio (Na_2O). Esta nomenclatura, propuesta en los libros de Antoine Lavoisier, indica, además de los átomos que componen las diferentes moléculas, sus proporciones. Así, las moléculas del óxido (también llamado trióxido) de hierro Fe_2O_3 incluyen dos átomos de hierro y tres de oxígeno, mientras que las del monóxido de hierro FeO están formadas por un átomo de cada (los subíndices 1 se omiten). Del mismo modo podemos hablar del hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que incluye tres grupos oxígeno-hidrógeno OH, del hidruro de calcio CaH_2 , del cloruro de sodio ClNa (la sal común) y de muchos otros.

¹ Entrevista de Guillermo Altares a Oliver Sacks, con fotografías de Tomás Muscionico, 2015: https://elpais.com/cultura/2015/02/19/actualidad/1424366454_934409.html

Los fractales

¿Cuál es la longitud de la costa de Menorca? Parece una pregunta sencilla, pero no lo es. La respuesta, sorprendente, es que la pregunta está mal formulada. No podemos hablar de la longitud de la costa de Menorca (ni de longitud de casi ninguna costa rocosa). Si dos personas diferentes miden de manera independiente la costa de Menorca, obtendrán resultados diferentes.¹ Y esto ocurre porque, en general, las costas son fractales. Benoît Mandelbrot elaboró la teoría de los fractales entre los años 1967 y 1977, basándose en conceptos ya elaborados por Félix Hausdorff antes de la Segunda Guerra Mundial. En 1967 publicó en la revista *Science* su artículo “¿Cuánto mide la costa de Gran Bretaña?”, donde introducía la geometría fractal y planteaba lo que nadie antes había observado: que cada libro de geografía y cada enciclopedia indicaba un valor diferente. La medida, en los objetos fractales, es algo no evidente.

1 Algunas páginas web explican que Menorca tiene 200 Km. de costa, otras dicen que tiene 216 Km. o 220 Km., y algunas nos hablan incluso de 286 o de 433 Km. de costa: https://www.researchgate.net/profile/Francesc_Xavier_Roig_Munar2/publication/321038015_El_litoral_de_Menorca_marco_fisiografico_y_tipos_de_costa/links/5a09d68445851551b78d2570/El_litoral-de-Menorca-marco-fisiografico-y-tipos-de-costa.pdf

La altura de un mueble es un valor (en cm., por ejemplo). La medida de un fractal, en cambio, es una función que la relaciona con la unidad de medida.² Hausdorff y Mandelbrot vieron que podemos entender los fractales en base a estudiar esta función. Encontraron que, en unidades logarítmicas, su gráfica es una recta y que su pendiente nos permite calcular la dimensión fractal, dimensión que mide la complejidad de la forma y el grado de retorcimiento del objeto.

Los fractales muestran siempre la misma estructura compleja y laberíntica, aunque nos acerquemos más y más. Los entrantes y salientes que vemos en un acantilado son similares a los que podemos fotografiar en un trocito de pocos centímetros de su roca. Las partes de un fractal son similares al todo, como vemos por ejemplo en la col romanesco. Por ello, decimos que los fractales son estructuras geométricas auto-similares.³

Estamos rodeados de fractales. Los podemos encontrar incluso en el interior de nuestro cuerpo. Nuestro cerebro puede trabajar como trabaja gracias a un mecanismo muy sofisticado de oxigenación de la sangre que se basa en la estructura fractal de nuestros alvéolos pulmonares.

2 Si nos piden que midamos la longitud de un trozo de costa y disponemos de un mapa, podemos usar una regla milimetrada, desplazándola sobre el mapa por la costa mientras sumamos longitudes, milímetro a milímetro (podemos hacerlo también caminando por la costa de verdad, pero siempre será más incómodo). Supongamos que la escala del mapa es 1: 250000. Con paciencia, acabaremos midiendo la longitud total en milímetros en nuestro mapa y, con una proporción o regla de tres, obtendremos una estimación de la longitud real de la costa (cada 4 milímetros del mapa corresponden a un kilómetro real). El problema es que la medida que hemos obtenido depende de la escala del mapa. Si aún nos queda paciencia y repetimos el proceso con un mapa más detallado, por ejemplo de escala 1: 50000, obtendremos una longitud en kilómetros que será diferente. El mapa tiene más detalles, y ahora estaremos midiendo entrantes y salientes de la costa que antes no veíamos. Cuanto más detallado es el mapa, mayor es la longitud que encontraremos.

3 Los fractales teóricos, los matemáticos, son auto-similares, y lo son a cualquier escala. En cambio, los del mundo real lo son únicamente hasta un determinado grado de detalle.

Las funciones y sus gráficas

En matemáticas, las relaciones se expresan mediante funciones. Las funciones son fórmulas o algoritmos que nos permiten calcular o prever el valor de una variable que llamamos dependiente en base al valor de otra (u otras) variable(s) que llamamos independiente.¹ Por ejemplo, el divisor de líneas de Hertha Marks² se basaba en la relación que hay entre los segmentos que definen un conjunto de rectas paralelas en otras dos rectas secantes.

El cálculo del coste de la energía eléctrica es otro ejemplo de relaciones, aunque algo más complicado. Si por 3 Kwh de electricidad tengo que pagar 2 céntimos y en cambio, por un total de 16 Kwh me toca pagar 7 céntimos, ¿cuál es el precio que voy a pagar por 11 Kwh?

1 Si usamos la notación “x” para esta última y llamamos “y” a la dependiente, el modelo matemático que expresa la relación entre las dos se escribe habitualmente de este modo: $y = f(x)$. La función f nos determina, para cualquier valor de x , el valor correspondiente $f(x)$ de la variable y . Es bien conocido que las funciones pueden representarse gráficamente, con la convención de situar los valores de “x” en el eje horizontal y los de “y” en el vertical.

2 Si disponemos dos reglas en ángulo (una de ellas graduada) y queremos dividir un segmento S de la regla no graduada en N partes iguales, sólo tenemos que situar el segmento S empezando en el vértice común V entre las dos reglas, unir el punto final de S con la marca de los N centímetros de la regla graduada, e ir dibujando rectas paralelas a esta primera recta. Cada una de estas rectas define un punto P de intersección en la regla graduada y otro punto Q en la segunda regla. Pues bien, si denominamos x a la distancia entre V y P y llamamos y a la distancia entre V y Q , el teorema de Tales nos asegura que la función $y = f(x)$ es del tipo $y = a \cdot x$. En este caso decimos que la función es lineal, sinónimo de proporcional. Si multiplicamos el valor de x por 2, por 3 o por cualquier otro valor, el valor de y queda multiplicado exactamente por el mismo valor. El dibujo del divisor de líneas de Hertha Marks que aparece en su patente de 1885, se encuentra en esta página web del Museo de la Ciencia de Londres: <http://journal.sciencemuseum.ac.uk/pdf/article/10358/the-life-and-material-culture-of-hertha-ayrton>

La primera función, la que surgía del divisor de líneas de Hertha Marks, es lineal y del tipo $y=a*x$. Para dibujar su gráfica sólo hay que saber uno de sus puntos (o, lo que es lo mismo, un único valor de la pareja x - y). Es una función que podríamos denominar “de un punto”. Cuando vamos al supermercado, la relación que existe entre el precio que pago por el queso que pido que me corten y la cantidad que me entregan es proporcional, porque el doble de queso vale el doble, y la mitad vale la mitad. Es más: si no quiero nada, no voy a pagar nada.

Pero en el caso del problema del coste de la energía eléctrica necesitamos dos parejas de valores x - y : la $(x = 3) - (y = 2)$ y la $(x = 16) - (y = 7)$. Se trata de un problema que podríamos llamar “de dos puntos”, ya que requiere conocer el valor de $f(x)$ para dos valores diferentes de x , mostrando un comportamiento no proporcional.³ La prueba, evidente, es que si un mes no gasto nada de electricidad, también tendré que pagar. Nos encontramos ante las funciones afines, menos intuitivas, probablemente por las dificultades sociales que comporta el concepto de división, como nos explicaba Steven Strogatz.⁴ De hecho, la división obligó a crear un nuevo tipo de números: los racionales.⁵

Por otro lado, hay relaciones que son incluso mucho menos intuitivas que las que acabamos de ver. Porque algunos fenómenos, al menos durante un tiempo, son exponenciales. En este caso, nuestro cerebro no está evolutivamente preparado para comprenderlos y a los humanos nos cuesta reaccionar. Intentemos multiplicar por dos hasta 60 veces, empezando por el uno (1, 2, 4, 8, 16, ...) y veremos cómo se comporta la función $y = 2x$. El número de contagios durante la primera fase de las epidemias y la evolución actual de los efectos del calentamiento global del planeta son variables que evolucionan exponencialmente a lo largo del tiempo, hasta que los límites planetarios acaban imponiendo su control.

3 ¿Cuál es la gráfica de la función, en este caso? Como sólo tenemos dos puntos, lo mejor que podemos suponer es que su gráfica será una recta. Pintamos los dos ejes x , y , marcamos los dos puntos (3,2) y (16,7), dibujamos la recta que los une, y ya tenemos la gráfica. Es una recta, sí. Pero no pasa por el origen (en nuestro caso, $f(0) = 11/13$). En estos problemas “de dos puntos”, la función es del tipo $y = f(x) = a*x + b$. Si nos dan dos parejas de valores (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , es bien sabido que $(x-x_1)/(x_2-x_1)=(y-y_1)/(y_2-y_1)$. Por tanto, $a=(y_2-y_1)/(x_2-x_1)$ y además $(y-y_1)=a*(x-x_1)$. O sea, $b=y_1-a*x_1$. En todo caso, es fácil ver que un simple cambio de variables tal que la nueva x sea $x-x_1$ y que la nueva variable y sea $y-y_1$, nos transforma el problema en proporcional. Es un truco para resolver este tipo de problemas.

4 Steven Strogatz opina que las divisiones son aquél punto en el que muchos estudiantes se despeñan por el muro de las matemáticas. No son las integrales, las matrices o las derivadas. Son aquellas divisiones de toda la vida que también necesitamos para entender las funciones.. Comenta una escena de la película *Mi pie izquierdo*. Cuando una de las hermanas de Christy pregunta cuál es el 25% de un cuarto, el padre dice: “Esta es una pregunta estúpida, ¿verdad? ¿Qué es esto del 25% de un cuarto? ¡No puedes tener un cuarto de un cuarto! “. Christy, con parálisis cerebral, intenta dibujar “1/16” en el suelo con su pie izquierdo, pero no lo consigue. La respuesta del padre de Christy, negando la solución del problema, es una buena muestra de la aversión que mucha gente tiene hacia las matemáticas, según Steven Strogatz. Ver su blog en el New York Times: <https://opinionator.blogs.nytimes.com/2010/02/21/division-and-its-discontents/>

5 La palabra racional deriva del hecho de que estos números son una ratio entre dos números enteros. Ejemplos de números racionales (o fracciones) los tenemos en $2/3$, $3/7$ o $423/13$.

Los infinitesimales y la velocidad

Parece ser que el simple cálculo de la longitud de la diagonal de un cuadrado fue lo que trastornó el esquema mental de Teano, Pitágoras y demás miembros de la escuela pitagórica. Se trata de un cálculo sencillo y al mismo tiempo misterioso. Supongamos un cuadrado de un metro de lado. Precisamente, el teorema de Pitágoras nos indica que la longitud de su diagonal es la raíz cuadrada de 2. Pero, ¿cómo calculamos esta raíz cuadrada?

Uno de los métodos para calcular la raíz cuadrada de 2, no el más conocido, consiste en empezar por un valor aproximado y luego repetir una serie de pasos que nos irán acercando al resultado.¹ Con muy pocas operaciones, hemos conseguido una aproximación de cinco decimales al valor de la raíz de 2, valor que como sabemos es irracional con infinitas cifras decimales: 1,4142135623730950488016887242...

Imaginemos ahora la función $y = x^2 - 2$. Su gráfica es una parábola, y calcular la raíz de 2 es encontrar un valor de x tal que $y = 0$. El método iterativo que hemos visto fue

¹ Empezamos suponiendo por ejemplo que el valor A de la raíz es 2 (el método siempre funciona, sea cual sea este valor inicial, siempre que sea positivo). A continuación, hacemos dos divisiones y calculamos $1/A$ y $A/2$. Luego, restamos y obtenemos $B = 1/A - A/2$. Sumamos $A + B$, y obtenemos un nuevo valor de A que nos permite repetir todo el cálculo. Lo podemos hacer con una tabla u hoja de cálculo, poniendo los valores de A , $1/A$, $A/2$, B y $A + B$ en distintas columnas. El último valor de cada fila, $A+B$, pasa a ser el valor A de la fila siguiente. Es fácil comprobar que el valor $A = 2$ de la primera fila se convierte en $A = 1,5$ en la segunda fila y en $A = 1,416$ en la tercera fila. Un paso más, y el valor final de $A+B$ en esta tercera fila ya es 1,41421. Evidentemente, todo lo dicho sirve para cualquier valor de A que sea positivo.

descrito de manera independiente por Isaac Newton y Joseph Raphson,² y permite calcular la raíz cuadrada de cualquier valor positivo además de ser útil en muchos otros temas. Uno de sus aspectos interesantes es que nos muestra, a la vez, el infinito y los infinitesimales. Aunque calculando solo tres filas de la tabla ya obtenemos una buena aproximación del resultado, constatamos que es imposible calcular de manera exacta esta raíz de 2. Dado que tiene infinitos decimales, necesitaríamos infinitos cálculos que llenarían infinitas filas de la tabla. Podríamos pasarnos años y años calculando, y siempre podríamos continuar y refinar más el resultado. La raíz de 2 es como el número pi: su valor exacto es inaccesible. Puede ser un ejercicio desesperante. Ahora bien, mientras calculamos valores más y más aproximados, tenemos un resultado intermedio, el valor de B1, que se hace más y más pequeño³ y pronto se convierte en un infinitesimal. Lo que indica la palabra infinitesimal es que el valor de B lo podemos hacer tan pequeño como queramos.⁴ Siempre podemos efectuar más iteraciones, estimando más cifras exactas de la raíz de 2 y obteniendo valores de B tan pequeños como queramos. Cuando el número de pasos y el de cifras correctas del resultado que vamos estimando va hacia el infinito, el valor de B se reduce infinitamente y deviene infinitésimo.

Las relaciones entre fenómenos se formalizan mediante funciones del tipo $y=f(x)$ que pueden representarse gráficamente.⁵ Cuando viajamos en coche, el espacio recorrido es función del tiempo, y lo podemos representar gráficamente si vamos cronometrando y marcando parejas de valores (tiempo transcurrido, kilómetros recorridos). Durante una epidemia como la del coronavirus, podemos también representar gráficamente la evolución del total acumulado de casos confirmados en función del tiempo. Un tercer ejemplo de función podría ser la que indica la variación de la temperatura ambiente en un determinado lugar a lo largo del día y la noche. Las dos primeras funciones representan valores que siempre van creciendo mientras que la tercera no, pero las tres tienen en común que, en el eje de abscisas representamos el tiempo.

2 El método de Newton-Raphson sirve para calcular raíces de funciones derivables. Dada una función $y = f(x)$, este método iterativo genera una secuencia que, si converge, se va acercando a una de las raíces de la función. En otras palabras, encuentra un valor de x tal que $f(x) = y = 0$. En nuestro caso, la función es $y = x^2 - 2$ y se puede demostrar que siempre converge al resultado esperado de la raíz cuadrada. Supongamos que tenemos un valor aproximado, $x = w$, de la solución. El correspondiente valor y es $y = w^2 - 2$. Y la pendiente o derivada de la función (que es una parábola) en el punto de abscisa $x = w$ es obviamente $p = 2*w$. Lo que hace el método de Newton-Raphson, gráficamente, es dibujar la recta tangente a la parábola en el punto $(w, w^2 - 2)$, encontrar su punto de corte con el eje de abscisas, y tomar este punto como nuevo valor de x . Las fórmulas del método de Newton-Raphson salen de resolver trigonómicamente el triángulo rectángulo formado por el punto $(w, w^2 - 2)$, la vertical que pasa por este punto, la recta tangente que ya hemos comentado y el eje horizontal, y del hecho observar que la pendiente $p = 2*w$ es el valor de la tangente del ángulo que forma la recta tangente con el eje de abscisas.

3 La tabla indicada no es necesaria. Se ha introducido únicamente como recurso explicativo. Una vez calculados los valores de B y de A+B, el nuevo valor de A puede substituir el valor anterior, sin necesidad de crear ninguna fila nueva en la tabla.

4 Dado cualquier valor ínfimo V que podamos imaginar, por pequeño que sea, siempre habrá un número de iteraciones N de re-cálculo de A tal que si hacemos más de N refinamientos, B será menor que V. Los infinitésimos son los inversos del infinito.

5 Véase la nota sobre las funciones y sus gráficas.

En estos casos, surge el concepto de velocidad. La velocidad de un coche son los kilómetros que hace en una hora, y la de crecimiento de una pandemia es el número de nuevos casos confirmados que contamos cada semana o cada día (por ejemplo), de la misma manera que podemos hablar de la velocidad de enfriamiento ambiente por la noche, en grados por hora o por minuto. Dadas dos mediciones en dos instantes consecutivos de tiempo, la velocidad es el cambio que ha habido (en kilómetros, en contagios o en temperatura) durante este intervalo de tiempo. Si el coche va a 120 Km / h, sabemos que cada 5 minutos avanza 10 Km. y que cada minuto recorre 2 kilómetros. Porque $120/60 = 10/5 = 2/1$. La velocidad es la variación de lo que estamos estudiando dividida por el intervalo de tiempo entre las dos medidas. Es también la pendiente de la recta que une, en la gráfica de la función, los dos puntos que estamos considerando. Pero todo depende del contexto. El concepto de velocidad está emparentado, por ejemplo, con el adjetivo “marginal” que usan los economistas.

Y por cierto, ¿cómo podemos calcular la velocidad en un determinado momento? La solución ya la intuyeron sabios como Arquímedes: es necesario que las dos mediciones sean muy, muy cercanas en el tiempo. Para calcular bien la velocidad de un coche en el momento que cruza el mojón de los 436 kilómetros en una carretera, podemos hacerle dos fotos separadas un segundo, medir, en las fotos, la distancia recorrida, y dividirla por tiempo. Si medimos la distancia en metros, habremos calculado la velocidad en metros por segundo (3,6 Km/h equivalen a 1 m/seg.). Pero si queremos ser más precisos, tendremos que dejar menos tiempo entre una y otra foto. Hasta que la separación entre los dos instantes de tiempo sea lo más pequeña posible: un infinitésimo. En este momento, la recta secante se convierte en la tangente en el punto que estamos considerando, y la velocidad instantánea, cuando el intervalo de tiempo es infinitesimal, pasa a ser la pendiente de esta recta tangente.

Aunque su definición involucra infinitésimos que pueden parecer no triviales, las leyes de la física nos proporcionan maneras muy sencillas de medir directamente las velocidades. Los anemómetros miden directamente la velocidad del viento; velocidad que también podemos estimar, de manera aproximada, con la inclinación de la ropa tendida u observando las ondulaciones que el viento produce en la superficie de lagos y estanques o en la arena del fondo, como hacía Hertha Marks Ayrton.

Arquímedes de Siracusa ya trabajó con los infinitésimos. Le sirvieron para calcular aproximaciones al número pi, y los utilizó en su maravilloso razonamiento para calcular la fórmula del volumen de la esfera en base a cortar en delgadas rebanadas un cilindro, un cono y una semiesfera.⁶ Porque la deducción de Arquímedes, impecable, implica imaginar que el grosor de las rebanadas va reduciéndose hasta valores infinitesimales, de manera tal que los objetos (cono, cilindro y semiesfera) acaban cortados en infinitas rebanadas infinitamente delgadas. Pero Arquímedes no se quedó aquí.

6 Para conocer con más detalle el razonamiento que llevó a Arquímedes a descubrir la fórmula del volumen de la esfera: <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2016/03/30/lesfera-darquimedes/>

También descubrió, cortando en rebanadas muy delgadas una semiesfera y su cilindro circunscrito, que el área de la superficie exterior de una esfera es igual a la de cuatro círculos máximos. Razonando en base a las propiedades de un sinfín de rebanadas de espesor infinitésimo, Arquímedes supo deducir las fórmulas algebraicas de la geometría de la esfera que aprendemos en la escuela.

Luego, tuvimos que esperar hasta Gottfried Leibnitz y Isaac Newton para que los infinitesimos llegaran a la mayoría de edad. De manera independiente (y peleándose, porque el carácter de Newton no era fácil) desarrollaron lo que ahora conocemos como cálculo infinitesimal. Las técnicas de abstracción les permitieron pensar en funciones $y = f(x)$ en las que la x no tenía por qué ser el tiempo, y el concepto de velocidad dio paso al de derivada. La derivada es la variación local de una función: la pendiente de la recta tangente a la gráfica de $f(x)$ en un punto dado. Dedujeron las reglas de derivación, que nos indican que si nuestra función es $y = x^2 - 2$, su función derivada es $y' = 2x$, y que si la función $f(x)$ es el seno, su derivada es el coseno. Gracias a Newton y Leibnitz y a su cálculo infinitesimal, ahora podemos calcular derivadas e integrales con simples fórmulas algebraicas.

En su libro sobre los juegos con el infinito, Rozsa Péter habla de los infinitesimos, de las derivadas, y de los problemas de máximos y mínimos.⁷ Y plantea el problema de cómo construir, con una cartulina de a por b centímetros, una caja de volumen máximo.⁸

7 Rozsa Péter, *Playing with infinity*, Dover Eds., traducción al inglés del libro original de 1957; págs. 177-195.

8 Rozsa observa que si la altura de la caja mide x centímetros, el volumen final de nuestra caja será $V = (a - 2x) * (b - 2x) * x$ y que por tanto, V es una función polinómica de grado 3 en x : $V = 4x^3 - 2(a+b)x^2 - abx$. Resolver el problema implica encontrar el máximo de esta función. Rozsa Péter, gracias al cálculo infinitesimal, explica que lo único que debemos hacer es estudiar la derivada de esta función, $V' = 12x^2 - 4(a+b)x - ab$, y encontrar el valor de x que la hace cero. Todo se reduce a resolver una ecuación de segundo grado.

La información, la percepción, los colores y los fotones

Einstein, en el libro de divulgación que escribió en 1939 junto con Leopold Infeld, explica el estudio que hizo James Maxwell a partir de los experimentos de Hans Christian Oersted y Michael Faraday.¹ Oersted había visto que toda corriente eléctrica genera efectos magnéticos, y los experimentos de Faraday mostraron que un imán en movimiento genera electricidad.

Pero la gran idea de Maxwell fue generalizarlo y pasar a hablar de campos.² Maxwell supo condensar los experimentos de Oersted y Faraday en una sola frase: toda variación de un campo eléctrico genera un campo magnético y toda variación de un campo magnético genera un campo eléctrico. Y esta interacción entre los dos campos existe aun en ausencia de cable eléctrico e imán. Una vez creados (por ejemplo, en las antenas de radio, televisión y telefonía, con corrientes eléctricas variables) los dos campos van activándose mutuamente y se materializan en el campo electromagnético. Es un campo que se rige por las ecuaciones de Maxwell y que viaja por el espacio siempre a la velocidad de la luz. Es la radiación electromagnética.

La radiación electromagnética existe desde poco después del Big Bang. Es un fenómeno sorprendente. Es el mecanismo que tiene el Universo para enviar energía a

1 Albert Einstein y Leopold Infeld, *La física, aventura del pensamiento*, Editorial Losada, Buenos Aires, 1939, págs. 122-132. Tercera edición. Traducción del original inglés *The Evolution of Physics*, por Rafael Grinfeld.

2 En palabras de Maxwell, cuando movemos un imán generamos un campo eléctrico que modifica su entorno y crea corrientes eléctricas en los cables conductores cercanos, generando efectos en todos los puntos del espacio. Gracias a ello hemos podido fabricar dinamos y alternadores y hemos podido construir tanto las centrales eléctricas convencionales como las eólicas

distancia, y es el principal mecanismo de transmisión de información. Toda la energía que usamos se deriva de la radiación electromagnética que fabrica el Sol. La radiación electromagnética que nos llega de las galaxias lejanas es información que nos ayuda a entender su estructura. Las ondas de radio y televisión, las de la telefonía móvil, las de los GPS, las de los microondas, los rayos X, los colores, todo son radiaciones electromagnéticas. Son estos misteriosos fotones de luz (visible o no) que nos calientan la piel cuando tomamos el Sol y que viajan como ondas del campo electromagnético. Pero que, como descubrió Einstein, son distinguibles y “separables”; los podemos contar.

Nos cuesta entender qué es la radiación electromagnética, pero existe y es esencial. Por ello, la evolución ha ido perfeccionando estos órganos llamados ojos que captan una mínima parte de estas radiaciones ubicuas y que le explican al cerebro lo que haya nuestro alrededor. La información visual, que llega en forma de fotones a la retina de los ojos, es la que, una vez procesada (y conjuntamente con la auditiva, táctil y otras), se convierte en conocimiento y va conformando nuestro modelo de la realidad.

La información puede captarse, almacenarse y enviarse; se puede filtrar, comparar, transformar, sintetizar, e incluso crear. Los informáticos somos cocineros de información. La guardamos y la procesamos. La trabajamos, la preparamos e intentamos hacerla más digerible. La información es lo que nos permite conocer, entender. Pero no existe por sí sola. Requiere un sustrato, basado en la materia o en la energía. Y si no lo tiene, desaparece. La materia nos sirve para guardarla, la energía (de la radiación electromagnética o de las vibraciones de los sonidos en el aire), para enviarla. Las letras de tinta en las páginas de los libros codifican la información del texto en base a unas determinadas pautas de forma y orden. Cuando leemos, este orden material nos llega a la retina gracias a la energía de fotones efímeros que salen de la página y que justamente existen gracias a otros fotones, los de la lámpara que nos ilumina el libro. Todo es sutil. No podemos leer sin fotones, y los fotones, sin ojos que miren, se pierden junto con su información. La conjunción de páginas escritas, fotones y mirada permite que la información llegue a nuestro cerebro y que quede almacenada en las conexiones entre neuronas.³ Hace millones de años que el ciclo de la información inherente en la materia se repite: se envía, se recibe, vuelve a guardarse (probablemente algo modificada en el ADN), y así sin cesar.

³ Artículo sobre los fotones, la materia y la información: Pere Brunet, blog fractal: <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2017/12/16/on-es-la-informacio/>

Percibimos el color gracias a unas células de la retina llamadas conos.⁴ Nuestro mecanismo perceptivo ha ido evolucionando durante millones de años y procesa este destilado del espectro de color con solo tres canales.⁵ Suficiente para vivir.

Cada color del arco iris es un color puro, formado por fotones idénticos, todos ellos con la misma frecuencia y longitud de onda; es una radiación electromagnética perfectamente determinada. No hay más fotones visibles que los que vemos en el arco iris. Los humanos solo podemos ver las radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre los 380 nanómetros (violeta) y los 740 nanómetros (rojo).⁶ Pero cuando combinamos estos colores del arco iris es cuando aparece la sinfonía mágica de colores que nos envuelve. Y además hemos acabado descubriendo que el arco iris⁷ incluye colores invisibles: las líneas negras de Fraunhofer, de colores que no están.⁸ Justamente es lo invisible lo que nos ha ayudado a entender el Universo.

No somos demasiado conscientes del regalo que nos hace la naturaleza con el arco iris.

4 Además de los bastones que sólo son sensibles a la luz, tenemos tres tipos de conos que detectan zonas diferentes del espectro. Unos tienen máxima sensibilidad en la zona de los rojos, otros en la de los verdes y unos últimos en la zona de los azules. En su funcionamiento, nuestra retina no es demasiado distinta de los sensores de las cámaras digitales, que también captan por separado el rojo, el verde y el azul. Pero en nuestro caso, el cerebro modifica y procesa la información visual, agrupándola en tres canales: el canal verde-rojo, el canal azul-amarillo y el canal blanco-negro que nos ayuda a percibir la claridad/oscuridad. Finalmente, todo lo que recordamos se basa en los valores de estos tres canales.

5 La cámara espacial Aviris, que capta imágenes calibradas con información policromática en 224 canales espectrales, detecta el rango de longitudes de onda entre los 400 y 2500 nanómetros. Esto incluye todo el espectro visible más un gran intervalo de las radiaciones en el espectro infrarrojo. Es una cámara que desvela y nos hace visible lo que no vemos.

6 Como ondas que son, los fotones de la radiación electromagnética tienen una determinada longitud de onda, al igual que todas las demás ondas. En las olas del mar por ejemplo, la longitud de onda es la distancia entre el punto más alto de dos ondas consecutivas: unos cuantos metros. La longitud de onda de los fotones visibles es muy pequeña: la de los fotones que vemos de color violeta se encuentra entre 380 y 450 nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro), la de los del verde es entre 500 y 560 nanómetros, y la de los del rojo, entre 630 y 740 nanómetros. La longitud de onda de los fotones de los rayos X es alrededor de un nanómetro, mientras que la de los de un horno de microondas es mucho mayor: se encuentra entre 1 mm. y unos 10 cm. Y la de los fotones que nos llevan la información de datos a los teléfonos móviles es en el rango de entre unos pocos milímetros y 30 cm. Pero todo son fotones. Sólo cambia su frecuencia, energía y longitud de onda.

7 Newton escribió su teoría sobre la luz y los colores y la envió a la Royal Society 1672. Un siglo y medio más tarde, en 1810, Goethe publicó una nueva teoría, ampliando el concepto de color. Añadió, a los colores fundamentales de Newton del arco iris, los colores complementarios: el turquesa para el rojo ("cyan"), el púrpura para el verde ("magenta") y el amarillo para el azul. Pero sobre todo nos explicó que el color no era sólo física. El color es nuestra percepción, nuestra representación. Los colores que recordamos son difícilmente explicables, si no es por comparación. Son parte de la experiencia íntima y de los recuerdos de cada uno.

8 Artículo sobre los colores que no aparecen en el espectro: Pere Brunet, blog fractal (en catalán): <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2019/03/15/els-colors-que-no-hi-son/>

Los algoritmos

Un algoritmo no es más que un conjunto ordenado, finito y no ambiguo de reglas y operaciones que permiten resolver un problema o realizar una determinada actividad. Nuestra vida está llena de algoritmos. Aunque no los identifiquemos, los llevamos siempre a nuestro lado y los utilizamos. Las recetas de cocina y las partituras musicales son algoritmos para preparar comidas e interpretar melodías. Y lo son las instrucciones de los juegos o los protocolos de los médicos en los hospitales.

La palabra “algoritmo” viene de lejos. Surgió hace concretamente 1.150 años, cuando *al-Khwârazm* trabajaba en el observatorio de Bagdad. *Al-Khwârazm* fue una importante fuente de transmisión de conocimientos matemáticos de Oriente a Occidente, en parte gracias a las traducciones de textos antiguos que hacía, con sus colegas, en la Casa de la Sabiduría de Bagdad. En su tratado de álgebra, “*Hissab al-jabr wa-l-muqabala*” explicó reglas y recetas (o sea, algoritmos) para repartir herencias, lo que en aquel tiempo y en el mundo árabe era complicado e implicaba muchos cálculos.¹

Cuando sumamos estamos aplicando el algoritmo que aprendimos en la escuela; y, cuando multiplicamos o dividimos, también. Euclides nos dejó un algoritmo muy elegante para calcular el máximo común denominador de dos números (ir restando el mayor menos el más pequeño hasta que se hacen iguales), y Pitágoras nos regaló su algoritmo para calcular hipotenusas y distancias entre puntos. Luego, con los ordenadores, hemos acabado diseñando algoritmos para todo. Los ordenadores y los teléfonos

¹ En otro libro, *Sobre el cálculo con números indios*, *al-Khwârazm* explicó, parece que por primera vez, el sistema de numeración posicional en base 10 (incluyendo el cero) que aprendió de los sabios hindúes y que todavía ahora utilizamos. *Al Khwârazm* nos dejó libros maravillosos, todos ellos salpicados de algoritmos.

móviles funcionan en base a los algoritmos que algunos expertos antes han programado. Todas las aplicaciones que hemos instalado en nuestros móviles son algoritmos. Usamos algoritmos para mejorar fotos, para buscar información en internet, para saber la posición de los astros y para prever el tiempo que hará mañana. Tenemos algoritmos que pueden encontrar el nombre de las músicas que escuchamos, y algoritmos que pueden traducir textos de un idioma a otro.

En sus trabajos, Leslie Valiant ha sabido conectar los trabajos de Alan Turing sobre el diseño de algoritmos con los métodos para la resolución robusta de problemas y con la teoría de la evolución y el principio de la supervivencia de los más adaptados. Lo explica en su libro sobre los algoritmos de la Naturaleza:² los actuales seres vivos saben resolver problemas aparentemente muy complejos, y los resuelven de manera óptima o casi-óptima. Con poca energía vital son capaces de encontrar soluciones que funcionan y que los ayudan a vivir. Un buen ejemplo son los insectos. Hace poco, científicos de la Universidad de Londres descubrieron que las abejas, cuando recogían el polen, sabían encontrar automáticamente la ruta más corta para visitar todas las flores en el mínimo de tiempo, resolviendo el llamado “problema del viajante de comercio”³ a una velocidad superior a como lo haría un ordenador. La explicación se basa en el hecho de que la evolución ha ido cableando el algoritmo de la solución del problema en su cerebro.⁴

Podemos hablar de algoritmos fiables y de algoritmos que podríamos llamar aproximados. El sistema GPS utiliza algoritmos específicos para calcular nuestra ubicación a partir de las señales que recibe de los satélites. Sus algoritmos son claramente fiables y robustos y, a diferencia de los aproximados, tienen un margen de error insignificante. Pero muchos de los algoritmos que nos rodean pertenecen a la categoría de aproximados (también llamados heurísticos). El motivo es que los problemas que deben resolver son demasiado complicados si tenemos en cuenta el tiempo que estamos dispuestos a esperar. Y es que habitualmente preferimos una respuesta rápida y aproximada a una que sea óptima pero que implique tener que esperar durante horas. Es lo que ocurre, por ejemplo, con los sistemas que nos proponen recorridos para ir de un sitio a otro, o con los algoritmos de tratamiento de imágenes para la mejora de fotos. Tienen varios parámetros ajustables, y su idoneidad en el contexto de una aplicación determinada dependerá del ajuste de éstos parámetros.

Y desde hace pocos años vemos sistemas masivamente heurísticos que se van refinando con los datos. Se basan en algoritmos de aprendizaje automático y se nutren del llamado *Big Data*. Incluyen millones de parámetros que se van refinando con los datos de aprendizaje y que se estructuran en redes neuronales profundas, cajas negras

2 Leslie Valiant, *Probably Approximately Correct: Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World*, Ed. Basic Books, 2013.

3 Véase la nota sobre modelos, simulación y optimización.

4 Véase por ejemplo (en catalán): <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2013/05/29/els-ginkgos-les-abelles-i-els-algorismes/>

que generan resultados no explicables y no siempre fiables.⁵ Ello implica la imposibilidad de determinar quién es la persona responsable en el caso de actuaciones que terminen siendo legalmente incorrectas.⁶ Pueden ser útiles en aplicaciones que toleran los errores, siempre que incluyan una post-supervisión. Pero los problemas éticos y legales surgen cuando alguien decide utilizar estos sistemas en aplicaciones críticas (sean coches, aviones, sistemas de diagnóstico médico o drones de ataque letal), pretendiendo que funcionen sin ningún tipo de intervención humana. En todo caso, y a diferencia de estos sistemas de aprendizaje profundo (DL), los algoritmos fiables y aproximados sí son explicables, por lo que en el caso de fallos permiten definir responsabilidades ayudando a la rendición de cuentas.

En algunos medios se ha puesto de moda hablar “del algoritmo”, de este algoritmo que parece ser que nos vigila y puede limitar nuestros derechos. Cierto es que probablemente estamos entrando en la sociedad del control y la vigilancia. Pero no es cosa del “algoritmo”. El control lo ejercen personas concretas. Los algoritmos solo son herramientas.

5 Para una introducción a los sistemas de inteligencia artificial, su estructura, su utilidad y sus aspectos más controvertidos, véase: <https://centredelas.org/robots-asesinos-18-preguntas-y-respuestas/?lang=es>

6 Véase, por ejemplo (en catalán): <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2019/03/29/traduacions-algorismes-i-dignitat/> - También: <https://virvigblogs.cs.upc.edu/2017/02/09/els-algorismes-que-aprenen/>

Les mediciones cosmológicas y la curvatura del espacio

Carlo Rovelli, hablando de su libro *Siete breves lecciones de física*,¹ dice que intenta explicar ciencia sin ocultar las emociones, la confusión y la pasión. El libro incluye siete lecciones magistrales que nos permiten entender (o, al menos, intuir) los aspectos más relevantes y fascinantes de la física actual. Rovelli comenta que la actitud científica humana se basa en escrutar los detalles de la realidad para deducir aquello que no vemos directamente pero que deja un rastro que podemos seguir. Nos habla de que nuestro cuerpo es física y que por tanto, somos física. A veces nos percibimos como externos a la naturaleza. Pero no es así, indica, porque somos parte integrante del mundo que vemos. Estamos hechos exactamente con los mismos átomos y los mismos rayos de luz que intercambian los pinos de las montañas y las estrellas de las galaxias. Nuestro ADN es física y química, como nuestro cerebro y demás órganos.

Newton explicó la fuerza de la gravedad y formuló sus leyes. Pero no pudo entender cómo se transmitía. Por qué el movimiento de los astros lejanos quedaba afectado por la presencia de las grandes estrellas y galaxias? ¿Cuál era el mecanismo que hacía que la gravedad actuara a distancia? La respuesta se hizo esperar. Rovelli explica la visión genial y extraordinaria de Einstein, que descubrió y entendió que el campo gravitatorio no está difundido por el espacio, sino que el campo gravitatorio es el mismo espacio. El espacio de Newton en el que se movían los cuerpos celestes y el campo gravitatorio que transporta la fuerza de la gravedad son la misma cosa. Esta es la base de la teoría general de la relatividad. Los planetas giran alrededor del Sol porque el Sol ha curvado la misma estructura del espacio-tiempo y las rectas ya no son rectas.

¹ Carlo Rovelli, *Siete breves lecciones de física*, Ed. Anagrama, 2016: https://www.anagrama-ed.es/libro/argumentos/siete-breves-lecciones-de-fisica/9788433964007/A_497

Los astros “intentan” moverse en línea recta, pero como el espacio no es ni cartesiano ni Euclídeo, acaban siguiendo trayectorias curvas. Y eso sí, si los planetas y las estrellas curvan el espacio, las galaxias y los cúmulos de galaxias lo curvan aún más. Incluso doblan este camino tan recto que nos parece que sigue la luz, como bien predijo y calculó Einstein. Arthur Eddington y su grupo pudieron corroborarlo experimentalmente durante el eclipse solar de 1919, confirmando estas predicciones de Einstein.²

La cosmóloga Priyamvada Natarajan,³ del departamento de astronomía y física de la Universidad de Yale, mide los cambios de dirección de la luz que proviene de galaxias lejanas cuando ésta atraviesa grandes cúmulos de galaxias que encuentra en su camino hacia nosotros. Estos cúmulos actúan como inmensas lentes gravitacionales que curvan el espacio, desviando y curvando también la trayectoria de los fotones de luz. Gracias a este efecto que ella llama de “lentes de cúmulos muy potentes”, ha sabido y podido confeccionar mapas de distribución de la materia oscura en algunos de estos cúmulos galácticos.

2 Véase Joachim Wambsganss, “Gravitational Lensing in Astronomy”, *Living Reviews in Relativity*, vol. 1, 1998: <https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-1998-12>

3 Sobre los trabajos de Priyamvada Natarajan, véase: <http://www.astro.yale.edu/priya/>

Los modelos, la simulación y la optimización

Los modelos nos ayudan a entender la realidad, simplificándola y convirtiéndola en fórmulas o ecuaciones matemáticas abstractas. Permiten reproducir el comportamiento de los fenómenos que vemos, entender sus leyes, e incluso hacer predicciones. Pero son aproximados. La realidad es compleja, y cuando la simplificamos para poderla modelizar, dejamos de lado ciertos aspectos que tal vez no hubiéramos tenido que descartar.

Los sistemas de predicción del tiempo son un claro ejemplo de modelos computacionales que, para efectuar las simulaciones y poder llegar a predicciones razonables, requieren una optimización con restricciones. Deben optimizar porque todos queremos que su nivel de acierto sea el más alto posible. Ahora bien, aumentar la calidad de sus resultados (que siempre serán aproximados y sometidos a errores) requiere incrementar tanto el número de datos meteorológicos diarios que utilizan como la complejidad de su modelo computacional, y eso implica más y más tiempo de cálculo. Y esta es la restricción, porque el tiempo de cálculo tiene un límite¹ Esta es la realidad de muchos modelos: los utilizamos para optimizar, pero no podemos llegar a la perfección porque siempre hay límites que debemos considerar. Cuando diseñamos un puente, si lo que queremos es maximizar su capacidad de carga y su durabilidad, deberíamos hacerlo más y más robusto. Pero esto implica más materiales, más complejidad de construcción y más dinero. En este caso, como en muchos otros en el

¹ Yendo al extremo, es claro que el cálculo de la predicción diaria del tiempo no puede durar más de 24 horas, si lo que deseamos es tener las predicciones antes de que lleguen los fenómenos atmosféricos del día siguiente.

ramo de la construcción e ingeniería civil, una de las restricciones (límites) es el presupuesto.

Los modelos de programación lineal son buenos ejemplos de las técnicas que se utilizan cuando lo que se desea optimizar es función lineal de las variables. Veamos un ejemplo. Supongamos una región de N kilómetros cuadrados, que hay que repartir en parcelas que tendrán diferentes usos. Para simplificar, supongamos sólo dos usos A y B (el razonamiento puede generalizarse directamente a cualquier número de usos). Si denominamos X el número de kilómetros cuadrados que se destinarán al uso A, e Y el número de kilómetros cuadrados que se destinarán a B, el problema se reduce a calcular el mejor reparto que cumpla $X + Y = N$. Pero el modelo matemático del problema dependerá de lo que queramos maximizar.²

Podemos hablar también de los modelos que se utilizan en problemas de optimización que no trabajan en el espacio de las variables continuas, sino que pertenecen al mundo discreto. Uno de ellos es el llamado "*problema del viajante*", que aparece cuando nos planteamos ir a N ciudades o lugares diferentes, pasando una y sólo una vez por cada una de ellas. En este caso, lo que hay que optimizar es la ruta, encontrando un "plan de viaje" (que no es más que una ordenación de las N ciudades) de manera que el coste total del recorrido (en tiempo, en kilómetros, en dinero o en energía) sea el mínimo posible. Es un problema típico en aplicaciones logísticas y de transporte, el mismo que "saben" resolver las abejas cuando van a coleccionar el néctar de las flores que encuentran. Problema que es directamente inabordable si nos empeñamos en calcular el óptimo absoluto.³ Deberemos conformarnos con algoritmos heurísticos que encuentran soluciones sub-óptimas en tiempos de cálculo limitados, soluciones que seguramente ya nos serán útiles.

Finalmente, podríamos citar otro problema de optimización con variables discretas: el "*problema de la mochila*" ("*Knapsack problem*" en inglés). Es uno de los 21 problemas NP-completos que Richard Karp planteó en 1972.⁴ Supongamos que tenemos una mochila y que su volumen es V . Por otro lado, tenemos N objetos que llamaremos $O_1 \dots O_N$, con volumen respectivamente igual a $W_1 \dots W_N$. Y supongamos que sabemos

2 Si suponemos que toda la región es agrícola, que A y B son dos cultivos, y que lo queremos maximizar es el beneficio económico (representado por $a \cdot X + b \cdot Y$), acabaremos planteando un problema de optimización lineal con varias restricciones (la ya indicada $X + Y = N$ y otras relativas, por ejemplo, al uso de fertilizantes), véase, por ejemplo, la modelización del problema del granjero: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_programming - Pero si lo que deseamos es maximizar la satisfacción de los habitantes de los pueblos del entorno y garantizar la sostenibilidad de la zona, tal vez tendremos que imponer que la función a optimizar dependa de los resultados de alguna encuesta que estime la opinión de los habitantes de la zona y que las restricciones incluyan varios límites ecológicos.

3 Su dificultad proviene del número de caminos que hay que analizar para encontrar el óptimo, que es la mitad de $(N-1)!$. Y la función factorial pronto pasa a ser intratable: para $N = 10$ hay que analizar más de 180 mil rutas diferentes, mientras que para $N = 30$, el óptimo se encuentra entre más de 121 mil billones (!) de posibles rutas que deberíamos estudiar. Se trata de un problema tipo NP-completo.

4 Richard Karp, *Reducibility Among Combinatorial Problems*, en Raymond E. Miller & James W. Thatcher (Eds.), *Complexity of Computer Computations*, 1972, págs. 85-103: <http://www.cs.berkeley.edu/~luca/cs172/karp.pdf>

cuantificar de alguna manera el beneficio que nos conlleva el hecho de llevar cualquiera de los objetos O_k en la mochila, llamando B_k a este beneficio. Supongamos además que la suma de todos los W_k es superior a V , porque de lo contrario, el problema es trivial. Nuestro objetivo es optimizar el subconjunto de objetos que colocamos en la mochila de manera que la suma de sus beneficios tenga el mayor valor posible (y cumpliendo, evidentemente, que la suma de sus volúmenes sea menor que V).⁵ El carácter de NP-completo que nuevamente tiene este problema implica que forzosamente deberemos abordar su solución con algoritmos heurísticos que nos darán soluciones sub-óptimas. En todo caso, un aspecto interesante de este problema es su relación con las soluciones que nos podrían ayudar ante la crisis climática. Porque en este caso, el volumen de la mochila sería la concentración máxima de gases de efecto invernadero (básicamente dióxido de carbono) que queremos mantener en la atmósfera⁶ y los “objetos” serían los diferentes sistemas y recursos alternativos que podemos utilizar, cada uno con su “volumen” (contribución a las emisiones) y con el beneficio vital que nos reporta. El beneficio del coche de combustión puede que sea superior al de la bicicleta, pero el “volumen” de la bicicleta es casi nulo...

5 En todo caso, es evidente que en vez de volúmenes podríamos hablar de pesos o de cualquier otra magnitud.

6 Por ejemplo, la concentración de 320 ppm que teníamos en los años 60.

Polígonos, poliedros y politopos

Un polígono es una figura geométrica cerrada formada por vértices y aristas. Las aristas son los segmentos rectos que unen cada vértice con el siguiente. Aunque algunos polígonos no son planos,¹ los polígonos que habitualmente estudiamos son bidimensionales. Los cuadriláteros, triángulos y hexágonos son polígonos.

En el espacio de tres dimensiones, los objetos delimitados por caras planas se denominan poliedros. Los poliedros contienen vértices, aristas y caras. Las caras son polígonos.

Los polígonos regulares son aquellos en los que todas las aristas tienen la misma longitud y en los que todos los ángulos entre cada arista y la siguiente son idénticos. Lo son, por ejemplo, el triángulo equilátero, el cuadrado y el pentágono regular. El número total de polígonos regulares es infinito, ya que, dado cualquier número N de lados, siempre es posible dividir una circunferencia en N partes iguales, marcar los puntos que separan estas partes como vértices, y construir un polígono regular de N aristas.

Los poliedros regulares cumplen que todas sus caras son polígonos regulares idénticos entre ellos y que, además, todos los ángulos entre todas las parejas de caras que comparten una arista son idénticos. Platón fue el primero en dejar escrito lo que sus antepasados ya habían descubierto: que sólo hay cinco poliedros regulares. Son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro, que tienen 4, 6, 8, 12 y

¹ El polígono que determina una parcela de terreno en general no es plano debido a las ondulaciones del terreno que hacen que sus vértices dejen de estar en un mismo plano.

20 caras respectivamente. Las caras del tetraedro, octaedro e icosaedro son triángulos equiláteros, mientras que las del cubo son cuadrados y las del dodecaedro son pentágonos regulares.

Los 4-politopos regulares son objetos que generalizan los poliedros en el espacio de 4 dimensiones. Sus hiper-caras son poliedros regulares, y por tanto, todas sus caras y aristas son también idénticas. Como dedujo Alicia Boole, sólo existen seis 4-politopos regulares. Estos tienen, respectivamente, 5 caras tetraédricas, 16 caras tetraédricas, 600 caras tetraédricas, 8 caras cúbicas, 24 caras octaédricas y 120 caras dodecaédricas.

Volvamos a los poliedros regulares, los llamados sólidos platónicos. Los cinco contienen dos parejas de poliedros “hermanos”, que llamamos duales. El cubo tiene 6 caras y 8 vértices, mientras que el octaedro regular está formado por 8 caras triangulares que convergen en 6 vértices, perfectamente situados en el centro de cada una de las 6 caras de su cubo dual. La segunda pareja es la formada por el icosaedro y el dodecaedro. El primero tiene 12 vértices y 20 caras triangulares, mientras que el dodecaedro tiene 20 vértices que unen sus 12 caras pentagonales. La dualidad se manifiesta en el hecho de que estos 20 vértices están en el centro de cada una de las 20 caras del icosaedro dual, y que los pentágonos provienen de las 5 caras triangulares del icosaedro que confluyen en cada uno de sus vértices. Dejando aparte el tetraedro, los cinco sólidos platónicos² son duales dos en dos. Es una pequeña muestra del orden poético que cautivó a los antiguos.

Leonard Euler (y Descartes) nos explicaron además que en todo poliedro conexo y sin agujeros pasantes, el número de caras C , vértices V y aristas A están relacionados por la ecuación $V + C = A + 2$.

En cuanto a los 4-politopos, el teorema de Ludwig Schlafly demuestra de manera analítica (y de forma independiente a las deducciones de Alicia Boole) que el número de 4-politopos regulares es 6. Si llamamos V al número de vértices, A al número de aristas, C al número de caras poligonales y F a su número de hiper-caras poliédricas, y si caracterizamos cada 4-politopo por los valores (V, A, C, F) , los 4-politopos regulares

2 ¿Por qué sólo hay cinco poliedros regulares? Supongamos que queremos construir un poliedro regular con caras poligonales regulares de n lados cada una y de manera que en cada vértice confluyan m caras. Es fácil ver que m no puede ser inferior a 3. Además, en todo polígono regular se cumple que cada uno de sus ángulos vale $A = 180 - 360/n = 180 \cdot (n-2)/n$ grados. Pero (debemos imaginar que estamos construyendo el poliedro con cartulina), dado que el poliedro debe ser convexo, antes de doblarla nos tiene que sobrar cartulina alrededor de cada uno de sus vértices. En otras palabras, es necesario que este valor A del ángulo, una vez multiplicado por m , sea menor que 360 grados. O sea: $m \cdot (180 \cdot (n-2) / n) < 360$. Por lo tanto, $m \cdot (n-2) < 2 \cdot n$. Y esta ecuación sólo tiene cinco soluciones, justamente las que corresponden a los cinco poliedros platónicos: Si $n = 3$, nos queda $m < 6$; si $n = 4$, tenemos que $2 \cdot m < 8$, y si $n = 5$ nos queda $3 \cdot m < 10$. El primer caso nos lleva al tetraedro ($n = 3, m = 3$), al octaedro ($n = 3, m = 4$) y al icosaedro ($n = 3, m = 5$); el segundo caso es el del cubo ($n = 4, m = 3$), y el último corresponde al dodecaedro ($n = 5, m = 3$). Para $n = 6$ o superior, la ecuación no tiene ninguna solución m que sea 3 o mayor que 3. Podemos afirmar, por tanto, que solo existen cinco sólidos platónicos.

son el 5-celda la (5, 10, 10, 5), el 8-celda (16, 32, 24, 8), el 16-celda (8, 24, 32, 16), el 24-celda (24, 96, 96, 24), el 120-celda (600, 1200, 720, 120) y el 600-celda (120, 720, 1200, 600). Podemos observar también dos dualidades, entre los 8-celda y 16-celda, y entre los 120-celda y 600-celda.

Podríamos seguir con la generalización y hablar, por ejemplo, de los 5-politopos del espacio de dimensión 5. Sus 4-híper-caras, todas iguales, deben ser necesariamente alguno de los 4-politopos, que estarán a su vez delimitados por 3-hiper-caras poliédricas. Curiosamente, en los espacios de dimensión 5 o superior puede demostrarse que sólo existen 3 politopos regulares: el n -simplex que generaliza el tetraedro y el 5-celda, el n -hipercubo que generaliza el cubo y el 8-celda, y el n -ortoflex que generaliza el 16-celda.

Un simplex es la figura geométrica más sencilla con aristas rectas que puede representarse en un espacio de una determinada dimensión. En el plano, el 2-simplex es el triángulo. En el espacio, los 3-simplex son los tetraedros. Y en 4D, los 4-simplex son híper-tetraedros con 5 tetraedros como caras y con 5 vértices. En general, un n -simplex tiene $n + 1$ vértices. En el espacio de dimensión N , un simplex puede definirse como la envolvente convexa de $N + 1$ puntos independientes.

Las predicciones, el caos y Lyapunov

Muchos sistemas son estables y predecibles a corto plazo, pero es imposible saber qué les pasará a largo plazo. Sabemos predecir el tiempo a 24 horas vista pero no podemos hacerlo con un mes de antelación. Y el motivo es que el tiempo atmosférico es un sistema caótico. De alguna manera, hay una cierta semejanza con el comportamiento humano. Si observamos una persona andando, es fácil prever lo que hará al cabo de uno o dos segundos: podemos intuir sus intenciones y deducir lo que seguirá haciendo. Pero, sólo observando, no podemos saber qué hará al cabo de una hora. Las órbitas de la Tierra y de Plutón son estables y predecibles a miles de años vista, pero no podemos saber qué pasará dentro de 100 millones de años. Y es que la órbita de Plutón alrededor del Sol, muy inclinada en relación a todas las demás, algunas veces pasa incluso por dentro de la de Neptuno y además es caótica.

Después de que Newton publicara la ley de la gravitación universal en 1687, muchos científicos empezaron a preguntarse si el sistema solar era estable o no. Es una pregunta que inquietó a Laplace, Lagrange, Gauss, Poincaré, Kolmogorov y a muchos otros. Las órbitas de los planetas, ¿se mantendrán estables y predecibles como el gran reloj astronómico que ahora son, o existe el peligro de que todo ello se desestabilice en un cierto momento? Sabemos que las órbitas de los planetas son y serán predecibles durante los próximos diez millones de años. Pero en algún momento entre los próximos 10 y 40 millones de años es probable que Plutón pase demasiado cerca de Neptuno, que los dos planetas terminen saliendo expulsados en direcciones imprevisibles como inmensas bolas de billar, y que esto termine desestabilizando por completo el sistema solar.

En octubre de 2012, el huracán Sandy, un ciclón tropical gigantesco, afectó Jamaica, Cuba, las Bahamas, Nueva York, la zona de los grandes lagos de Estados Unidos y Canadá oriental. Cuando Sandy se encontraba en Jamaica se hicieron varias simulaciones con diferentes modelos matemáticos para poder predecir su evolución los días siguientes. Todas las simulaciones constataban que el huracán pasaría por la zona este de la isla de Cuba, cerca de Santiago de Cuba. Pero luego divergían tanto que era imposible hacer predicciones medianamente verosímiles a medio plazo. Algunas simulaciones indicaban que el huracán iría hacia Nueva Jersey, otras que iría directamente a la costa Canadiense y algunas incluso que se dirigiría a Europa. Sandy acabó dirigiéndose a Nueva York, en contra de muchas de las predicciones. Los huracanes son caóticos.

Los sistemas caóticos tienen comportamientos similares. Ínfimos errores en su estado inicial hacen que las simulaciones de su comportamiento futuro diverjan de manera exponencial al poco tiempo, haciéndose totalmente impredecibles.¹

Durante un cierto tiempo son predecibles, como indica su tiempo de Lyapunov.² Admiten predicciones a corto plazo, si las hacemos de manera que el intervalo de tiempo de predicción³ se mantenga dentro del orden de su tiempo de Lyapunov. Luego, ya entran en el campo de la incertidumbre. En las predicciones meteorológicas, el tiempo de Lyapunov es de pocos días mientras que para Plutón es de unos 20 millones de años⁴ y en el caso de las personas podríamos afirmar que es de sólo algunos segundos. Un caso interesante es el del movimiento de rotación del satélite Hiperión de Saturno. Su tiempo de Lyapunov es de 36 días, lo que implica que es imposible saber cómo se nos mostrará dentro de unos pocos meses.

El comportamiento exponencial y no predecible de los sistemas caóticos es independiente del error de medida que podamos tener cuando medimos su estado inicial. Un

1 Los sistemas caóticos son sistemas deterministas (sin factores aleatorios que afecten su dinámica) tales que su evolución queda fuertemente influenciada por cambios insignificantes en las condiciones iniciales. En consecuencia, la predicción de su estado futuro a partir de un cierto momento se hace imposible. Si conociéramos con absoluta exactitud la situación actual, los sistemas caóticos serían explicables y se podría predecir su comportamiento futuro. El carácter caótico se deriva de la imposibilidad de saber su estado actual con total precisión y de que estos sistemas amplifican de manera exponencial los pequeños errores iniciales que podamos cometer. Y como que los errores, aunque pequeños, son inevitables, su predicción a largo plazo se hace imposible.

2 El tiempo de Lyapunov es el inverso del coeficiente de crecimiento exponencial en la ecuación de la dinámica del sistema. Para un coeficiente L de 2 segundos, la evolución del sistema seguirá la exponencial $\text{Exp}(t/L) = \text{Exp}(t/2)$, donde t es el intervalo de tiempo de predicción medido en segundos. Algunas veces se utiliza también la función exponencial en base 2, $2^{t/L}$ o incluso la exponencial en base 10, $10^{t/L}$ en vez de la función Exp basada en el número e .

3 El intervalo de tiempo de predicción es la diferencia de tiempo entre el instante futuro en el que queremos hacer las previsiones, y el instante actual.

4 El carácter caótico de Plutón hace que no podemos saber cuál será el estado del sistema solar dentro de 100, 200 o 300 millones de años. Son tiempos más que lejanos. Pero tal vez no tanto. Sólo hay que recordar que hace 3500 millones de años ya había vida en la Tierra, que tenemos animales vertebrados desde hace 500 millones de años y que hace 200 millones de años los dinosaurios que ahora encontramos fosilizados llenaban el planeta.

cambio ínfimo en un cierto momento puede producir efectos gigantescos al cabo de un tiempo. Y otro cambio minúsculo en otra dirección puede simplemente evitar este efecto. La presencia o no de un edificio en Jamaica que hubiera desviado ligeramente (unos metros) la trayectoria del huracán Sandy cuando éste era todavía incipiente podía haber hecho que al cabo de pocos días, acabase desviando su trayectoria miles de kilómetros.

Para incrementar la fiabilidad en la simulación de sistemas caóticos, una solución es generar muchos posibles comportamientos futuros con varios modelos matemáticos y/o con estados iniciales ligerísimamente diferentes. Es una técnica que se aplica en las previsiones del tiempo, en la predicción del movimiento de los huracanes e incluso en las predicciones relativas al cambio climático. Aunque la evolución de estos sistemas termine divergiendo exponencialmente, siempre es posible sacar algunas conclusiones. No pudimos predecir la trayectoria del huracán Sandy, pero sí que podíamos afirmar con un alto nivel de seguridad que no iría hacia el sur.

Las muestras y los intervalos de confianza

Se publican muchos sondeos, electorales y de todo tipo. Puede que nos digan, por ejemplo, que un 46,3% de futuros votantes piensan votar por una determinada opción política. ¿Cómo puede ser que sepamos el porcentaje de gente que desea votar un determinado partido sin haber preguntado a todo el mundo?

La respuesta es que esta cifra del 46,3% es sólo una aproximación, porque los sondeos nunca pueden dar valores exactos. Lo importante, sin embargo, en el resultado de toda encuesta, es conocer también los valores del error y del intervalo de confianza. En el ejemplo anterior, lo correcto sería decir: “con un error del 1% y un intervalo de confianza del 95%, podemos estimar que el 46,3% de futuros votantes piensan votar esta opción”. Estos dos valores, error e intervalo de confianza, bien conocidos por los estadísticos que han analizado los datos de la encuesta, habitualmente se silencian para no oscurecer y complicar el mensaje comunicativo. Pero la idea es sencilla. Debemos fijar un error porque nunca podremos tener certeza absoluta en las inferencias que hacemos a partir de sondeos. Así, cuando aceptamos un error del 1%, lo que estamos afirmando es que el porcentaje de futuros votantes se encontrará entre el 45,3 y el 47,3%, con un 1% de incertidumbre. Y además necesitamos de un segundo parámetro porque el hecho de hacer las preguntas a un subconjunto de personas nunca nos dará información precisa sobre lo que piensa hacer el resto, ni siquiera aceptando este error del 1%. ¿Qué significa decir que el intervalo de confianza es del 95%? Significa que cuando alguien afirma que el porcentaje de futuros votantes se encontrará entre el 45,3 y el 47,3%, tendrá razón en el 95% de los casos.

Esta mágica mezcla de error e intervalo de confianza es lo que permite que la estadística pueda medir lo que es parcialmente desconocido y lo que sólo es probable. No

sabemos qué opina todo el mundo, pero podemos afirmar que si decimos que el porcentaje de votos estará entre el 45,3 y el 47,3%, acertaremos el 95% de las veces.

Esta tabla muestra, en el caso más desfavorable y con un intervalo de confianza del 95%, si debemos preguntar a mucha o poca gente:

Población	Error del 1%	Error del 4%
5.000	3.289	536
10.000	4.899	567
20.000	6.489	583
100.000	8.763	597
1.000.000	9.513	600
2.000.000	9.558	600
50.000.000	9.602	601

El número de gente a la que hay que preguntar es lo que se denomina tamaño muestral. La tabla anterior indica esta medida en el caso correspondiente a un error del 1% (bastante habitual) pero también, en una segunda columna, en el caso de que este error sea del 4%. En otros casos será preciso utilizar las fórmulas que se derivan de la inferencia estadística.¹

Es interesante observar, en la tabla ya comentada, la lentitud en el crecimiento del tamaño muestral a medida que crece la población total que queremos analizar. Si aceptamos un error del 1% con un intervalo de confianza del 95% y queremos estimar la intención de voto en un pueblo con 5.000 votantes potenciales, deberemos preguntar a 3.289 personas, más de la mitad del total. Pero si la población total es de dos millones de personas o más, el tamaño muestral se estabiliza y no llega a las diez mil personas. Y en caso de que aceptamos un error del 4%, el tamaño de la muestra sólo varía entre 536 y 601. Concluyendo, para estudios que implican grandes poblaciones, el tamaño de la muestra acaba siendo relativamente pequeño. Por suerte, no es necesario preguntar a demasiada gente.

Luego, una vez calculado el tamaño de la muestra, habrá que elegir las personas aleatoriamente (con el censo de población o el censo de votantes, según el caso), y esta lista de personas a preguntar no se podrá alterar porque la muestra debe ser aleatoria.

Los sondeos se hacen habitualmente con un intervalo de confianza del 95%. Pero, para entender bien los resultados, debemos conocer el valor del error que se ha considerado. No es lo mismo un error del 1% que uno del 4%.

¹ Sobre el cálculo del tamaño muestral véase, por ejemplo: <http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo8/B1C8m1t12.htm>

Este trabajo es una aproximación a la cultura de los límites y a los valores que se destilan y emanan de la ciencia, explicados a partir de la vida de personas científicas, sobre todo mujeres.

Desgraciadamente, la ciencia y sus protagonistas son casi imperceptibles, como todo lo que plantean y los valores que defienden. La ciencia incluso genera recelo. No es fácil acercarse a ella sin prejuicios. Y si los científicos son invisibles, a lo largo de la historia las mujeres científicas lo han sido aún más.

La obra intenta conectar la vida de estas personas protagonistas, muchas de ellas hoy olvidadas, con los valores que las guiaron y con algunas pinceladas divulgativas para desvelar aquella misteriosa belleza oculta que las cautivó.

El objetivo es múltiple: hablar de algunos de sus principios éticos, acercarnos a la cultura científica de los límites, desvelar, con su biografía, las dificultades que encontraron para desempeñar su trabajo creativo y divulgar algunos de sus maravillosos descubrimientos, intentando superar el respeto y el miedo que a menudo nos genera la ciencia. Ellas vivieron lejos de las riquezas, se descubrieron frágiles. Vivieron con mesura, decidieron cuidar, quisieron ser cuidadas. Y escondidas en el valle de los límites, lo explicaron. Su actitud nos ayuda a entender nuestro lugar en el mundo, desenmascarando los discursos que ignoran las fronteras ecológicas y convergiendo con las del ecofeminismo, los movimientos por el clima y la sociedad civil.

Los retos actuales, como ya explicaron Virginia Woolf, Buckminster Fuller y otras muchas personas, son imposibles de alcanzar sin cambiar y superar el actual sistema militarizado de poder y seguridad, y que éste no se puede dismantelar desde una visión patriarcal. Otro mundo es posible y necesario, un mundo que deje atrás los grandes mitos que nuestro miedo ancestral ha ido engendrando. Mitos que, ignorando nuestra efímera esencia, nos han llevado al empeño desmedido de poder, a la violencia, a la dominación, a creer que somos mejores que los otros, a la destrucción, las armas y las guerras. Otro mundo y otra cultura que escuchen las voces de las personas de ciencia, que acepten de una vez que formamos parte de la naturaleza, que somos iguales y vulnerables y que debemos convivir, dialogar y cuidarnos en un planeta que debemos respetar. O cambiamos ahora o nos destruiremos.