

Los científicos vienen afirmando desde hace ya varias décadas que la ciencia del siglo XXI será la de los **sistemas complejos**. Y es que en la base de todo sistema complejo —desde el comportamiento de las moléculas hasta las medidas que deben adoptar los Estados para lograr el equilibrio con la naturaleza— subyace una serie de reglas que, una vez identificadas, contribuirán a unificar ampliamente las ciencias de la vida.

**Roger Lewin** ha querido reunir aquí las ideas de los **auténticos pioneros** de este descubrimiento para que podamos seguir de cerca la **hermosa aventura** en la que ya nos hemos embarcado todos irremediabilmente.

Desde las colinas que rodean el Cañón del Chaco en Nuevo México hasta los páramos del condado de Devonshire, desde la selva de Costa Rica hasta los laboratorios más sofisticados de Estados Unidos, conversando entre muchos otros biólogos, matemáticos, físicos y químicos, con científicos tan célebres como **Edward O. Wilson**, entomólogo creador de la sociobiología, **Stephen Jay Gould**, protagonista de la polémica sobre la noción del progreso en la evolución biológica, **James Lovelock**, cuya hipótesis de Gaia ha conmocionado el debate sobre el orden emergente, **Murray Gell-Mann**, físico ganador del **Premio Nobel** por el descubrimiento de los quarks, o **Chris Langton**, estudioso de los sistemas complejos adaptativos en las culturas del sudoeste norteamericano, **Lewin** no sólo ha levantado un auténtico mapa del recorrido realizado hasta hoy por lo que pronto se conocerá como **Teoría de la Complejidad**, sino que ha trazado la apasionante historia de la lenta, pero obstinada, conquista de sus **descubridores**.

# COMPLEJIDAD

El caos como generador del orden

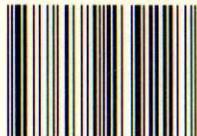
Roger Lewin



METATEMAS 41

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

ISBN 84-7223-922-5



9 788472 239227

TUSQUETS  
EDITORES



Fundació "la Caixa"  
Museu de la Ciència

1646  
01  
EW  
m

**Roger Lewin**, tras doctorarse en bioquímica en la Universidad de Liverpool, trabajó durante nueve años para la revista *New Scientist* en Londres y durante otros nueve para *Science* en Washington. Autor de varios libros de divulgación científica, **Lewin** ha escrito junto con el conocido antropólogo **Richard Leakey** tres obras, la última de las cuales fue *Interpretación de los fósiles*. En 1989 recibió el **Lewis Thomas Award for Excellence in Communicating Life Science**.

Metatemas 41





Metatemas  
Libros para pensar la ciencia  
Colección dirigida por Jorge Wagensberg

Al cuidado del equipo científico del Museu de la Ciència  
de la Fundació "la Caixa"

Roger Lewin

---

## COMPLEJIDAD

El caos como generador del orden

Traducción de Juan Gabriel López Guix

Tusquets Editores

\* Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor

Título original: *Complexity.*  
*Life at the Edge of Chaos*

1.ª edición: noviembre 1995

R 54581

© 1992 by Roger Lewin

© de la traducción: Juan Gabriel López Guix, 1995  
Diseño de la colección: Clotet-Tusquets  
Reservados todos los derechos de esta edición para  
Tusquets Editores, S. A. - Iradier 24, bajos - 08017 Barcelona  
ISBN: 84-7223-922-5  
Depósito legal: B. 33.965-1995  
Fotocomposición: Foinsa - Passatge Gaiolà, 13-15 - 08013 Barcelona  
Impreso sobre papel Offset-F. Crudo de Leizarán, S.A. - Guipúzcoa  
Libergraf, S.L. - Constitución, 19 - 08014 Barcelona  
Impreso en España

## Indice

P. 9 Agradecimientos

### Complejidad

- 13 1. La vista desde el cañón del Chaco
- 37 2. Más allá del orden y la magia
- 60 3. El descubrimiento del límite del caos
- 82 4. Explosiones y extinciones
- 105 5. La vida en un ordenador
- 129 6. Estabilidad y realidad de Gaia
- 155 7. La complejidad y la realidad del progreso
- 178 8. El velo de la conciencia
- 203 9. La vista desde el límite

### Apéndices

- 233 Bibliografía seleccionada
- 237 Índice onomástico y de materias

## Agradecimientos

La ciencia de la complejidad ha acabado siendo uno de los conjuntos de ideas más estimulantes intelectualmente que he encontrado en mucho tiempo, y debo agradecer a mi agente, John Brockman, el haberme alentado en esa dirección. Por lo general, donde hay ideas interesantes, hay también gente interesante, y esta experiencia no ha constituido una excepción. Quisiera expresar mi gratitud a aquellas personas que han hecho un hueco en sus apretadas agendas para hablar conmigo y responder con paciencia a lo que en alguna ocasión debieron de parecer preguntas estúpidas. Este libro trata de ellos y de su trabajo, y sus nombres aparecerán en las páginas que siguen. Tengo contraída una deuda especial con un puñado de personas que me ofrecieron su tiempo y sus ideas de un modo extraordinariamente generoso. Son Stuart Kauffman, Chris Langton, Norman Packard, Stuart Pimm y Tom Ray. A Tom también tengo que darle las gracias por mi primera experiencia en una selva tropical. Patricia Crown, Jeff Dean y Chip Wills organizaron la visita al cañón del Chaco y me introdujeron en una faceta de la arqueología que me era desconocida. Nunca lo olvidaré. Los miembros del Instituto de Santa Fe, cuna de la nueva ciencia de la complejidad, se mostraron pacientes y colaboradores ante cada nueva petición por mi parte; a todos ellos mi más sincero reconocimiento. Y Trish Hoard me resultó siempre útil en la búsqueda de las referencias más oscuras: gracias.

Muchas personas tuvieron la amabilidad de leer algunas partes del manuscrito y hacer comentarios útiles. Mi constante apoyo a lo largo de todo el proceso —y mi crítica editorial más amable— ha sido Gail, mi esposa. Sin ella, la redacción del libro habría sido menos gratificante y el resultado final más pobre.



Complejidad

La subida fue corta pero escarpada, casi una escalada. Habíamos visto el camino desde la carretera, serpenteando por el pedregoso terreno al pie de un abrupto acantilado, aunque no tardaba en desaparecer tortuosamente por una estrecha y sombría grieta formada muchos años atrás cuando un enorme bloque de roca se separó parcialmente de la cara del acantilado. Las paredes de arenisca marrón casi se tocaban, el pasaje era apenas más ancho que mis hombros y subía unos 40 metros hasta llegar a la cima. Miré hacia arriba y vi una gran desgarradura azul donde el pasaje llegaba al cielo abierto, azul oscuro sobre marrón. Estaba ansioso por llegar, pero tenía que mirar donde pisaba; a veces era sobre suave arena, otras sobre piedras traicioneras. Mis tres compañeros llegaron al final de la escalada antes que yo y aprovecharon para recuperar el aliento mientras los alcanzaba.

«Desde aquí te harás una buena idea de cómo se desarrolló todo», dijo Chip Wills. «Era un sistema vasto y complejo, no se parece a nada.» Hizo con el brazo un movimiento de énfasis de 180 grados. Estábamos mirando hacia el sur, frente a un abrupto cañón de casi un kilómetro de ancho. Parecía casi imposible que el pequeño río que veía recorrer irregularmente el fondo del cañón hubiera podido labrar en el paisaje algo tan impresionante. Flanqueado por elevados álamos de Virginia, de un brillante amarillo otoñal, el río completaba un panorama de sobrecogedora belleza. Es el cañón del Chaco, en la cuenca del San Juan, Nuevo México, un lugar que ejemplifica el majestuoso escenario del sudoeste estadounidense: mesas, cerros y cañones; desolado, aunque suavizado por los cá-

lidos tonos terrosos. Es también el emplazamiento de algunos de los restos arqueológicos más importantes al norte de México. «Venga», dijo Chip, arqueólogo de la Universidad de Nuevo México y especialista en culturas sudoccidentales primitivas. «Un poco más allá hay una vista estupenda de Bonito.»

Hace casi un milenio, el cañón del Chaco fue el centro de la cultura anasazi. Era el foco de una red de influencia económica, política y religiosa que abarcaba más de 260 000 kilómetros cuadrados de lo que hoy es un terreno riguroso, implacable: la meseta de Colorado. Ninguna otra sociedad precolombina alcanzó un estadio tan complejo al norte de México. Los arqueólogos lo llaman el fenómeno del Chaco.

Chip nos guió a lo largo del borde septentrional del cañón. Completaban el grupo Patricia Crown, de la Universidad Estatal de Arizona, y Jeffrey Dean, de la Universidad de Arizona, expertos también en arqueología sudoccidental. La árida arenisca que pisábamos se había depositado unos 80 millones de años atrás, cuando un gigantesco mar interior dividió Norteamérica en dos subcontinentes, el oriental y el occidental. Elevada y erosionada hoy por una conspiración de los elementos y el tiempo, una exigua vegetación desértica crece a ras de suelo, regada por lluvias ocasionales. Entre hierbas agostadas, crecen aquí y allá atrofiados enebros de hojas rojas, artemisas con una nube de lanudas hojas plateadas, y «malas mujeres», un miembro de la familia del zumaque muy utilizado en cestería.

Siempre dispuesto a disfrutar del olor de las hierbas, cogí varias hojas de artemisa y las froté entre los dedos mientras las olía. Durante las siguientes dos horas, mis ojos no pararon de llorar, y mi nariz de gotear. «Característico olor acre (produce fiebre del heno)», fue la descripción que leí más tarde. Podía confirmarlo. Patty contó la historia de una amiga que, nueva en la región, rellenó un pavo con esas hojas, pensando que eran parecidas a la salvia. No volvió a repetir el error. Jeff explicó que aunque los anasazi habían utilizado artemisa para muchos propósitos diferentes, incluso como ingrediente de cigarrillos ceremoniales y como antídoto para las mordeduras

de serpientes, nadie le conoce hoy ningún uso. «Es una lástima, porque hay por todas partes», dijo.

Habíamos andado unos cuatrocientos metros a lo largo del borde del cañón, deteniéndonos por el camino para examinar dos agujeros circulares, de unos 35 centímetros de diámetro, cortados en la roca. Alguien había sugerido recientemente que eran restos de algún tipo de señalización. Chip, delante de nosotros, nos hizo señas. «Ahí», dijo señalando el fondo del cañón. «Eso es Bonito.» Patty y Jeff lo habían visto antes muchas veces. Su trabajo los había llevado con frecuencia al lugar. Sin embargo, la familiaridad no enfrió el encuentro. En forma de D y con una longitud de 170 metros en el lado recto, Pueblo Bonito era la mayor de las llamadas Casas Grandes de la cultura del Chaco. «¿No es fantástico?», dijo Patty. Nos quedamos mirando, en silencio. El sol de primera hora de la mañana proyectaba alargadas sombras de las innumerables paredes. Alguien caminaba lentamente en uno de los espacios abiertos, una figura minúscula que subrayaba la grandeza de la estructura.

«Lo sorprendente de la arquitectura chaqueña es que los edificios surgen literalmente del suelo», dijo Jeff. «Como se puede ver, en aquella sección de allá, algunas partes tenían cuatro, cinco pisos de altura.» Estaba señalando la parte redondeada de la D, donde una catacumba de estancias interconectadas de varios pisos de altura formaba una curva de cinco, seis, a veces siete habitaciones de profundidad, que se adentraban en el espacio abierto de la D. El lado recto, paralelo al acantilado, daba al cañón y tenía sólo una habitación de profundidad y un piso de altura. Desde su mitad, una línea de habitaciones y cámaras circulares cavadas en el suelo dividía en dos el espacio central. Cuanto más miraba, más iba descubriendo en todas partes esas cámaras circulares, unas veinticinco, algunas pequeñas, otras de hasta quince metros de diámetro, con pequeñas estructuras cuadradas y rectangulares en su interior. «Son kivas», explicó Patty. «Se utilizaban para reuniones ceremoniales, sobre todo las grandes.» Contó que algunas de las pequeñas formas cuadradas y rectangulares del interior de las kivas eran estructurales, servían para colocar

grandes postes que sostenían un techo de madera. Otras eran simbólicas, como el pequeño hoyo circular situado a menudo en mitad del suelo, la puerta del mundo de los espíritus.

Desde el borde del cañón, Bonito resultaba impresionante con sus seiscientas habitaciones, centro sin duda de una intensa actividad. Los arqueólogos han llegado a estimarle una población de cinco mil habitantes. De cerca, Bonito es tan sorprendente como desde la elevación del borde del cañón. Las paredes de las fachadas se construyeron con pequeñas piezas de arenisca, lo que produjo un diseño intrincado y muy entrelazado. A menudo macizas, las paredes han resistido sin mortero casi mil años debido a la precisión de la construcción y a su volumen. Curvas largas y precisas, juntas invisibles, ángulos improbables para las ventanas y las puertas, algunas con la característica forma de T; los rasgos de Bonito ponen de manifiesto que los anasazi fueron unos consumados arquitectos y unos constructores meticulosos. «Las paredes nos parecen increíblemente hermosas, pero a menudo estaban revocadas, de forma que no se veían los detalles», dijo Patty. «Ese es sólo uno de los enigmas del Chaco», dijo Chip. «Hay muchos más.»

En la construcción de Bonito se emplearon hasta 70 millones de piezas de arenisca, treinta mil toneladas de roca que hubo que transportar a lo largo de quince kilómetros, moldear y colocar cuidadosamente siguiendo un diseño impecable. Como vigas y postes se utilizaron más de veintiséis mil árboles, algunos pesaban trescientos kilos y todos tuvieron que traerse desde una distancia de al menos ochenta kilómetros. «Parte de la madera vino de allá», dijo Jeff, señalando el lejano horizonte occidental, los montes Chuska, donde todavía crecen el pino ponderosa, el abeto de Douglas y la picea. Experto en técnicas de datación, Jeff es quien mejor conoce la madera de las Casas Grandes del Chaco. Ha sacado el corazón de muchas vigas y ha elaborado un extenso catálogo de fechas para cada uno de los pueblos. «Se puede seguir bastante bien la secuencia de construcción utilizando las fechas», explicó. También comentó que quizá muy pronto sería posible identificar la fuente geográfica de cada viga comparando los

oligoelementos de la madera con los de los actuales bosques de la región.

Veintiséis mil árboles, arrastrados ochenta kilómetros, sin otro medio de transporte que la fuerza muscular y el ingenio humanos: esas cifras pedían unos cálculos rápidos. A seis personas por árbol y un viaje de cuatro días, me salieron mil seiscientos años-persona de trabajo. Y Bonito era sólo una de las nueve Casas Grandes de la zona, seis en el fondo del cañón y tres en diversos lugares de las mesas. «Eso es lo que me impresiona de todo esto», dijo Chip. «No tienes la sensación de que fuera un pueblo que pasara hambre. Notas una exuberancia, un pueblo capaz de organizar enormes hazañas constructoras y, también, trabajos de regadío y agricultura bajo unas circunstancias muy duras. No hay duda, Chaco fue un lugar importante, muy importante.» El descubrimiento en Bonito de joyas de turquesa y unas cuantas sepulturas importantes habla de antiguas ceremonias.

Chaco es también importante hoy para los seguidores del movimiento New Age, que acuden al cañón para celebrar sus ceremonias, en las que incorporan cantos budistas, técnicas de meditación y bolas de cristal. «Van a Casa Rinconada, un poco más allá», dijo Jeff, señalando una zona ligeramente elevada al otro lado del cañón. Rinconada es una de las tres grandes kivas independientes situadas estratégicamente en el fondo del cañón; mide veinte metros de diámetro, se entra por un túnel de estructura simbólica y tiene nichos tallados en la pared circular. Es fácil imaginar la fuerza de semejante lugar: el techo de troncos, la penumbra de las antorchas, objetos sagrados en los nichos, el decisivo canto de los maestros religiosos. «Por eso les encanta a los New Agers», dijo Jeff. Para ellos, como para los antiguos anasazi, las grandes kivas son lugares sagrados.

Jeff nos habló de un grupo New Age que había visitado Rinconada el año pasado, procedente de algún lugar de Tejas. Al irse, uno de ellos murió de un ataque al corazón cuando entraba en el coche. Los amigos se lo llevaron, lo incineraron, volvieron con sus cenizas, y las esparcieron por el suelo de Rinconada. «Los navajos se horrorizaron», dijo Jeff. «No pue-

den tolerar una sensación de muerte en las kivas». Hubo que eliminar la contaminación mortal del suelo de la kiva antes de que volvieran los indios. «Se destruyeron muchos detalles arqueológicos.»

La impresión de la importancia que el Chaco tuvo para los anasazi se vio acrecentada cuando nos alejamos del borde del cañón y nos dirigimos hacia el norte, hacia los restos de otra Casa Grande, Pueblo Alto. Con cierta dificultad localizamos los restos de un camino construido hacía casi mil años por los anasazi para unir Bonito y Alto. El camino, que a veces discurría por un terreno relativamente llano y otras por pronunciados desniveles con escalones tallados en la roca, trazaba una línea recta entre las dos poblaciones. Pero era un camino extraño. Sin caballos ni medios de transporte con ruedas, a los anasazi les habría sido más fácil seguir los contornos naturales del terreno en lugar de ponerse a prueba a cada paso. Una simple pista habría bastado, no una carretera de unos diez metros de anchura. Para los anasazi, los caminos, como la arquitectura, superaban sin duda lo meramente funcional.

Los caminos anasazi se conocían desde principios de siglo, aunque sólo a partir de fragmentos dispersos. Su naturaleza y extensión no se hizo evidente hasta los años setenta, con la utilización de las modernas técnicas de detección remota. «Van en línea recta, salen del cañón del Chaco y recorren grandes distancias», dijo Jeff. «Pero no van en todas direcciones. Hacia el este no hay muchos, por ejemplo.» Los caminos quizá sigan rutas anteriores usadas para llevar suministros al Chaco, especuló Jeff. Si ése fue su origen, más tarde adquirieron otro papel. Se sabe ahora que los caminos conectaban poblaciones alejadas, algunas a más de ciento cincuenta kilómetros del cañón del Chaco. Los asentamientos, entre 150 y 300, son chaqueños en su arquitectura y organización, y está claro que conformaron algún tipo de sistema social unificado.

No tardamos en llegar a Pueblo Alto, más pequeño que Bonito y excavado menos extensamente. Nos dimos la vuelta y miramos hacia atrás, esforzándonos por ver el lugar donde el camino que habíamos seguido llegaba hasta el borde del cañón, antes de descender por unos empinados peldaños talla-

dos en la pared del acantilado. Más allá, al otro lado del cañón, está el desfiladero Sur, una de las salidas que van a dar a un camino importante. En la lejanía, se eleva Cerro Hosta como un centinela en el desierto. «Acercarse al cañón por ese camino debió de ser muy impresionante», dijo Chip. «Está muy trabajado, tiene al menos diez metros de anchura, y al entrar al cañón hay taludes construidos a ambos lados del camino, cada vez más altos. Tienes la impresión que de te hundes poco a poco, como si el Chaco te tragara.»

Me estaba formando una idea de cómo pudo haberse desarrollado todo, tal como había prometido Chip. Las nueve Casas Grandes y varias grandes kivas aisladas del cañón del Chaco no fueron sólo el centro geográfico de los anasazi hace un milenio; fueron, de algún modo, el centro de una poderosa influencia. Supuse, por analogía con los Estados modernos, que Chaco representó algún tipo de capital, quizá con Pueblo Bonito como centro principal. «Las recientes excavaciones en Pueblo Alto y una nueva valoración de Bonito señalan que, fuera lo que fuera el fenómeno del Chaco, no es algo que hoy nos sea familiar», dijo Chip, echando por tierra mis reflexiones. «Las Casas Grandes no estaban densamente pobladas; por ejemplo, es posible que en Bonito sólo vivieran unos pocos centenares de personas. En absoluto los miles que imaginábamos antes.» Adiós a la idea de Pueblo Bonito con su bulliciosa población de cinco mil habitantes. Ahora prevalece la imagen de alrededor de una veintena de personas, algunas dedicadas al cumplimiento de la misteriosa función de este hermoso y arquitectónicamente elaborado lugar, otras atendiendo los campos, donde se cultivaba maíz.

Algunos arqueólogos han sostenido la hipótesis de que las numerosas habitaciones de las Casas Grandes servían de almacén, de modo que Chaco habría sido un gigantesco centro de distribución. Pero hay pocas pruebas directas en favor de esa idea, y la intrincada configuración de muchas de las Casas Grandes, así como la importancia de las kivas, la desmienten. «Muchos arqueólogos piensan que fue un centro ceremonial», dijo Patty. «Aquí vivirían unas pocas personas, algunas como guardianes, otras como figuras destacadas en las ceremonias.

Pero la mayoría acudiría como visitante, quizá de forma periódica para los ritos estacionales.» No cabe duda de que al Chaco se trajo piedra y alfarería en grandes cantidades y desde lugares alejados, así como conchas marinas y turquesas. «¿Ves ese montículo de ahí?», preguntó Patty, señalando una pedregosa elevación al este de Pueblo Alto. «Es un montón de escombros, está lleno de trozos de alfarería.»

En efecto, podíamos ver decenas de cascotes, algunos decorados, otros no. Esas vasijas habrían llevado los motivos característicos de la época, dibujos trenzados o un diseño geométrico en blanco y negro. Tenían un tamaño adecuado para ser sostenidas con las dos manos y eran objetos bellos y útiles al mismo tiempo. Una década y media antes, cuando se excavó ese montículo de cuatro metros, se encontraron cantidades sorprendentes de cascotes, especialmente para una población tan modesta como Pueblo Alto. Se habían roto dos mil quinientas vasijas al año, lo que representa veinticinco recipientes anuales por persona. «O eran muy torpes o no utilizaban las vasijas de modo convencional», observó Chip. «La excavación demostró que los cascotes se tiraban periódicamente, algo inusual en el caso de un uso diario. Eso quizá significa que Pueblo Alto sólo estaba ocupado estacionalmente. O que había acontecimientos ceremoniales en los que se rompían recipientes. Me inclino por lo segundo.»

Mientras volvíamos a las ruinas de Palo Alto, Chip destacó la sensación de elevación, de dominio desde el lugar, con una panorámica de horizonte a horizonte. Sólo otras dos Casas Grandes del cañón del Chaco gozan de una visión de 360 grados. La región, cercana a la línea continental divisoria de las aguas, tiene una altura de unos dos mil quinientos metros. Desde el norte, cuatro o cinco caminos anasazi convergen sobre Pueblo Alto, cruzando como flechas la elevada meseta. Un recorrido de la mirada desde el norte hasta el oeste, el sur y un poco hacia el este, abarca el vasto territorio por el que se extendió la influencia de las Casas Grandes del cañón del Chaco.

Cuando llegó la hora de comer, encontramos un lugar resguardado en el extremo occidental del emplazamiento, con

casi todas las paredes redondeadas por siglos de erosión. La reciente excavación había puesto al descubierto el 10 por ciento de la estructura y sacado a la luz algunas variantes de la sillería chaqueña. Chip señaló una pequeña habitación cercana. «Aquí se encontraron tres piedras de moler, una al lado de otra», dijo. «Frente a cada una de ellas, había en el suelo de arcilla las huellas de tres cestas. Podemos imaginar a tres personas moliendo periódicamente maíz y depositando la harina en las cestas, haciendo comentarios sobre la gente y la vida de Pueblo Alto.» Una actividad de lo más corriente en un lugar de lo más especial.

El sol estaba en su cenit otoñal, el cielo de un nebuloso azul indicaba la tormenta prevista para mañana. Hacía calor a pesar de la brisa. Disfrutamos serenamente de la tranquilidad del lugar, entre paredes en ruinas que albergaban antiguos secretos.

Santa Fe parecía estar muy lejos.

Jeff, Patty, Chip y yo habíamos planeado nuestra excursión un año antes, al final de un congreso científico en Santa Fe, a unos 200 kilómetros al este del Chaco, entre los montes Sangre de Cristo y Jemez. El título del congreso, «Organización y evolución de las sociedades sudoccidentales prehistóricas», era bastante corriente. Muchos de los participantes eran antropólogos y arqueólogos, como cabría esperar de un encuentro así. Pero también había físicos, informáticos y un biólogo teórico. Uno de los organizadores era Murray Gell-Mann, un premio Nobel del Instituto de Tecnología de California, más conocido por desvelar los misterios del quark que por descubrir civilizaciones pasadas. El encuentro se celebraba bajo los auspicios del Instituto de Santa Fe, donde, según ha observado recientemente *The Wall Street Journal*, «ninguna idea es demasiado descabellada».

Los arqueólogos estaban ahí para intentar comprender mejor el esquema general de la prehistoria del Sudoeste. ¿Por qué, por ejemplo, había tenido una repercusión tan pequeña en la organización social la introducción de la agricultura del

maíz en la región tres mil años atrás? Y lo mismo había ocurrido con la cerámica poco más de mil años más tarde. ¿Qué había desencadenado el estallido de nuevas formas de organización social a partir del año 200? ¿Qué había detrás del rápido crecimiento del cañón del Chaco como importante centro regional entre los años 900 y 1150, el fenómeno conocido como del Chaco? De modo similar, ¿por qué se hundió Chaco y nunca recuperó la posición que había tenido?

Chaco nunca alcanzó el nivel de complejidad social de lo que puede denominarse una ciudad-estado, como las que habían surgido antes en México, Centroamérica y Sudamérica, así como en el Viejo Mundo. Pero, de modo incuestionable, incluyó elementos de organización social y económica que son precursores de la formación de un estado, una cuestión que ha intrigado siempre a los prehistoriadores. Por lo tanto, los arqueólogos y antropólogos asistentes a la reunión de Santa Fe tenían la oportunidad de reflexionar sobre el marco general de la formación de los estados y analizar algunos de sus detalles.

Para los miembros del Instituto de Santa Fe, el motivo era diferente. Para ellos, la evolución cultural y la formación de los estados no son sino otro ejemplo más de un importante fenómeno general. Desde su creación en 1984, el instituto ha atraído a un núcleo de físicos, matemáticos y expertos informáticos. El ordenador es el microscopio por medio del cual escrutan el mundo, real y abstracto. No hay rincón del mundo natural que escape a su mirada: la química, la física, la biología, la psicología, la economía, la lingüística, la sociedad humana, todo está incluido en una órbita intelectual común. También caben los mundos no naturales, mundos de lo más intangible creados con los ordenadores. El fenómeno que puede conectar estos mundos dispares, incluyendo el que impulsó el cañón del Chaco a lo largo de su historia única, se llama complejidad.

Para algunas personas, el estudio de la complejidad representa nada menos que una revolución científica fundamental. Una de ellas era Heinz Pagels, cuya estelar carrera como físico de la Universidad Rockefeller se vio truncada trágicamente en 1988 por un accidente de alpinismo. «La ciencia ha

explorado el microcosmos y el macrocosmos. [...] La gran frontera inexplorada es la complejidad», escribió en *The Dreams of Reason*, que se publicó el año de su muerte. «Estoy convencido de que los países y las personas que dominen la nueva ciencia de la complejidad se convertirán en superpotencias económicas, culturales y políticas en el próximo siglo.» Una afirmación bastante rotunda para una ciencia que hasta ahora tiene quizás unas pocas docenas de investigadores activos, una ciencia de la que la mayor parte de las personas nunca han oído hablar y que, en caso contrario, preguntan si no es lo mismo que el caos.

He hecho la misma pregunta a muchas personas. «La complejidad y el caos dan vueltas persiguiéndose intentando averiguar si son lo mismo o cosas diferentes», respondió Chris Langton. Chris, que es miembro del instituto y participó en el congreso sobre prehistoria sudoccidental, es una de esas personas para quien es difícil hablar sin recurrir al mismo tiempo a la pizarra para ilustrar lo que está diciendo. «Completamente ordenado aquí... Completamente aleatorio aquí», dijo dibujando grandes trazos. «La complejidad se produce en algún lugar intermedio.» Movimiento brusco. Estábamos hablando durante una pausa en el congreso y deseaba enfrentarme a lo que me parecían unos conceptos escurridizos. ¿Por qué no hay complejidad ahí, en el área del azar?, pregunté. «Es una cuestión de estructura, de organización», dijo. «El gas de esta habitación es un sistema caótico, muy aleatorio, con muy poco orden. La ciencia de la complejidad trata de la estructura y el orden.»

¿Orden como el que se encuentra en la organización del Chaco? «Sí.» ¿Orden como cuando un embrión se desarrolla y se convierte en un adulto plenamente formado? «También.» ¿Y las tendencias evolutivas? «Sí.» ¿Y los ecosistemas? «Eso es.» Pregunté por qué, en ese caso, el instituto no está lleno de antropólogos y biólogos en vez de físicos e informáticos. «Porque estamos buscando las reglas fundamentales que subyacen a todos esos sistemas, no sólo los detalles de cualquiera de ellos», explicó Chris. «Sólo se pueden entender los sistemas complejos utilizando ordenadores, porque son en gran me-

dida no lineales y están más allá de los análisis matemáticos convencionales.» Añadió que por ahora pocos biólogos son conscientes de la complejidad tal como se entiende en el Instituto de Santa Fe. «Si lo fueran probablemente pensarían que estamos chalados.»

En los últimos tres siglos la ciencia, armada con las matemáticas de Newton y Leibniz, ha logrado explicar muchos procesos del universo. Se trataba esencialmente de un mundo mecánico, caracterizado por la repetición y la predictibilidad. El lanzamiento de una nave espacial con la misión de llegar a la Luna tras varios días de viaje depende de esa predictibilidad. Si se altera, aunque sea de forma mínima, la trayectoria de la nave, el nuevo rumbo, que se desvía sólo ligeramente del original, puede volver a predecirse usando las ecuaciones del movimiento. Ese es un mundo lineal, y constituye una parte muy importante de nuestra existencia. Sin embargo, la mayor parte de la naturaleza es no lineal y no puede predecirse con facilidad. El tiempo meteorológico es un ejemplo clásico: hay muchos componentes que interactúan de modos complejos y producen una impredecibilidad notoria. Los ecosistemas, por ejemplo, las entidades económicas, los embriones en desarrollo y el cerebro son otros tantos ejemplos de dinámica compleja que desafían la simulación o el análisis matemático.

En los sistemas no lineales, entradas pequeñas pueden tener consecuencias espectacularmente grandes. A menudo, se ha hecho referencia a esto con el nombre de efecto mariposa: una mariposa bate las alas en la selva tropical del Amazonas y pone en marcha sucesos que producirán una tormenta en Chicago. Sin embargo, la siguiente vez que la mariposa bate las alas, no hay ninguna consecuencia meteorológica. Esta es la base de la impredecibilidad. Si las leyes del movimiento fueran no lineales, ningún astronauta en su sano juicio aceptaría ser enviado a la Luna, porque la posibilidad de que el personal de tierra fuera capaz de disponer las condiciones iniciales —peso, altitud, aceleración, etcétera— con la suficiente precisión como para determinar el resultado sería minúscula. Casi con toda seguridad, el astronauta acabaría en cualquier parte

salvo en la Luna. También los jugadores de béisbol confían en la naturaleza lineal —es decir, predecible— de las leyes del movimiento; de otro modo los defensores no podrían situarse en el campo para realizar las espectaculares recepciones que consiguen.

La física clásica consideraba los sistemas complejos precisamente como eso: sistemas que, cuando se dispusiera por fin de herramientas analíticas lo suficientemente poderosas, exigirían descripciones complejas. El descubrimiento central del reciente interés por los sistemas dinámicos no lineales es que esa presunción es incorrecta. Tales sistemas pueden, en efecto, parecer complejos en la superficie, pero quizás estén generados por un conjunto relativamente simple de subprocesos. El descubrimiento de la teoría del caos estuvo en la vanguardia de esa naciente comprensión de los sistemas dinámicos no lineales, como ha descrito James Gleick de forma tan cautivadora en su libro *Caos. La creación de una ciencia*. Muchos de los investigadores que, en contra de la opinión de colegas más experimentados, buscaron una comprensión del caos, están ahora comprometidos con el tema más amplio de la complejidad. Mirados todavía de soslayo por algunos, ya no se considera que estén del todo equivocados.

Pregunté a Chris si podía afirmarse que el caos es un subconjunto de la complejidad. «Sí, en la medida en que tratas con sistemas dinámicos no lineales», contestó. «En un caso puede que tengas pocas cosas interaccionando, produciendo un comportamiento de lo más divergente. Es lo que se llama caos determinista. Parece azar, pero no lo es, porque es el resultado de ecuaciones que es posible especificar, ecuaciones a menudo muy simples. En el otro caso, las interacciones en un sistema dinámico producen un orden global emergente, con todo un conjunto de propiedades fascinantes.» Chris se acercó de nuevo a la pizarra y garabateó un grupo de pequeños círculos unidos por flechas de doble punta. «Estos son los componentes del sistema, interaccionando localmente.» Encima surgió lo que parecía un dibujo infantil de una nube; una lluvia de flechas salió del grupo en dirección a la nube. A continuación, añadió dos grandes flechas, una a cada lado de la nube, ba-

jando hacia el grupo de círculos. «De la interacción de los componentes individuales *aquí abajo* emerge algún tipo de propiedad global *aquí arriba*, algo que no se podía haber predicho a partir de lo que se sabía de las partes componentes», continuó Chris. «Y la propiedad global, este comportamiento emergente, vuelve a influir en el comportamiento de los individuos que *aquí abajo* la produjeron.»

Orden surgiendo de un sistema dinámico complejo, así es como Chris lo describió, propiedades globales fluyendo del comportamiento general de los individuos. En el caso de un ecosistema, la interacción de las especies en el seno de la comunidad podría conferirle cierto grado de estabilidad; por ejemplo, una resistencia a los estragos de un huracán o a la invasión de una especie extraña. La estabilidad en este contexto sería una propiedad emergente.

En las sociedades industriales, el comportamiento global de compañías, consumidores y mercados financieros produce la economía capitalista moderna, «como guiada por una mano invisible», como dijo el economista escocés Adam Smith. En un embrión en crecimiento, la consecuencia global del agregado de un caleidoscopio de procesos de desarrollo es un individuo maduro. Y en el cerebro, miles de millones de neuronas interaccionan para producir complejas pautas de comportamiento. ¿Incluyendo la conciencia?, pregunté a Chris. ¿Explicaría la teoría de los sistemas complejos la conciencia? «Si la teoría de los sistemas complejos no es alguna clase de seductor espejismo y si el cerebro puede describirse como un sistema complejo adaptativo, entonces, sí, también la conciencia puede explicarse», dijo Chris. «Al menos en principio.»

Tenía ya claro que existe un enorme terreno para la confusión en torno a términos como *caos* y *complejidad*. Para la mayoría de nosotros, *caos* significa azar. En el ámbito de los sistemas dinámicos no lineales no es así. Y, también para la mayoría de nosotros, *complejo* puede significar casi lo mismo que caótico. Como dijo Chris, las moléculas de la habitación en la que estoy sentado escribiendo este capítulo no pueden ser más caóticas y describirlas exigiría conocer la posición y la actividad de cada una de ellas. No es posible ninguna des-

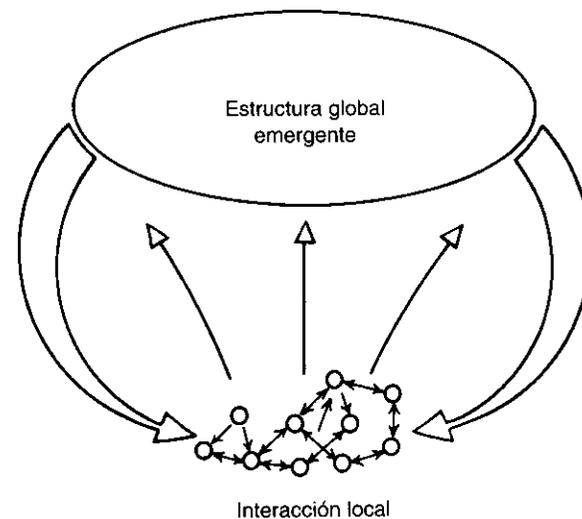


Figura 1. Visión de Chris Langton de la emergencia en los sistemas complejos.

cripción más simple. En el caso de algunos parámetros, eso haría que la habitación llena de moléculas fuera muy compleja. Esa clase de complejidad no me interesaba, ni es tampoco el principal centro de interés de los miembros del Instituto de Santa Fe. Están interesados en sistemas complejos que producen orden, como yo.

Murray Gell-Mann tiene una buena frase para referirse a ello: complejidad superficial que surge de una simplicidad profunda.

Los alrededor de treinta participantes en el congreso sobre prehistoria sudoccidental se reunieron la primera mañana en la sala principal del Instituto de Santa Fe un poco inseguros de lo que seguiría. El instituto estaba situado en un antiguo convento, Cristo Rey, y la sala principal había sido la capilla, un hecho que algunos miembros consideraban una sutil ironía. El

edificio, una estructura baja de adobe al final de Canyon Road, una calle famosa hoy por sus galerías de arte, proporcionaba esa atmósfera íntima necesaria para explorar ideas nuevas. Era precisamente la clase de entorno que los miembros fundadores habían buscado, explicó Gell-Mann en una breve sesión introductoria. «Lejos de las universidades o las instituciones establecidas, donde las burocracias y las barreras académicas ponen trabas al pensamiento creativo», dijo.

La idea de un instituto interdisciplinario y sin restricciones surgió en 1983 a partir de informales conversaciones de sobremesa entre un grupo de amigos en el cercano Laboratorio Nacional de Los Alamos, que Gell-Mann visitaba con frecuencia. Más conocido por ser el lugar de nacimiento de la bomba atómica, Los Alamos tiene también una gran experiencia en análisis de sistemas no lineales. En esas conversaciones creció una incipiente sensación de que de semejante análisis podía surgir algo de suma importancia, siempre que se pudiera actuar con mayor libertad. No se excluiría ninguna disciplina; todas cabrían bajo el paraguas de los sistemas complejos; en particular, con la maduración del instituto, de los sistemas complejos adaptativos.

«El flujo turbulento en un líquido es un sistema complejo», explicó Gell-Mann en la sesión introductoria. «Pero no puede decirse que sea adaptativo. En un flujo turbulento hay torbellinos que dan lugar a torbellinos más pequeños y así sucesivamente, y algunos torbellinos tienen propiedades que les permiten sobrevivir en el flujo y reproducirse, mientras que otros desaparecen. No cabe duda de que hay información en el sistema. Pero no produce un esquema, una comprensión de la información con la que pueda predecirse el entorno.»

Gell-Mann no es que sea un hombre especialmente activo, pero tiene capacidades poco frecuentes. Además de haber logrado un premio Nobel de Física, manifiesta un profundo interés por la lingüística (habla trece idiomas, todos ellos con una locución perfecta) y, también, por la psicología, la antropología, la arqueología, la ornitología y la conservación cultural y ecológica. Dice que abarca cincuenta veces más cosas que cualquiera y que, por ello, se le acumulan ocho años de

trabajo cada día que pasa. Afirma trabajar sólo al 2 por ciento de eficacia, aunque eso sea difícil de creer. Gell-Mann tiene pocas razones para ser modesto, y no lo es.

«En la evolución biológica, la experiencia del pasado está comprimida en el mensaje genético codificado en el ADN», continuó Gell-Mann. «En el caso de las sociedades humanas, los esquemas son las instituciones, las costumbres, las tradiciones y los mitos, que constituyen, en realidad, formas de ADN cultural.» Los sistemas complejos adaptativos son buscadores de pautas, dijo Gell-Mann. Interaccionan con el entorno, «aprenden» de la experiencia y, como resultado, se adaptan. La noción de que los sistemas complejos adaptativos contienen información sobre su entorno, de que lo conocen en algún sentido especial, era atractiva. ¿Una dotación genética como criptograma del entorno en el contexto de la evolución biológica? Por supuesto. ¿Y las instituciones culturales para las sociedades humanas? También. Pero, en el caso de otros sistemas, como los ecosistemas, los embriones, ¿cómo podrían conocer el mundo que habitan? Esa y otras preguntas semejantes tendrán que esperar. Cuando aún resonaba en nuestras mentes el comentario final de Gell-Mann —en realidad, una advertencia— de que «algún esquema puede estar mal adaptado», la sesión plenaria se levantó y los participantes se dividieron en grupos previamente asignados, cada uno de ellos con una tarea concreta.

Patty, Chip y Jeff eran los arqueólogos de mi grupo, al que se nos unieron Chris y Stuart Kauffmann, un biólogo teórico de la Universidad de Pennsylvania que también está vinculado con el instituto. Nos reunimos en el despacho de Stu, donde cabíamos justos los seis. Mi familiaridad con la arqueología del sudoeste era, en el mejor de los casos, limitada. La mayoría de mis incursiones en la prehistoria han tenido lugar en el pasado remoto, como en la garganta del Olduvai y la selva de Koobi, en Africa oriental. Estoy acostumbrado a pensar en el pasado en términos de millones de años, no de unos pocos miles o menos. Una poderosa intuición me había lle-

vado a ese novedoso ambiente, una intuición de que encontraría una pauta, un primer vislumbre de que iniciaría un viaje de descubrimiento. Me interesan las pautas de la naturaleza, las tendencias de la evolución, en la ecología, en la historia de la vida en la Tierra. Las frases de Gell-Mann «complejidad superficial que surge de una simplicidad profunda» y «los sistemas complejos adaptativos son buscadores de pautas» sintonizaron con esa búsqueda intelectual. Y me pregunté, sentado en la pequeña habitación, lo nítida que llegaría a ser la pauta.

«Has dado con los mejores especialistas en un método muy criticable», dijo Stu, señalándose a él y a Chris. «Puede que te proporcione algo en qué pensar. Puede que no.» Era obvio qué era lo que consideraba más probable. Algunos arqueólogos consideran que la historia carece de dirección, es «sólo una maldita cosa tras otra», por decirlo de algún modo. En cuyo caso, preguntó Chris, ¿cómo podía el «método criticable» de Stu conducir a una mejor comprensión del proceso? Lo que siguió fue un intercambio exploratorio de ideas, preguntas y respuestas, arqueología pura entrelazada con análisis abstractos de la complejidad y analogías biológicas. El franco desconcierto no fue algo infrecuente y, al principio, me resultó difícil ver dónde podía conducir la discusión. Poco a poco, empezaron a cristalizar los puntos de contacto, ideas provisionales que crecían a partir de minúsculas posibilidades iniciales.

Se habló del modo en que pueden analizarse las avalanchas de bienes que entran y salen de una economía como resultado de una innovación, el automóvil, por ejemplo. ¿Podía utilizarse eso en un marco arqueológico? Chip dijo que algo de eso podía verse en el Sudoeste, con la introducción del maíz en el año 1000 y, más tarde, la alfarería. Pero el enigma era que, durante más de mil años, pocas otras cosas habían cambiado. El maíz siguió siendo una parte menor de la subsistencia. ¿Qué faltó durante ese tiempo? ¿Organización social? ¿Los medios para acumular los excedentes? «En el año 200, la alfarería se volvió importante; también conocieron las ventajas del regadío, el sedentarismo y una organización social más compleja», dijo Patty. «Sucedió algo que produjo un gran cambio. Y sucedió rápidamente.»

«Esta es mi transición de fase», exclamó Chris, saltando a la pizarra, donde garabateó el diagrama de los manuales de física clásica de una transición de fase, con las fases sólida, líquida y gaseosa. «Cuando te acercas al límite y lo cruzas, de pronto hay un cambio de fase», explicó Chris. «Aquí estás en una fase, aquí en otra, y el cambio ocurre muy rápidamente, provocado por un cambio mínimo en las condiciones, la temperatura y la presión en este caso.» Quizás algún cambio pequeño en las condiciones externas hizo que, entre los años 300 y 400, los anasazi pasaran de una simple estructura propia de una tribu de cazadores-recolectores a algo más complejo, especuló Chris, quizás una especialización de las tareas. En este punto se nos unió brevemente al grupo Norman Yoffee. Antropólogo de la Universidad de Arizona y experto en la dinámica de la formación de estados, Norman describió la historia de las primitivas civilizaciones de Mesopotamia. «Cuando se observa la formación del Estado, siempre sucede rápidamente», dijo. «Los Estados son esperables y predecibles.»

Chris repitió brevemente lo que había dicho sobre las transiciones de fase en la física y su analogía con otros sistemas, incluyendo los cambios entre diferentes niveles de complejidad social. «Lo veo todo a través de los cristales de la transición de fase», admitió. Ofreció otro ejemplo, el del paso de los organismos unicelulares a los multicelulares, que se produjo hace 600 millones de años, en el Cámbrico. Durante 3000 millones de años, desde el momento en que la Tierra se enfrió lo bastante, la forma más elevada de vida fue la célula. Es verdad que cierto grado de complejidad surgió hace poco más de 1000 millones de años, cuando las células adquirieron mitocondrias y desarrollaron núcleos limitados por una membrana. No obstante, transcurrieron eones de entumecedora repetición. Entonces, de repente y con un efecto espectacular, evolucionó la capacidad de diferenciación celular y de agregación en organismos multicelulares. Se produjo una explosión de nuevas formas, con una asombrosa diversificación de la complejidad.

«La especialización celular ocurrió en el Cámbrico y...

¡bang!... El infierno se desató», dijo Chris gráficamente. «¿Sirve esto como analogía de lo que ocurrió en el Sudoeste?», preguntó. Pero Chris tenía en mente algo más que una simple analogía, algo más que una mera coincidencia de pauta. «Quizás haya algo fundamentalmente idéntico en los dos sistemas, de manera que las pautas sean la misma, al margen de cuáles sean los detalles del sistema», conjeturó.

Los biólogos conocen el principio de la multicelularidad y el consiguiente florecimiento de las formas complejas con el nombre de explosión cámbrica, una puntuación masiva en la historia de la vida. En términos antropomórficos, parece haber sido una época de experimentación evolutiva sin freno, una época en que se ensayaron todos y cada uno de los tipos corporales posibles. Muchas formas parecen haberse extinguido en un plazo breve (es decir, entre 5 y 100 millones de años), tras lo cual quedó una gama limitada de diseños corporales, o tipos, a partir de los cuales se formaron todos los organismos modernos. Chip, Patty y Jeff quedaron intrigados con la analogía —llamémosla así de momento— entre la explosión cámbrica y los estallidos de cambio social de la historia del Sudoeste, y dieron ejemplos similares de la historia de los anasazi. Sabía que George Gumerman, coorganizador del congreso, también consideraba que valía la pena explorar la analogía.

En un artículo general introductorio al congreso, George se había referido a la coincidencia de pautas biológicas y culturales. «El incremento en la variedad de las convenciones sociales es, en muchas maneras, análogo a la explosión cámbrica», escribió. «El incremento y la abundancia repentinos de las formas de vida en el Cámbrico se ha atribuido a la ocupación de una “ecología vacante”, un medio ambiente disponible y receptivo para la experimentación evolutiva. En todo el Sudoeste hubo tal incremento demográfico y tal expansión que hacia el año 1100 se habían ocupado casi todos los nichos. Es más, se probaron y tuvieron éxito durante un breve lapso numerosos tipos de organizaciones experimentales.» La tradición del cañón del Chaco fue una de esas organizaciones experimentales y una de las más complejas y logradas.

¿Cómo encontraste la analogía?, pregunté a George cuando le telefoneé poco antes del congreso. Contestó que unos meses atrás había estado leyendo un número de *Science*, el del 20 de octubre de 1989, que contenía un artículo del geólogo de la Universidad de Cambridge Simon Conway Morris sobre la explosión cámbrica: el título del artículo era «Burgess Shale Faunas and the Cambrian Explosion». «No lo entendí del todo porque no soy paleontólogo», me dijo George, «pero me di cuenta de la pauta global y pensé: es la misma pauta que la que encontramos en el Sudoeste. Diría que es una analogía espléndida. Quizá sea un rasgo universal de todos los sistemas evolutivos, quizás de todos los sistemas complejos. No lo sé.» Esa analogía explícita había contribuido en gran medida a alentar mi intuición de que muchas pautas de la naturaleza eran, de alguna forma, variaciones sobre temas similares. Eso me había llevado a Santa Fe.

«La pauta de la explosión cámbrica es fundamental en toda innovación», dijo Stu, respondiendo al interés del grupo por esta nueva línea argumental. «Aparece una gama inicial de nuevas formas y, luego, es cada vez más difícil mejorarlas. Se ve en biología. Se ve en las economías industriales.» Y se ve quizás en la evolución de la complejidad social.

La evolución de la complejidad social ha puesto a prueba a los antropólogos durante muchos años, en términos de definición y explicación. Nadie duda de que un Estado es más complejo que una banda de cazadores-recolectores. Pero el proceso del paso de la al otro, así como la naturaleza de las etapas intermedias, sigue siendo tema de debate. Hace tres décadas, el antropólogo de la Universidad de California en Santa Bárbara Elman Service propuso una estructura clara, que progresaba desde la banda de cazadores recolectores a la tribu, la jefatura, el Estado, una evolución predecible de formas particulares. Demasiado clara, como se ha visto. Hay muchas variaciones locales que hacen que la clasificación, así como la progresión gradual, parezca simplista. El Chaco, por ejemplo, no acaba de encajar en la antaño aceptada definición de jefatura, al carecer de muchas de las características de semejante estructura de poder, como la arquitectura monumental y las

sepulturas elaboradas. Y, sin embargo, no cabe duda de que Chaco representa un aumento importante en la complejidad social con respecto a la banda de cazadores-recolectores o el poblado agrícola sencillo.

«Si la evolución cultural funciona como otros modelos de sistemas evolutivos, cabría esperar ver unas transiciones rápidas de un nivel de organización al siguiente», continuó Stu. «Hemos hablado de la pauta de innovación en el punto de cambio. ¿Es razonable considerar los diferentes niveles como algo especial, ya se llamen tribus, jefatura u otra cosa?» De modo nada sorprendente, los arqueólogos del grupo encontraron varias formas de responder al reto, explicando por qué algunas personas piensan de un modo y otras de otro. «No creo que sea del todo irrazonable», acabó concediendo Jeff. «Puede que existan niveles discretos de organización que, en un sentido general, sean comunes a toda evolución cultural. Pero no me preguntéis cómo habría que llamarlos.» Explicó que algunos arqueólogos se refieren al cambio de un nivel a otro como puntos bisagra. Los biólogos evolutivos los llaman puntuaciones. Y los físicos, como Chris, transiciones de fase.

Si de verdad existen niveles discretos de organización social comunes a toda evolución cultural —al margen de cómo se denominen—, me pregunté si cada nivel representa algún tipo de sistema «natural», un nivel de organización hacia el que es atraído de modo inexorable el sistema cultural en evolución. Los arqueólogos se mostraron completamente escépticos. Pero, de nuevo Jeff admitió que no era irrazonable, al menos nadie podía inequívocamente demostrar que fuera falso. Me di cuenta de que estaba forzando el límite de lo razonable y lo cognoscible. Pero para eso estaba ahí.

Los sistemas más complejos exhiben lo que los matemáticos llaman atractores, estados en los que el sistema acaba estabilizándose, en función de sus propiedades. Imaginemos que estamos flotando en un mar embravecido y peligroso, entre rocas y arrecifes. Se crean remolinos, en función de la topografía del lecho marino y la corriente. Al final, nos atrae uno de esos vórtices. Nos quedamos ahí hasta que alguna perturbación mayor o cambio en la corriente nos saca de él, para ser luego

atraídos por otro. Dicho de forma esquemática, así es como cabría imaginar un sistema dinámico con múltiples atractores: como la evolución cultural, con atractores equivalentes a bandas, tribus, jefaturas y Estados. Este mar mítico tendría que estar dispuesto de tal modo que el desventurado naufrago pasara primero por el remolino uno, tras lo cual el siguiente remolino posible sería el remolino dos y así sucesivamente. No habría necesariamente una progresión de uno a dos, de dos a tres y de tres a cuatro. La historia está llena de ejemplos de grupos sociales que consiguen un nivel superior de organización y luego se vienen abajo. Es lo que sucedió en el Chaco. Y, hasta tiempos recientes, toda sociedad que ha alcanzado el nivel cuatro —el Estado— ha acabado derrumbándose.

Llevando hasta el límite esta línea de pensamiento, pregunté a Chris qué esperaba en el caso de que fuéramos capaces de construir un modelo informático de evolución cultural. Tendría que empezar con los componentes de la banda dedicada al pillaje y su dinámica social y económica. ¿Esperaría que el modelo presentara atractores equivalentes a niveles discretos de organización, como la tribu, la jefatura, el Estado? «Esperaría ver atractores, sin duda», dijo sin vacilación. «Si hay poblaciones que interaccionan, y su adecuación depende de esa interacción, encontraremos periodos de estasis puntuados por periodos de cambio. Es lo que vemos en algunos de nuestros modelos evolutivos, de forma que espero verlo aquí también.» En tal caso, la historia no podría ser descrita como una maldita cosa tras otra, ¿verdad?

Con una conversación tan espesa como ésa estaba claro que había llegado el momento de hacer una pausa e ir a tomar un té en el patio del convento.

«Os he visto antes», dijo Chris. «No érais arqueólogos. Erais biólogos. Erais lingüistas. Erais economistas, físicos, todo tipo de investigadores.» Se trataba de la sesión final del congreso, todos estábamos reunidos otra vez en la capilla. Cada grupo había hecho un resumen de sus debates y conclusiones. Chris estaba ofreciendo la perspectiva del Instituto de Santa

Fe. «Cada vez que un grupo de personas viene a una de estas conferencias, se considera algún tipo de proceso histórico. Los sistemas evolutivos son así. Son procesos únicos, de modo que no pueden compararse con nada más. Os gustaría repetir el proceso, ver lo que ocurre una segunda vez, una tercera y así sucesivamente. No es posible hacerlo, de modo que es aquí donde nosotros entramos.»

Chris y otros miembros del instituto como él buscan principios universales, reglas fundamentales que moldeen todos los sistemas complejos adaptativos. «El congreso sobre sociedades sudoccidentales me aclaró mucho las cosas», me dijo Chris más tarde. «Fue entonces cuando me di cuenta de que había visto las mismas pautas una y otra vez en los congresos del instituto. Por eso dije: “Os he visto antes”.» Chris y yo estábamos hablando un año después del congreso, justo después de volver de mi visita al cañón del Chaco. Nos encontrábamos en la nueva sede del instituto, un edificio de oficinas en Old Pecos Trail compartido con abogados y una compañía de seguros. Más conveniente quizá, pero ya no era el convento. «Aquí están todas esas bandas de cazadores de ahí fuera, grupos de individuos en los que todos son capaces de hacer todas las tareas. Cada uno de ellos puede cazar, recolectar plantas, hacer ropa, etcétera. Interaccionan entre sí, se produce una especialización y... ¡bang!... transición de fase... todo cambia. Se produce un nuevo nivel de organización social, un nivel superior de complejidad.»

Chris estaba en la pizarra, ocupado primero en dibujar la transición de la banda a la tribu, y luego en demostrar por qué es lo mismo que el paso de los organismos unicelulares a los organismos multicelulares. No tardó en hablar de la explosión cámbrica y el equilibrio puntuado. Más dibujos. Luego, se ejecuta en el ordenador un simple modelo evolutivo. Dibujo. Poco después está con las bicicletas, las semillas y la caída de Gorbachov... Dibujo... dibujo.

Fue entonces cuando me convencí de verdad de que mi viaje en busca de pautas iba a merecer la pena.

«Me miraron como si estuviera loco», recordó Stuart Kauffman. «Allí estaba, barajando mi paquete de tarjetas, y luego entregándoselas al programador.» Eso fue en 1965, en la época en que había que alimentar el ordenador con una serie de tarjetas perforadas que contenían el programa y los datos. «La era del vapor.» Para que el programa funcionara, las tarjetas tenían que estar en perfecto orden, todo el mundo lo sabía. Una tarjeta fuera de lugar y lo más probable era que la máquina produjera basura. «Y allí estaba yo, barajando mis tarjetas de datos, desordenándolas. No es de extrañar que me miraran con una sonrisa burlona.»

Stu tenía entonces veinticuatro años, estudiaba segundo de medicina en la Universidad de California, San Francisco. Sin embargo, la incursión en el centro de cálculo de la facultad de Medicina no tenía nada que ver con sus estudios oficiales. Estaba allí para demostrar que tenía razón y que toda la comunidad biológica, desde Darwin en adelante, se equivocaba. «No era una empresa modesta», admitió Stu, mientras hablábamos en su desordenado despacho del departamento de bioquímica de la Universidad de Pennsylvania. «Pero estaba firmemente convencido de que yo tenía razón.»

Conocí a Stu en un congreso científico sobre ritmos circadianos, en Berlín, hacía casi veinte años. El congreso había sido una mezcla de biología básica y extrañas —para mí— matemáticas, exactamente la clase de combinación intelectual con la que Stu y sus amigos disfrutaban. Stu siempre tiene que estar entusiasmado por alguna idea. «Es la persona con mayor índice boca-cerebro que conozco», me dijo una vez un

colega y amigo íntimo suyo. «Y estamos hablando de una inteligencia privilegiada.» Al parecer, la Fundación MacArthur estuvo de acuerdo y le concedió una de sus prestigiosas becas para «genios». De modo que, cuando llamé a Stu a principios de 1990 y me dijo: «¿Por qué no vienes a Penn y te hablo de la complejidad? Es algo nuevo y va a ser muy importante», supe que tenía que ir. Iba a ser mi introducción a la complejidad como ciencia por derecho propio. Eso ocurrió en la primavera anterior al encuentro de Santa Fe sobre sociedades prehistóricas sudoccidentales.

A toda velocidad y con una característica mezcla de jerga y lúcidas metáforas, Stu explicó cómo una certeza interior lo había empujado a ese extravagante experimento informático en su época de estudiante de medicina, una certeza de que la explicación convencional de los orígenes del orden en el mundo de la naturaleza tenía que estar equivocada. Hay orden en todas partes, en las semejanzas morfogenéticas entre los grupos de organismos y en el modo notable en que los organismos individuales operan en sus respectivos medios, como si estuvieran cuidadosamente diseñados. El fenómeno había fascinado a los estudiosos desde los tiempos de Aristóteles. Y, a mediados del siglo XVIII, el sueco Carl von Linné agrupó los organismos conocidos según las semejanzas que presentaban en su *Systema Naturae*, una clasificación que los biólogos siguen utilizando hoy en día. La explicación convencional de todo ese orden es la selección natural, que los biólogos han considerado, a partir de Darwin, como la fuerza que hace encajar a los organismos en sus respectivos nichos. Las semejanzas entre grupos son el resultado de la descendencia común, «descendencia con modificación», como Darwin la describió.

«Se consideraba que la selección natural era la única fuente de ese orden, una fuerza omnipotente capaz de producir más o menos cualquier clase de forma biológica, dadas las circunstancias adecuadas», dijo Stu. «No me preguntes cómo, pero sabía que eso no podía ser así, que ahí afuera tenía que haber una gran cantidad de orden espontáneo.» ¿Orden espontáneo? Eso huele a vitalismo, insinué, una noción antaño popular pero hoy desacreditada según la cual gran parte de las

maravillas del mundo natural es consecuencia de un *élan vital*, o espíritu vital. Esta noción no explicaba tanto la naturaleza como la justificaba y, para la ciencia moderna, es anatema. «No me refiero a eso, por supuesto», respondió Stu. «Me refiero a que la autoorganización es una propiedad natural de los sistemas genéticos complejos. Ahí fuera hay “orden gratis”, una cristalización espontánea del orden a partir de sistemas complejos, sin necesidad de selección natural o de cualquier otra fuerza externa. Lo tenía claro en la facultad de medicina y lo sigo teniendo claro ahora.»

Stu sigue siendo incapaz de dar plena cuenta de su vieja convicción de que el saber convencional tiene que estar equivocado. Algo que sin duda tiene que ver con su educación claramente no convencional. Había llegado a Dartmouth en el otoño de 1957 con la intención de convertirse en dramaturgo, no un dramaturgo corriente sino un Gran Dramaturgo. «Es inútil ser un escritor de teatro corriente.» Tres semanas y dos obras mediocres más tarde y, animado por un amigo que había ido a Harvard, Stu decidió que sería un Gran Filósofo. «Los jóvenes se meten a estudiar filosofía porque están interesados por la ética, la mente, esa clase de cosas buenas», explicó.

Con un diploma en filosofía de Dartmouth (Phi Beta Kappa), Stu recibió una beca Marshall que lo llevó a la Universidad de Oxford en el otoño de 1961, donde estudió filosofía, psicología y fisiología en Magdalen College, uno de los cursos más prestigiosos en una de las facultades más prestigiosas de esa antigua universidad. «Fue una época maravillosa», declaró, colocando los brazos detrás de la nuca, resbalando en su crujiente silla y estirando las piernas, mientras lo inundaban los recuerdos. «Escalar los muros de la facultad por la noche y ese estilo de cosas.» ¿Y lo de convertirse en un Gran Filósofo?, pregunté. «Pues llegué al siguiente silogismo: “Para llegar a ser un filósofo que valiera la pena tenías que ser tan listo como Immanuel Kant. Yo no soy tan listo como Immanuel Kant. Por lo tanto, decidí ser médico”. ¿Con ese tipo de razonamiento no es de extrañar que no fuera un Gran Filósofo!»

Aunque consideró que sólo tenía un nivel normal en filosofía, Stu descubrió su habilidad para inventar teorías que explicaran cualquier problema con el que se enfrentara en psicología, incluyendo algunos aspectos de las redes neuronales. Lo hacía tan bien que consideró el don como si se tratara de cierta facilidad de palabra y decidió dedicarse a algo más sólido. La facultad de medicina le proporcionaría la disciplina necesaria que deseaba adquirir. En primer lugar, sin embargo, tenía que cursar un año de estudios previos, un curso especial de Berkeley diseñado para obtener algunos conocimientos básicos de biología, incluyendo la embriología. Eso ocurrió en 1964, cuando Berkely ardía —literalmente— de radicalismo. «No participé mucho en las manifestaciones. Pero más tarde, durante el tercer año de medicina, firmé una declaración según la cual me negaba a servir en Vietnam. Poco después vi una flotilla entrando en la bahía, un portaaviones, varios acorazados y demás, y pensé: “Muchacho, van a hacer falta muchas firmas para parar esto”».

Los primeros años de la década de 1960 fueron también una época muy especial para la biología molecular, porque en los años anteriores dos investigadores franceses, François Jacob y Jacques Monod, habían realizado importantes avances en la comprensión de la regulación de la actividad de los genes. Habían descubierto la existencia de mecanismos de retroalimentación por medio de los cuales los genes se activaban o desactivaban, una especie de servosistema a nivel molecular análogo también al sistema conmutador binario de los ordenadores digitales. El trabajo no tardó en recibir el reconocimiento del comité Nobel. «Estaba muy entusiasmado por aprender esas cosas», dijo Stu. «Empezó a obsesionarme la embriología, en particular el modo en que las células embrionarias se diferencian, forman células musculares, células nerviosas, células del tejido conjuntivo, etcétera; el modo en que los cien mil genes de la dotación genética humana podían producir esa asombrosa combinación de tipos celulares diferentes, unos 250 en total. Todo iba encajando, las ideas de Jacob/Monod, incluso las redes con las que había estado trabajando en Oxford.» La embriología, el modo en que una única

célula fertilizada se multiplica, diferencia y combina para dar lugar a un organismo adulto, era y sigue siendo uno de los mayores desafíos de la biología. El joven Kauffman estaba listo para enfrentarse a él, equipado con la más exigua base biológica y con sólo un rudimentario dominio de las herramientas matemáticas que planeaba aplicar.

«Mi ignorancia fue mi fuerza», dijo con toda seriedad. «De haber tenido una formación biológica adecuada y conocimientos de matemáticas, habría sabido que lo que pretendía no iba a funcionar. No lo habría intentado.» Stu llegó a la conclusión de que era casi imposible que la selección natural orquestara la actividad de los cien mil genes del genoma humano para generar una gama de alrededor de 250 tipos celulares diferentes. Eso representa 250 pautas diferentes de actividad génica. «¿Sabes cuántos estados potenciales de actividad hay en la combinación de cien mil genes?», preguntó sin esperar la respuesta. « $10^{30.000}$ . Es una cantidad muchísimo más grande que el número de átomos de hidrógeno del universo. Algunas personas sostienen que la selección natural conduce con éxito a través de las ciénagas de esos  $10^{30.000}$  estados del sistema, para dar al final con los 250 deseados. Pero yo tenía una solución diferente, impensable y completamente contraintuitiva.»

«Imagina que los genes están dispuestos como una red, en la que cada uno está activo o inactivo en función de las entradas que recibe de los otros genes», empezó Stu. Eso suena a una red de proceso en paralelo, dije. «Exacto. Pero imagina que los vínculos entre los genes están asignados de modo aleatorio. ¿Pensarías obtener un orden de todo eso?» Inexperto en esas cuestiones, supuse sin embargo que era improbable. Stu también lo habría considerado improbable de haber sabido, siendo estudiante de medicina, que varios grandes nombres de las matemáticas y la informática habían experimentado ya con sistemas similares y no habían encontrado nada interesante. «El resultado contraintuitivo es que se obtiene orden, y de la manera más notable.»

Los sistemas de ese tipo se conocen con el nombre de redes booleanas aleatorias, en honor al inglés George Boole, in-

ventor de un enfoque algebraico de la lógica matemática. La red procede a través de una serie de estados. En un momento dado, cada elemento de la red examina las señales que le llegan de las relaciones que tiene con otros elementos y se activa o desactiva, según sus reglas para reaccionar a ellas. A continuación, la red alcanza el siguiente estado, donde el proceso se repite otra vez. Y así sucesivamente. Bajo ciertas circunstancias una red puede recorrer todos los estados posibles antes de repetir cualquiera de ellos. Sin embargo, en la práctica, la red llega en algún punto a una serie de estados por los cuales gira repetidamente. Conocida con el nombre de ciclo límite, esta serie repetida de estados es, en realidad, un atractor en el sistema, como el remolino en el traicionero mar de la dinámica de los sistemas complejos. Una red puede concebirse como un sistema dinámico complejo, y es probable que tenga muchos atractores de ese estilo.

«Pasaba horas trabajando a mano en las redes», explicó Stu. «Mis cuadernos de farmacología están completamente llenos de ellas.» Debido a que, incluso en redes pequeñas y poco conectadas, el número de estados posibles crece con rapidez al aumentar el número de elementos, las redes calculadas a mano pronto se hicieron inmanejables. Con más de ocho elementos, se hacía necesario un ordenador. «Conseguí que alguien me enseñara a programar y me preparé para la primera prueba, una red con cien elementos, con dos entradas cada uno, asignadas aleatoriamente. Por eso tenía que barajar las tarjetas de datos.» Quien entró ese día de verano de 1965 en el centro de ordenadores era un joven con una intuición extraordinaria o un loco. La mayoría de los expertos se habrían inclinado por lo último, puesto que incluso esa modesta red tenía unos  $10^{30}$  estados posibles, sólo 100 billones de veces la edad del universo, medida a razón de un estado por segundo. El ordenador funcionaba mucho más rápidamente que un estado por segundo; aun así, de haberse aventurado la red por el más insignificante de los caminos de su territorio de estados posibles antes de dar con un ciclo límite, el programa habría estado ejecutándose durante días y Stu se habría arruinado, puesto que él mismo pagaba el tiempo de ordenador.

«Había que ser muy ingenuo para hacer lo que hice», dijo Stu con una gran mueca. «Pero tuve suerte. El ordenador llegó a un ciclo límite tras pasar sólo por dieciséis estados, y el ciclo era de sólo cuatro estados. Me dije: “Dios mío, he encontrado algo profundo”. Y sigo pensándolo. Es la cristalización del orden a partir de sistemas masivamente desordenados. Es orden espontáneo.»

Stu cursaba entonces el segundo año de carrera, con los estudios médicos bastante desatendidos mientras crecía en él la obsesión por las redes booleanas. Cuando no estaba computando redes, exploraba la bibliografía, gran parte de la cual le era extraña. Entonces, con una profunda conmoción, encontró un libro publicado en 1963 titulado *Temporal Organization in Cells*. Su autor, Brian Goodwin, había estudiado biología en la Universidad McGill, en Canadá, luego matemáticas en Oxford unos pocos años antes que Stu y se había doctorado en la Universidad de Edimburgo con C.H. Waddington, una de las principales figuras recientes de la biología británica. Waddington estaba firmemente convencido de que los organismos debían ser estudiados como globalidades y que el principal reto de la biología era comprender la génesis de la forma. Entusiasmado por este enfoque holístico, Brian lo integró en la biología molecular de Jacob y Monod y produjo una teoría sobre el modo en que la actividad génica junto con niveles oscilantes de sustancias bioquímicas podían contribuir a crear formas biológicas.

«Pensé, vaya, él lo ha encontrado primero», dijo Stu recordando su primera reacción ante el libro. «Luego pensé, un momento, no entiendo esto. ¿Qué es todo esto? Al final me dije: “Se ha equivocado. No sé por qué, pero estoy seguro de que se ha equivocado”.» El libro era un intento de demostrar cómo los sistemas de control moleculares, como la retroalimentación, la represión, el control de la actividad enzimática —en otras palabras, la lógica local intrínseca de un sistema complejo—, daban lugar natural y espontáneamente a un comportamiento oscilatorio y a pautas globales. Semejante comportamiento es un componente importante de los sistemas vivos, como los ritmos circadianos y la actividad periódica.

dica de los sistemas hormonales y enzimáticos. El núcleo del libro —la generación del orden como un producto inevitable de la dinámica del sistema— estaba en profunda sintonía con la visión del mundo de Stu. Inmediatamente envió a Brian un ejemplar de los primeros resultados con redes booleanas, pero no establecieron ninguna correspondencia. «Stu no es un gran corresponsal, es incluso peor que yo», me dijo Brian. «Prefiere hablar; y, entonces, la experiencia es intensa. Unas pocas horas con Stu equivalen a semanas con cualquier otra persona.»

Sabía lo que quería decir. Una conversación con Stu es como un combate entre una pistola de agua y una manguera de incendios: un flujo bastante unidireccional. Pero cada gota vale la pena. La conversación había llegado a un punto en que necesitaba un descanso, y Stu y yo nos dirigimos a un pequeño restaurante indio cerca del campus, la clase de lugar en que se puede escribir en la mesa. Le pregunté en tono especulativo si el auge y la caída de las sociedades complejas podría describirse también por medio de la ciencia de la complejidad. Una idea extraña, dije, pero he estado leyendo estudios sobre el auge y la caída de las civilizaciones a lo largo de la historia, y al espectador inexperto que era le había parecido que la repetición de la pauta «olía» a eso. «No he pensado nunca en ello», dijo Stu tras unos instantes de reflexión. «Pero no, no lo creo.» (Seis meses después había cambiado de opinión, y me llamó triunfante para decírmelo. En esa comida, sin embargo, estaba mucho más concentrado en las redes booleanas.)

Admití que lo del orden espontáneo a partir de las redes booleanas era impresionante. ¿Pero no sería poco más que una analogía, una imagen seductora? «Es una especie de analogía, sin duda, pero es profunda. Mira.» Stu empezó a describirme los innumerables experimentos que había hecho, que demostraban la emergencia de dos propiedades de naturaleza muy biológica. La primera se refería al número de tipos celulares que se encuentran en una gama de diferentes organismos de distinta complejidad y al modo en que pudieron haberse generado. La segunda se relacionaba con las limitadas posibilidades

que tiene cualquier tipo celular de transformarse en otros tipos celulares.

«Llegué a la firme convicción de que los ciclos límite de mis redes booleanas eran equivalentes a diferentes tipos celulares», dijo. «Es obvio. Se trata sólo de un nuevo enfoque de mi búsqueda de orden. Pero entonces empecé a calcular cuántos ciclos límite obtenía en las redes con dos conexiones. El número resultó ser de modo aproximado la raíz cuadrada del número de elementos del sistema. Una red de 10 tiene unos 8 ciclos límite, 8 atractores si quieres; una red de 1000 elementos tiene unos 30 atractores, y así sucesivamente. Una red con 100 000 elementos, aproximadamente el número de genes del genoma humano, tiene unos 370 atractores, lo cual se acerca bastante al número conocido de tipos celulares, 254.» Al poco de empezar esa investigación, Stu se enfrascó de nuevo en la bibliografía, en busca de información sobre el número de tipos celulares en una gama dada de organismos, en relación con el número estimado de genes. Obtuvo información sobre bacterias, la levadura, algas, un hongo, medusas, gusanos anélidos y humanos, representativos de los diferentes grupos principales, o tipos, que se separaron unos de otros en el Cámbrico, hace 600 millones de años. El resultado fue claro: cuantos más genes poseía un organismo, más tipos celulares tenía. Todo encajaba bastante bien, no era exacto pero las divergencias no eran muy grandes y, por lo tanto, era biológicamente razonable. Sin embargo, igual de importante era el hecho de que el número de tipos celulares de cada organismo coincidía aproximadamente con la raíz cuadrada del número de genes. Las redes booleanas y los genomas seguían la regla de la raíz cuadrada.

«Por lo tanto, o bien se me convence de que 600 millones de años de evolución han perfilado de forma independiente los genomas de los diferentes tipos de organismos para que todos generen tipos celulares según la raíz cuadrada del número total de genes», dijo Stu, «o se tiene que admitir que mis redes booleanas son algo más que una analogía interesante, que hay algo fundamental en la dinámica de esta clase de sistema.»

Stu me pidió que imaginara las redes como colecciones de

bombillas, rojas si están fijas, azules cuando cambian. En las redes con dos conexiones por elemento, grandes zonas de luz permanecen estables, invariables para casi todos los atractores, salpicadas con manchas de cambio. Era una imagen gráfica de titilantes islas azules en un mar rojo. «Las consecuencias de este modelo son dos», explicó Stu. «Si se trata de un modelo razonable para la generación de tipos celulares, todos los tipos celulares deberían expresar una mayoría de genes idénticos, con sólo una pequeña fracción diferente.» Esto, por lo que yo sabía, era correcto.

«Así es. La segunda consecuencia —y ésta es la segunda de las dos características biológicas de las redes— es que los atractores resisten la perturbación: las mutaciones en las islas no se propagan muy lejos. Pero, cuando cambian, sus opciones están limitadas por los atractores cercanos.» Podía imaginar las titilantes islas comportándose de ese modo, y que su aislamiento en un mar congelado de color rojo restringiera su comportamiento frente a la perturbación. «Esto es otra vez lo que vemos en los sistemas vivos. Durante el desarrollo, los tipos celulares progresan por caminos muy limitados. Una vez que una célula ha emprendido un camino particular deja tras ella muchas otras opciones, y disminuye el número de tipos celulares diferentes en los que puede transformarse.»

Entonces, pregunté, ¿la propiedad clave del sistema es que las reglas locales, el número de entradas que cada «gen» recibe y las reglas para responder a ellas, generan un orden global en el sistema? «Así es.» ¿Una propiedad emergente? «Sí, es impredecible y contraintuitivo. Orden espontáneo. ¿No es hermoso?» Era hora de marcharse.

Si las redes booleanas aleatorias explican el modo en que podrían generarse los tipos celulares, ¿qué ocurre con el segundo componente principal de la embriología, el modo en que las células se combinan en un individuo maduro? «Ve a ver a Brian Goodwin», me urgíó Stu. «El es el poeta de la biología teórica.» Los dos hombres se conocieron en 1967, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Con anterioridad,

ese mismo año, Stu había enviado sus resultados sobre redes booleanas a Warren McCulloch, un pionero en la teoría de redes. McCulloch había contestado enseguida con una característica hipérbola («Todo Cambridge se ha entusiasmado con su trabajo») e invitó a Stu y Elizabeth, su reciente esposa, a pasar tres meses en su grande y laberíntica casa de Cambridge. El MIT era el lugar donde había que estar, albergaba a todos los grandes nombres en el estudio de los sistemas de proceso en paralelo y a algunos de los investigadores punteros del campo de la biología teórica, incluyendo a Brian Goodwin durante una época.

Stu y Brian enseguida se dieron cuenta de que sus enfoques a la búsqueda de orden en biología no entraban en conflicto sino que eran complementarios, y entablaron una fuerte relación personal y profesional. Brian se estaba convirtiendo ya en una importante figura de la biología teórica y no tardó en destacar como inteligencia eminente. También es conocido por ocupar una posición extrema en el espectro intelectual.

«Poeta de la biología teórica. Mmm. Supongo que Stu cree que tengo cierta visión», manifestó Brian cuando nos encontramos en su despacho de la Universidad a Distancia, en Milton Keynes, a unos ochenta kilómetros al norte de Londres. Su gran estatura, las distinguidas canas y el buen aspecto mediterráneo encajan sin duda con la parte de poeta. «Lo que pasa es que mucha gente podría pensar que eso es peyorativo.» Le pregunté por la dedicatoria que había escrito en el ejemplar de Stu de *Temporal Organization in Cells*. Decía: «No hay verdad más allá de la magia.» ¿Qué quería decir? «En realidad, dos cosas. La primera es que, en ciencia, cuando descubres la verdad, resulta que posee una extraordinaria cualidad mágica. Esa es la clave: al reconocer el orden profundo en la biología sientes que estás tocando algo fundamental. Pero también hay un sentido poético: la realidad es extraña. Mucha gente piensa que la realidad es prosaica. Yo no. En ciencia no justificamos las cosas. Nos acercamos al misterio.» Suena romántico, insinué. «Si es una visión romántica de la ciencia, que lo sea. Sin ella, el mundo sería aburrido.»

Me parecía que los osciladores químicos acoplados —el

tipo de mecanismo que Brian había explorado en su libro y en el que todavía sigue interesado— estaban muy lejos de cualquier noción de misterio. «Te explicaré mi enfoque y lo verás.» El problema fundamental de la biología es cómo se genera la forma, empezó Brian. «Mucho antes de Darwin, los estudiosos ya estaban fascinados por la forma biológica y por cómo ésta se relaciona con el mundo. Había dos enfoques muy diferentes: el enfoque angloamericano y el enfoque europeo continental, en especial el alemán.»

El primero de ellos tenía sus raíces en la escuela de la teología natural, que se remonta al siglo XVIII. Se centraba en la función, en cómo funcionan los organismos. Pero su ideología dominante era que las maravillas del mundo proporcionaban la prueba de una Mano Divina. «Seguramente recuerdas el célebre pasaje al principio de la *Natural Theology* de Paley», continuó Brian. «La historia de alguien que encuentra un reloj en un brezal.» Lo recordaba. Había comprado una edición de 1854 muchos años atrás —la primera se había publicado en 1802— y había releído varias veces los pasajes iniciales, todavía legibles a pesar de las manchas y la impresión defectuosa. «Supongamos que, al cruzar un brezal, mi pie tropieza con una piedra y me pregunto cómo había llegado esa piedra hasta ahí; seguramente podría responder que, por todo lo que sabía, había estado ahí desde siempre», empezaba. Y luego: «Pero supongamos que hubiera encontrado un reloj en el suelo y hubiera que averiguar cómo había llegado el reloj hasta ese lugar; difícilmente pensaría en la respuesta que había dado antes, que, por lo que sabía, podía haber estado siempre ahí.»

Paley continúa explicando, en una larga analogía, que la existencia del reloj debe implicar un agente de diseño. «La diferencia, creemos, es inevitable; que el reloj debió de tener un fabricante; que debió de existir en algún momento, y en algún lugar, un artífice o artífices que lo creara con una finalidad cuya respuesta encontramos en la actualidad; que concibiera su construcción y diseñara su uso.» El razonamiento se extiende entonces a la biología: «Las invenciones de la naturaleza superan las invenciones del arte, en complejidad, sutileza y cu-

riosidad del mecanismo [...]; sin embargo, en una multitud de casos, son no menos evidentemente mecánicas, no menos evidentemente invenciones, no menos evidentemente adecuadas a su fin, o su función, que las más perfectas producciones del ingenio humano.» Y, pregunta Paley, ¿qué mejor ejemplo que el ojo, tan complejo, tan perfectamente adecuado a su papel?

«Ah, sí, el ojo», dijo Brian. «Incluso Darwin estaba preocupado por el ojo.» En el *Origen de las especies* escribió: «Parece absurdo de todo punto —lo confieso espontáneamente— suponer que el ojo, con todos sus inimitables mecanismos para acomodar el foco a diferentes distancias, para admitir una cantidad variable de luz y para la corrección de las aberraciones esférica y cromática, pudo haberse formado por selección natural.» No obstante, concluyó, puesto que «no hay imposibilidad lógica alguna —variando las condiciones de vida— en la adquisición por selección natural, de cualquier grado de perfección concebible», también el ojo es explicable por ese lento y gradual proceso de combinación.

Así, mientras Paley explicaba la exquisita morfología de los organismos en relación con su medio como una prueba del Designio Divino, Darwin la explicó como el resultado de la selección natural, la ciega adaptación de los organismos a las condiciones existentes en cada momento, los productos de la mutación aleatoria seleccionados de acuerdo con la supervivencia. «Ambas explicaciones se centran en la función: una es teológica, la otra científica. Pero creo que la segunda es casi tan errónea como la primera», dijo Brian. «Y sin embargo la noción de selección natural está hoy profundamente arraigada en nuestra cultura científica. Basta con acudir al celebrado libro de Richard Dawkins, *El relojero ciego*, para verlo.» El título es un hermoso giro de la analogía de Paley de Dios el relojero, Dios el creador de la naturaleza. «Este libro se ha escrito con la convicción de que nuestra propia existencia, presentada alguna vez como el mayor de los misterios, ha dejado de serlo, porque el misterio está resuelto», empieza *El relojero ciego*. «Lo resolvieron Darwin y Wallace, aunque todavía continuaremos añadiendo notas a esta solución.»

El libro es una ingeniosa y convincente exposición de la evolución por medio de la selección natural y no deja un lugar importante para otros mecanismos. «El argumento del punto de vista darwinista es que [...] la selección natural lenta, gradual, acumulativa, es, en último término, la explicación a nuestra existencia», escribe Dawkins en el párrafo final. «Si existen versiones de la teoría de la evolución que nieguen el lento gradualismo, y el papel central de la selección natural, pueden ser ciertas en casos concretos. Pero no pueden constituir toda la verdad, porque niegan el verdadero centro de la teoría de la evolución, que le da el poder para disolver las improbabilidades astronómicas y explicar prodigios de un milagro aparente.» Las redes booleanas aleatorias de Stuart Kauffman, vale la pena destacarlo, tienen el «poder para disolver las improbabilidades astronómicas» sin selección natural.

De modo que, pregunté a Brian, ¿estás buscando puntualizaciones a la teoría de Darwin? «Nada de eso. Necesitamos un libro nuevo.»

La biología moderna ha perdido casi toda noción auténtica de «organismo», se lamentó Brian. «El organismo ha sido sustituido por una colección de partes: genes, moléculas y los componentes que se supone que forman los ojos, las extremidades o cualquier estructura en la que uno esté interesado.» ¿Te refieres al enfoque reduccionista? «Exactamente.» Pero el reduccionismo ha significado el triunfo de la biología moderna, al hacer la biología más parecida a la física, sugerí. Basta mirar lo que sabemos de la estructura de los genes, cómo se expresan, los increíbles detalles de la maquinaria metabólica que ahora se conocen. «Todo eso es cierto. No niego esos logros. Sólo insisto en que no dicen nada importante acerca de la forma biológica, de cómo se genera la forma.» Stu me contó su analogía favorita: saber la estructura del H<sub>2</sub>O no ofrece ninguna pista de por qué el agua se va por un desagüe en un vórtice. «Necesitamos una noción de todo el organismo como una entidad fundamental en biología y luego comprender cómo eso genera partes que conforman su orden intrínseco», continuó. Eso suena un poco vago, sugerí. «Re-

cuerda el congreso de Dahlem», contestó Brian, refiriéndose a un encuentro científico al que habíamos asistido los dos en Berlín una década atrás.

El congreso había sido sobre evolución y desarrollo y, en un momento dado, se produjo una enérgica batalla en torno a lo que hacía falta saber de verdad para comprender cómo se ensambla un organismo. *Cáustico* es mejor adjetivo que *enérgico*. De un lado, estaban los biólogos moleculares convencionales, que insistían en que todo quedaba claro cuando se conocía la secuencia de ADN de un organismo. «Las instrucciones de ensamblaje están escritas en los genes», era su posición. Del otro lado, estaba Brian y un pequeño grupo de biólogos moleculares heterodoxos, incluyendo a Gunther Stent, un destacado investigador de la Universidad de California, Berkeley. Stent era famoso —o, más bien, tenía mala fama— entre sus colegas por haber afirmado en un importante artículo de *Science* que la época dorada de la biología molecular había pasado, que ya no le quedaban desafíos intelectuales importantes. Otras vías del ámbito biológico, como el desarrollo embrionario, se enfrentarían a los problemas reales, había afirmado. «Los genes son sólo un principio», era el punto de vista Goodwin/Stent; «sin conocer la dinámica de las partes componentes no se va a ningún sitio.» El debate no tuvo conclusión.

«Los biólogos moleculares descubrieron que la secuencia lineal de los nucleótidos en el ADN especifica de modo preciso la secuencia lineal de los aminoácidos en las proteínas», continuó Brian. «Nadie duda de su importancia. Pero cometieron el error de imaginar que, de modo similar, la secuencia lineal de los genes del genoma especifica la génesis de la forma en un embrión, de modo análogo a un programa de ordenador.» Añadió enfáticamente: «No hay programa genético para el desarrollo, no hay programa que guíe el sistema a través de sus transiciones morfogénicas.» ¿No es eso afirmar que los genes son irrelevantes?, pregunté, pensando hasta dónde seguiría por esa línea de razonamiento. «No. Los genes establecen los valores de los parámetros.» ¿Qué quiere decir eso? «Quiere decir que producen partes componentes del sis-

tema, dentro de una gama de valores. Las transiciones morfológicas son entonces consecuencias del ciclo de la dinámica que genera geometría y la geometría que modifica la dinámica. Esto nos proporciona una visión que podría llamarse de "bufet libre" de la morfogénesis.» Espera un momento, solicíté. Vas más rápido que yo. ¿Es posible hacer todo esto un poco más tangible, algo que se pueda entender de modo intuitivo?

«Claro. Te enseñaré el modelo de *Acetabularia*.»

*Acetabularia acetabulum* vive en las aguas poco profundas de las costas mediterráneas. Su ciclo de vida es regular y espectacular, empieza con la fusión de dos células «sexuales» que forman una sola célula, el cigoto. La célula única desarrolla rizoides y luego un tallo que llega a alcanzar los cinco centímetros de longitud. Este tallo produce anillos de «pelos» cerca de su extremo, el llamado verticilo. El verticilo acaba desplegándose al abrirse el extremo y formarse un disco, igual que el sombrero de un hongo.

«Mira esto», me dijo Brian mientras me enseñaba el verticilo en un dibujo de *Acetabularia*. «Es un misterio, o al menos lo era. No tiene ninguna función conocida, entonces ¿para qué está ahí? La explicación darwinista —la explicación funcionalista— sería que ha fracasado a la hora de encontrar su función o que una vez tuvo una que ahora es un simple vestigio. La verdad es muy diferente. Brian y varios colegas habían construido hacía poco un modelo matemático del desarrollo del organismo como forma de entender las transiciones morfogenéticas, los pasos principales que recorre el organismo en desarrollo. En esencia, el modelo incluye algunos aspectos de la regulación del calcio en la célula, los cambios del estado mecánico del citoplasma (elasticidad y viscosidad) y la respuesta de la pared celular. Esos son los parámetros del sistema. «Biológicamente simple pero matemáticamente complejo», así describió Brian el modelo.

«Mira cómo se desarrolla la forma», dijo Brian mientras ejecutaba el modelo en un monitor. «Cuando empezamos a trabajar en esto esperábamos que serían posibles muchas pautas, que nos tomaría mucho tiempo encontrar los parámetros

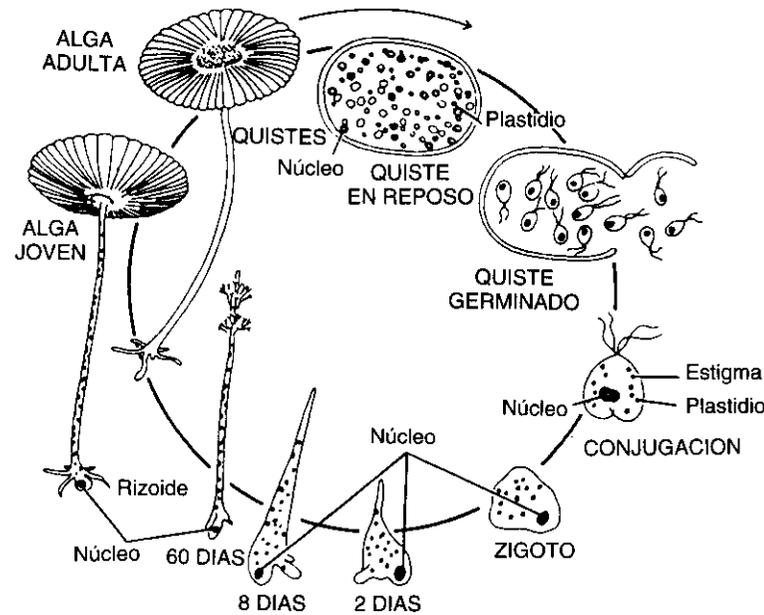


Figura 2. Ciclo vital de *Acetabularia acetabulum*. Cortesía de Brian Goodwin.

que simulaban la morfogénesis de *Acetabularia*.» No fue así. Todo salió muy rápidamente, como si la forma de *Acetabularia* fuera un propiedad profunda del sistema, como un fantasma en una máquina molecular. Contemplé el modo en que el organismo pasaba por gran parte de su ciclo vital, mientras Brian explicaba el desarrollo de la dinámica del sistema.

«Algo que no habíamos entendido nunca es por qué y cómo el extremo inicialmente cónico se aplana antes de la formación del verticilo», dijo, siguiendo los cambios de la pantalla. «El modelo nos dio una explicación. El gradiente de calcio, con un máximo en el tallo, se vuelve inestable a medida que se produce el crecimiento, y da lugar a un anillo de elevada concentración de calcio y mayor tensión. La pared de este anillo se ablanda, debido a la combinación de la tensión citoplasmática y la elasticidad de la pared, de modo que la

pared desarrolla una curvatura máxima en la región de este anillo y se aplana en la punta.» Y así se forma el verticilo, dije viendo desarrollarse un anillo de cilios esquemáticos. «Sí.» ¿Sólo como resultado de la dinámica del sistema? «Eso es. La razón por la cual todos los miembros de las dasicladáceas producen verticilos puede ser que ésa sea una forma natural que surge de los principios dinámicos contenidos en la organización de la célula. Algunas especies los utilizan, otras no, pero todas los generan.»

Quedé sorprendido por el paralelismo con las redes booleanas de Stu Kauffman. ¿Las reglas locales generan orden global? «Sí. Es una propiedad emergente de los sistemas dinámicos. Concibo el desarrollo como un sistema dinámico. Volvamos al ojo.»

Por diversas razones mecánicas, en *Acetabularia* y en las plantas, la generación de la forma está siempre acompañada de crecimiento, una expansión continua. Dado que no se encuentran tan restringidos mecánicamente, los embriones animales pueden generar complejidad de muchas más maneras, lo cual incluye la deformación externa o interna de capas de células, la migración celular y otros procesos. De resultas, los animales pueden producir una enorme complejidad interna, así como una intrincada morfología externa. A pesar de esas diferencias, los procesos fundamentales de la organización del desarrollo son los mismos que en *Acetabularia*, un baile de sistemas dinámicos.

Brevemente, Brian explicó los principales acontecimientos de la morfogénesis en el embrión animal, que implica procesos secuenciales de invaginación y pliegue de capas celulares, procesos que crean los cimientos de la estructura interna del organismo. «Podemos hacer modelos informáticos que simulan el proceso utilizando las mismas clases de parámetros que en el modelo *Acetabularia*», dijo Brian, mientras íbamos viendo imágenes de esas etapas clásicas del desarrollo. A continuación, describió los acontecimientos del desarrollo que establecen la forma del ojo, procesos de invaginación y pliegue de capas de células. «¿Ves cómo los acontecimientos morfo-genéticos básicos de la formación del ojo son simples repeti-

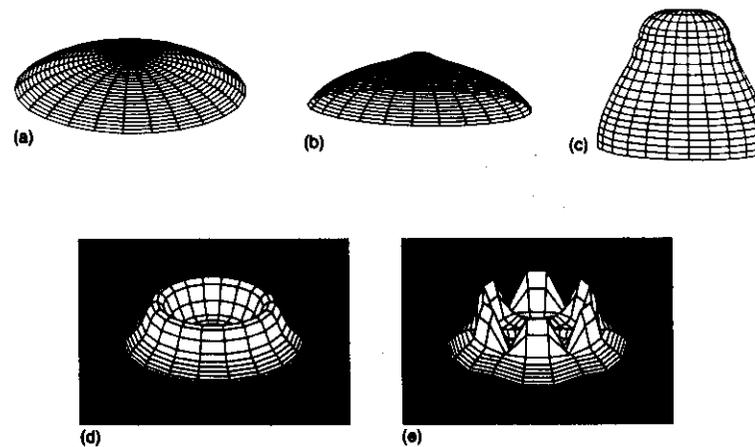


Figura 3. Cinco etapas del desarrollo de los verticilos en el modelo informático de *Acetabularia*. Cortesía de Brian Goodwin.

ciones de los movimientos básicos de los que hemos estado hablando en otros aspectos del desarrollo?» ¿Estás diciendo que, dados los procesos de desarrollo conocidos, hacer un ojo es fácil? «Sí.» ¿Igual que es fácil hacer *Acetabularia*? «Eso es. diciendo que hay un gran atractor en el espacio morfo-genético que produce un sistema visual funcional.»

¿Los ojos han evolucionado independientemente, no sé cuántas veces, muchas, porque hay un atractor morfo-genético que especifica esa clase de forma? «Más de cuarenta veces. Sí, eso creo. Los ojos son el producto de transformaciones espaciales de alta probabilidad de los tejidos en desarrollo. Esto es muy diferente de la posición neodarwinista, que afirma que los organismos generan estructuras altamente improbables, como el ojo, que persisten porque son útiles. La selección natural mantiene los organismos en esos estados improbables con programas genéticos que guían el organismo en desarrollo a través de la densa espesura de estados posibles hasta los que son consistentes con la supervivencia. Este es más o menos el razonamiento neodarwinista.»

Veía adónde apuntaba el razonamiento de Brian. Si hay un

atractor morfogénético para el ojo, ¿es entonces probable lo mismo para otros órganos? «Sí.» Y, en última instancia, ¿para un organismo? «Sí.» ¿Quieres decir que las especies son atractores en un espacio de parámetros morfogénéticos? «Eso es lo que digo. Para un neodarwinista, todo punto de ese espacio es realizable como un organismo, siempre que las condiciones ambientales favorezcan su expresión. En otras palabras, cualquier clase de forma biológica es posible, dentro de ciertos límites mecánicos. Lo que digo es que eso no es correcto, que la dinámica organizativa de la morfogénesis define un número limitado de puntos en ese espacio, que la gama posible de las formas biológicas está restringida de un modo fundamental.» Las especies como atractores en un sistema dinámico: una noción provocadora, bastante alejada del pensamiento biológico convencional. «Hay que tener en cuenta que lo que estoy diciendo es una conjetura plausible», admitió Brian. «Pero creo que es poderosa y que resultará ser más verdadera que falsa.»

La posición de Brian —y también de Stu Kauffman— es la expresión más reciente de una tradición intelectual con raíces en la Ilustración del siglo XVIII. Conocida genéricamente como morfología racional —con una línea de distinguidos estudiosos desde Kant y Goethe, que incluye a Geoffroy Saint-Hilaire, el barón George Cuvier, William Bateson, Richard Owen, Hans Driesch, D'Arcy Wentworth Thompson, Waddington y otros—, su objetivo era la búsqueda de las «leyes de la forma» que explicaran las sorprendentes pautas de orden percibidas en la naturaleza. A pesar de cierta diversidad de enfoques, todos los morfologistas racionales albergaban una profunda convicción en la unidad del organismo individual y buscaron la fuente generadora del orden que percibían. Esta es la segunda de las dos grandes escuelas interesadas en la forma biológica; la primera estaba formada por los funcionalistas, con la teología natural, Darwin y Dawkins.

«La nuestra es una ciencia de cualidades, no de cantidades, y es, por lo tanto, una ciencia goetheana», dijo Brian, al pasar de lo tangible a lo filosófico. «Goethe es aquí uno de mis hé-

roes.» En respuesta a la afirmación de que eso podía sonar un poco místico para algunos, Brian dijo: «Quizá. Pero nuestro enfoque considera la naturaleza como inteligible. Ciertamente, el principio creativo de la emergencia es un profundo misterio en muchos sentidos, y ésta es una propiedad de los sistemas dinámicos complejos. Pero, en última instancia, es inteligible. No se puede decir lo mismo del neodarwinismo». François Jacob comparó una vez la selección natural con un zapatero remendón, un táctico del momento, que iba juntando piezas para hacer frente a las circunstancias imperantes. Su objetivo era una descripción, no una crítica del concepto. «El problema de la forma queda así “reducido” efectivamente al problema de la adaptación funcional», dijo Brian. «Hace ininteligible la forma biológica.»

Me pregunté si había un lugar para la selección natural en la visión del mundo de Brian. «No estoy negando la selección natural», dijo. «Estoy diciendo que no explica los orígenes de la forma biológica, el orden general que vemos ahí afuera.» En una escala de uno a diez, dijo que puntuaría la importancia de la selección natural —en el contexto de la generación de la forma—, cerca del uno. «Y la posición de Stu es la misma. Pero no creo que esté dispuesto a decir que todo esto transforma el neodarwinismo. Lógicamente, lo que estoy diciendo lo transforma, pero él concede a la selección natural un papel más importante que yo.»

«Cuando escribí por primera vez mis resultados sobre redes booleanas para una revista científica, apenas consideraba que la selección natural tuviera alguna importancia», me contó Stu. «Mira la cita al principio del artículo». Decía: «El mundo es efecto de la causa o del azar. En este último caso, sigue siendo un mundo a pesar de todo, es decir, una estructura regular y hermosa». La cita era del emperador Marco Aurelio. «Me gustó la cita porque yo estaba ahí, combinando redes al azar y, a pesar de eso, encontramos todo ese orden», explicó. «Conoces la frase de Einstein sobre “buscar los secretos del Viejo”. Bueno, pensé que el Viejo no se dedicaría a jugar,»

que habría alguna lógica ahí afuera, y pensé que la había vislumbrado en las redes booleanas aleatorias. Sigue siendo hermoso. Y, no, no pensaba entonces que tuviera que preocuparme por la selección natural, pero ahora sí.»

John Maynard Smith fue el responsable de que Stu diera su brazo a torcer en este aspecto. John es el más eminente biólogo evolucionista británico, un campeón del neodarwinismo, con una fuerte inclinación matemática. Con la apariencia del clásico profesor despistado, gafas y largo cabello blanco, John presenta la infrecuente combinación de penetrante inteligencia crítica y gran generosidad profesional. John y Brian fueron colegas en la facultad de ciencias biológicas de la Universidad de Sussex durante muchos años, y difícilmente cabría imaginar dos visiones del mundo más diferentes. John es también un apasionado jardinero y abre su jardín al público. Es una excursión sencilla y agradable visitar el jardín de John en Sussex por la mañana y el de Darwin en el cercano Kent por la tarde, con lo cual se satisfacen simultáneamente los intereses científicos y hortícolas.

A pesar de quedar impresionado por la emergencia de orden en las redes booleanas aleatorias de Stu Kauffman, John las consideró incompletas. «Hasta que no se meta la selección en esos modelos no tendrán nada que ver con la vida», me dijo John cuando lo visité en la Universidad de Sussex. «No son tan interesantes para un biólogo. Stu ya lo ha comprendido.» El proceso de comprensión empezó cuando los dos hombres se encontraron por primera vez, en 1968, en un congreso de biología teórica celebrado en la Villa Serbelloni de la Fundación Rockefeller, a orillas del lago Como, en Italia. En esa ocasión, y cada vez que han vuelto a encontrarse a lo largo de los años, John intentaría convencer a Stu de la importancia de la selección natural en la conformación de los sistemas biológicos. Una vez, diez años atrás, caminaban los dos por South Downs, cerca de la Universidad de Sussex, cuando John dijo: «En gran medida, quienes han sostenido que la selección juega un papel importante en la evolución han sido caballeros rurales ingleses y quienes han sostenido que no, perdóname Stu, mayormente judíos urbanos.»

Le pregunté a John qué había querido decir. «Caballeros rurales ingleses es un término demasiado restringido; europeos, quizás, y también mujeres», empezó. «Personas como Darwin y Wallace; eran gente de campo, y cultivaron una pasión por la historia natural. Pero como eran intelectuales se interesaron por el modo en que había surgido, por la increíble adaptación funcional que vemos. No se puede estudiar la naturaleza sin saber que ahí fuera hay extrañas adaptaciones, formas complicadas de vida que parecen hacer encajar un organismo en su medio ambiente. Así que el problema pasa a ser: ¿cómo se explica? La respuesta es la adaptación por medio de la selección natural.» Entendía el razonamiento respecto a los caballeros rurales ingleses, pero ¿y los judíos urbanos? «Me refiero a los intelectuales urbanos, personas como Stu Kauffman y Steve Gould. Es la búsqueda de verdades universales. Parecen decir: si no hay verdades universales, ¿cómo hacer ciencia? También para ellos la selección parece estar *ad hoc*, sólo que la consideran adaptación oportunista. Para mí, así es como funciona la naturaleza.»

Pregunté a Stu si realmente buscaba verdades universales. «Lo que busco es una teoría profunda del orden en la biología. Si se considera el mundo como lo hace John, nuestra única opción como biólogos es el análisis sistemático de máquinas en última instancia accidentales y de sus historias evolutivas en última instancia accidentales. Sé que hay algo más además de eso.» Y la selección natural: ¿hizo un buen trabajo John al defender su importancia? «La teoría de la selección natural es brillante, no hay duda. Y sé que Brian no está de acuerdo conmigo, pero es una fuerza importante en la evolución: digamos que un cinco en nuestra escala del uno al diez. Pero hay cosas que Darwin no pudo saber. Si la nueva ciencia de la complejidad tiene éxito, logrará un matrimonio entre la autoorganización y la selección. Será una física de la biología.»

Para los biólogos será difícil asimilar en su actual visión del mundo la noción de autoorganización. «Y hay más cosas», dijo Stu. «Está el límite del caos.»

## El descubrimiento del límite del caos

«El límite del caos.» Una expresión enigmática. «Es más que enigmática», dijo Stu Kauffman cuando volvimos a su despacho para continuar una conversación interrumpida constantemente por llamadas telefónicas concluyendo lo que parecían complejos acuerdos inmobiliarios. A Stu le gusta hacer malabarismos con diferentes cosas al mismo tiempo. «Es una expresión hermosa y puede ser fundamental para nuestra ciencia de la complejidad.» Y puede ser fundamental para el mundo de ahí fuera, añadió agitando un brazo en dirección a una ventana que la Universidad de Pennsylvania no había lavado aparentemente en muchos años. Con «ahí fuera» Stu se refería a la naturaleza. Toda la naturaleza.

¿Cómo pasamos de las redes booleanas aleatorias a ese territorio de ecos misteriosos, al límite del caos?, pregunté. «Es una larga historia», replicó. «¿Recuerdas que te conté que había pasado tres meses en el MIT, con Warren McCulloch? Fue una época estupenda, de lo más intensa y estimulante. Yo era sólo un estudiante de medicina, y toda esa gente era inteligentísima y famosa.» Stu también era inteligente, McCulloch supo reconocerlo y guió al joven Kauffman a través de lo que era, para él, un territorio matemático virgen. «Warren era lo que uno necesita como mentor: entusiasmado por mi ciencia, dispuesto a ayudar cuando era necesario, dispuesto a retirarse en el momento de la distribución de los honores, dispuesto a compartir la autoría de un artículo si consideraba que me protegería.» Algo bastante inusual según mi experiencia, observé.

McCulloch firmó junto con Stu un trabajo, técnicamente el

primer informe de los resultados sobre redes booleanas; pero fue un documento interno del MIT, no un artículo científico tradicional. «Warren, ¿se va a interesar alguien por esto?», preguntó Stu a su mentor mientras preparaban el informe. «Sí, pero pasarán veinte años antes de que nadie se fije en él», contestó McCulloch sin vacilar. «No podía creerlo», me dijo Stu, al recordar la conmoción del momento, unas dos décadas atrás. «Veinte años me sonaban a una eternidad. Sabía que había encontrado algo profundo, que tenía implicaciones profundas en el modo en que estaban constituidos los organismos, y que eso sacudiría la biología. La gente, pensaba, empezará a dar saltos y a gritar “¡Aleluya!”. Recuerda que sólo tenía veintiocho años en esa época. Y era ingenuo.»

Tras conseguir el diploma médico en San Francisco en 1968, con una de las notas más bajas de su promoción, Stu trabajó un año de interno en el Hospital General de Cincinnati, fue luego profesor de biología teórica en la Universidad de Chicago durante cuatro años, en los Institutos Nacionales de la Salud, en Bethesda, y llegó a la Universidad de Pennsylvania en 1975, donde permaneció dieciséis años, antes de instalarse con dedicación más o menos completa en el Instituto de Santa Fe en 1991. La odisea lo había llevado desde la biología teórica a la biología práctica, de las abstractas redes booleanas a la genética de las moscas de la fruta, *Drosophila*. «Me convertí en un biólogo de verdad», dijo con bastante sorna. (Sabía que Stu no tenía gran reputación como científico experimental.)

Durante una breve visita a la Universidad de Chicago en 1970, John Maynard Smith se ofreció para enseñarle «cómo hacer algunas sumas». John estaba fascinado por las redes booleanas, a pesar de que —para él— estaban alejadas de la realidad biológica. De forma que, con el aliento del considerable saber hacer matemático de John, Stu analizó las redes con mayor detenimiento. Ya sabía que cuando cada elemento de la red tenía sólo una conexión con otros elementos, no ocurría nada interesante. El sistema prácticamente se congelaba. También sabía que con cuatro o más conexiones el sistema se volvía inestable, caótico. Nada interesante, tampoco.

Y, por supuesto, sabía que con sólo dos conexiones, ocurría algo muy importante: se generaba un pequeño número de atractores, que él consideraba análogos a los tipos celulares. Pero no se dio cuenta de la importancia de ese territorio intermedio —entre una y cuatro conexiones—. Stu había atravesado el límite del caos, pero no se percató de ello. Como consecuencia, el interés por las redes booleanas aleatorias languideció durante casi dos décadas.

Mientras Stu hacía de biólogo de verdad, los mundos de los ordenadores, las matemáticas y la física dirigieron firmemente su atención colectiva hacia los sistemas dinámicos. Los arcanos nuevos mundos de las redes neuronales, los espejos giratorios, los algoritmos genéticos y la teoría del caos abrieron horizontes intelectuales que ofrecían fugaces visiones de la complejidad, así como formas de comprenderla. En este esfuerzo disperso, fueron esenciales para hacer frente técnicamente a las exigencias de los sistemas dinámicos el desarrollo de nuevas técnicas matemáticas y la necesaria potencia de cálculo. Sin embargo, igual importancia tuvo el nacimiento de un punto de vista según el cual, de modo fundamental, estas múltiples actividades trataban conceptos comunes. Este nuevo clima intelectual alimentó un lento reavivamiento del interés por las redes booleanas y un renacer de la fascinación por un fenómeno conocido como autómatas celulares. Ambas cosas acabarían conduciendo al descubrimiento del límite del caos.

John von Neumann, el brillante matemático húngaro, inventó los autómatas celulares en la década de 1950 en su búsqueda de máquinas autorreproductoras. Los autómatas celulares, el equivalente informático de una casa de fieras, son una clase de sistema dinámico complejo. Imaginemos una plantilla infinita de cuadrados, como un interminable papel cuadriculado. Cada uno de los cuadrados, o células, puede ser blanco o negro, en función de la actividad de las células vecinas. Unas reglas simples rigen el estado de cada célula, por ejemplo, si cuatro o más de las ocho células contiguas a una célula son blancas, la célula central cambia de estado. Como las

redes booleanas, los autómatas celulares progresan por medio de una serie de estados, en los cuales cada célula examina la actividad de las vecinas y reacciona de acuerdo con sus reglas. Por toda la plantilla se desarrollan y vagan pautas dinámicas y complejas cuya naturaleza está influida, pero no estrictamente determinada en detalle, por las reglas de actividad. Hay que observar que la estructura global surge de las reglas de actividad local, una característica de los sistemas complejos.

Cuando se encontró por primera vez con los autómatas celulares y su potencial de autorreproducción, Chris Langton quedó fascinado. Eso ocurrió mientras estaba en la Universidad de Arizona, Tucson, en 1979. Chris se había obsesionado con la creación de vida artificial, y el ordenador iba a ser su medio.

Educado en Lincoln, Massachusetts, y el mayor de tres hijos de padres científicos, Chris era el prototipo de rebelde de los años sesenta. Con pelo largo, vaqueros y guitarra, había cursado una carrera universitaria de manera tan fragmentaria como es posible imaginar: asistió al Rockford College, la Universidad de Boston, la Universidad de Arizona y la Universidad de Michigan, donde su carrera se vio interrumpida por diversas protestas contra de la guerra de Vietnam; un trabajo en el Hospital General de Massachusetts como resultado de su objeción de conciencia; una temporada como colaborador en una colonia de investigación sobre primates en Puerto Rico; un gratificante empleo como carpintero con un contratista de obras; y una breve asociación en un taller de vidrios coloreados. Y mucho tiempo en la carretera.

En 1975 un accidente casi fatal en la escalada del monte Grandfather, Carolina del Norte, le hizo trizas un montón de huesos, entre ellos las dos piernas, casi le seccionó el brazo derecho, le perforó un pulmón, le aplastó la cara contra una rodilla y le provocó un traumatismo cerebral generalizado. Cuando consiguió recuperarse se dirigió a Tucson, en otoño de 1976, donde se proponía estudiar astronomía, pero enseguida decidió que deseaba combinar una serie de cursos de biología evolutiva, cálculo y antropología. De modo incons-

ciente, Chris, como Stu Kauffman, también estaba buscando los secretos del Viejo. «Ahí estaba, con el cuerpo maltrecho, casi un esqueleto, entusiasmado por las ideas que tenía de poder hacer un modelo de la evolución cultural con un ordenador», me dijo cuando nos conocimos poco antes en el Instituto de Santa Fe. «Sí señor, tenía el aspecto de un lunático desquiciado.»

Incluso entonces, quince años después, las ideas fluían más deprisa que las palabras, de modo que una conversación con Chris constituye de modo inevitable una serie de excursiones primero en una dirección, interrumpida de pronto por una cuestión secundaria, luego en otra, una breve visita al tema principal y luego más digresiones. Con tiempo suficiente, el territorio cubierto es enorme, y al oyente no le queda ninguna duda de que tiene ante sí una mente que no puede evitar buscar y encontrar conexiones. Conocí a Chris en el congreso sobre prehistoria sudoccidental en el instituto, y me explicó que después de Tucson había ido a la Universidad de Michigan, en 1982, oficialmente para hacer un doctorado sobre la dinámica de los autómatas celulares, aunque seguía poseído por la noción de vida artificial. Continúa vistiendo vaqueros, llevando el pelo largo y tocando la guitarra, pero ha añadido los adornos de plata y turquesa del Sudoeste: hebilla, brazaletes y corbata de lazo. Tiene en la cara las marcas de la vida a la intemperie, sin vestigios del tremendo accidente sufrido.

Antes de abandonar Tucson, Chris ya había estado siguiendo en la medida de sus fuerzas la senda de Von Neumann con los autómatas celulares, desarrollando otras vías que parecían similares, siempre en busca del objetivo de la autorreproducción y la complejidad en el ordenador. Lo que lo atrajo a Michigan fue la declaración de principios del departamento de Ciencia Computacional: «El ámbito adecuado de la ciencia informática es el procesamiento de la información en toda la naturaleza». ¿En toda la naturaleza? «Sí, en cualquier parte donde se procese información», dijo Chris. «La información es la clave.»

Contando con los recursos técnicos del marco académico de Michigan —una estación de trabajo Apollo en lugar del

Apple que había estado utilizando— y el legado intelectual de Von Neumann, Chris se sumergió en la dinámica de los autómatas celulares. «Así es como me metí en lo del límite del caos... conocí a Steve Wolfram... oí hablar de sus cuatro clases... el significado del procesamiento universal de información... la dinámica no lineal, el caos... Wolfram no había establecido una relación entre las clases...» Un momento, supliqué. ¿Quién es Wolfram, y qué son esas cuatro clases? «Wolfram es muy brillante y, en parte, es el responsable del resurgimiento del interés por los autómatas celulares», explicó Chris, más lentamente. «Es un empresario y en Cal Tech [Instituto Tecnológico de California] eso no gustaba —era un joven profesor sin plaza fija en aquella época—, de modo que se marchó y se fue a Princeton, al Instituto de Estudios Avanzados. Allí inventó esa clasificación del comportamiento de los autómatas celulares.»

Los matemáticos ya sabían que muchos sistemas dinámicos presentan tres clases de comportamiento: fijo, periódico y caótico. Cuando Wolfram experimentó con el comportamiento de los autómatas celulares, encontró esas mismas tres clases, que etiquetó uno, dos y tres. Pero también dio con un cuarto tipo —la clase cuatro—, intermedia entre el comportamiento caótico y el fijo o periódico. «El comportamiento de clase cuatro es el más interesante», dijo Chris. «Ahí obtienes el procesamiento universal de información.»

Para alguien como yo, para quien procesamiento de información es aquello que ocurre cuando se le dice a la computadora que haga algo específico, la noción de un diseño prototipo procesando información en una pantalla de ordenador constituye todo un desafío. «Piensa en términos de manipulación de la información, de manipulación compleja», intentó ayudarme Chris. Me habló del juego de la vida, un auténtico conjunto de reglas para autómatas celulares que genera pautas interminables, extrañas y, a menudo, muy reales. Inventado por el matemático británico John Conway a finales de la década de 1960, Vida, como se lo suele llamar, se ajustaba a una predicción teórica realizada por otro británico, Alan Turing, veinte años atrás. Turing había ideado el principio del

procesamiento universal de información y logró demostrarlo con un sencillo artefacto llamado máquina de Turing. La máquina de Turing, al encarnar los principios de todas las computadoras posibles —de ahí el término de procesamiento universal de información—, era capaz de manipular la información de forma compleja. Y, también, Vida, sin ninguna ayuda. Es verdaderamente fascinante ver cómo va evolucionando en una pantalla de ordenador, y no conozco a nadie, pertenezca o no al «mundillo», que pueda contemplarlo con indiferencia.

Si Steve Wolfram había identificado las cuatro clases de comportamiento de los autómatas celulares, ¿cómo conseguiste ir más allá?, pregunté a Chris. «Steve estaba trabajando con un sistema bastante limitado y sólo consiguió muestrear comportamientos discretos», explicó. «Piénsalo en estos términos. Utilizaba una sonda, la clavaba aquí, luego allí, luego más allá, y analizaba el comportamiento de cada punto.» Como siempre, Chris estaba atareado en la pizarra haciendo dibujos, dándome descripciones verbales y visuales al mismo tiempo. «Sabía que con los sistemas dinámicos a veces puedes identificar un parámetro para hacer que el sistema muestre todo el espectro de comportamiento, explorándolos todos. Quería hacer lo mismo con los autómatas celulares, moverme suavemente por el espacio de reglas, observando al mismo tiempo el cambio del comportamiento.» Un gran trazo atravesó las cuatro clases, uno, dos, cuatro, tres. «Así», dijo Chris, describiendo lo que había acabado por encontrar.

Chris desarrolló algo que denominó parámetro lambda para conseguir lo que se proponía. Difícil de convertir en una analogía tangible, lambda es un instrumento matemático que establece las reglas del autómata celular y permite seguir las consecuencias a lo largo de un continuo. ¿Como un demonio dentro de la máquina?, insinué. «Podrías decirlo así.» Chris prefiere la precisa notación matemática y siempre se sorprende cuando el público no tiene ni idea de lo que está hablando. («¿Una distribución exponencial? ¿Con palabras? Oh, es tal que la probabilidad de que algo vaya a ocurrir sea de uno dividido por cierto número elevado a cierta potencia. La pre-

gunta es ¿cuál es la potencia?» No, no, Chris. Con palabras...) Esa vez, sin embargo, sólo estaba recordando uno de esos golpes de suerte de los que a veces brotan profundos descubrimientos. «Puse lambda al 50 por ciento, generé algunas tablas de reglas y esperaba verlas salir en la región caótica. Pero cada una de ellas era como el juego de la vida, un comportamiento de lo más interesante. Me dije: “No puede ser verdad; algo va mal en el sistema”. Resulta que, por error, había colocado lambda al 30, no al 50 por ciento.»

Por accidente, Chris había entrado directamente en la región de la clase cuatro de Wolfram, la región en la que reside la máxima capacidad de procesamiento de la información. Pero ¿no había Wolfram demostrado ya eso?, pregunté. «Steve sabía que esa clase de comportamiento existía, pero no tenía una estructura general de los comportamientos en el espacio de reglas», dijo Chris. «Pude pasearme por el espacio de reglas y encontrar dónde estaban las diferentes clases de comportamiento, dónde estaba esa clase de comportamiento particularmente interesante, la clase cuatro.» Chris había logrado producir una topografía del comportamiento de los autómatas celulares y del comportamiento de los sistemas dinámicos en general. Porque lo máximo que se había podido predecir era que las diferentes clases de comportamiento —congelado, caótico e intermedio— podían estar salpicando fortuitamente el sistema. Pero Chris había visitado ese espacio de reglas, lo había explorado y había visto que, al abandonar el territorio ordenado y entrar en la región del caos, se atraviesa la máxima capacidad de procesamiento de la información, la máxima manipulación de la información. «Descubrí que era una región muy estrecha situada entre el comportamiento de clase dos y de clase tres», dijo Chris.

En este mundo más intangible que ningún otro, el espacio de reglas de los autómatas celulares, hablábamos de ir de una región a otra, cruzar una tierra de nadie, donde el caos y la estabilidad tiran en direcciones contrarias. Parecía un mundo como el de Alicia en el país de las maravillas, irreal, extraño, un lugar en el que ocurren cosas raras. Chris se refirió a esta tierra de nadie como «el arranque del caos». Pero, según pude

comprobar, no era simplemente un mundo irreal, digno de Alicia en el país de las maravillas. Era un mundo real. Empezó a ver la transición del orden al régimen caótico en los sistemas dinámicos como una analogía de las transiciones de fase de los sistemas físicos, del cambio de un estado a otro; del estado sólido al estado gaseoso, por ejemplo, quizá con un estado intermedio fluido. En la mente de Chris se abrió camino la noción de una fenomenología análoga entre el procesamiento universal de información y esas transiciones de fase físicas. Había ahí una traslación de la computación abstracta a la realidad del mundo físico.

«En el mundo físico se ven todo el tiempo transiciones de fase», dijo Chris. «¿Sabías que las membranas celulares están en precario equilibrio entre un estado sólido y uno líquido?» Lo sabía, pero no lo había pensado en términos dinámicos. «Da un ligerísimo tirón, cambia un poco la composición del colesterol, cambia sólo un poco la composición del ácido graso, deja que una única molécula proteínica se una con un receptor de la membrana y puedes producir grandes cambios, cambios biológicamente útiles.» Le pregunté si estaba diciendo que las membranas biológicas estaban en el límite del caos, y que no era por accidente. «En efecto. Estoy diciendo que el límite del caos se encuentra donde la información llega al umbral del mundo físico, donde consigue ventaja sobre la energía. Estar en el punto de transición entre el orden y el caos no sólo te proporciona un perfecto control —pequeña entrada/gran cambio—, sino que también proporciona la posibilidad de que el procesamiento de información pueda llegar a ser una parte importante de la dinámica del sistema.»

Chris hizo su afortunado descubrimiento poco después de ser contratado por Michigan. Pasó allí dos años explorando todo tipo de combinaciones de parámetros, para conocer el espacio, para conocer el poder que surge del encuentro entre el orden y el caos. No sabía que, pisándole de cerca los talones, estaba Norman Packard, otro aventurero en esa tierra extraña.

Norman Packard, oriundo de Montana, había formado parte de un atrevido grupo de físicos y matemáticos de la Universidad de California, Santa Cruz, que, en la década de 1970, resolvió efectivamente el enigma del caos. Muchos colegas más viejos y supuestamente más sabios consideraban que el grupo, conocido como el Colectivo de Sistemas Dinámicos, malgastaba el tiempo y el talento al ocuparse del caos, algo que, «como todo el mundo sabía», era matemáticamente irresoluble y poco interesante. Norman, su amigo íntimo Doyne Farmer y otros integrantes del grupo también dedicaban horas a desarrollar métodos asistidos por ordenador para ganar a la ruleta, confirmando así la opinión de mentes más convencionales según la cual los miembros del Colectivo de Sistemas Dinámicos estaban, en el mejor de los casos, desencaminados en sus intereses académicos. Al final, cuando apareció la teoría del caos, el colectivo acabó por obtener reconocimiento y respeto, y sus miembros se dispersaron por centros de investigación respetables; Doyne se fue al Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Norman al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Steve Wolfram había invitado a Norman para que se le uniera en Princeton, cosa que hizo entusiasmado. «Me interesaba la dinámica evolutiva y los aspectos creativos del caos», me dijo Norman. «Hay una analogía entre ellos. El caos crea una infinidad de pautas y nunca sabes lo que va a pasar después. Y está la creatividad de la evolución, que empieza con una sopa química hace miles de millones de años, y aquí estamos ahora, reflexionando sobre ello.» Nos encontrábamos hablando en la oficina de Santa Fe de la Prediction Company, una sociedad recién creada cuyo objetivo es aplicar el poder de la investigación sobre sistemas dinámicos al análisis y la predicción del movimiento de los mercados financieros, las bolsas, los bonos y la moneda. Norman y Doyne Farmer son los codirectores científicos de la empresa. La oficina es una modesta casa de madera junto al centro histórico de la ciudad, con paredes blancas, suelos de madera, pilas de *The Wall Street Journal* sobre una mesa baja y un retrato enmarcado de Einstein colgado de una puerta. «Los autómatas celulares po-

seen una abundante gama de comportamientos dinámicos posibles», explicó Norman, después de que una llamada telefónica le diera la noticia de un nuevo apoyo financiero para la aventura técnica de la compañía.

Norman llegó a Princeton en 1983, un año después de que Chris Langton empezara su tesis en Michigan. Como Chris, Norman también empezó a estudiar las reglas de los autómatas celulares, «paseándome por ese espacio de reglas posibles». Utilizando un enfoque diferente al del parámetro lambda de Chris, Norman también exploró la topografía del comportamiento de los autómatas celulares. También él descubrió la estrecha región de transición entre el orden y el caos y se dio cuenta de su potencial para la manipulación de la información compleja. Dos investigadores, explorando un territorio similar, ignorantes el uno del otro, pero alcanzando el mismo destino.

«Nos encontramos en el congreso sobre Evolución, Juegos y Aprendizaje», dijo Norman. «Al principio no entendí del todo el parámetro lambda de Chris, pero me dio la impresión de que ambos examinábamos el mismo fenómeno.» Norman había sido, junto con Doyme Farmer, coorganizador del congreso celebrado en mayo de 1985 en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Ambos escribieron después una introducción al volumen que recogió las participaciones y, en ella, describieron los posibles puntos comunes entre la dinámica evolutiva y los sistemas dinámicos, en especial los sistemas complejos adaptativos. Norman fue también coautor de otros dos artículos. Pero no publicó su conferencia sobre el trabajo con autómatas celulares. «Tengo demasiadas cosas en marcha», explicó. «Siempre voy a toda máquina cuando hago investigación y luego no la publico. Me temo que ocurre con demasiada frecuencia.» Chris sí que escribió un artículo titulado «Studying Artificial Life with Cellular Automata», que reflejaba su continuado interés por la vida artificial, pero donde describía también el parámetro lambda y el descubrimiento del arranque del caos.

Al carecer de material escrito sobre la presentación de Norman, no hay forma objetiva de comparar el estado de desarrollo de las dos investigaciones en esa época. Sin embargo,

según lo recuerda Chris, él iba por delante, Norman no había hecho todavía la conexión vital entre el comportamiento de clase cuatro y la transición entre orden y caos. «Recuerdo que mientras volvía del encuentro pensaba: "Les he contado algo importante a esos tipos".» En cualquier caso, ambos hombres estaban en la misma pista intelectual y llegaron al mismo lugar. Mientras que Chris había llamado al punto de transición «el arranque del caos», Norman acuñó la expresión «el límite del caos». Es mucho más evocadora, y sugiere la idea de estar en equilibrio en el espacio, de una provisionalidad incluso peligrosa, aunque plagada de potencial. Como todas las expresiones poderosas, el límite del caos ha cuajado y se ha convertido en un icono de la inmanente creatividad de los sistemas complejos.

El descubrimiento de que el procesamiento universal de información está en equilibrio entre el orden y el caos en los sistemas dinámicos fue importante en sí mismo, con sus analogías con las transiciones de fase del mundo físico. Sería harto interesante que los sistemas complejos adaptativos estuvieran inevitablemente situados en el límite del caos, el lugar de máxima capacidad para el cómputo de la información; podría considerarse entonces que el mundo explota la dinámica creativa de los sistemas complejos, pero sin elección en la materia. Pero, ¿y si realmente tales sistemas se colocaran ellos solos en el límite del caos, se movieran por el espacio de parámetros hasta el lugar de procesamiento máximo de la información? Eso sí que sería interesante: casi parecería que el fantasma de la máquina tiene poder de decisión, pilotando el sistema hasta la creatividad máxima.

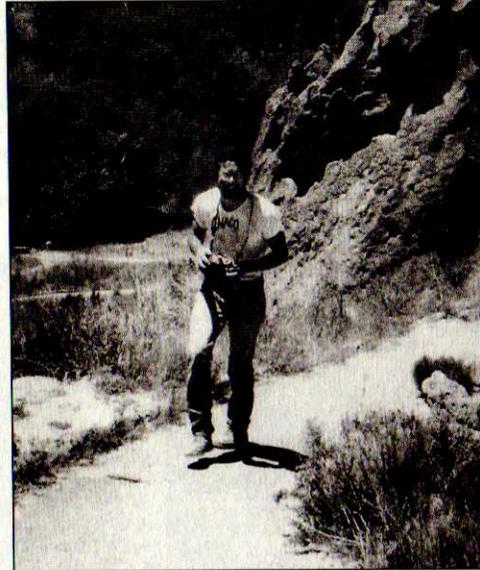
«Tenía la intuición, y también la tenía Chris, de que el límite del caos podía ser útil para propósitos evolutivos», explicó Norman. «Quería demostrar que eso era verdad, que los sistemas se adaptan hacia el límite del caos. La lógica era que si los procesamientos de información eran considerados buenos en un contexto evolutivo, llegabas a las interacciones dinámicas en el límite del caos.» Decidió jugar a Dios, aunque con unos objetivos modestos.

Estableció un conjunto de reglas para un autómata celular,

dejó que mutaran usando un algoritmo genético y les impuso la tarea de un cómputo particular. Le pregunté si había esperado que las reglas mejoraran por medio de la selección natural. «Esa era la idea», dijo Norman. ¿De modo que asignarías a esas reglas «mejoradas» una eficacia biológica superior en el juego? ¿Y esperabas que las reglas más aptas se generaran en el límite del caos? «Sí. Era consciente de que controlaba las cosas más de lo deseado, pero sabía que eso podría demostrar lo que estaba buscando.» Así fue. «Se ha visto que la población de reglas se desplaza hacia una región del espacio de todas las reglas que marca el límite entre las reglas caóticas y las reglas no caóticas», escribió Norman en un artículo científico que describía el trabajo y que se publicó en 1988. El artículo se tituló «Adaptation Toward the Edge of Chaos». Es un hito en la aparición de la ciencia de los sistemas complejos adaptativos.

El descubrimiento del límite del caos en el comportamiento de los autómatas celulares fue un paso vital en este proceso, pero, en cierto sentido, fue simplemente un eco de lo que los matemáticos ya sabían sobre los sistemas dinámicos en general. Sin embargo, lo que era nuevo era la noción de procesamiento universal de información en el límite. Y, conceptualmente, el hecho de hacer una analogía explícita entre la dinámica del límite del caos y las transiciones de fase del mundo físico, como había hecho Chris, suponía un gran avance. Pero, sin duda, el logro capital fue la demostración de que un sistema complejo adaptativo (los autómatas celulares de Norman con la tarea de cómputo asignada) no sólo se desplazaba hacia el límite del caos, sino que también refinaba la eficacia de sus reglas a medida que lo hacía.

Poco antes de publicar su artículo, Norman visitó a Stu Kauffman en Santa Fe. «Estábamos tomando un baño caliente una noche y empecé a contarle esos resultados, el procesamiento de información en el límite del caos», explicó Norman. «Stu se entusiasmó y gritó: “Todo esto encaja con mis redes booleanas... Todo es lo mismo, todo es lo mismo”.»



© W. Wills

Chip Wills, Universidad de Nuevo México: «No se tiene la sensación de que el del Chaco fuera un pueblo que pasara hambre. Se nota la riqueza de un pueblo capaz de enormes hazañas constructoras y, también, de una avanzada agricultura de regadío bajo circunstancias muy duras. No hay duda, el Chaco fue un lugar importante, muy importante.»

© P. Crown

Patricia Crown, Universidad de Arizona: «En el año 200, la alfarería se volvió importante [para los ansazi]; también conocieron las ventajas del regadío, el sedentarismo y una organización social más compleja. Sucedió algo que produjo un gran cambio. Y sucedió rápidamente.»





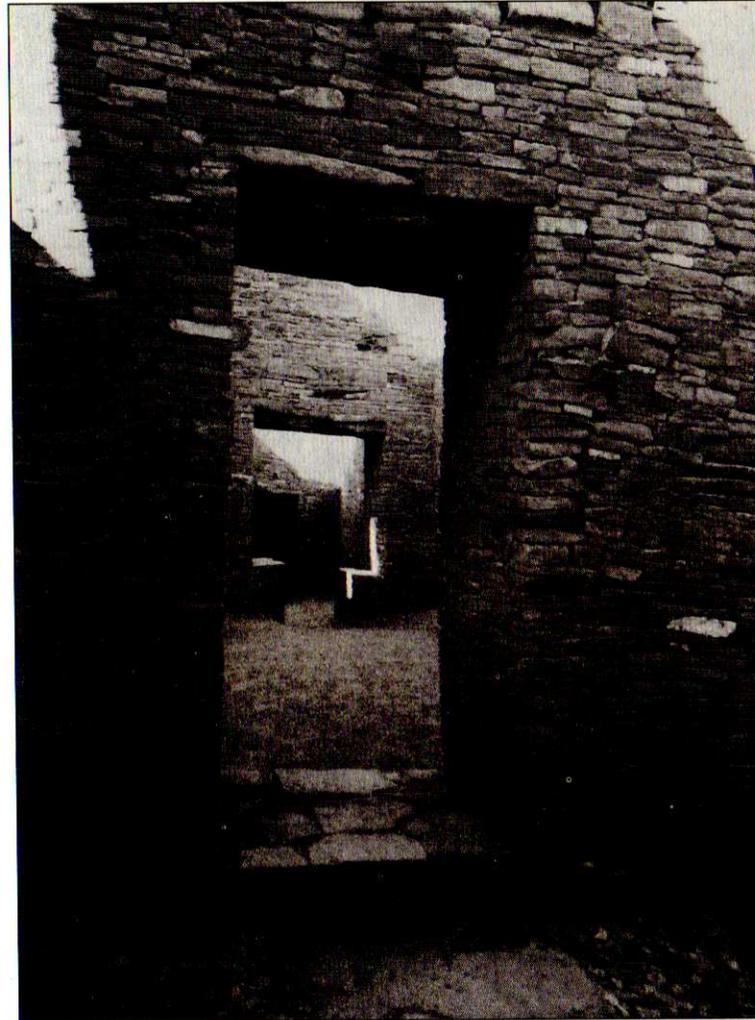
Murrill Gell-Mann, California Institute of Technology: «En el caso de las sociedades humanas, los esquemas son las instituciones, las costumbres, las tradiciones y los mitos, que constituyen, en realidad, formas de ADN cultural».

© California Institute of Technology

Pueblo Bonito, visto desde la orilla septentrional del cañón del Chaco. Las numerosas estructuras circulares son kivas, lugares ceremoniales. Bonito fue la mayor de las Casas Grandes de la comunidad del cañón del Chaco; quedó abandonado en algún momento entre los años 1150 y 1200.



© R. Lewin



© R. Lewin

La construcción en el cañón del Chaco pone de manifiesto una gran meticulosidad; una característica arquitectónica es la ventana o la puerta en forma de T (como la que aparece aquí de Pueblo Bonito).



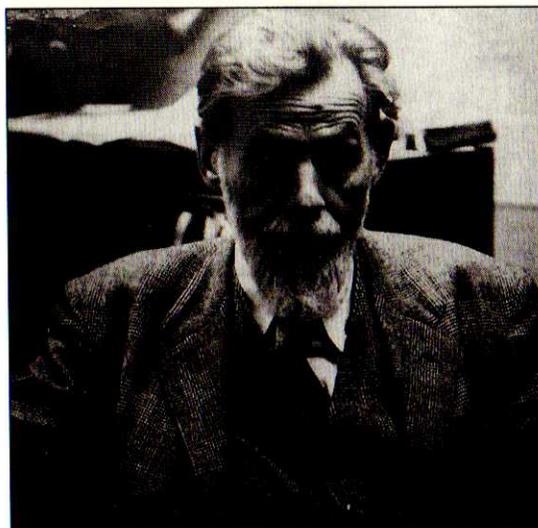
© R. Lewin

Las vigas de madera están empotradas en las paredes, a menudo en grupos de tres, como en éstas de Pueblo Bonito. Se traían de bosques distantes a más de 80 km y han resistido el paso del tiempo por la aridez del clima. Hoy son fundamentales para establecer la edad del conjunto.

© Carrie Dean



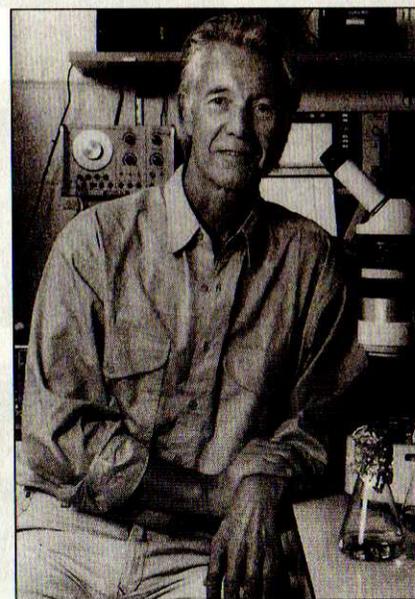
Jeff Dean, Universidad de Arizona: «Lo sorprendente de la arquitectura chaqueña es que los edificios surgen literalmente del suelo».



© M.I.T.

Warren McCulloch, Instituto de Tecnología de Massachusetts: en 1967, le dijo a Stuart Kauffman que tendrían que pasar veinte años antes de que alguien reparara en el descubrimiento de Kauffman del «orden espontáneo» en las redes booleanas. Tenía razón.

© John Farnham



Brian Goodwin, Universidad Abierta, Inglaterra: «Ciertamente el principio creativo de la emergencia es un profundo misterio en muchos sentidos, y ésa es una propiedad de los sistemas dinámicos complejos.

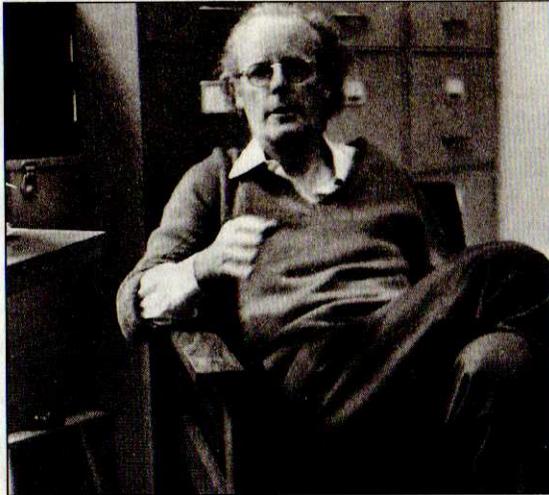
Pero, en última instancia, es inteligible. No se puede decir lo mismo del neodarwinismo».



Stuart Kauffman,  
Universidad de  
Pennsylvania: «Si la nueva  
ciencia de la complejidad  
tiene éxito logrará un  
matrimonio entre la  
autoorganización y la  
selección. Será una física de  
la biología».

© University of Pennsylvania

Johon Maynard  
Smith, Universidad  
de Sussex,  
Inglaterra: «No se  
puede estudiar la  
naturaleza sin saber  
que ahí fuera hay  
extrañas  
adaptaciones,  
formas complicadas  
de vida que parecen  
hacer encajar un  
organismo en su  
medio ambiente.  
Así que el problema  
pasa a ser: ¿Cómo  
se explica? La  
respuesta es la  
adaptación por  
medio de la  
selección natural».



© R. Lewin



Chris Langton, Instituto de  
Santa Fe: «El límite del caos  
se encuentra donde la  
información llega al umbral  
del mundo físico, donde  
consigue ventaja sobre la  
energía».

© Cary Herz

© Brookhaven National Laboratory



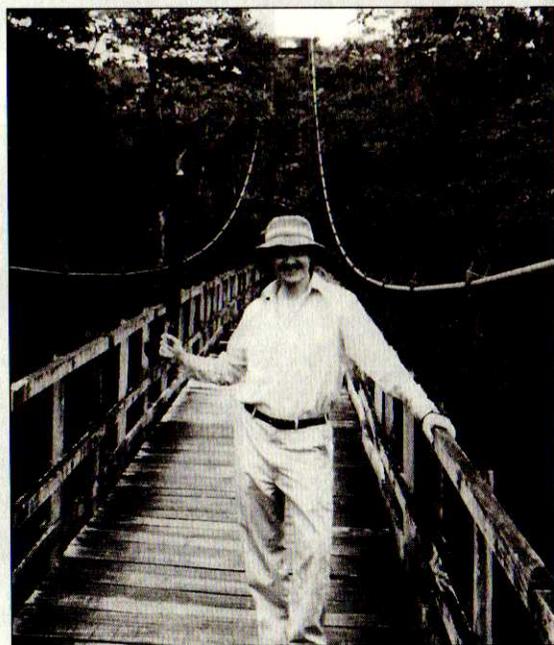
Per Bak, Laboratorio Nacional de  
Brookhaven; del límite del caos y  
la criticalidad autoorganizada  
afirma: «Estamos hablando de la  
misma clase de fenómeno».



© Patricia Evans

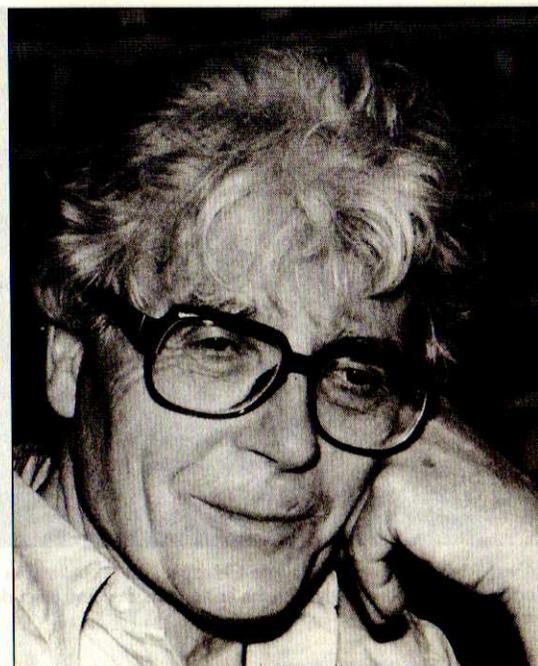
David Raup, Universidad de Chicago: «Hasta un 60 por ciento de todas las extinciones pudo ser resultado de la colisión de un asteroide».

© R. Lawin



Tom Ray, Universidad de Delaware: «Si la Tierra tiene algún mensaje, es que la dinámica de los sistemas complejos puede dar lugar a pautas que no podían haberse predicho, pautas que vemos en la naturaleza y que incluyen extinciones de una magnitud considerable».

James Lovelock: «La mayoría de los ecólogos teóricos hace caso omiso en sus modelos del entorno físico y químico, y ésa es una parte muy importante de los mundos de las especies».



© James Lovelock

Stuart Pimm, Universidad de Tennessee: «Para mí, es evidente que tenemos que concebir las especies como engastadas en sistemas dinámicos complejos, y eso proporciona una visión muy diferente del mundo».

© Sandy Lovelock

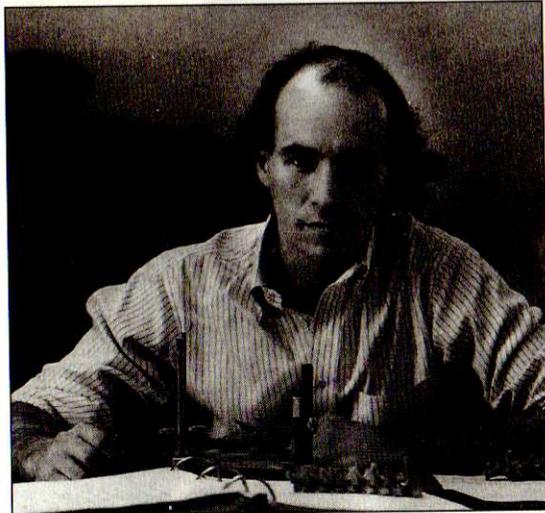
© S. Pimm





Robert Richards, Universidad de Chicago: «El rechazo [por parte de Stephen Jay Gould] de la idea de progreso, tanto en su nombre como en el de Darwin, está influido por la ideología».

© Bob Kalmbach. Courtesy of the University of Michigan News and Information Services



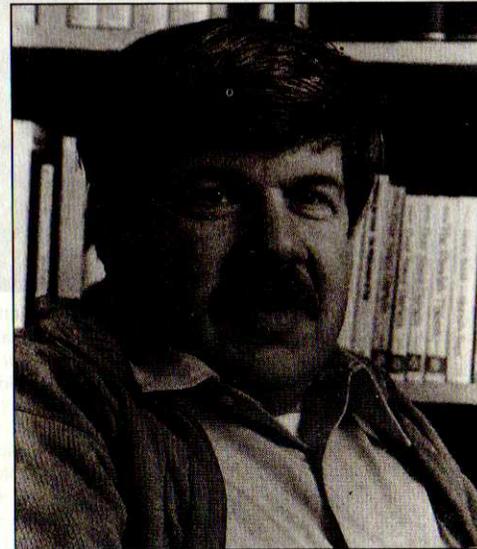
Dan MacShea, Universidad de Michigan: «Enseguida aprendí dos cosas. Primero, que hay un consenso general aunque vago de que la complejidad ha aumentado a lo largo de la historia evolutiva. Segundo, que complejidad es un palabra muy escurridiza. Puede significar muchas cosas».



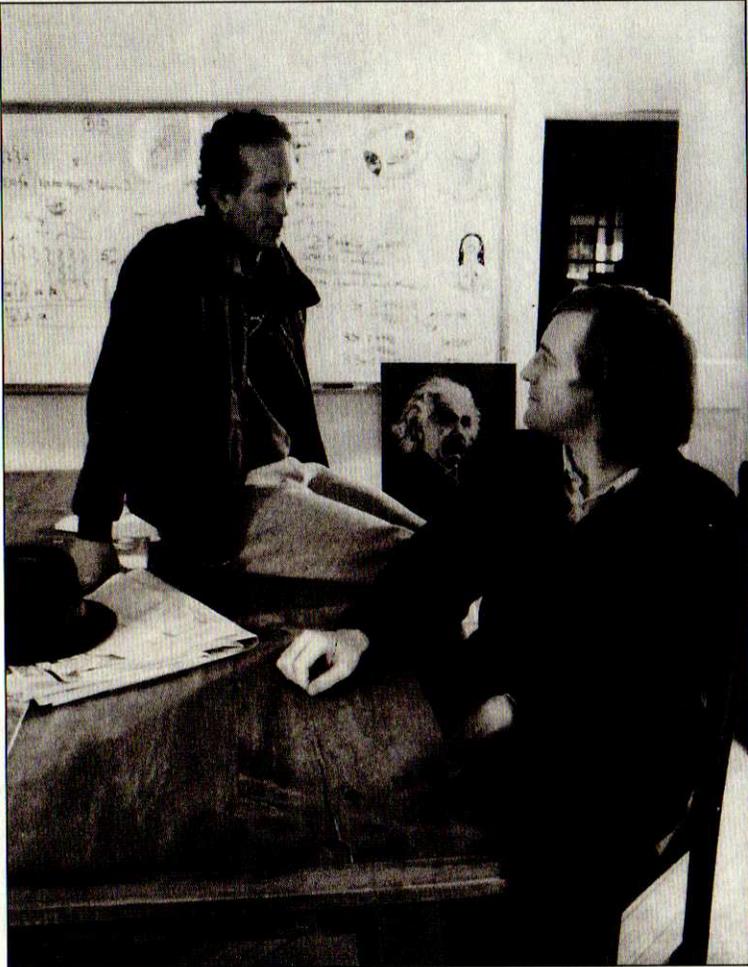
Michael Ruse, Universidad de Guelph: «Rasca en cualquier biólogo evolucionista y encontrarás debajo a un progresivista».

© University of Guelph

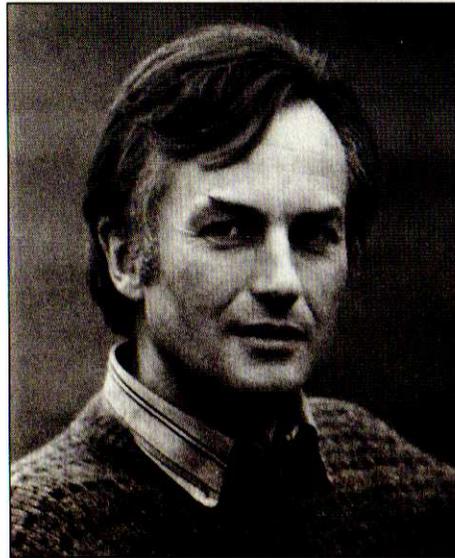
© Harvard University News Office



Stephen Jay Gould, Universidad de Harvard: «Tenemos una visión de la evolución muy "cefalocéntrica", un sesgo que distorsiona nuestra percepción del verdadero curso de la historia».



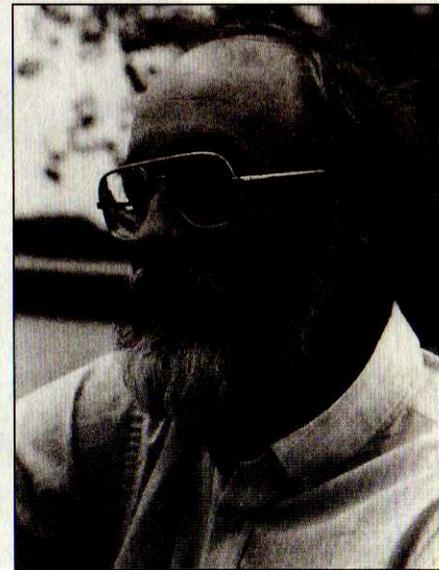
Doyne Farmer (izquierda) y Norman Packard, Prediction Company: Farmer fue el «protector» de Chris Langton en el Laboratorio Nacional de los Alamos; Packard: «A la gente no le gusta [el progreso en la evolución] no tanto por razones científicas como sociológicas. No concedo un juicio de valor a la superioridad en el procesamiento de la información».



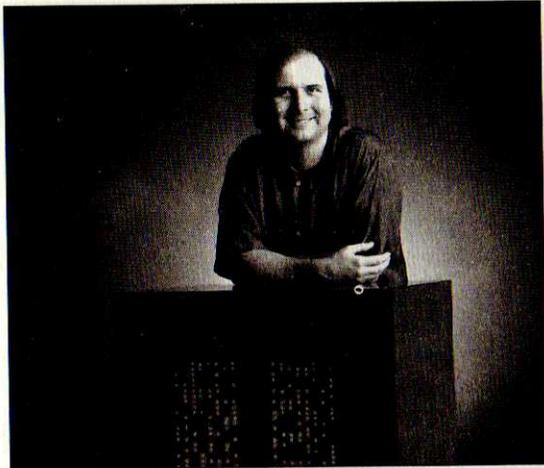
© Lisa Lloyd

Richard Dawkins, Universidad de Oxford: «Soy hostil a todo tipo de fuerza mística que conduzca a una mayor complejidad».

© Susan Dennet



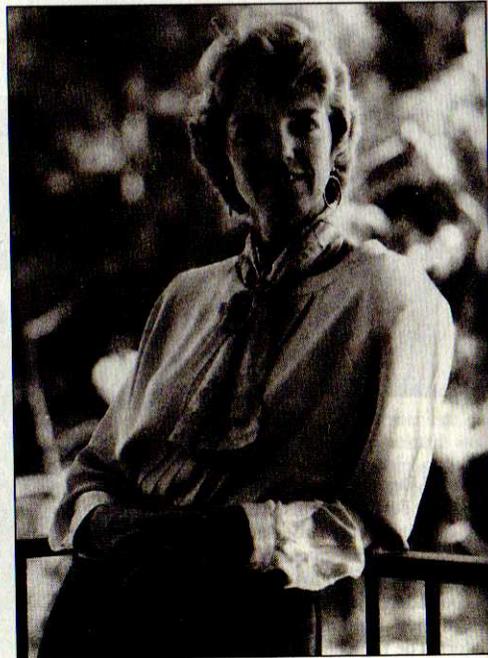
Daniel Dennett, Universidad de Tufts: «Me gustaría que imaginaras algo que llamo la "máquina joyceana", una máquina que filtra los múltiples borradores y al final ofrece la ilusión de un relato único en forma de flujo de conciencia».



Danny Hillis,  
Thinking Machines  
Corp.: Hillis describe  
el ordenador más  
avanzado del mundo,  
el Connection  
Machine-5, como  
«de una complejidad  
trivial comparado  
con el cerebro de una  
mosca».

Photo by Clint Clements. © Thinking Machines Corp.

© Becky Cohen



Patricia Churchland,  
Universidad de California,  
San Diego: «Cuando  
piensas en la actividad del  
cerebro debes tener en  
cuenta propiedades  
emergentes en niveles  
superiores que dependen de  
fenómenos de un nivel  
inferior en el sistema».



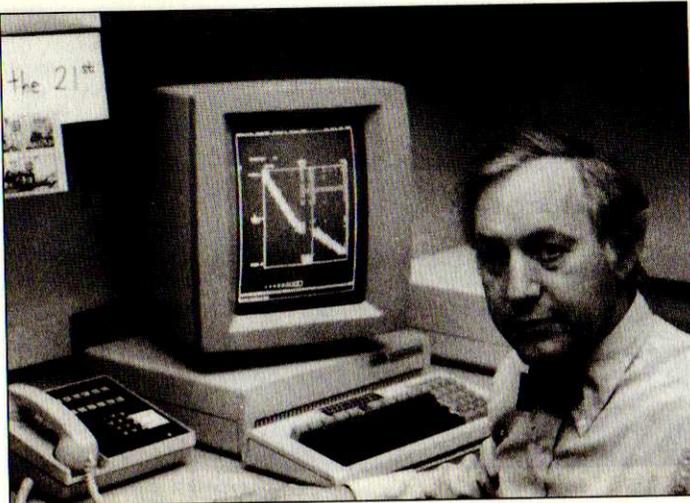
© C. McGinn

Colin McGinn,  
Universidad de  
Rutgers: «La  
profunda sensación  
de misterio que  
experimentamos en  
relación con la  
conciencia debería al  
menos animarnos a  
explorar la  
posibilidad de que su  
comprensión nos esté  
sencillamente  
vedada».

© Tim Wainwright

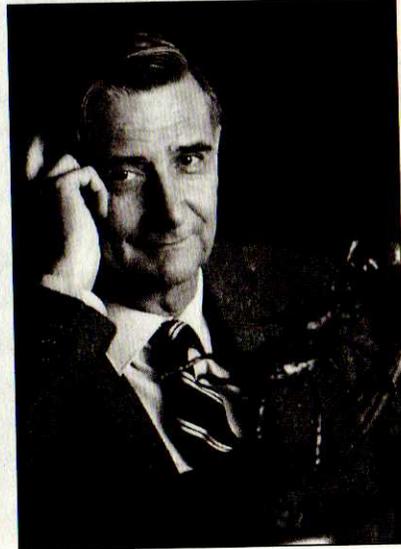


Nicholas Humphrey,  
Universidad de Cambridge:  
«Es el presente lo que es  
crucial en la conciencia, no  
reflexionar sobre el pasado o  
el futuro».



Jack Cowan, Universidad de Chicago: «Quizás encierre algunas verdades universales la teoría de la Complejidad, pero el modelo todavía tiene que formularse pensando en la física y la biología y eso es lo que nos falta por ahora».

© Harvard University



Edward O. Wilson, Universidad de Harvard: «Es el momento de volver a mirar el conjunto y, sí, creo que podemos empezar a hablar de las colonias de insectos como superorganismos, pero sin que en ello haya misticismo alguno».

En 1985, Stu había pasado un año sabático en Ginebra y visitado París, donde conoció a Gérard Weishbuch, un físico de la École Normale Supérieure. Stu había empezado hacía poco a trabajar otra vez con redes booleanas, intrigado por ver si lograba descubrir adaptación. Resultó que las redes booleanas estaban experimentando un renacimiento, al menos en Europa. Weishbuch compartía despacho con Bernard Derrida, otro físico que trabajaba en lo que llamaba «redes de Kauffman». Debió de ser toda una sorpresa, dije. «Sí. Toda esa actividad en marcha, en ebullición. Quédé encantado.»

Tiempo atrás, en San Francisco, Stu había «adaptado» su red cambiando el número de conexiones que cada elemento recibía, uno, dos, tres, cuatro, a veces con tantas conexiones como elementos. Algo bastante poco refinado, pero eficaz para lo que estaba haciendo entonces. Había visto estados de orden generalizado, con una conexión, donde la mayoría de las «bombillas» estaban congeladas como una isla de color rojo. Había visto caos, con muchas conexiones, donde las pautas caleidoscópicas de rojo y azul aparecían desordenadamente por el sistema. Y había visto que, con dos conexiones, surgía una estructura interesante, titilantes islas azules en un mar rojo. Pero, como en el caso de Wolfram y sus cuatro clases de comportamiento de los autómatas celulares, Stu no se había hecho una idea de la topografía general y su importancia. París cambiaría eso. «Bernard estaba adaptando un parámetro diferente del mío, más sutil», explicó Stu. «Había empezado a ver el mismo fenómeno que Chris Langton había visto con los autómatas celulares, el límite del caos. Islas azules, brillando, cambiando, en tenue contacto entre sí.»

Ese mismo año Stu trabajó con Weishbuch, refinando el enfoque de Derrida, y empezó a desarrollar una idea de la topografía de los diferentes estados del sistema, de la compleja capacidad de procesamiento existente entre los regímenes ordenados y caóticos. «Gérard y yo no escribimos el trabajo», se lamentó Stu. «A nadie le habría importado.» Sin embargo, a él sí. Y con razón, ya que es probable que la idea del límite del caos sea de suma importancia en el mundo de los sistemas complejos adaptativos. La prioridad del descubri-

miento es, como mínimo, una cuestión de orgullo profesional y muy probablemente un logro merecedor de reconocimiento serio. La única referencia bibliográfica explícita a la afirmación de Stu de haber descubierto de modo independiente el límite del caos está en su propio libro, *The Origins of Order*, publicado en el verano de 1992. En una versión final de la obra, se menciona un debate sobre la importancia del límite del caos: «Esta sugerencia había sido hecha por mí (1985), C. Langton (1990), N. Packard (1988) y de modo más reciente por J. Crutchfield (comunicación personal, 1990)». Esta cita de 1985 a él mismo hace referencia a las discusiones que Stu afirma que se produjeron en París ese año, no a una publicación.

Al citar en este pasaje un artículo de 1990 de Chris Langton en lugar del artículo de 1986, Stu parecía dar prioridad al descubrimiento de Norman Packard. Norman admite que Chris fue el primero. En cualquier caso, ni Chris ni Norman recuerdan que Stu se hubiera referido explícitamente al fenómeno del límite del caos hasta haberlo hecho ellos de modo independiente y haber hablado a Stu del tema. «Sencillamente me olvidé de que el límite del caos era un lugar interesante para estar», me dijo Stu.

Cuando volvió a Filadelfia tras su estancia en Europa, Stu dirigió una parte de su atención a la evolución, en concreto a la adaptación. Siguieron cuatro años de investigación febril, que llevaron la noción del límite del caos a las fronteras de la biología real y que se iniciaron con los relieves adaptativos, un concepto desarrollado en los años treinta por el genético de la Universidad de Chicago Sewell Wright. La imagen es engañosamente simple.

Hay que pensar en la «eficacia biológica» de un individuo en términos de las diferentes combinaciones de las variantes génicas que podría tener. Pensemos ahora en un paisaje, en el que cada punto represente dotaciones ligeramente diferentes de esas variantes. Por último, si imaginamos que algunas dotaciones son más aptas que otras, podemos convertirlas en picos.

Cuanto más aptas sean las dotaciones, más elevado el pico. El relieve general será rugoso, con picos de diferente altura separados por valles. No olvidemos que este paisaje representa probabilidades de eficacia biológica, lugares en que podrían estar los individuos de una especie en función de la combinación de variantes genéticas presentes en sus cromosomas. Si un individuo está en un valle de eficacia biológica, la mutación y la selección podrían empujarlo hasta un pico local, lo cual representaría un aumento en la eficacia biológica. Una vez en lo alto, podría, metafóricamente, contemplar con envidia un pico cercano, aunque sería incapaz de alcanzarlo porque ello exigiría cruzar un valle de eficacia biológica inferior.

«Es una imagen hermosa», dijo Stu. «Me gusta.» Stu desarrolló más la idea y le impuso la estructura de las redes booleanas: la eficacia biológica estaba determinada por el número de genes de las especies (los elementos de la red) y sus interacciones (el número de conexiones entre los elementos). Ajustando la conectividad de los genes, cambiaba la eficacia biológica de diversas combinaciones, cambiando así la topografía del paisaje. Trabajando con Simon Levin, un biólogo de la Universidad de Cornell, Stu utilizó el concepto de paisaje de eficacia biológica adaptable para demostrar que, por poderosa que pueda ser en ocasiones la selección natural, con frecuencia es incapaz de trasladar una especie hacia los picos de eficacia biológica, y que en ello puede ejercer una fuerte influencia la dinámica del propio sistema genético. «Así que le estoy agradecido a John [Maynard Smith] por hacerme pensar en la selección», dijo Stu, «pero me alegro de ver que tiene sus límites, como siempre había sospechado.»

La noción de relieve adaptativo logró imbuir aún más el límite del caos de realidad biológica cuando Stu unió dos paisajes. «Imagina una mosca», dijo Stu. «Tiene un relieve adaptativo. Ahora imagina una rana. También tiene un relieve adaptativo. Pero no son independientes. La rana saca la lengua y, zap, se acabó la mosca. Es parte de la vida. Supón ahora que la mosca desarrolla patas resbaladizas para que la lengua de la rana no la atrape. La rana se queda sin cena y su pico

en el paisaje de eficacia biológica descende: es menos apta. La mosca es más apta, de modo que su pico se eleva. Así que los paisajes acoplados cambian, cada uno en respuesta al otro». El siguiente paso es que la rana desarrolle pelos en la lengua —o algún otro recurso— y sea capaz de volver a atrapar la mosca. Las eficacias biológicas cambian, los paisajes cambian. «Es la clásica carrera de armamentos biológica», explicó Stu. «Depredador y presa intentan constantemente estar un paso por delante del otro.»

Los biólogos conocen este fenómeno como el efecto reina roja, bautizado así por Leigh Van Valen de la Universidad de Chicago en referencia a *Alicia a través del espejo*: las especies del depredador y la presa tienen que correr (evolutivamente) para conseguir permanecer en el mismo sitio. Es una analogía adecuada, porque las especies viven en relieves adaptativos cuyas topografías están en constante cambio, de manera muy parecida a lo que ocurriría en un mundo «a través del espejo». El efecto reina roja es de lo más pertinente en biología, porque sirve de recordatorio de que las especies no llevan vidas aisladas, sino que están inextricablemente unidas unas a otras. Así, el éxito evolutivo de una especie puede ser tanto una función de lo que hacen otras especies como de lo que hace ella misma. Algunos biólogos llegan incluso a afirmar que el efecto reina roja es la fuerza motriz de la historia evolutiva, en la que el cambio medioambiental desempeña un papel menor. La noción contiene claros ecos de la dinámica de los sistemas complejos, un motor más interno que externo del cambio de las especies en tanto comunidad.

«Imagina ahora que en lugar de dos especies tenemos un centenar», dijo Stu, dando paso a la complejidad potencial de semejante sistema. «Tenemos un centenar de paisajes acoplados, interacciones por todas partes.» Intenté imaginarlo, pero la simple y vívida imagen de la mosca y la rana se evaporó y quedó reemplazada por la confusión. Cualquier cosa podría ocurrir, dije. «Cualquier cosa, pero no es así», replicó Stu. «Adaptamos las interacciones —internas, entre los genes de las especies, y externas, el modo en que una especie choca con otra—, vemos cómo funciona el sistema, cómo cambia la efi-

encia biológica media con las diferentes combinaciones de interacciones. Imagina lo que ocurre.» No tuve que hacerlo. «El sistema se desplaza a través de estados de actividad, quizá congelados, quizá caóticos, pero al final llega a una posición de reposo, con la eficacia biológica optimizada, en equilibrio en el límite del caos.»

Eso, dije con escepticismo, suena a selección de grupo. «Suena a eso, pero no lo es», respondió Stu. Durante un tiempo se creyó que los individuos dentro de las especies, o las especies en un grupo, podían conformar su comportamiento en bien del grupo. En la actualidad, los biólogos saben que los individuos actúan de forma limitada, darwinista y egoísta y que harán trampas si pueden. La sugerencia de que un grupo de especies pudiera adaptarse colectivamente, teniendo como objetivo el beneficio del grupo, provoca sonrisas de conmiseración en las caras de los biólogos. «Pero resulta que los individuos de mi grupo se comportan egoístamente», dijo Stu. «Eso es lo que tiene de hermoso. La adaptación colectiva con fines egoístas produce la máxima eficacia biológica promedio, cada especie dentro del contexto de las otras. Como si por medio de una mano invisible —la expresión de Adam Smith para referirse a los mercados en una economía capitalista—, se garantizara el bien colectivo.»

Parecía demasiado perfecto para ser cierto. Intenté imaginar de nuevo un ecosistema en el que interaccionan muchas especies, cada una persiguiendo sus propios fines evolutivos, adaptando evolutivamente sus propias conexiones genéticas y las interacciones con las demás especies, con el resultado de que la comunidad alcanza una posición de máxima eficacia biológica sostenida. Algunas especies quedarían en una especie de equilibrio evolutivo mientras que otras participarían en las travesuras de la reina roja; pero todas forman parte de un sistema en delicado equilibrio. De repente vi que adaptando sus interacciones, las especies estarían refinando efectivamente su capacidad para evolucionar. Eso sería asombroso. ¿Me estás diciendo que tus criaturas evolucionan mejor en medio de toda esta actividad, que mejoran su evolutividad? «Sí», dijo con una extraña sonrisa. «¿No es maravilloso?»

Desde luego, parecía maravilloso. Entonces Stu me sorprendió con algo completamente inesperado. «¿Sabes lo que me dijo Phil Anderson cuando le hablé de esto en el instituto?», preguntó Stu. «Me dijo: “Esto es mini-Gaia”.» ¿Es qué? «Mini-Gaia.» ¿En serio?, pregunté. Philip Anderson es un Nobel de Física de Princeton, con estrechos lazos con el instituto. A él no le toman el pelo. Y la idea de Gaia, la diosa Tierra, entendida como superorganismo que mantiene un equilibrio global, para muchos científicos no es ni mucho menos respetable. «Claro que lo digo en serio. Phil dijo mini-Gaia, y creo que tiene razón.» En mi exploración de la complejidad y del modo en que podría iluminar algunas de las grandes pautas de la naturaleza, había desarrollado ciertas expectativas de adónde podría llegar. El desarrollo embrionario, la evolución, los ecosistemas, la complejidad social... pero nunca se me había cruzado ni una sola vez por la cabeza Gaia. Y, sin embargo, enseguida adquirió sentido: ahí, en el complejo mundo de los modelos informáticos de Stu, un ecosistema alcanzaba por sí mismo un estado colectivamente beneficioso, el control por medio de vastas redes de interacciones. Sin duda sonaba a Gaia. Hice una nota mental para seguir esa pista más adelante.

Le pregunté cómo podía estar seguro de que su ecosistema informático alcanzaba el límite del caos. «Seguimos la dinámica, contemplamos el sistema cuando está congelado, cuando es caótico, y podemos ver que se estabiliza en ese estado intermedio, con una elevada eficacia biológica», explicó Stu con paciencia, repitiendo lo que había dicho antes. Luego volvió de nuevo a la analogía de las bombillas, para terminar con el ecosistema representado por unas islas azules brillantes y apenas cambiantes, tocándose tenuemente entre sí. Su familiaridad era tranquilizadora. «Lo maravilloso es que puedes realmente ver que la adaptación lleva el sistema al límite del caos», continuó Stu. «Es una idea tan poderosa que tiene que ser cierta.»

Pero, añadió, aún hay más. «¿Has oído hablar de Per Bak y la criticalidad autoorganizada?» No había oído hablar, pero Stu ya me estaba hablando de ello antes de que pudiera res-

ponder. «Ese es otro ramal de la historia. Tengo la sensación de que todo esto encaja de un modo maravilloso.»

Per, físico en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, Nueva York, es a la vez una figura jovial e imponente. Majestuosamente alto, tiene la cara redonda, gafas redondas y, aunque propenso a ser despistado, posee una inteligencia agudísima. Recientemente ha desarrollado la hipótesis de que los grandes sistemas interactivos —los sistemas dinámicos— evolucionan de modo natural hacia un estado crítico. El sistema puede ser biológico, como un ecosistema en coevolución, o físico, como en la interacción de las placas tectónicas y su papel en los terremotos. Todo esto suena un poco como la frontera del caos, aventuré. ¿No? «Es lo que pienso», contestó. «Estamos hablando de la misma clase de fenómeno.»

Los sistemas que han alcanzado el estado crítico exhiben una propiedad muy característica, explicó Per. Si se perturba un sistema de éstos, podríamos obtener una respuesta pequeña. Perturbándolo otra vez, con el mismo grado de perturbación, podría colapsarse por completo. Si se perturba muchas veces cuando se halla en equilibrio en un estado crítico, obtenemos una gama de respuestas que puede describirse con una ley exponencial; es decir, las respuestas grandes son escasas, las respuestas pequeñas son comunes y en medio se sitúan las respuestas intermedias. «Eso se ve en los terremotos, los incendios forestales, el juego de la vida de Conway», explicó Per. ¿Esperarías verlo en los episodios de extinción, en el tipo de cosas que ves en el registro fósil?, pregunté. «Sí.» ¿Y en los episodios de especiación? Si se alterara el medio ambiente, ¿eso daría lugar al origen de nuevas especies? «También.»

Per tenía una asombrosa analogía visual para un sistema en estado crítico: un montón de arena. Se tira un pequeño chorro de arena sobre una bandeja circular. El montón crece firmemente, pronto alcanza el límite. Lo que era un montón pequeño va elevándose cada vez más, hasta que, de repente, más arena puede desencadenar una pequeña avalancha y luego

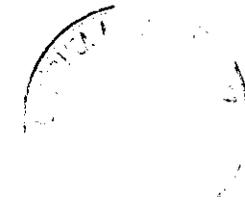
una grande, avalanchas de todas las clases. El montón, cuando no recibe más arena adicional, representa el sistema en equilibrio en el estado crítico. Y las avalanchas de toda la gama de tamaños, provocadas por perturbaciones de la misma magnitud (otro grano de arena), representan una distribución exponencial de la respuesta: la marca de un sistema que ha alcanzado él solo el estado crítico. Que ha alcanzado él solo, quizás, el límite del caos.

Si el estado crítico y el límite del caos eran fenómenos equivalentes, surgía entonces una pregunta obvia. ¿Puedes poner a prueba tus modelos de ecosistemas para ver lo que ocurre cuando los perturbas?, pregunté a Stu. «Fue una cosa fácil», dijo. «Lo único que hicimos fue hacer del mundo exterior —el mundo abiótico— otra conexión aleatoria.» Si el relieve adaptativo de una especie se deforma por una perturbación externa, es probable que la especie se vuelva menos apta. Entonces, por medio de la mutación y la selección volverá a escalar el pico, o un nuevo pico, un cambio que con toda probabilidad deformará el paisaje de eficacia biológica de la especie o las especies con las que interaccione. Si la conectividad entre especies dentro del sistema es baja, los efectos de la perturbación inicial enseguida se agotarán. Eso ocurre cuando el sistema está cerca del estado congelado. Con una conectividad elevada, es probable que cualquier cambio se propague con fuerza por todo el sistema, con muchas avalanchas grandes. Es el estado caótico. En el estado intermedio, el límite del caos —con interacciones internas y entre las especies cuidadosamente adaptadas—, algunas perturbaciones provocan pequeñas cascadas de cambio, otras desencadenan avalanchas completas, equivalentes a extinciones en masa. «Con nuestro sistema en el límite del caos, vimos una distribución exponencial del cambio», dijo Stu a propósito del experimento que había ejecutado en el ordenador. «No creo que sea trivial. Pienso que nos está diciendo algo profundo sobre el mundo de ahí fuera.»

Ese «algo profundo» es esto: los sistemas en coevolu-

ción, obrando como sistemas complejos adaptativos, se adaptan solos en el punto de máxima capacidad de procesamiento de la información, máxima eficacia biológica, máxima evolutividad. No pude evitar pensar de nuevo en «el fantasma de la máquina», la hoy desacreditada expresión que solía utilizarse para describir una «mente» autónoma en el interior del cerebro. Una especie de fantasma habita en los sistemas complejos adaptativos, me pareció. Al menos, no era posible describir la historia evolutiva como «una maldita cosa tras otra». Si el límite del caos es más que un producto seductor de complejos modelos informáticos, el mundo «de ahí afuera» adquiere un tinte de provocadora inevitabilidad. Quizás algo más que un tinte. ¿Pero es eso cierto?

Tendría que averiguarlo.



La vida en la Tierra tiene más de 3800 millones de años, pero sólo los organismos formados por muchas clases diferentes de células parecen fascinar a los apasionados por el diseño. Después de que tales organismos evolucionaran, hace 600 millones de años, el infierno se desató y la historia de la vida en la Tierra ha seguido desde entonces una pauta compleja.

En los pocos millones de años que siguieron a ese hito capital en la historia terrestre, los mares se llenaron de miríadas de formas de vida, seres nadadores, merodeadores, sedentarios, así como excavadores. El acontecimiento fue tan espectacular que el término coloquial de explosión cámbrica no es una exageración. Tres mil millones de años de abrumadora simplicidad biológica se vieron sustituidos de la noche a la mañana —desde una perspectiva geológica— por una efervescente complejidad.

Una vez establecida, la vida multicelular siguió una ruta ascendente en la escala de complejidad, de modo que los mares modernos contienen el doble de especies que los del mundo cámbrico. Sin embargo, este incremento no fue una tendencia estable, donde cada era se apuntaba rutinaria y predeciblemente nuevas ganancias en la diversidad. El transcurso del tiempo estuvo marcado por una renovación continua, donde nuevas especies sustituían a las existentes. Y, lo más espectacular, toda progresión regular desde los tiempos antiguos a los modernos se vio interrumpida por catastróficos colapsos ocasionales en la diversidad, extinciones en masa que, en un caso, afectaron al 96 por ciento de las especies existentes en un instante geológico.

Cinco episodios de este tipo puntúan la historia de la vida. También infligieron pérdidas muchos colapsos menores, que no son lo suficientemente grandes como para merecer la denominación de «extinción masiva», pero que sin embargo fueron devastadores a escala continental. El resultado es que el 99,9 por ciento de todas las especies que vivieron alguna vez están hoy extinguidas. En palabras de un estadístico bromista: «Según una primera aproximación, todas las especies están extinguidas». A pesar de nuestra insignificancia estadística, somos, junto con las demás especies existentes —entre 10 y 30 millones—, la última expresión de un proceso de 600 millones de años de creación y extinción.

Dos pautas principales dominan esta historia. La primera es su principio, la explosión cámbrica, única en diversos aspectos importantes. La segunda es el repetido colapso de la biodiversidad, las extinciones en masa y sus primos menores. Para que la nueva ciencia de la complejidad —con sus nociones duales de autoorganización y límite del caos— tenga interés para los biólogos, deber ser capaz de iluminar de algún modo directo o, incluso, indirecto esas dos pautas principales. En el extenso paisaje de la historia de la Tierra estamos buscando las huellas de la complejidad, por débiles que sean.

«Hola, Roger, creo que tengo la respuesta», dijo una voz exultante al otro lado de la línea telefónica. «Creo que puedo explicar la pauta. Tiene que ver con mis relieves rugosos.» Esto ocurrió a finales de julio de 1988, y quien llamaba era Stu Kauffman. Ese mismo mes había publicado un artículo en *Science* titulado «A Lopsided Look at Evolution», en el que describía algunas de las preguntas planteadas por la explosión cámbrica y las recientes ideas acerca de su solución. «Los relieves rugosos explican por qué hay innovación de alto nivel en el Cámbrico, pero no más tarde», continuó Stu.

La pregunta clave sobre la naturaleza de la explosión cámbrica está relacionada con la innovación evolutiva, no tanto con su cantidad, que fue grande, como con su calidad, que fue extraordinaria. «Sin precedentes y nunca superada», así me

la describió James Valentine. Valentine, que en la época del artículo de *Science* estaba en la Universidad de California, Santa Barbara, pero que ahora trabaja en Berkeley, ha hecho un extenso estudio de la explosión cámbrica y sus consecuencias. «Es el fenómeno único más espectacular del registro fósil», dijo.

Es cierto que ha habido con posterioridad enormes estallidos de innovación en la historia de la vida, la mayoría tras las extinciones en masa. Por ejemplo, después de la extinción pérmica hace unos 250 millones de años, en la que se estima que pereció el 96 por ciento de las especies existentes, el ritmo de innovación alcanzó casi el del Cámbrico. Pero la innovación fue debida principalmente a variaciones sobre los temas existentes; no se añadieron nuevos temas principales. En el Cámbrico, en cambio, la innovación se produjo en gran medida en el nivel de la producción de nuevos temas, con un número relativamente menor de variaciones sobre ellos. «Este es el reto», dijo Valentine. «Hay que explicar el paso de pocas especies en muchos grupos durante el Cámbrico a muchas especies y menos grupos más tarde.»

Los grupos de los que Valentine estaba hablando se encuentran en los niveles superiores de la estructura jerárquica de la clasificación biológica: las clases y, en particular, los tipos. Los tipos, justo por debajo del nivel del reino (animales y plantas, en la clasificación tradicional, «de sentido común») y justo por encima de las clases (mamíferos, reptiles, etcétera), representan diseños corporales principales en la diversidad de la vida. Por ejemplo, los artrópodos, el más poblado de todos los tipos, tienen apéndices articulados, e incluyen criaturas como los insectos, los ciempiés, los miriápodos, las arañas y los cangrejos. Los humanos, y todos los demás vertebrados que tanto dominan nuestra visión del mundo, forman parte del tipo de los cordados. Los tipos son diseños corporales discretos, sobre los que pueden crearse muchas variaciones.

Hay en el mundo actual treinta tipos principales, más o menos como en los últimos 500 millones de años, una sorprendente continuidad de los diseños anatómicos, a partir de

los cuales han existido y desaparecido hasta 50 000 millones de variantes. Tras la explosión cámbrica, pudo haber hasta un centenar de tipos, la mayoría de los cuales se extinguió enseguida, con lo que se llegó al nivel moderno de diversidad. «Tanta innovación no fue exclusiva del Cámbrico, pero sí lo fue su magnitud», dijo Valentine, planteando el problema de forma sucinta. Lo que el mundo cámbrico y poscámbrico inmediato experimentó fue una tremenda experimentación evolutiva, seguida de un severo proceso de selección.

El descubrimiento de esta pauta es una de las grandes historias de la historia de la paleontología. Empieza básicamente con Charles Darwin, finaliza con Harry Whittington, catedrático de geología en la Universidad de Cambridge, y ha sido narrada por Stephen Jay Gould en su libro *La vida maravillosa*. Un actor clave en esta historia fue Charles Walcott, secretario del Instituto Smithsonian y descubridor en 1909 de la más espectacular ventana al mundo cámbrico, Burgess Shale. Los depósitos de Burgess Shale, que contienen una sorprendente encapsulación de vida costera durante un breve momento de la historia cámbrica, están situados en las montañas Rocosas de la Columbia Británica, Canadá. Para Walcott, la vista a través de esa ventana era la de un mundo con las mismas pautas que hoy, más primitivo, sin duda, pero con igual diversidad. Estaba siendo un buen darwinista.

Como Darwin concebía la selección natural como un proceso esencialmente gradual, capaz de producir gran innovación, pero sólo a partir de pequeños incrementos en el transcurso de largos periodos de tiempo, puso reparos a la idea de un cambio rápido. Darwin consideraba que el cambio rápido, ya fuera en la aparición o en la desaparición de especies, era un desafío a su teoría. Explicó la aparentemente abrupta emergencia de vida multicelular en el Cámbrico diciendo que esas formas anteriores debían de haber existido, pero estaban ocultas por la imperfección del registro fósil. «[D]urante esos vastos y todavía desconocidos periodos de tiempo, los seres vivientes hormigueaban en el mundo», escribió sobre el periodo precámbrico en *El origen de las especies*.

Cuando Walcott descubrió la profusión de formas de vida

de Burgess Shale, que duplicaba lo que se sabía hasta entonces del Cámbrico, se agudizó en gran medida el desafío de la aparición rápida. Los precursores de los animales del Cámbrico, cuya existencia postuló Darwin, no fueron descubiertos en las cantidades predichas. Y la abundancia de la vida cámbrica, tan aparente en Burgess Shale, hizo aún más explosivo el instante de aparición rápida. Walcott, un darwinista ferviente, tenía dos elecciones.

O bien podía decir que el descubrimiento de Burgess Shale confirmaba una aparición explosiva de vida en el Cámbrico y demostrar así que Darwin se equivocaba, o bien considerar las criaturas de Burgess en el contexto del gradualismo y la continuidad —negando la aparición súbita de una gran diversidad— y mantener de ese modo el punto de vista darwinista. Eligió lo segundo. Para Walcott, y para las dos generaciones que lo siguieron, el Cámbrico no sólo era el producto de una larga historia de evolución, sino que también presagiaba a la perfección el mundo presente, con sus treinta tipos, más o menos. Al asignar a los tipos modernos prácticamente todas las criaturas que encontró en los depósitos, por extrañas que fueran, Walcott cerró los ojos a la diversidad real que estalló en la vida durante el Cámbrico.

Hasta la llegada de Harry Whittington y sus estudiantes en las décadas de 1960 y 1970 no se reconoció la naturaleza verdaderamente inusual de gran parte de la fauna de Burgess. Whittington, experto en trilobites, descubrió que Walcott había asignado muchas criaturas cámbricas a grupos que no les correspondían. Al final, se propusieron un centenar de tipos, no los treinta supuestos por Walcott y que todos habían creído. No cabía duda entonces de que el Cámbrico tenía que concebirse como un acontecimiento de innovación evolutiva explosiva. Y, también, que se había visto seguido de una extinción masiva, que moldeó el mundo que conocemos.

«Hay dos hipótesis rivales para explicar la pauta de innovación en el Cámbrico», me dijo Valentine. «La primera es la hipótesis ecológica, por la que tengo cierta inclinación, y la se-

gunda es la teoría genómica. Quizá no sean del todo rivales», añadió. «Quizás haya un poco de cada.» La teoría ecológica es sorprendente por su sencillez. Los primeros organismos cámbricos entraron en un mundo desprovisto de competidores, un mundo que debió de rebosar de bacterias y algas unicelulares, que representaba más una fuente potencial de alimento que un reto competitivo. Dada la cantidad de nichos ecológicos disponibles, fueron viables todas las clases de variantes evolutivas: la evolución procedió por lo tanto a través de grandes saltos, más que por medio de pequeños pasos graduales. «Después de la extinción pérmica, aun cuando se habían perdido innumerables especies, toda la gama de nichos ecológicos habría seguido estando ocupada», afirmó Valentine. «Las oportunidades ya no estaban ahí, como había ocurrido en el Cámbrico.» La innovación en el pospérmico, por lo tanto, fue mucho más restringida, o eso es lo que afirma la hipótesis ecológica.

Según la hipótesis genómica, la evolución produjo en el Cámbrico tantas formas experimentales porque las dotaciones genéticas de las especies —los genomas— carecían del grado de coherencia y el estrecho control que desarrollaron más adelante. Por ello fue posible y viable una mutación más drástica, con la consiguiente generación de temas en lugar de variaciones sobre ellos.

La hipótesis ecológica está animada esencialmente por factores externos, a saber, la oportunidad ecológica; la hipótesis genómica, por factores internos, la viabilidad de la mutación sustancial. «Ninguna de las dos es correcta», proclamó Stu Kauffman, en ese día de julio de 1988. «Aunque la solución tiene más que ver con los genes que con la oportunidad ecológica.»

Stu había estado trabajando en su noción de relieves adaptativos rugosos, pero no había llegado a las ideas sobre relieves coevolutivos y el límite del caos. Eso vino más tarde. Las mutaciones que afectan al desarrollo embrionario al principio del proceso pueden producir una alteración espectacular en la forma adulta, porque el pequeño cambio inicial se ve aumentado a medida que tiene lugar el desarrollo, explicó Stu. «El

desarrollo embrionario representa un relieve adaptativo rugoso, en el que se llega muy pronto a los óptimos locales.» ¿Lo que quiere decir que alcanzar variantes más aptas al principio del desarrollo se hace cada vez más difícil?, insinué. «Eso es. La ontogenia temprana se queda congelada, y las nuevas variantes tienen que venir cada vez más del desarrollo posterior, lo cual provoca cambios evolutivos menos drásticos. Los seres cámbricos pudieron explotar nuevas variantes de eficacia biológica al principio de la ontogenia y dar grandes saltos evolutivos, pero cuando llegó el Pérmico ese juego ya se acabó y sólo fueron posibles pequeños cambios.» Stu escribió sus ideas, las publicó en la revista *Evolutionary Ecology* y me envió un ejemplar. No pensé más en ello. Hasta que apareció la complejidad.

Pregunté a Stu recientemente si pensaba que la explicación del paisaje rugoso seguía siendo válida. «Sí», contestó. «Pero creo que habría que considerarla en un contexto coevolutivo, cosa que no hice antes.» En ese caso, dije, ¿cómo aplicarías aquí tu modelo coevolutivo del límite del caos? Se produjo una pausa, poco característica y lo suficientemente prolongada como para darme cuenta de que entrábamos en territorio inexplorado. Yo había pensado la explosión cámbrica en términos cualitativos, en su forma más simple, un salto de los organismos unicelulares a los multicelulares. Había pensado la clase de interacciones ecológicas que debieron de desarrollarse entre poblaciones de organismos en el mundo precámbrico, poblaciones mezcladas de bacterias y algas en los estromatolitos, por ejemplo. Y, en un sentido abstracto, esas miniecológicas complejas se convirtieron en interacciones al alcance de un único organismo en el mundo poscámbrico: se había producido un salto jerárquico. Pero, ¿y el límite del caos?

¿Resulta razonable pensar en los animales cámbricos como parte de un sistema en régimen caótico, un sistema moviéndose hacia el límite del caos, pero sin haberlo alcanzado todavía?, pregunté a Stu. «Eso tendría sentido», dijo. «En mi modelo tendrían que estar interaccionando entre sí de forma muy estrecha. Si hubieran evolucionado recientemente a partir

de unos pocos antepasados comunes, eso sería razonable.» Si la explosión cámbrica significó de verdad un régimen caótico, las perturbaciones causaron grandes avalanchas, según el modelo de Stu. Y eso incluiría una mayor propensión a la innovación evolutiva, lo cual habría podido producir novedades inusualmente innovadoras. A medida que el sistema coevolucionó hacia un estado de equilibrio (el límite del caos, en el modelo de coevolución de Stu), disminuyeron las respuestas a las perturbaciones, la innovación se hizo menos arriesgada, hasta que se alcanzó un estado de renovación estable. «Todo lo que se necesita para explicar la diferencia de innovación tras la extinción pérmica es que el sistema sea empujado de nuevo hacia el régimen caótico, pero no demasiado», afirmó Stu. «Habría innovación en el rebrote postextinción, pero sería menos exagerada».

Plausible, pero era una completa especulación. ¿Cómo podríamos saberlo?, pregunté. ¿Qué pista podríamos buscar? Esta vez no hubo vacilación. «Hay que mirar las extinciones», fue la respuesta instantánea de Stu. «Si esta disparatada idea tiene algún valor, los índices de extinción en el Cámbrico también tienen que haber sido más elevados, y eso significaría que las vidas de las especies habrían sido más cortas.» Y en otros periodos después de extinciones en masa, añadí. «Sí, exacto. ¿Qué pruebas tenemos?» Sentíamos que podíamos estar cerca de algo nuevo e interesante. No lo sé, pregunté. Lo averiguaré. ¿El resultado? Pregunté a paleontólogos que debían saberlo y, una y otra vez, obtuve la misma respuesta: no hay datos fiables.

Abandoné mi incursión en el proceso de innovación del Cámbrico y me enfrenté a otras dos preguntas. La primera se refiere a su pauta global de innovación. ¿Es una pauta única o hay ahí algo más general, algo que pueda iluminar de un modo fundamental el proceso de innovación en los sistemas complejos? La segunda pregunta plantea si los productos de ese proceso de innovación son únicos o no. Si pudiéramos hacer retroceder el reloj y repetir la explosión cámbrica, ¿sería

el mundo como hoy? ¿Habría seres humanos para observarlo y meditar sobre él?

Cuando George Gumerman leyó un artículo sobre la fauna de Burgess Shale y la explosión cámbrica en el número del 20 de octubre de 1989 de *Science*, encontró suficientes semejanzas en la dinámica del sistema como para examinar de nuevo su propia área de interés: la evolución de las sociedades prehistóricas sudoccidentales. Como uno de los coorganizadores del congreso de Santa Fe sobre complejidad social en el Sudoeste, George había considerado pertinente la pauta de la innovación. Señaló que una gran diversificación en las convenciones sociales se produjo en el Sudoeste durante un siglo y medio, entre los años 1000 y 1150; y a ello siguió una reducción igual de drástica en la diversidad, con el dominio de la cultura del cañón del Chaco. Experimentación seguida de especialización; es la pauta de la vida en el Cámbrico y la de la vida de los anasazi en el sudoeste norteamericano. ¿Hay otros ejemplos?

«Se aprecia también en la innovación tecnológica de las sociedades industriales», dijo Stu a mi subgrupo en el congreso sobre el Sudoeste. «Pensad en las primeras bicicletas o los primeros coches», continuó. «Mucha experimentación al principio, diferentes formas de bicicleta, diferentes formas de propulsión y diseño de los coches, todas viables. Pasa el tiempo y el mundo se llena de bicicletas o coches, o de cualquier otra cosa, los extremos quedan suprimidos, sobreviven unas pocas formas y la consiguiente innovación se centra en la mejora de los temas que quedan. Se pasa de la generación de muchos temas a las variaciones sobre unos pocos, como en el Cámbrico.»

Sin embargo, con la innovación humana siempre existe la posibilidad de dar vida otra vez a un diseño desaparecido. Podríamos, por motivos de moda o necesidad económica, resucitar el velocípedo de rueda alta o el automóvil de vapor. Pero, para la historia evolutiva, las formas perdidas son sólo eso: historia. La extinción es para siempre, y la reevolución de grandes formas extintas exige la concatenación de demasiados acontecimientos improbables como para que se produzca.

Los únicos trilobites y dinosaurios con que nos encontraremos son los de los libros, las colecciones de los museos o las exposiciones geológicas. Así, la contingencia histórica influyó en la forma de la explosión cámbrica y su secuela. Los tipos que se perdieron, bien por exigencias de la competencia o por eliminación estocástica (en otras palabras, por la mala suerte), no se reinventaron nunca. La forma del mundo actual se vio, al parecer, influida en gran medida por los tipos que sobrevivieron hace 500 millones de años.

¿Y las tradiciones sociales y culturales que se extinguen tras periodos de experimentación, como ocurrió entre los anasazi hace casi un milenio? ¿Es su destino correr la misma suerte que los automóviles de vapor o los trilobites? «Puedes extender la pauta de la historia cámbrica a la historia cultural humana», me dijo George. «Hemos visto lo similar que es la pauta de innovación, con un estallido de novedades y luego la consiguiente pérdida. Y, de la misma manera que no vemos la reaparición de formas animales extintas, no vemos la reaparición de culturas una vez han cambiado.» Hay tanto contenido histórico en las tradiciones culturales y las mitologías que, una vez perdidas, es improbable que se reformulen otra vez exactamente igual, explicó George. En otras palabras, las culturas se parecen más a los trilobites que a los automóviles.

¿Qué consistencia tiene, pues, una pauta de innovación en los sistemas complejos adaptativos como éstos? Cada uno de ellos se ve afectado por la contingencia histórica, pero según grados diferentes. Es sin duda significativo que, con todas esas diferencias de detalle —en los ámbitos biológicos, culturales y tecnológicos—, la pauta global sea notablemente similar. Ello alienta la creencia de que la consistencia de la pauta sea algo más que una simple coincidencia o una simple analogía. Puede estar en acción una dinámica fundamental, que haga predecible, hasta cierto punto, la pauta de innovación de los sistemas complejos adaptativos.

En su artículo de *Science* sobre la explosión cámbrica, Si-

mon Conway Morris finalizaba con un pequeño experimento mental. «¿Y si la explosión cámbrica fuera a repetirse?», preguntó. Se produciría la misma innovación explosiva, aventuró, y, casi con seguridad, la misma reducción de la diversidad tras la innovación masiva. La fauna posterior ocuparía nichos instantáneamente reconocibles a nuestros ojos: herbívoros, carnívoros, insectívoros, etcétera... criaturas grandes y pequeñas, con vidas como las pasadas y las actuales. Pero, afirmaba, debido a la contingencia histórica, no se parecerían a nada de lo que hemos experimentado y serían «dignas de la más refinada ciencia ficción».

El hecho de la contingencia histórica, que Stephen Jay Gould ha defendido con más fuerza incluso en los últimos años, significa que el mundo en que vivimos es sencillamente uno de entre una infinidad de mundos virtuales. Si pasamos la cinta otra vez, afirma, incluso el más modesto recodo en la ruta de la historia se traducirá en un drástico efecto unos cien millones de años más tarde. Si se multiplican por un millón estas pequeñas excursiones del destino, el resultado final será un mundo irreconocible a nuestros ojos. ¿O no? ¿Existe una infinidad virtual de mundos posibles, de los cuales nuestra experiencia es sólo una? Según Brian Goodwin, no.

Para Brian, la mecánica del desarrollo embriológico está muy limitada, y eso restringe grandemente las clases de estructuras y las clases de especies que pueden surgir. En el lenguaje de los sistemas dinámicos complejos, el espacio de las posibilidades morfológicas está tenuemente poblado de atractores, esos estados en los que los sistemas dinámicos acaban por asentarse, especies fantasmas que podrían ser devueltas a la vida bajo las circunstancias correctas. Esta imagen es muy diferente de la visión convencional de la evolución darwinista, en la que los procesos de la selección natural y la adaptación pueden explorar prácticamente todos y cada uno de los rincones de ese espacio. Le pregunté a Brian si sostendría que en su mundo sólo era posible un número limitado de especies, mientras que en el mundo del adaptacionista se daban una infinidad de especies posibles. «Eso exagera un poco la cuestión», contestó Brian. «Incluso el más ferviente adaptacio-

nista acepta algunas restricciones a las posibilidades morfológicas, como la biomecánica básica. Pocos sostendrían que los organismos terrestres podrían desarrollar ruedas, por ejemplo. Pero, en conjunto, tu comparación es correcta.»

Para la mayoría de biólogos, el enfoque de Brian de los sistemas dinámicos es, en el mejor de los casos, apenas comprensible y, en el peor, del todo disparatado. «Es una conjetura plausible», me recordó otra vez Brian. De acuerdo, pero llevémosla un poco más lejos, respondí. ¿Afirmas que el mundo de ahí afuera está poblado por una gama de especies fantasma, atractores dinámicos, de las cuales sólo una parte puede ser ocupada en un momento dado? «Sí, es una afirmación correcta. Sin embargo, no habría que concebir los atractores como estáticos. Cambian, igual que las posibilidades dinámicas, al cambiar el entorno. En el pasado, he cometido el error de hacer caso omiso del entorno, pero es importante. Puede disminuir la estabilidad de algunos atractores y mejorar la estabilidad de otros.»

Surgía una pregunta obvia acerca de la contingencia histórica. Si es cierto que sólo un número limitado de atractores pueblan el espacio morfológico potencial, aventuré, ¿significa eso que si repitieras la explosión cámbrica, el nuevo mundo no sería tan diferente del que conocemos? ¿Que Steve Gould podría no estar en lo cierto cuando dice: «El magnetófono divino contiene un millón de escenarios, cada uno perfectamente coherente»?

«Deja que te conteste a la pregunta de este modo», empezó reflexivamente Brian. «¿Eres consciente del fenómeno de la convergencia en biología, cuando ves una morfología sorprendentemente similar en especies muy divergentes? ¿Como el lobo de Tasmania y el lobo de verdad?, insinué. «Sí, uno es un marsupial, el otro es un mamífero placentario, separados por, no sé, 50 millones de años. Y, sin embargo, en términos anatómicos son prácticamente iguales.» La teoría evolutiva convencional explica el fenómeno en parte por la contingencia histórica: ambos descienden de un mismo antepasado mamífero. Pero el nudo del razonamiento es que las adaptaciones similares conforman anatomías y

comportamientos similares. «Creo que eso es estirar un razonamiento débil hasta el punto de ruptura», dijo Brian. «No hay dos entornos tan similares como para producir una anatomía tan paralela.»

¿Así que dirías que el lobo de Tasmania y el lobo de verdad son atractores en el espacio de las leyes morfogénicas? «Sí.» ¿Y extenderías el razonamiento a la repetición de la explosión cámbrica? «Lo extendería en parte», dijo Brian. «Pondré una analogía. Supón que repetimos la Gran Explosión. ¿Cuáles son las posibilidades de conseguir la misma tabla periódica de elementos naturales, las mismas noventa y dos combinaciones de protones, neutrones y electrones? Bastantes, o eso es lo que creo. Concibo una repetición de la explosión cámbrica del mismo modo, quizá no con la misma extensión, pero como una imagen. Si existen atractores dinámicos en el espacio de las posibilidades morfológicas, como creo, una repetición de la explosión cámbrica produciría un mundo mucho más parecido al que conocemos de lo que afirma Steve Gould. No sería idéntico, pero habría un montón de semejanzas, fantasmas que reconoceríamos en el acto.»

Dicho de otro modo, la historia evolutiva quizá no sea una maldita cosa tras otra, sino, en una interesante medida, inevitable. Esto se está convirtiendo ya en una especie de estribillo de los sistemas complejos adaptativos.

«El estudio de las extinciones nunca ha estado de moda», se lamentó David Raup. «Hay muchas razones, estoy seguro. Pero es probable que pueda remontarse bastante a Darwin.» Dave es geólogo en la Universidad de Chicago, donde el Departamento de Ciencias Geofísicas está situado en South Ellis, entre el falso gótico de gran parte de la arquitectura de la universidad. El departamento es, sin embargo, un edificio moderno, de ladrillo rojo y cristal, ventanas en ángulos ingeniosos y ese tipo de cosas. El despacho de Dave es grande, sobrio, iluminado por dos ventanas y, para ser el dominio de uno de los principales investigadores en ese campo, con una sorprendente ausencia de rocas y fósiles. A pesar de su severo

aspecto exterior, el entorno investigador de Dave es más el ordenador y el análisis estadístico superior que la extracción de rocas de antiguos estratos. «Al estar comprometido con el gradualismo, Darwin intentó negar la existencia de extinciones en masa», explicó Dave.

Del mismo modo que intentó negar la abrupta aparición de los animales multicelulares en el Cámbrico, sugerí. «Sí, eso, Darwin dijo que la extinción era “el misterio más gratuito” o algo así. Pero también dijo que el origen de las especies es gradual, y también lo es su extinción.» Una frase de *El origen de las especies* refleja esto: «Las especies y los grupos de especies desaparecen gradualmente, uno tras otro, primero de un lugar, luego de otro y, por último, del mundo.»

Si las especies desaparecen como parte de la dinámica gradualista de la selección natural, ya no hay nada más que explicar. Ya no hay nada más que decir del proceso, excepto la necesidad de etiquetar como fracasos aquellas especies que se han extinguido. Darwin lo afirmó de modo explícito: «Los habitantes de cada periodo sucesivo de la historia del mundo han derrotado a su predecesores en la carrera de la vida y están por ello más arriba en la escala de la naturaleza». (Todo el mundo sabe que los dinosaurios son fracasos, ¿no es cierto?) La reticencia de Darwin a contemplar la desaparición abrupta de las especies se apoyaba no sólo en el modelo gradualista de la selección natural, sino también en la noción de gradualismo en la geología en general, que había sido promulgada por su amigo Charles Lyell.

A principios del siglo XIX, el barón George Cuvier, el gran geólogo francés, propuso lo que llegó a conocerse como teoría de las catástrofes o catastrofismo. Según esta teoría, los cambios abruptos en la fauna que los geólogos veían en los estratos de rocas eran resultado de devastaciones periódicas que borran todas o casi todas las especies existentes, y el periodo siguiente era repoblado con nuevas clases de animales y plantas por la mano de Dios. Lyell rechazó semejante hipótesis no científica (como había hecho James Hutton antes que él) y la sustituyó por la noción de que los procesos geológicos procedían de forma gradual: todos los procesos geoló-

gicos. En su obra principal, *Principios de geología*, Lyell afirmaba que las transiciones abruptas del registro geológico se revelarían algún día como erróneas, cuando se descubrieran los estratos transicionales. El gradualismo acabó imponiéndose frente al catastrofismo. Las visiones del mundo de Darwin y Lyell eran, por consiguiente, perfectamente complementarias.

«Con el tiempo, los geólogos llegaron a aceptar los aparentes cambios abruptos del registro geológico como reales, como extinciones en masa, pero las explicaciones darwinistas —competencia, depredación, etcétera— subsistieron y dominaron el escaso debate que se produjo», dijo Dave. El debate intelectual en torno a los mecanismos de extinción siguió estando llamativamente ausente de la comunidad biológica. Entonces llegó Luis Alvarez. «Escandaloso en su comportamiento, escandaloso en sus afirmaciones, consiguió sin duda trastornarlo todo», dijo Dave con malicia. Alvarez, físico de la Universidad de California, Berkeley, afirmó en 1980, junto con varios colegas, que la extinción masiva ocurrida hace 65 millones de años y que provocó el fin de los dinosaurios, estuvo causada por la colisión de un asteroide gigante. A Dave le gustó la idea, en parte por su audacia, en parte por su plausibilidad. Cuatro años más tarde, Dave y su colega Jack Sepkoski dieron un paso —o varios— más allá que Alvarez y afirmaron que las colisiones de asteroides gigantes ocurrían cada 26 millones de años, provocando periódicas extinciones en masa.

Hoy en día, la mayoría de entendidos acepta que la extinción de fines del Cretácico fue causada por la colisión de un asteroide. La misma explicación se considera verosímil para unas pocas extinciones más. Pero la idea del impacto periódico, cada 26 millones de años, sigue siendo claramente polémica, como mínimo porque para la mayoría suena demasiado a la vieja idea del catastrofismo. Sin embargo, Dave ha seguido insistiendo y recientemente ha reunido las pruebas de la cronología de la colisión de asteroides (a partir de la edad de los grandes cráteres) y la cronología de las extinciones en masa (a partir del registro fósil) y ha demostrado que encajan bastante. «Hasta un 60 por ciento de todas las extinciones

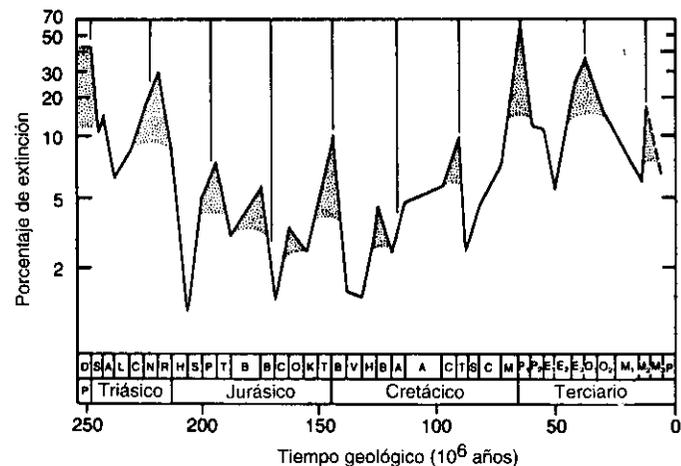


Figura 4. La historia de la vida está puntuada por extinciones en masa. Los picos del gráfico indican periodos de extinción elevada; a la izquierda, se muestra el porcentaje de familias extintas. Cortesía de David Raup y John Sepkoski.

puede ser resultado de la colisión de un asteroide», concluyó. El sesenta por ciento. Eso es muchísimo, dije, sin ocultar mi incredulidad. «Lo sé. La gente no lo va a aceptar fácilmente, pero es una hipótesis creíble.»

En todas las causas propuestas para las extinciones en masa, incluyendo la colisión de asteroides, hay implícita una igualdad entre la causa y el efecto, entre la escala de la perturbación ambiental y la proporción de especies que desaparecen. Así es como funcionaría un mundo regido por ecuaciones lineales: grandes perturbaciones producen grandes extinciones; pequeñas perturbaciones, pequeñas extinciones. «Eso no es necesariamente cierto», dijo Stu Kauffman, «no si tenemos razón acerca de los ecosistemas en equilibrio en el límite del caos.» El mundo que Stu estaba describiendo era un mundo no lineal, donde la dinámica compleja del tipo que ya hemos en-

contrado produce pautas complejas. «Puede ser que cambios similares en el medio ambiente produzcan extinciones de todas las magnitudes», añadió Stu.

Estábamos hablando en la Universidad de Pennsylvania; en el laboratorio vecino, bioquímicos de bata blanca manejaban preciosos líquidos con exquisita precisión, excursiones en la evolución molecular experimental, mientras en su despacho se discutían teorías sobre extinciones globales. Parecía extraño. ¿Estás hablando de tu sistema coevolutivo? «Sí», dijo Stu. «¿Recuerdas cuando nuestro ecosistema se puso él solo en un estado de equilibrio, el límite del caos, lo pellizcábamos un poco con alguna clase de cambio externo y producíamos avalanchas de cambio de todos los tamaños?» Me acordaba. ¿Como las avalanchas en el montón de arena de Per Bak, en equilibrio en el estado crítico, dando una distribución exponencial? «Exacto. Eso era parte de nuestro razonamiento de que el ecosistema informático había llegado al límite del caos.»

¿Y lo que quieres saber es si los ecosistemas reales —ahí fuera— también están en equilibrio en el límite del caos? «Quizá la naturaleza ha hecho el experimento para darnos la respuesta», respondió Stu. «Quizá la respuesta esté en los datos de las extinciones en masa.» Stu y su colega Sonke Johnsen sacaron los datos sobre las extinciones en masa (de un artículo de Dave Raup), hicieron un gráfico con la magnitud de las extinciones y su frecuencia y buscaron una ley exponencial. «El resultado es muy parecido a una ley exponencial», dijo Stu. «No es una línea recta, es ligeramente convexa, pero así se comportan las extinciones en nuestro ecosistema informático.» Si los datos de vuestro sistema coevolutivo son los mismos que los obtenidos con los datos de Dave a partir de extinciones reales, ¿significa eso que el mundo que vemos está en equilibrio en el límite del caos? «Así es como lo interpreto», dijo Stu. «Sólo que ligeramente en el lado congelado del límite del caos.» Los ecosistemas, los informáticos y los reales, están justo en el lado congelado del caos, afirmó Stu, como resultado de una perturbación continua.

«Si tenemos razón, no sólo sabemos algo de la dinámica

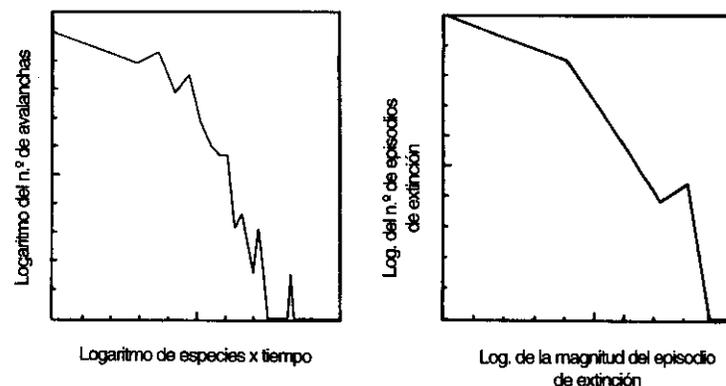


Figura 5. Las extinciones en los ecosistemas informáticos y reales se acercan a una ley potencial. El gráfico de la izquierda muestra el logaritmo del número de avalanchas (equivalente a las extinciones) en el eje vertical y, en el eje horizontal, el logaritmo del tamaño de las avalanchas en el ecosistema informático de Kauffman, con 100 especies (ambos ejes están trazados como logaritmos naturales). Una ley potencial sería una línea recta descendente de izquierda a derecha. El gráfico de la derecha muestra lo mismo para las extinciones del registro fósil. Las pendientes son similares, y ambas están en el lado congelado del límite del caos.

de los ecosistemas en el mundo real en el contexto de los sistemas complejos adaptativos», continuó Stu, «sino que también nos enfrentamos a la noción contraintuitiva de que una extinción masiva como la de finales del Pérmico podría haber sido causada por el mismo tipo de perturbación que la producida por una pequeña oscilación en el mapa de las extinciones.» Si tenéis razón. «Sí.»

Dave sacudió lentamente la cabeza cuando le pregunté si pensaba que los datos de las extinciones en masa mostraban una ley potencial. Dave es más un pensador que un orador. «Yo no lo creo», dijo al final, y el «yo» se alargó como si durara media docena de sílabas, rezumando duda cada una de ellas. «En primer lugar», continuó, «los datos son horribles.» Pero son tus datos, dije, sorprendido. «Lo sé, y no me gusta

ir por ahí diciendo que mis datos son horribles. Son los mejores que tenemos, pero a uno le gustaría tener algo mucho mejor si pretende sacar conclusiones de esa magnitud.» Los datos en cuestión registran medidas de niveles de extinción en setenta y nueve puntos durante la vida poscámbrica. Dave y su colega Jack Sepkoski han pasado años compilándolos, a veces juntos, a veces por separado. Es un trabajo que consume mucho tiempo, muy difícil, y la calidad del producto final refleja los problemas de la compilación, no la calidad de los investigadores. «Algún día dispondremos de datos lo bastante buenos como para hacer este tipo de cosas.»

Pero supón, dije, que los datos fueran buenos ahora, y vieras una curva como la que Stu ha conseguido, algo cercano a la ley exponencial. ¿Sería válida su interpretación? «Me gano la vida con las simulaciones», empezó a modo de respuesta, «y sé lo delicado que es el proceso, lo plagado de trampas que está. A veces encuentras algo que refleja el mundo real de algún modo y piensas: “Eh, aquí me acerco a algo”. Es algo gestáltico y es seductor.» Me habló de un nevado fin de semana de invierno que pasó en el Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, en Massasuchetts, muchos años atrás, con Steve Gould, Dan Simberloff (un ecólogo), Jack Sepkoski y otros, discutiendo con la esperanza de obtener alguna idea provechosa sobre los problemas de la biología evolutiva. No salía nada. Entonces, el domingo por la tarde, Dave sugirió que consideraran algunos de esos procesos como si fueran aleatorios. La sugerencia produjo una docena de artículos científicos en los años siguientes. Algunos buenos, otros muy malos.

«Steve, Dan y yo hicimos una simulación en la que asignamos iguales probabilidades de extinción a un biota modelo, luego buscamos pautas de extinción», me contó Dave. «Conseguimos pautas como las que ves en el registro fósil: grupos que crecen y disminuyen, algunos extinguiéndose al final, como en el mundo real.» Era un momento en que cierto número de investigadores intentaba separarse del postulado de la biología evolutiva según el cual «todo está determinado por la inexorable dinámica de la selección natural». Fue una gran

sorpresa que las pautas de las grandes extinciones pudieran producirse usando un enfoque puramente aleatorio. También estaba equivocado. «Nos equivocamos en la escala», explicó Dave. «Nuestros grupos eran demasiado pequeños, como señaló con razón Steve Stanley. Si se utilizan grupos mucho más grandes, no se obtiene en absoluto esa pauta. Así que, ya ves, me es familiar lo fácil que resulta equivocarse, sobre todo cuando algo parece tan irresistible.»

¿Se está equivocando Stu?, pregunté. «En estadística hay algo que se llama el modelo del palo roto», dijo Dave. Un generador de números aleatorios «rompe» un palo de longitud 100 en veinticinco puntos y produce veintiséis palos más cortos. Los pedazos se miden, se cuentan los que miden una unidad, los que miden dos, etcétera y se dibuja un histograma. El resultado es una distribución asimétrica, desviada hacia el lado corto, como muchos fenómenos naturales, incluyendo la distribución de los tamaños de las ciudades estadounidenses, por ejemplo. «Algo que no hay que olvidar en el tema de las extinciones es que algunas especies son más propensas a desaparecer que otras, porque existen como pequeñas poblaciones aisladas», explicó Dave. «Este tipo de rareza estadística puede fácilmente sesgar los resultados.» ¿Así que mostrarías tus reservas hacia cualquier cosa que se pareciera a una ley potencial? «Sí, porque es muy común, está en la naturaleza de la estadística. Puede decirte que un sistema está en equilibrio en el punto crítico, sea lo que sea lo que eso significa, pero puede que no. En cualquier caso, cuando Stu afirma que la curva que obtiene de mis datos se acerca a una ley potencial, sabe que hay otros muchos modelos matemáticos que podrían encajar perfectamente.»

No cabía duda de que había muchas razones para mostrarse cauto al sacar la conclusión de que, usando sólo los datos de las extinciones, los ecosistemas globales están en equilibrio en el límite del caos. «Me has preguntado cómo interpretaría una distribución potencial válida para los tamaños de las extinciones», dijo Dave, volviendo a la pregunta original. «Bueno, ya sabes que sostengo que una fracción muy grande de las extinciones pudieron ser causadas por colisiones de as-

teroides. Y ya sabes que el tamaño de los asteroides puede describirse mediante una ley potencial: los grandes son escasos, los pequeños son comunes; es algo que se puede apreciar en la distribución del tamaño de los cráteres de la Luna. De manera que podría ser que una distribución potencial del tamaño y la frecuencia de la extinción sea un reflejo de una distribución potencial del tamaño y la frecuencia del impacto de asteroides. Podría ser, ¿verdad?»

«Sí, podría ser», admitió Stu cuando le hice la pregunta de Dave. ¿Cómo se sabe entonces si la distribución potencial de las extinciones está causada por la distribución de tamaño de los asteroides o si los ecosistemas globales están en equilibrio cerca del límite del caos? «Le pregunté a Per [Bak] qué sucede cuando se superpone una ley potencial sobre otra, a qué se parecería», dijo Stu. «Me respondió: “Seguirás viendo una ley exponencial”. Seguí preguntándole cómo, pero no llegué a ninguna parte. Creo que es bastante confuso.» Stu también admitió que la curva de los datos de extinción podía describirse con otros modelos matemáticos, no sólo la ley potencial. «Pero, al menos, la curva es consistente con los ecosistemas globales que están cerca del límite del caos», dijo. «Sí, sé que eso es bastante débil. Pero, mira, si la curva no se pareciera en nada a una ley potencial, no tendríamos nada de que hablar. En ella no aparecería el límite del caos. Tal como están las cosas, sigue siendo posible que los ecosistemas globales se coloquen en el límite del caos, como predicen nuestros modelos.»

Por último, le pregunté a Stu por la conectividad. El modelo coevolutivo construye conexiones entre las especies del ecosistema. Es parte del sistema, la parte que se adapta al moverse el propio sistema hacia el límite del caos. La conectividad es necesaria si el sistema tiene que funcionar como conjunto, no sólo como suma de entidades independientes. Y la conectividad es necesaria si las perturbaciones tienen que caer en cascada por el sistema, produciendo avalanchas de especiación y extinción. En una breve incursión por la biología del problema, Dave había expresado sus dudas de que la conectividad en el mundo real fuera suficiente para propagar las

consecuencias de perturbaciones mundiales y causar, así, extinciones en masa a escala global. ¿Tiene razón Dave al mostrarse escéptico?, pregunté. «Eso da que pensar», replicó Stu. «No tengo inconveniente en concebir una conectividad a escala continental, pero globalmente es más discutible. Necesitas conexiones a lo Gaia.»

Mientras consideraba el problema, añadió: «Sí, para conseguir una extinción del 96 por ciento, como la de finales del Pérmico, hace falta mucha conectividad». Espera un momento, dije, ¿sabes que la extinción del Pérmico coincidió con la unión de los continentes, la formación de Pangea? «¿En serio? Vaya, fantástico.»

Los continentes del planeta están en un movimiento constante y apenas perceptible, pasajeros de una fina corteza dividida en múltiples placas. Uno de los grandes descubrimientos de la ciencia del siglo XX, el movimiento continental como resultado de la tectónica de placas, arroja una nueva luz sobre la historia, una luz muy difícil de comprender para las mentes humanas, tan esclavas del presente. Inmersos en un deslizamiento global, los continentes a veces chocan y ocasionalmente se unen en un supercontinente, Pangea. La última vez que ocurrió fue a finales del Pérmico, hace 250 millones de años. «Eso significaría que todos los biotas estuvieron en contacto potencial entre sí, todos», dijo Stu.

Las colisiones y la unión de todos los continentes se han invocado, de hecho, como factores contribuyentes, cuando no causantes, de la extinción de finales del Pérmico. La argumentación es que si las masas terrestres se juntan para formar un continente gigante, se pierde alrededor de la mitad de la línea costera. (Basta hacer cuatro cuadrados de cartulina de cinco centímetros de lado y sumar el total de los perímetros; luego se unen formando un único cuadrado y se vuelve a medir el perímetro.) La extinción a gran escala en el ámbito marino también es probable que se deba a este hecho. «Eso es cierto, por supuesto», dijo Stu. «Pero también proporciona el potencial de conectividad para las avalanchas coevolutivas a lo largo de toda la masa de tierra, para contribuir a la mayor extinción de la historia de la Tierra, ¿verdad?» Nos habíamos

adentrado bastante en el terreno especulativo y cualquier huella de complejidad que pudiéramos vislumbrar tenía que ser considerada con un elevado grado de escepticismo.

No obstante, había visto huellas en otro sitio. Confusas y discutibles, cierto. Nada que permitiera justificar la declaración de que, en la explosión cámbrica y las extinciones en masa, la complejidad triunfa como fuerza dominante. Pero suficientes para alentar una mayor exploración de los patrones biológicos. Sabía que tenía que descender de las alturas de las grandes pautas y observar más de cerca los propios ecosistemas, tanto los reales como los que viven sólo en los ordenadores.

## 5

### La vida en un ordenador

«Es imposible visitar una selva tropical y no quedar cautivado por ella», dijo Tom Ray. «Quedé impresionado por la experiencia cuando vine aquí por primera vez, hace dieciocho años. Y sigo estándolo.» Ibamos vestidos para el calor y la humedad: pantalones cortos y camisetas de fino algodón, sacacots, botas de caucho y, por maravillosamente incongruente que me pareciera, paraguas. Incongruentes o no, demostraron su utilidad. «Esto es una pluviselva», dijo Tom, muy divertido ante mi mayor preocupación por la elegancia que por la comodidad. Nos habíamos adentrado en la Reserva Biológica La Selva, en el centro norte de Costa Rica, una porción del protegísimos sistema forestal primario de este pequeño país. Estábamos en enero, que pasa por ser ahí la estación seca. «Tendrías que venir cuando llueve de verdad.»

Creo que he viajado bastante y me considero privilegiado por haber visitado algunas de las partes más ecológicamente exóticas del globo, entre ellas, la sabana africana, los altos Andes y las islas Galápagos. Aquella era mi primera selva tropical. Desprevenido, ésa era la mejor descripción de mi estado. Desprevenido ante lo abierto que era todo, al caminar entre los impresionantes troncos de los árboles gigantes, bajo la elevada bóveda arbórea, con una modesta maraña de vegetación cubriendo el suelo. (Los densos matorrales en el nivel del suelo sólo se producen en la selva secundaria, en regeneración, explicó Tom.) Desprevenido ante lo tranquilo que estaba todo. (Era media mañana, e innumerables pájaros, una vez acabado el coro del amanecer, permanecían en silencio hasta el crepúsculo, al igual que los monos aulladores.) Y despre-

venido ante la diversidad de vida. «Cada nicho está rebosante de vida», afirma el tópico. Y es cierto. «Más especies por hectárea que en cualquier otra parte de la Tierra», dijo Tom. «Mira a tu alrededor; verás más especies de árbol en este pequeño espacio que en todo un bosque templado.»

El número de especies arbóreas era sólo el principio. Cada árbol albergaba otro nivel de diversidad, adornados como estaban de epífitos en cada grieta del tronco y en cada superficie segura de las ramas: céreos, orquídeas, helechos, bromeliáceas, aráceas, así como líquenes, musgos y hepáticas. Las enredaderas colgaban de todas partes. Las fotografías no sirven de preparación para esta realidad. Desconcertante novedad para mí, todo eso era territorio familiar para Tom, que constantemente buscaba cosas, mientras que yo sólo las miraba. Se hizo evidente la utilidad del paraguas como instrumento para hurgar y como protección esencial.

Tom fue director de la estación de la reserva durante un año a finales de los setenta y ha visitado la región todos los años desde entonces. Tiene una casa cerca, oculta entre dieciséis hectáreas de selva primaria que compró en 1982 para impedir que la destinaran a tierra de pasto para el ganado. Empezó batallas políticas, a veces con verdadero riesgo para su vida, en favor de la conservación de otras zonas de selva tropical. En una ocasión, Murray Gell-Mann, apasionado ornitólogo, contribuyó a los esfuerzos conservacionistas de Tom convenciendo a la Fundación MacArthur para que reuniera un millón de dólares y comprara tierra. Los dos hombres no se conocían por entonces.

Cada diciembre, Tom deja la Universidad de Delaware, en la que trabaja como ecólogo, y viene a la selva tropical, donde se queda un mes. Está más a gusto ahí que en la ciudad. Sus advertencias acerca de las hormigas bala y los colmillos de la serpiente punta de lanza al principio de nuestra excursión por la selva eran un recordatorio de que cada medio ambiente tiene sus riesgos.

«No tienes que ser un ecólogo para hacerte aquí una idea de la complejidad», dijo Tom. «Es algo más que una abundancia de especies, algo más que muchas clases diferentes de

organismos coexistiendo en profusión creativa. Te haces una idea de cómo funciona la selva como un todo.» Seguíamos el camino a lo largo de una estrecha senda, con el barro que se aferraba a nuestras botas a cada paso, la vegetación iluminada por una luz difusa y filtrada. Le pregunté por la complejidad biológica, la organización de los ecosistemas. Tom me previno en contra de la difusa noción del «maravilloso equilibrio de la naturaleza», tan extendida en otro tiempo, según la cual todo funciona por el bien de la comunidad, todo está estructurado como debería estar. Todavía es posible oír esa clase de comentario en algunos programas televisivos de historia natural, dije. «Sí, es desafortunado», contestó Tom. «No obstante, aquí hay una estructura, en todos los tipos de escalas, tanto en el tiempo como en el espacio. Y la estructura es lo que debería interesar a los biólogos.»

De repente, se detuvo. «Mira.» Señaló hacia adelante. No podía ver lo que indicaba. «Junto al árbol del caucho.» Cruzando el sendero, más seco en ese lugar, estaba el final de una columna de hormigas legionarias, en inexorable avance. «No, aquí», dijo Tom, dirigiendo mi atención a unas salpicaduras blancas en el suelo, junto a la columna. «A lo mejor vemos las mariposas, las mariposas hormigueras.» Tom explicó que poco después de su primera visita a La Selva, en 1974, descubrió el fenómeno hasta entonces desconocido de las mariposas hormigueras.

Las hormigas legionarias son famosas por su voracidad cuando aparecen sus incontenibles columnas. También son muy conocidas muchas especies de pájaros que explotan los efectos del avance de la columna, las multitudes de insectos expulsadas del follaje. Al aparecer y abalanzarse los pájaros, alimentándose con la nueva comida disponible, sus excrementos marcan el paso de la columna. Ricos en nitrógeno, estos excrementos proporcionan nutrientes al menos a tres especies de mariposas, en especial a las hembras, que deben aprovechar el recurso mientras sigue húmedo. Las hormigas, seguidas de los pájaros, seguidos de las mariposas. «Mira, ahí están», dijo Tom, indicando una nube de pequeñas mariposas con rayas amarillas, anaranjadas y negras, que se lanzaban sobre los ex-

crementos y se alejaban de ellos con igual rapidez, evitando el peligro de las hormigas. «Es un hermoso ejemplo de conectividad, ¿verdad?», dijo Tom, contento aún por el descubrimiento que había hecho una década atrás, disfrutando aún con la complejidad biológica.

Tom es un naturalista dentro de la tradición darwinista, un observador de la naturaleza desde cerca. Está entusiasmado por la evolución como unidad subyacente de todo. «Pero hace unos pocos años empecé a estar insatisfecho, intelectualmente descontento», explicó mientras nos sentábamos en un viejo árbol. «Quería estudiar la evolución, pero fallaba algo. Lo único que podía hacer era estudiar los productos de la evolución, todo esto», dijo con un movimiento de la mano. «Por eso creé Tierra». Y ahora soy naturalista en una clase diferente de mundo, un mundo extraño: la vida en un ordenador.

El 3 de enero de 1990, en contra de todas las predicciones de los expertos y de sus propias expectativas, Tom desató la evolución en un ordenador. Un sencillo «organismo» ancestral —un pequeño programa informático de ochenta instrucciones— se reprodujo, mutó y evolucionó hasta producir una diversidad de descendientes que recordaban el ecosistema ecuatorial que durante tanto tiempo había sido el medio de investigación de Tom. Un mensaje de correo electrónico de Tom a Chris Langton en el Instituto de Santa Fe decía así: «Ha surgido una ecología». Con ese mensaje, la vida de Tom cambió. Sigue yendo a la selva tropical, pero la evolución que estudia está en su ordenador, un mundo virtual de su propia creación. La aventura de Tom ha proporcionado al Instituto de Santa Fe un puente vital entre la abstracta teoría de los sistemas dinámicos y el mundo real de la naturaleza.

«Recuerdo con claridad el momento en que concebí la idea de la evolución en un ordenador», me contó Tom. «Me llegó un torrente de ideas, completas, con todo lo que quería hacer. Pero de eso hace más de diez años.» Un tiempo después de nuestra visita a la selva tropical, fui a Newark, Delaware, para ver de primera mano el mundo virtual de Tom. Su despacho en el Departamento de Biología era grande, con techos altos e iluminado a ambos lados por ventanas alargadas.

Das. Dos mesas largas ocupaban el centro de la habitación, una con tres ordenadores y una impresora, la otra con un amasijo de papeles y libros. La biblioteca del fondo de la habitación contenía docenas de manuales informáticos y un ejemplar de *El origen de las especies*. De una pared colgaba un gran póster con una galaxia espiral, con la palabra CREACION escrita abajo. De otra, colgaba el cartel de una película de los treinta, *The Jungle Princess*, con Dorothy Lamour y Ray Milland. Diferente de La Selva, pero con ecos reconocibles. «Tuve muchos impedimentos», continuó Tom, «principalmente la inexperiencia con los ordenadores y la programación.»

Antes de empezar a trabajar en la Universidad de Delaware, Tom se había doctorado en Harvard, donde permaneció un tiempo como ayudante de campo de Edward O. Wilson. Una noche visitaba el Centro de Ciencias de Harvard, donde se reunía regularmente el Club de Go de Cambridge. El antiguo juego chino del go es muy complejo y consiste en mover poblaciones de «piedras» sobre un tablero; el objetivo es rodear y destruir al contrario. Debido a cierta afinidad intelectual, muchos miembros del club pertenecían al laboratorio de inteligencia artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts. «Esa noche había un tipo jugando solo, así que me senté y me explicó el juego», dijo Tom.

El jugador solitario describió el juego con metáforas muy realistas como la estrategia de ciertos grupos de piedras, piedras que se rodean y se matan, etcétera. Esto intrigó a Tom, porque tenía el aura de un mundo artificial. Entonces el jugador hizo casualmente una pregunta, que hizo cristalizar en la mente de Tom un nítido y poderoso objetivo a partir de una serie de ideas medio formadas y apenas conscientes. «¿Sabías que era posible escribir un programa informático capaz de autorreplicarse?», preguntó el jugador. «Recuerdo enseguida la avalancha de ideas, toda la variedad de ideas que ahora persigo», dijo Tom. «Le pregunté cómo se hacía y me dijo: “Es trivial”. Le seguí preguntando, pero o no me lo explicó bien o yo no pude entenderlo. En cualquier caso, ahí estaba yo, solo con mis fantasías, pero sin modo de realizarlas.»

Los siguientes diez años fueron productivos pero, en última instancia, frustrantes. Productivos porque los estudios de campo de Tom sobre un grupo de enredaderas —las *Monstera*— produjeron algunos descubrimientos fascinantes. Esas plantas no sólo crecen a veces hacia la oscuridad, un comportamiento muy poco natural, sino que también pueden cambiar espectacularmente de forma, según crezcan en el suelo, las partes bajas de un árbol, más arriba o colgando. «Me interesaba la morfología», explicó Tom. «La morfología es el rastro dejado por el desarrollo. Y, en el fondo, tenemos que comprender el desarrollo si queremos comprender la evolución.» Por importante que esto fuera, los colegas de Tom eran muy tradicionales en su enfoque ecológico y no se mostraron nada comprensivos con su trabajo. Tom también tiene algo de solitario, capaz de una intensa concentración en un reto que tenga delante y de enfrascarse en él lo lleve donde lo lleve. No necesitaba, ni le importaba, la compañía de sus colegas, y ellos lo sabían. «La decisión sobre mi plaza se acercaba y, francamente, las perspectivas no eran buenas», recordó Tom, con acritud todavía. «El decano me sugirió que retirara la solicitud porque, aunque tenía el apoyo del resto del cuerpo docente, los ecólogos de mi departamento estaban muy en contra.»

El punto de inflexión para Tom se produjo en 1987, cuando se compró su primer ordenador personal, un modesto ordenador portátil. Le abrió los ojos al mundo de los ordenadores y encendería la idea de que quizás había llegado la hora de crear la evolución en una botella, que es como lo definió. «Había trabajado mucho con grandes ordenadores», dijo Tom. «Pero hay una gran distancia, literal y metafórica, entre el ordenador y tú. Tecleas tus cosas, obtienes las respuestas y no sabes lo que pasa.» El modesto ordenador portátil abrió una ventana a lo que ocurre en las tripas de un ordenador. «Había estado en Costa Rica un semestre, que es para lo que necesitaba el ordenador personal, y cuando volví empecé a leer. Me compré el compilador Turbo C de Borland y su depurador. Con el depurador podía “ver” en el interior de la máquina. Podía ver la memoria y la unidad central de proceso. Podía ver los programas, y cómo trabajaban con los da-

tos.» ¿Por qué era todo eso tan importante?, pregunté. «Porque tenía una idea clara del ordenador como medio ambiente, un medio ambiente en el que mis “criaturas” evolucionarían. Fue una epifanía.»

Una segunda posibilidad de conseguir su puesto académico se acercaba, la última oportunidad. «Si no consigues una plaza en Delaware, no la consigues en ningún sitio», dijo Tom en tono burlón. Pero, habiéndose evaporado todo interés por la ecología «real» y cada vez más obsesionado con crear vida en un ordenador, tener éxito en esa última oportunidad iba a ser difícil. Mientras daba los pasos para ser un miembro del profesorado fiel a la ecología real, Tom se sumergió aún más en los libros sobre ordenadores y aprendió a escribir instrucciones. También decidió que tenía que averiguar qué habían conseguido ya otros, si es que habían conseguido algo, con los programas autorreplicantes. Por esa época hicieron su aparición los virus informáticos, que tenían algunos de los elementos que Tom buscaba. «Dejé un mensaje en el correo electrónico, con el encabezamiento: “Virus satánicos: blasfemia contra el culto informático”. El caso Salman Rushdie estaba de actualidad», dijo Tom. En la nota del correo electrónico, Tom pedía información acerca de un reciente libro sobre virus informáticos y decía: «Soy un biólogo evolutivo y estoy interesado en estudiar las instrucciones autorreplicantes con mutación y recombinación como modelo de la evolución molecular».

En la tradición de la correspondencia por correo electrónico, Tom recibió muchos mensajes satíricos continuando la referencia al culto informático y algunos serios. Uno decía: «Escribir un programa que se automodifique pertenece todavía al reino de la ciencia ficción». No muy alentador, insinué. «No, en absoluto», dijo Tom. «Pero en estas cosas soy testarudo y perseveraré.» Lo único positivo que salió de esa incursión en el correo electrónico fue una referencia a un libro con el título *Artificial Life*. «Supe que era lo que necesitaba», dijo Tom. «Eso fue a principios de 1989 y el libro tenía fecha de 1989. Me abalancé a conseguirlo.» El libro recogía las contribuciones del Primer Congreso sobre Inteligencia Artificial, que Chris Langton había organizado en Los Alamos en septiembre

de 1987. Chris era el editor del libro y el autor de la introducción general, donde explicaba su visión de la vida artificial, así como sus perspectivas.

Tom abrió el libro con una mezcla de excitación y presentimiento. «Chris describía maravillosamente el tipo de programa de investigación que yo tenía en mente. Y ahí estaba yo, habiendo encontrado la misma clase de idea de forma independiente. Así que pensé: “Oh, vaya, me parece que eso ya está hecho”.» Es un libro extenso y no se digiere con facilidad. Tom lo leyó de un tirón, con la creciente sensación de que no, no se le habían adelantado. Nadie había hecho lo que él pretendía. «Parecían tener el mismo objetivo, pero utilizaban programas muy diferentes», dijo Tom. «Los autómatas celulares, eso era lo más que se habían acercado. El juego de la vida, ese tipo de cosas.» Los autómatas celulares son impresionantes por los patrones que pueden producir y la extraña sensación de realidad que transmiten, pero Tom se interesaba por los programas que pueden evolucionar por medio de la mutación y que compiten entre sí, como hacen los organismos en el mundo real. En *Artificial Life* no había nada que se pareciera a eso.

Tom mandó inmediatamente a Chris un mensaje por correo electrónico, y se estableció una correspondencia en ocasiones turbulenta, que duró casi un año. Tom explicó sus objetivos y dijo que creía que nadie los había conseguido. Chris, entusiasmado por recibir por fin noticias de un biólogo de verdad, le sugirió que visitara Los Alamos, para conocer el grupo de sistemas dinámicos no lineales. Hasta ahí todo bien. Entonces Tom le envió una copia de su artículo «Artificial Life: an Ecological Approach». Chris, un crítico sin lugar a dudas bien intencionado pero agresivo, hizo en realidad añicos el artículo diciendo en resumen: «Ray subestima algunas dificultades inherentes de los problemas. Hace caso omiso (o no es consciente) de los peligros de crear instrucciones que puedan sobrevivir en los sistemas operativos comúnmente utilizados en la red. Sobreestima las diferencias entre su enfoque y los demás trabajos sobre vida artificial». El comentario favorable, «En conjunto una gran cantidad de buenas ideas, sugerencias

y visiones», no consiguió mitigar el disgusto de Tom. «Lamento que no te haya gustado mi artículo», replicó el día en que recibió la crítica de Chris. «¡Vaya!, nunca dije que mi reacción fuera negativa», contestó Chris. Y siguieron así, reduciendo cada vez más las diferencias. «Supongo que estaba un poco a la defensiva», me contó Tom. «Pero también creo que Chris no comprendió del todo lo que yo quería hacer. A decir verdad, yo tampoco sabía en ese momento lo que quería hacer.»

Mientras tanto, Tom organizó un seminario para sus colegas ecólogos de Delaware e introdujo el concepto de vida artificial. «¿Sabes qué?, se echaron a reír. Se echaron a reír en los pasillos.» ¿Tus colegas, los que tenían que votar tu segunda opción a la plaza? No sonaba prometedor, dije. «No, en absoluto. Entonces llegó la invitación para visitar Los Alamos, y la firmaba Doyne Farmer», recordó Tom. «Todo el mundo había oído hablar de Doyne Farmer. Aparecía en *Caos*, de Gleick, y le tenían mucho respeto. De pronto, empezaron a pensar que no estaba tan loco.» Tom, como muchos científicos, con al menos una parte de político, sabía que la invitación de Farmer era inminente cuando preparó el seminario.

A principios de octubre de 1989, Tom viajó a Los Alamos y ascendió a la estratosfera intelectual. Chris Langton, Doyne Farmer, Walter Fontana, Stephanie Forrest, Steen Rassmussen: ésos eran los grandes nombres, la gente importante en el tema de los sistemas dinámicos, de la vida artificial. Su mensaje fue triple. Tom tenía que prestar atención a la seguridad, asegurarse de que cualquier cosa que produjera no se le fuera de las manos. En segundo lugar, las posibilidades de que fuera capaz de escribir un programa autorreplicante que pudiera sobrevivir a la mutación eran cercanas a cero. Y, en tercer lugar, hiciera lo que hiciera seguramente le llevaría muchos años. Otros, con mayor experiencia técnica, llevaban en el asunto mucho más tiempo y no habían tenido éxito. El encuentro fue de lo más amigable, de respaldo, pero no especialmente alentador en cuanto a las perspectivas inmediatas.

Fue una repetición de la crítica de Chris al artículo de Tom cinco meses atrás.

«Era consciente del problema de la seguridad», me contó Tom. «Con el miedo a los virus informáticos, todos lo somos. No hice suficiente hincapié en ello en mi presentación. El consejo de Chris y Doyne era sensato, debía ejecutar mi programa en un ordenador virtual.» ¿Qué es un ordenador virtual?, pregunté. «Ese es un ordenador de verdad», dijo Tom, dándose la vuelta y señalando una de las tres máquinas situadas sobre la mesa que tenía detrás. «Y ése es un ordenador de verdad. Y ése. Un ordenador virtual es un ordenador que no existe. Lo emulas con el software. Dices: me gustaría un ordenador con estas especificaciones y escribes las especificaciones en el programa, pones las partes del ordenador que quieras para la simulación. El programa crea efectivamente un ordenador dentro del de verdad. Por eso se llama ordenador virtual.» ¿Como cuando diseñas un coche por ordenador y compruebas su rendimiento?, pregunté. «Sí, es lo mismo.» Así, si tienes a tus criaturas viviendo en ese ordenador virtual, ¿no hay forma de que se te escapen? «Eso es. Tienes que desarrollar un nuevo lenguaje para tu ordenador virtual, y eso fue algo nuevo para mí.»

Tom siguió de buen grado el consejo del grupo de Los Alamos respecto a la seguridad, pero se dejó influir menos por sus opiniones acerca de la dificultad de escribir programas autorreplicantes capaces de sobrevivir a la mutación. El problema se conoce con el nombre de «fragilidad». En el intercambio epistolar por correo electrónico que había tenido lugar con anterioridad ese mismo año, Chris había afirmado con rotundidad que «sencillamente no funcionará». Cualquier ligero cambio aleatorio —una mutación— en el programa lo haría derrumbarse, dijo. Con su testarudez característica, Tom contestó: «No estoy dispuesto a despreciar el enfoque sólo porque nadie más haya conseguido que funcione». ¿Por qué insistían tanto?, pregunté. «Porque nadie lo había hecho, supongo», contestó Tom, «y porque Chris procede de la Universidad de Michigan, donde llevan mucho tiempo intentando conseguirlo.» ¿Y por qué estabas tan seguro de que funcionaría? Tom se

encogió de hombros y dijo: «Pensaba que podría funcionar». Y añadió: «Los genomas evolucionan, ¿por qué no los programas?»

Con el tercero de los tres puntos —que lo que pudiera conseguir llevaría mucho tiempo—, Tom estuvo plenamente de acuerdo.

Tom regresó de Los Alamos, entregó su informe a la comisión de evaluación de la plaza y dejó atrás dieciséis años como ecólogo de campo. Iba a jugar a ser Dios, a crear una vida en un ordenador y a convertirse en naturalista de organismos digitales. O fracasaría, y ése sería el final de Tom Ray, profesor universitario. Esto ocurría a mediados de octubre de 1989.

La tarea era producir un organismo sencillo que contuviera instrucciones para su propia replicación, sólo eso. No incorporaría nada acerca de su evolución potencial. El organismo estaría sometido a un bajo índice de mutación: un cambio de 1 a 0 o viceversa en su código, igual que los organismos terrestres experimentan cambios aleatorios en el ADN. Los organismos competirían por el espacio y el tiempo: por el espacio en la memoria del ordenador, una analogía del espacio en un ecosistema real; y por la cantidad de tiempo que el algoritmo replicante invertiría en la unidad central de proceso, una analogía de la energía. «Quería evitar introducir en el sistema cualquier cosa que pudiera moldear su comportamiento, que determinara sus pautas», dijo Tom. «Quería tener las limitaciones más sencillas, variación y selección, la base de la selección natural.» En el contexto de los sistemas dinámicos, le pregunté si deseaba ver qué pautas globales surgirían de la operación de reglas locales, la variación y la selección. «Sí, exactamente.»

Tom ya había diseñado su sencillo organismo —un algoritmo de ochenta instrucciones— antes de ir a Los Alamos. Una tarea «trivial», como había afirmado el jugador de go una década atrás. El siguiente reto era asegurarse de que todo no fallara debido al problema de la fragilidad, que cualquier pequeña mutación detuviera el programa. Inspirado por otras analogías con la biología, Tom modificó el sistema informá-

tico. Primero, redujo el tamaño del conjunto de instrucciones del código máquina de unos 4000 millones a sólo treinta y dos. Con esto se ajustaba a los veinte aminoácidos (codificados por sesenta y cuatro codones en el ADN) que operan en el terreno biológico. «Tenía la impresión de que si me quedaba con el enorme número original de instrucciones de código sería un problema», explicó.

La segunda analogía que Tom tomó prestada de la biología fue el «direccionamiento por molde». En la mayoría de los códigos máquina, cuando se direcciona una porción de datos, se especifica la dirección numérica exacta de éstos. En biología las cosas no ocurren así. Por ejemplo, una proteína A de una célula interaccionará con una segunda proteína B cuando las dos se junten por difusión; las formas complementarias de sus superficies se engranan entre sí. Tom sacó partido de este truco de la naturaleza introduciendo un breve código de cuatro instrucciones, con la configuración 1111, en la cabeza de su criatura y otro grupo de cuatro, con la configuración 1110, en la cola. «Entre esas dos instrucciones metí un programa que empezaba buscando la configuración complementaria a 0000 para encontrar la cabeza, luego buscaba la configuración complementaria a 0001 para encontrar la cola y registraba su localización; y luego calculaba el tamaño», explicó Tom. El programa situado entre los códigos de la cabeza y la cola contiene instrucciones para replicar el organismo y encontrar una localización cercana para su «hija». Además el direccionamiento por molde también permitía a los organismos encontrar vecinos con los que interaccionar.

Por lo que sabía, nadie había elegido ese camino, la unión de los recursos de la biología molecular y los ordenadores con el objetivo de producir vida artificial. «Creo que es importante», dijo Tom. «Soy un programador bastante bueno para ser biólogo, pero sin comparación con esos tipos de Los Alamos. Pero sé de biología; ellos no.» Tom había previsto pasar años modificando el programa. En vez de eso, el 18 de diciembre, sólo dos meses después de empezar con él, Tom logró enviar a Chris un mensaje por correo electrónico diciendo: «¡Mi simulador funciona!». También le dijo a Chris que había

decidido llamar al sistema Tierra, en castellano, en lugar de Gaia. «No quería que se confundiera lo que estaba haciendo con todo el asunto ese de la New Age», me explicó Tom.

Dos semanas más tarde, el sistema estaba libre de los últimos errores y listo para funcionar. Fue el 3 de enero. «Lo puse en marcha y lo dejé ejecutándose toda la noche», dijo Tom, recordando lo que obviamente fue un momento tenso pero delicioso de su vida. «No dormí mucho.» Tom ya había vislumbrado algunos fragmentos de vida en Tierra durante el proceso de depuración. Sabía que iba a pasar algo, algo interesante. Pero no tenía modo de predecir cuán interesante iba a ser. «El infierno se desató», así fue como describió lo que había ocurrido durante la noche en su mundo virtual. «Los parásitos evolucionaron rápidamente a partir del antepasado original, luego lo hicieron criaturas inmunes a los parásitos», dijo Tom. «Algunos de los descendientes eran más pequeños que el organismo ancestral, otros eran más grandes. Había hiperparásitos, criaturas sociales. Vi carreras de armamentos, trampas, había...» Espera un momento, interrumpí, tienes que explicarme esas criaturas. Cuando describí a Tom como naturalista de un mundo virtual, quería decir eso: para él los organismos digitales eran tan reales como lo habían sido las mariposas hormigueras.

«De acuerdo», dijo Tom. «¿Te gustaría ver algunas?» Durante ese primer estallido evolutivo, Tom tuvo que manejar la base de datos para descubrir el bestiario. Sin embargo, con ayuda de los expertos informáticos de Delaware, disponía ya de una representación visual de Tierra. Las diferentes criaturas están representadas mediante barras horizontales de diferentes longitudes y colores que llenaban la pantalla. Aunque no se trataba de una animación a lo Walt Disney, esa matriz multicolor transmitía la sensación de un mundo en movimiento, con criaturas nuevas entrando en escena mientras otras desaparecían. «Vamos a ver la interacción parásito-huésped», dijo Tom entrando en un directorio. Los registros de esa primera ejecución están almacenados, y Tom puede repasar lo que sucedió una y otra vez, igual que un paleontólogo escarbando en el registro fósil de la vida.

Los parásitos, explicó Tom, evolucionaron desprendiéndose de un pedazo del genoma original de ochenta bytes, quedándose con sólo cuarenta y cinco instrucciones de longitud y utilizando las instrucciones de replicación de sus vecinos. No dañan a sus huéspedes, pero los privan de energía y espacio valiosos. Cuando hay abundancia de huéspedes y el espacio escasea, los parásitos florecen. Una caída en la población de huéspedes acarrea también una caída en los parásitos, como en la vida real. «Lo que sale es el clásico ciclo Lotka-Volterra», dijo Tom mientras contemplábamos el auge y la caída periódicos de las poblaciones de huéspedes, seguidos de cerca por las poblaciones de parásitos. De libro, dije. El ciclo, que es la pauta más conocida en biología de poblaciones, describe la interacción entre poblaciones de especies de depredadores y sus presas. Con una población establecida de presas, aumenta la población de depredadores. Al final, los depredadores empiezan a tener un impacto serio sobre la población de presas, que empieza a disminuir. Con menos presas a su disposición, los depredadores empiezan a sufrir las consecuencias, y su población disminuye. Libre de la presión de la depredación, la población de presas aumenta de nuevo, seguida por la población de depredadores. El ciclo de auge y caída en las poblaciones continúa de forma indefinida, y la pauta tenía que verse en el ecosistema digital de Tom. «Sí, hay una gran cantidad de ecología de libro en Tierra», dijo Tom. Exclusión competitiva, superdepredadores, periodos de estabilidad puntuados por estallidos de cambio: muchas de esas cosas ocurren en la ecología de Tierra, todo ello pautas clásicas de la ecología terrestre. «Incluso encontramos extinciones en masa ocasionales»

¿Y todo eso surge de unas pocas leyes fundamentales? ¿No hay nada incorporado que dé lugar a esas pautas?, pregunté. «No hay nada incorporado», contestó Tom. «Lo que estás viendo es la emergencia de pautas globales a partir de reglas sencillas. La noción de algo profundo como fuerza organizadora me seduce, siempre lo ha hecho.» Una sensación familiar, dije. Stu Kauffman utilizó las mismas palabras para describir sus redes booleanas y la emergencia del orden. «Hemos hablado unas pocas veces», dijo Tom. «Nada filosófico, sólo

algunos detalles de los sistemas, del suyo y el mío. Pero, sí, por lo que dices, ambos tenemos la misma sensación de que hay ahí algo profundo. Por eso la evolución ha sido para mí una cuestión científica central, la idea de que algún proceso en el nivel de la física conduce al incremento de la complejidad. Es lo que encuentras en la naturaleza y es lo que encuentras en Tierra.»

La explosiva evolución ocurrida en Tierra ese día de enero de 1990 cogió a Tom por sorpresa, pero parecía una maravillosa oportunidad para mostrar a la comunidad de expertos en vida artificial lo que podía lograrse con esa mezcla única de principios biológicos e informáticos. Sólo un mes más tarde se celebraría el segundo congreso sobre vida artificial, esa vez en Santa Fe. Tras su obsesión de establecer el ámbito como una disciplina científica legítima, Chris Langton había dedicado gran parte de su tiempo desde el primer encuentro a la organización del segundo. La cantidad de personas que deseaban participar en él, mostrar sus creaciones, era enorme, y Chris estaba retocando todo el rato el programa, recortando el número de charlas que podía dar cada participante y podando el tiempo de las presentaciones. A Tom se le asignaron en un principio dos intervenciones, de cuarenta minutos cada una. Al final, se quedó con una de veinte minutos. De modo que, a medida que pasaba el tiempo, tenía cada vez más cosas que contar y cada vez menos tiempo para hacerlo. De todos modos, iba a sorprenderlos con Tierra, de eso no había duda.

A Chris, el clamor para asistir a VA2 (Vida Artificial 2), como se llamó al congreso, le parecía una reivindicación de su obsesión. Demostrar que la vida artificial era algo más que una fantasía había sido su objetivo incluso antes de ir a la Universidad de Michigan en 1982. Su tesis, sobre la dinámica de los autómatas celulares, había sido en realidad una especie de caballo de Troya, y cuando dejó esa universidad en 1986 para unirse a los grupos de dinámica no lineal de los Alamos a invitación de Doynne Farmer, aún no había concluido la parte formal de su doctorado, redactar la tesis. El romance

con la vida artificial había sido demasiado excluyente. La continuación del romance, así como las exigencias de la organización de los dos encuentros, contribuyeron también en Los Alamos a desviarlo de esa meta. El resultado fue que Doyne recibió muchas presiones por parte de la burocracia del laboratorio debido a la incapacidad de su protegido para acabar el doctorado. «Doyne era mi protector», me dijo Chris. «Siempre he tenido suerte con la gente que me ha protegido, que me ha dejado hacer lo que tenía que hacer.» (Al final, la tesis fue entregada y aprobada en 1991.)

¿De dónde procedía esa obsesión por la vida artificial?, pregunté a Chris. «Puedo rastrearla hasta un acontecimiento específico, una experiencia extraña», empezó. A principios de la década de 1970, Chris estaba trabajando en el Laboratorio de Investigación en Psiquiatría y Psicología del Hospital General de Massachusetts, Boston, en su condición de objetor de conciencia a la guerra de Vietnam. El laboratorio necesitaba a alguien que supiera de ordenadores, de modo que Chris aprovechó la ocasión: no sabía mucho de ordenadores en esa época, pero la oportunidad parecía mejor que trasladar cadáveres hasta el depósito, su trabajo inicial en el hospital. En el laboratorio había una gran camaradería y se vivía gran intensidad, y la gente se quedaba a menudo trabajando hasta altas horas de la noche.

«Una noche estaba solo, era muy tarde, como las tres de la madrugada», dijo Chris. «Estaba sentado en mi mesa, depurando el código, trabajando con lápiz y papel, intentando adivinar por qué no funcionaba. Tenía el juego de la vida en la pantalla y, de vez en cuando, levantaba la vista y lo miraba un rato, volvía a ponerlo en marcha cuando se paraba. Todos lo hacíamos. En aquel entonces era una novedad.» El juego de la vida de Conway, que había salido en 1970, había fascinado a todo el mundo por su autonomía, la habilidad para producir pautas complejas, la extraña sensación de poseer una mente propia.

«De pronto, tuve la impresión de que no estaba solo», dijo Chris. «Un sentimiento completamente visceral, el pelo de la nuca se me erizó. Me di la vuelta, pero no había nadie. Pensé

que quizás alguno de los monos se había escapado de las jaulas. No. De modo que volví a la mesa, me senté, vi que el juego de la vida se había parado, así que lo puse en marcha de nuevo. De pronto me di cuenta de que lo que había tenido que desencadenar esa impresión era algo en la pantalla.»

Una clave en tu visión periférica, dije. «Sí, tuvo que ser eso», dijo Chris. «Dejé que mi mente siguiera el hilo de los pensamientos, y me dio la impresión de que eran misteriosos, no del todo prohibidos, pero inexplorados y peligrosos.» Fue como si una idea se hubiera deslizado subrepticamente en su mente y hubiera empezado a proliferar, engendrando metaideas en todas las direcciones, ilimitada, intrépidamente. «Estaba contemplando el río Charles, en dirección a Cambridge... las luces de los coches se movían silenciosamente a lo largo del río... los edificios oscuros contra las luces de la ciudad... el vapor elevándose de las calles... una sensación de que todos esos comportamientos de ahí afuera, de que la ciudad estaba viva... no eran las personas, no era la biología, era sólo la vida.» Chris hizo una pausa, recordando la fuerza del momento.

«Fue como una experiencia alucinógena, como cuando vienes una fantasía loca», empezó Chris de nuevo. «Eliminas las barreras mentales usuales a los pensamientos disparatados y dejas que se desarrollen libremente. Como un huracán de ideas barriendo el paisaje mental, y yo era sólo un espectador.» Chris lo comparó también a un estado en el que entra de vez en cuando tocando la guitarra, cuando la música prende sola y se escampa. «No sé cuánto tiempo duró, quizá dos minutos, quizá dos horas. Pero fue muy profundo. Quedé atrapado por la idea de que la información tenía vida propia, una lógica viviente. Es irrelevante que digas que está viva, pero es una clase de fenómeno similar.» El huracán pasó, y el paisaje mental de Chris quedó alterado de forma irrevocable. Supo que un día haría realidad la vida artificial. Fue en el año 1971.

«Es cierto que organizar esos encuentros me ha quitado

muchísimo tiempo de mi investigación», me dijo Chris. «Pero lo importante es poner en marcha la disciplina, y que se la respete. No me importa quién lo haga, mientras se haga. Vida Artificial 2 nos hizo avanzar mucho en esa vía.» Pregunté cuál había sido el impacto de Tierra. ¿Sorprendió a todo el mundo, como esperaba Tom? «La verdad es que no», dijo Chris, hablando en su despacho del Instituto de Santa Fe. «Quizá fue por mi culpa, porque no le di más tiempo para su charla. Pero acababa de obtener los resultados y seguía trabajando en ellos estando aquí, de modo que quizá no había acabado de pulir la presentación. En cualquier caso, no salieron todas las implicaciones. Pero mira esto», dijo Chris, mientras se daba la vuelta y sacaba el volumen del congreso. «Mira este artículo de Kristen Lindgren, un sistema muy diferente, pero con el que obtienes competencia y selección.» Chris había encontrado el artículo de Lindgren y pasaba las páginas en busca en un gráfico que quería enseñarme. «¿Te suena?», preguntó.

El de Lindgren era el más sencillo de los sistemas evolutivos, se basaba en un juego famoso, el dilema del prisionero. En la versión clásica, la policía detiene e incomunica a dos personas por un delito que ambas han cometido; la policía les hace el siguiente ofrecimiento: pueden delatar al cómplice a cambio de una pena reducida, o permanecer en silencio. Si los dos permanecen en silencio, ambos quedan libres; pero, si uno de los dos cómplices habla, el otro recibe la máxima sentencia. Los teóricos de juegos han demostrado que, aunque la alternativa más beneficiosa es siempre el silencio, la estrategia óptima es hablar, para reducir el riesgo de la sentencia máxima. En la versión de Lindgren, los prisioneros juegan a ese juego, no una sino repetidas veces, con la posibilidad de tomar decisiones diferentes cada vez. Lindgren permitió que las estrategias evolucionaran (por una especie de mutación), volviéndose a veces muy complicadas, a medida que se sucedían las rondas del juego. Los diferentes resultados de estas estrategias son análogos a las diferentes eficacias en los sistemas biológicos y a las diferentes eficacias de los organismos del sistema de Tom Ray. El efecto es la competencia entre una

población de estrategias en evolución, con la emergencia de poblaciones en coevolución como en Tierra, pero mucho más abstracto. Y un gráfico de la historia de las poblaciones de estrategias a lo largo del tiempo se asemeja de un modo extraño a la mucho más compleja comunidad de criaturas digitales de Tom.

Sí, respondí, me suena; se parece a los datos de Tom. «Una población permanece en equilibrio durante un tiempo, luego, bum, cambio rápido, hay caos durante un tiempo y después más estasis», dijo Chris, describiendo el gráfico que teníamos delante. «Incluso hay extinciones en masa», dijo, «mira.» Era evidente que las poblaciones a veces caían en picado. Cuando visité a Tom en Delaware, le pregunté por los episodios de extinciones en masa de su sistema y comenté lo mucho que se parecía todo a la historia de la vida en la Tierra. «Sí, y no hay asteroides», respondió enfáticamente. No hay asteroides, sólo la dinámica de un sistema complejo adaptativo. ¿Puede ser una coincidencia que encontremos esta clase de pauta en un sistema simple como el de Lindgren, en uno más claramente biológico como Tierra y en la historia de la vida en el mundo real?, le pregunté. «No lo creo», dijo Chris, cautamente. «Creo que lo que vemos es algo profundo, alguna dinámica fundamental de sistemas similares.»

Una de las pautas que Chris describió, la de los periodos de estabilidad interrumpidos por estallidos de cambio, es bien conocido por los ecólogos y, en años más recientes, también por los biólogos evolutivos. El término utilizado por estos últimos es equilibrio puntuado. Stephen Jay Gould y Niles Eldredge, del Museo Americano de Historia Natural, propusieron la idea del equilibrio puntuado en 1972, y el resultado fue un debate a veces cáustico. Dos décadas después, hay todavía quienes dudan de su realidad, pero la mayoría acepta que, al menos, forma parte del modelo global de la historia evolutiva.

«El modelo del equilibrio puntuado siempre me recuerda el flujo de un líquido a través de una cañería», dijo Chris. «A poca velocidad, tienes un flujo laminar. A alta velocidad, tienes turbulencia, caos. Sólo cuando cambias de la turbulencia al caos, tienes un periodo en que el flujo es laminar, luego

aparece esa célula de turbulencia; luego vuelve el flujo laminar durante un tiempo; luego más turbulencia. Se llama intermitencia.» ¿Equivale la intermitencia al límite del caos?, pregunté. «Es una analogía razonable, quizá sea algo más que una analogía.» ¿Significa esto que una pauta de equilibrio puntuado en un ecosistema o en una historia evolutiva implica que los sistemas están en el límite del caos? «Creo que podría ser así.» ¿No es seguro? «No es seguro.»

Tras su desalentadora presentación en el encuentro sobre vida artificial, Tom volvió a Delaware, se sumergió aún más en el análisis de la vida en Tierra y preparó lo que resultó ser un año de numerosos viajes por Estados Unidos y Europa. Se llevó consigo su mundo virtual y se dedicó a dar seminarios en departamentos universitarios. Sólo en noviembre presentó Tierra en Aarhus, Copenhague, Basilea, Montpellier, París, Nottingham, Oxford, Cambridge y Sussex. «Solía empezar diciendo: “Todos somos biólogos; nos interesa la evolución, pero sólo podemos estudiar un ejemplo, aquel del que formamos parte”», me contó Tom. «Luego decía: “Bueno, ahora tenemos la oportunidad de explorar otros mundos, otros ejemplos de evolución”. Al llegar a este punto algunas personas empezaban a reír de modo disimulado. Luego les enseñaba Tierra y la mayoría, cuando no todo el mundo, quedaba enganchada.»

Los biólogos se muestran a menudo escépticos ante los modelos matemáticos, sospechan que la simplificación aporta comprensión a costa de la realidad. Ante un modelo del cual su autor prometía ofrecer una visión de los procesos subyacentes a toda la historia de la vida, la audiencia sentía su escepticismo doblemente justificado.

«Pensé que era maravilloso», dijo Richards Dawkins, cuando nos encontramos en su despacho del colegio mayor de Oxford. En noviembre de 1990, Tom había impartido un seminario en el departamento de zoología de la universidad, quizá la mayor concentración de biólogos evolutivos punteros del mundo. «A veces se tarda un poco en obtener una com-

prensión global de la importancia del trabajo de Tom, pero estaba preparado y enseguida me di cuenta de lo importante que era.» Cinco años atrás, Richard y un amigo astrofísico habían esbozado un modo de cómo producir un mundo autorreplante, mutante y adaptativo, como Tierra. «Es extraño lo cercanas que estaban nuestras ideas de lo que Tom realmente produjo», dijo Richard. ¿Por qué no seguisteis trabajando en ello? «Parecía un proyecto ingente, una labor de programación muy ambiciosa. Creo que nos pareció un trabajo demasiado grande.»

En su libro de 1986, *El relojero ciego*, Richard presentó un sistema alternativo, un programa que producía estructuras a partir de reglas sencillas. Las estructuras, que llamó biomorfos, evolucionan, pero sólo a través de la selección artificial: el ordenador genera mutantes a partir de una forma parental, pero el usuario tiene que elegir de entre las variantes cuál de ellas pasa al siguiente estadio de mutación. Aparecen pautas extremadamente reales, de ahí su nombre, pero, a diferencia del sistema de Tom, sin la intervención humana no se llega a ningún sitio. «Hasta que no dominemos los viajes interestelares, el sistema de Tom, o algo parecido, es la mejor posibilidad de estudiar otro ejemplo de evolución», dijo Richard. «Ha creado un universo de silicio.»

¿Otro ejemplo de evolución? ¿Es ése en realidad el objetivo de Tierra?, pregunté a Tom. «Sí. Tenemos innumerables productos del ejemplo de evolución que conocemos, el que se basa en el ADN, y podemos aprender mucho de él. Pero nos gustaría saber lo general que es, porque eso nos diría algo de los principios organizativos de la evolución.» Leí en algún lugar que la ambición de Tom era repetir la explosión cámbrica. Le pregunté por qué. «¿No es la ambición de cualquier biólogo evolutivo?», contestó. «La mayoría de personas, si se les pregunta, dirá que el acontecimiento más importante de la vida en la Tierra es su origen y, por supuesto, eso es verdad hasta cierto punto. Pero yo sostengo que la explosión cámbrica es un acontecimiento de igual importancia. Es ahí donde empieza toda la biología importante, las pautas evolutivas importantes.» Cuando pusiste en marcha por primera vez Tierra

fue como una explosión cámbrica, ¿verdad? «En cierto sentido, aunque habría que introducir los organismos multicelulares para observar la diferenciación celular y la emergencia de la complejidad morfológica. Luego podríamos alcanzar a ver si hay una infinidad de mundos posibles o quizá sólo unos pocos.» Le pregunté si sería capaz de producir una explosión cámbrica antes de que yo acabara mi libro. «Me temo que no. Es todo un trabajo.»

A pesar de todo, dije, la vida en Tierra tiene suficientes semejanzas con la vida en la Tierra como para alentar la esperanza de que compartan algunas propiedades fundamentales. En particular, las extinciones en masa. Si en un sistema pueden ocurrir extinciones en masa en ausencia de colisiones de asteroides y sin prejuicio de la conectividad asumida entre especies, constituirá sin duda una observación importante. Pregunté a Tom si pensaba que todas las extinciones en masa podían ser el resultado de la dinámica de un sistema complejo adaptativo. «No», dijo. «Las pruebas de que al menos algunas extinciones fueron causadas por colisiones me parecen bastante convincentes. Pero si Tierra tiene algún mensaje, es que la dinámica de los sistemas complejos puede dar lugar a pautas que no podían haberse predicho, pautas que vemos en la naturaleza y que incluyen extinciones de una magnitud considerable.»

A principios de otoño de 1990, Tom llamó a Stu Kauffman y lo invitó a dar un seminario en Delaware. (El motivo ulterior era que deseaba pasar algún tiempo en el Instituto de Santa Fe y había oído que Stu tenía influencia ahí.) Antes del seminario, Tom le enseñó Tierra. «Pensé que era algo maravilloso», me dijo Stu. «Tom ha aportado la visión de un ecólogo a los sistemas complejos, y necesitábamos eso. El aumento de la diversidad que él ve es una clara historia de generación de complejidad.» Naturalmente, surgió el concepto del límite del caos. «Si el concepto tiene alguna validez, deberíamos encontrar alguna prueba en el sistema de Tom», dijo Stu. ¿Que buscarías?, pregunté. «¿Qué crees?» ¿Una distribu-

ción exponencial? «Eso es. Una distribución exponencial de las extinciones.»

Stu sugirió a Tom que mirara la distribución del tamaño y la frecuencia de las extinciones en Tierra. Tom, algo escéptico ante nociones «de moda» como el límite del caos y completamente escéptico sobre la importancia de las distribuciones exponenciales, no representó los datos enseguida. Unos nueve meses después, justo antes de visitar el instituto, lo hizo y se los entregó a Stu al llegar. «Quedé sorprendido», dijo Stu. «Representó gráficamente treinta mil episodios de extinción, esto es lo que obtuvo.» Stu sacó una hoja de papel que mostraba una curva ligeramente convexa. Es como la curva que obtuviste cuando representaste los datos de extinción de Dave Raup, dije. «Exacto, una ley exponencial, ligeramente curva, lo cual indica que el sistema está justo en el régimen congelado, cerca del límite del caos.»

Stu quedó impresionado con el resultado, sobre todo porque con su propio sistema coevolutivo había tenido que construir un modelo explícito de relieves adaptativos y especificar las interacciones entre las especies. «Es cierto, con mi modelo sé por qué el sistema se desplaza hasta el límite del caos: es donde la eficacia se optimiza», dijo Stu. «Lo que supongo es que los bichos de Tom se han acercado solos al límite del caos, y por la misma razón.» Le pregunté si podía probarlo. «Todavía no, pero estamos ideando formas de intentarlo.»

Tom, ya mucho menos escéptico, piensa que podría ser posible ajustar su sistema en el límite del caos alterando la tasa de mutación. «La tasa de mutación de mi sistema es en cierta medida análoga al parámetro lambda [el instrumento matemático que establece las reglas de los autómatas celulares y permite seguir las consecuencias a través de un continuo] que Chris utilizó en sus autómatas celulares», me dijo Tom. «Si aumento la tasa de mutación, el sistema se vuelve caótico y desaparece. Con una tasa baja no sucede nada demasiado importante. Entre las dos tasas vemos que se produce una abundante ecología y, si ése es el límite del caos, es ahí donde deberíamos ver avalanchas de extinciones con una distribución exponencial.» ¿Lo has hecho ya? «Todavía no», dijo

Tom. «Lo siento.» Pero el sistema que ya tienes muestra esa clase de ley exponencial, dije. ¿Significa que Tierra podría haber evolucionado hasta el límite del caos de forma autónoma? «Sí, es posible, pero me gustaría hacer una prueba para comprobarlo.»

¿Era una simple coincidencia que viéramos una distribución exponencial (o algo muy parecido) en las extinciones del mundo real, en tu modelo coevolutivo y en Tierra?, pregunté a Stu. ¿O estábamos viendo la huella de los mismos procesos fundamentales? «Mira», dijo. «Aquí pisamos terreno desconocido, toda la ciencia de la complejidad lo es en cierto modo. Estamos construyendo un sistema, pedazo a pedazo. Creo que la coincidencia —llámalo como quieras— es parte del sistema. ¿No crees?»

Bueno, dije, parece interesante. Pero primero tengo que mirar los ecosistemas reales.

(Sí, Tom consiguió la plaza.)

## 6 Estabilidad y realidad de Gaia

«Los setos llevan aquí mil años», dijo Bill mientras avanzábamos a una arriesgada velocidad por oscuros caminos rurales, en lo profundo de la campiña inglesa. «Algunos, dos mil años.» Con un espacio alarmantemente diminuto a cada lado del coche, los viejos setos, sujetos a una base de tierra y piedra, se alzaban unos buenos tres metros sobre nosotros. Las luces barrían fugazmente la tortuosa zanja de apariencia interminable a medida que avanzábamos. No habría tenido que ponerme nervioso, puesto que Bill había hecho ese trayecto muchas veces, llevando visitantes desde la estación de tren de Exeter en Devonshire al pequeño pueblo de St. Giles on the Hath. Bill es la compañía de taxi local de St Giles, y representa la única forma de transporte en esos lugares, a unos ciento treinta kilómetros de la punta más sudoccidental de las islas Británicas.

El viaje duró casi una hora, empezó en la menguante luz de lo que había sido un brillante día de febrero y acabó en ese tipo de oscuridad que se experimenta sólo en lo profundo de la campiña. «Eso de ahí es Dartmoor», dijo Bill cuando llevábamos media hora de viaje, indicando un terreno elevado y sin accidentes a nuestra izquierda. Estaba anocheciendo, era el momento perfecto para contemplar un lugar tan imponente, en la imaginación resonaban *El sabueso de los Baskerville* y otras historias de horror ambientadas en esos páramos. «Hace un tiempo se perdió una gente», observó Bill. «Todavía no han aparecido.» Me esforcé por captar las palabras en el fuerte acento de Devon de Bill, rotundo y rápido. «Mi mujer y yo vamos de excursión en

verano», añadió de modo incongruente, como si formara parte del mismo pensamiento.

Hacia un kilómetro y medio que habíamos dejado atrás St Giles on the Heath y avanzábamos por caminos todavía más estrechos, con hierba que crecía en medio de las dos roderas. «No falta mucho», me aseguró Bill. Entonces, al cruzar un cercado, las luces iluminaron el cartel ESTACION EXPERIMENTAL DE COOMBE MILL. Una señal de «peligro» como las que se encuentran en los laboratorios de investigación colgaba de una verja de cinco barrotes. Y, cuando nos paramos frente al antiguo molino, las luces iluminaron una estatua de mármol blanco, la figura de una mujer. «Sí», dijo Bill al verme mirarla. «Es Gaia.»

La puerta de la casa se abrió, y un hombre salió a saludarme, con la mano tendida: «Hola, soy Jim Lovelock», dijo con una voz suave y amable, una sonrisa casi tímida. De setenta y pocos años, pelo blanco, proyectaba una combinación de vigor y extrema cortesía. ¿Era éste el hombre a quien gran parte de la comunidad biológica considera como la encarnación del diablo, una amenaza para la integridad de la verdadera ciencia? Se nos unió Sandy, su esposa. «Entra», dijo. «Beberemos algo.»

Durante la cena en un comedor de vigas bajas, Jim habló de sus primeros tiempos como científico, cuando era doctor becado en Harvard y tenía que dar sangre una vez al mes como complemento a sus magros ingresos. «Por fortuna tengo un tipo raro, así que me daban cincuenta dólares por cada donación.» Encontró Harvard burocrático, rígido y explotador. «Cuando se acabó la beca me pidieron que me quedara otro año», recordó Jim. «Dije que no, así que me ofrecieron doblarme el sueldo. Volví a decir que no. Me contestaron que me lo triplicaban, me lo cuadruplicaban. No se les había ocurrido darme más dinero durante el primer año, cuando era evidente que lo necesitaba, de modo que les dije: "Me voy".»

La frase «me voy» capta bastante bien el espíritu independiente de la vida y el trabajo de Jim: tras dos décadas en el Instituto Nacional de Investigación Médica de Londres, en 1964 volvió la espalda a la investigación convencional y se

estableció como científico independiente, primero en una casa de campo con tejado de paja en Wiltshire y luego en Coombe Mill. «Soy un inventor», explicó. «Mi ciencia es intuitiva. Puedo ser más creativo en esta clase de entorno.» Durante años ha mantenido su familia y su investigación desarrollando y patentando unos treinta instrumentos analíticos y de control. El primero de ellos, el detector de captura de electrones, sigue siendo uno de los medios más sensibles para medir las sustancias químicas atmosféricas, incluyendo importantes contaminantes como los clorofluorocarburos (CFC).

Tras la cena, Jim me acompañó a la casa de invitados (un granero reconvertido), cuyo ocupante unas pocas semanas antes había sido Hugh Montefiore, antiguo obispo de Birmingham. Me sentí en buena compañía. «Nos vemos mañana temprano», dijo Jim. «Tenemos mucho de qué hablar.»

Cuando, dos años antes, me había embarcado en mi exploración de la relevancia de la nueva ciencia de la complejidad para las regularidades de la naturaleza, no supuse que me llevaría hasta Jim Lovelock, autor de la hipótesis de Gaia. Sabía que me llevaría a través de las complejidades del desarrollo embriológico y la evolución, así como a la dinámica de la extinción. Sospechaba que descubriría su huella en el funcionamiento de los ecosistemas. Y especulé que las sociedades complejas —el auge y la caída de las civilizaciones— también podían estar accionadas por el motor de la complejidad. Pero, ¿todo el globo? ¿La interacción íntima entre los mundos biológico y físico que, según Gaia, palpita como un único organismo? Debí de haberlo previsto. De manera que, cuando Stu Kauffman me describió un año antes el movimiento hacia el límite del caos de sus modelos coevolutivos como «mini-Gaia», provocó una de esas experiencias en las que uno exclama: «¡Claro!, ¿por qué no lo había pensado antes?».

Si gran parte de la naturaleza baila al son de los sistemas dinámicos complejos, entonces las consecuencias tienen que ser aparentes desde los organismos sencillos al modo en que funciona todo el planeta. Los fenómenos de la generación es-

póntanea del orden y la adaptación al límite del caos moldearían lo que vemos, con un nivel construido sobre otro, una jerarquía de efectos, con Gaia como expresión última. En caso de ser cierto.

Las pruebas que había visto hasta ese momento eran lo suficientemente fuertes como para animarme a proseguir, a dar el paso hacia Gaia. «Pero eso es absurdo», observaron algunos de mis amigos biólogos con una mezcla de regocijo y preocupación por el hecho de que pudiera estar perdiendo el contacto con la realidad. Intenté defender mi razón fundamental, la fuerza explicativa de los sistemas complejos adaptativos, así como la lógica de incluir Gaia en ese esquema. Me di cuenta de que me estaba alejando del territorio del saber biológico convencional y no me sorprendieron ni desanimaron sus miradas de desconcierto. «Bueno, por lo menos, diviértete», dijeron.

Antes de partir para Inglaterra, le pedí a Stu que me explicara con más detalles cómo pensaba que su modelo coevolutivo se reflejaba en Gaia. «No soy ningún experto en Gaia», dijo. «Pero, por lo que veo, Lovelock sostiene que los sistemas biológico y físico de la Tierra están estrechamente unidos formando un sistema homeostático gigante. Mi modelo coevolutivo es una indicación de que entidades en coevolución como las que él cita pueden controlar la estructura de sus paisajes, así como la extensión de su acoplamiento». ¿Te refieres a los paisajes de eficacia biológica, no a los paisajes físicos de verdad? «Sí, a los paisajes de eficacia biológica», contestó Stu. «Expulsas dióxido de carbono como residuo y la planta que tienes detrás expulsa oxígeno como residuo. ¿De dónde vino esa integración funcional? Y, a escala global, todo está equilibrado. ¿No es extraordinario?»

Pero, ¿hay algo más que una analogía cuando se habla de Gaia con el lenguaje de los sistemas complejos, cuando se piensa en una entidad autoorganizada y autorreguladora gigante?, pregunté. «No es irrazonable pensar que pudiera haber un atractor en la metadinámica del sistema», respondió Stu. «De modo colectivo, los agentes adaptativos hacen compatibles consigo mismos los mundos en los que viven y son llevados

a esa estructura característica, el límite del caos, en que sus intereses están mutuamente equilibrados. Eso es la homeostasis.»

De acuerdo, dije, ¿cómo descubro si Gaia vive o es sólo un producto de la imaginación de Jim Lovelock? «Tienes que saber si los sistemas están acoplados», contestó Stu tras unos segundos de reflexión. «Tienes que conocer la magnitud de los vínculos, porque si son cortos, no tienes un sistema global. Tienes que obtener una percepción de un sistema dinámico que tenga propiedades emergentes, propiedades que podrían conducir a mecanismos homeostáticos globales.» ¿Algo más? «Sí, también tienes que hablar con un buen ecólogo, alguien que sepa de comunidades ecológicas, no sólo de pares depredador-presa persiguiéndose por ahí.»

Coombe Mill es una armoniosa mezcla de encanto dieciochesco y tecnología del siglo XX. Jim estaba en el siglo XX cuando llegué a la casa tras el desayuno, por la mañana temprano, como habíamos convenido. «Entra, te enseñaré una cosa.» La habitación estaba llena de equipo informático, apenas quedaba espacio para que dos personas se sentaran y hablaran. Un establo reconvertido a unos cincuenta metros de la casa hacía las veces de taller, el lugar donde Jim inventa sus instrumentos analíticos. Esa habitación estaba destinada a otra clase de inventos.

«Mira», dijo Jim, señalando una pantalla de ordenador. «Si tengo un mundo carente de vida y aumenta la luminosidad solar, la temperatura global sube de modo estable». Una clara línea ascendente de unos cuarenta y cinco grados mostró el aumento de la temperatura. «Ahora mira lo que ocurre si pongo aquí algunas semillas de margaritas blancas y negras.» Otro conjunto de curvas apareció en la pantalla. Vi cómo empezaban a proliferar las margaritas negras mientras la luminosidad solar era todavía baja y, luego, empezaron a declinar a medida que el sol daba cada vez más calor. Al descender las margaritas negras, las margaritas blancas empezaron a multiplicarse. «Mira ahora la temperatura global», dijo Jim. «¿No es intere-

sante?» En lugar de un ascenso inexorable a medida que el sol calentaba el mundo, el gráfico de la temperatura mostró un escalón: hacia arriba, estable y, luego, de nuevo hacia arriba. «Muy al principio, cuando la luminosidad solar es todavía muy baja, la temperatura alcanza los veintitrés grados centígrados, que es el óptimo para el crecimiento de las margaritas, y permanece en ese nivel durante mucho tiempo, hasta que de pronto se dispara», explicó Jim. «Es el mundo de las margaritas.»

¿El simple hecho de tener esos dos tipos de margaritas sensibles a la luz y el calor del sol mantiene una temperatura estable? «Es un modelo muy sencillo, por supuesto, pero su mensaje es muy poderoso», replicó Jim. «¿Ves?, es un modelo de biología de poblaciones en el que las margaritas de diferente color compiten por el espacio en que crecer. Las margaritas negras tienen ventaja cuando la luz solar es débil, porque pueden atrapar el calor y calentar el planeta. Pero una temperatura demasiado elevada suprime el crecimiento y, por tanto, son las margaritas blancas las que tienen ventaja porque reflejan luz; aumentan el albedo del planeta. El resultado es que la temperatura se mantiene cerca del óptimo para el crecimiento de las margaritas, hasta que el sol se vuelve demasiado caliente y todo se colapsa.» Es como la homeostasis, ¿verdad? «Es homeostasis», contestó Jim. «Y es una propiedad emergente del sistema.» Jim pasó a mostrarme que el mismo efecto se daba incluso en presencia de una tercera especie de margarita (de color intermedio) que ocupaba espacio pero no contribuía a la regulación. El mundo de las margaritas, dijo, es resistente.

¿Pretende ser el mundo de las margaritas un modelo de Gaia?, pregunté. «No pretendía serlo cuando lo construí», contestó Jim. «Pero ha acabado encarnando la idea de Gaia mucho más de lo que había imaginado. Te contaré lo que sucedió.»

Las semillas de la hipótesis de Gaia se sembraron a principios de la década de 1960, cuando la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA) contrató a Jim como asesor en su búsqueda para descubrir si había vida en

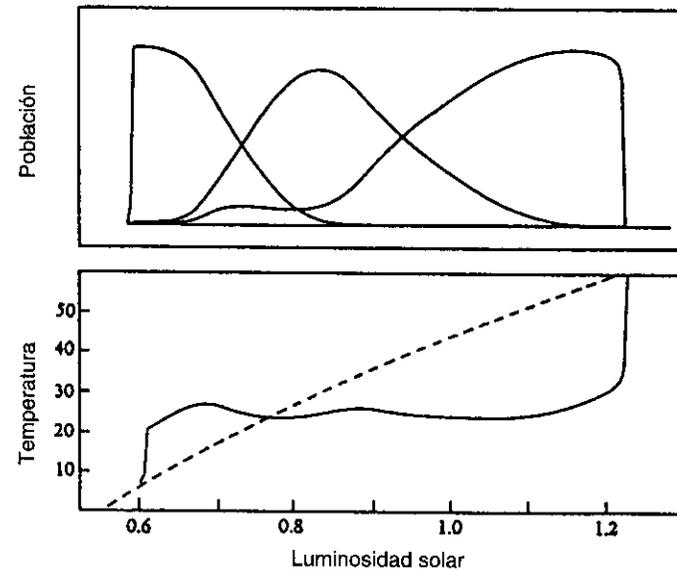


Figura 6. El mundo de las margaritas: el gráfico superior muestra los cambios en las poblaciones de margaritas negras (izquierda), margaritas blancas (derecha) y margaritas de color intermedio (centro) a medida que aumenta la luminosidad (eje horizontal). En el gráfico inferior, la línea ascendente de 45 grados muestra el aumento de la temperatura global que tiene lugar en ausencia de margaritas; la curva en forma de S muestra la temperatura global bajo la influencia de un mundo de margaritas: se mantiene relativamente estable cerca de los 22,5 grados centígrados, que es el óptimo para la margaritas. Cortesía de James Lovelock.

Marte. La idea de la NASA era buscar directamente signos de vida en la superficie del planeta: microscópicamente, buscando objetos en forma de microbios, y químicamente, buscando signos de metabolismo microbiano como los que los biólogos conocen en la Tierra. Jim consideró que ése era un enfoque poco seguro y buscó una visión más global. Si el planeta estaba muerto, razonó, su atmósfera estaría determinada sólo por la física y la química; estaría en equilibrio con la química de los minerales del planeta. Pero si había vida, por sencilla que fuera, explotaría sin duda la atmósfera para obtener materias

primas, con lo que modificaría su composición química. Un planeta vivo tendría una atmósfera diferente de la que resultaría del simple equilibrio con la química y la física de las rocas. Un argumento sencillo; una estrategia convincente; no hubo caso. La NASA eligió la vía del análisis químico y, cuando la sonda del Viking envió sus resultados en 1975, éstos fueron, en el mejor de los casos, ambiguos.

«En Marte no hay vida», me dijo Jim. «Lo supe por el análisis espectral de la atmósfera. Intenté decirselo, pero ellos no estaban interesados en oír lo que yo tenía que decirles.»

La tarea de intentar adivinar las características de un planeta vivo desde lejos cimentó en Jim un modo «deductivo» de pensar en la Tierra y su dinámica. «Para mucha gente, la imagen de la Tierra vista desde una nave espacial —una moteada esfera azul y blanca— fue una experiencia emocional y germinal, una mirada al planeta como un todo», dijo. «Ya había llegado a eso pensando sobre los gases atmosféricos y lo que indican de la actividad del planeta.» Luego, una tarde de 1965, Jim experimentó uno de esos saltos intuitivos que son para él la materia de que está hecha la ciencia. «Sabía que la composición de la atmósfera de la Tierra había permanecido estable a lo largo de grandes periodos de tiempo. También sabía que existía una producción continua de gases, sobre todo de oxígeno y dióxido de carbono. ¿Qué controlaba la estabilidad a largo plazo?, me pregunté.» El hecho de que la radiación solar haya aumentado en un 25 por ciento durante la historia de la vida en la Tierra hacía que la estabilidad atmosférica fuera más enigmática todavía.

«Mi intuición era que la vida proporcionó la mano controladora», dijo Jim, «en una asociación activa con el mundo físico, controlando la composición atmosférica y la temperatura global.» ¿Como en el mundo de las margaritas?, dije. «Sí, como el mundo de las margaritas, pero a una escala mucho más grande y compleja, por supuesto.» La principal preocupación científica de Jim, como ahora, era la química atmosférica y la invención de instrumentos analíticos, por cuyo trabajo había recibido el mayor galardón científico de Inglaterra, ser nombrado miembro de la Royal Society de Londres. Sin

embargo, en su mente había arraigado la noción de un control atmosférico global —de los mundos biológico y físico en estrecho mutualismo—, una preocupación por la que es visto con profundo recelo por sus colegas científicos. «Un día de 1969, estaba trabajando fuera de la casa y vino William Golding, que iba a dar un paseo. Le pregunté si podía ir con él.» ¿William Golding, el novelista? «Sí, vivía al lado. Eso fue en el pueblo de Bowerchalke, en Wiltshire. Durante el paseo me preguntó qué estaba haciendo y le hablé de mis ideas acerca de la homeostasis atmosférica. Golding había sido físico; mucha gente no lo sabe. La cuestión es que me dijo: “Para una idea tan grande necesitas un nombre grande. Tienes que llamarla Gaia”.»

Durante la siguiente media hora se produjo un gran malentendido, porque Golding pensaba en Gaia, la diosa griega Gaia o Gea, la Madre Tierra, mientras que Jim creyó que había dicho Gyre. «“Gyre” son grandes remolinos en el océano, autoorganizados, enormes, poderosos, y eso parecía razonable», dijo Jim. «Al final quedó claro que estábamos hablando de cosas diferentes, y apareció Gaia.» ¿No pensaste que bautizar una hipótesis científica sería a partir de una diosa griega podía ser un problema para tus colegas científicos? «No», admitió Jim. «Parecía una idea poderosa.»

Pero fue un problema. La hipótesis no sólo se extendió más allá de los límites de una única disciplina —siempre un obstáculo para la comprensión en el fuertemente compartimentado mundo de la ciencia—, sino que también parecía tener implicaciones teológicas, una noción de propósito encarnada en todo el sistema. En 1972, por ejemplo, con Lynn Margulis —bióloga actualmente en la Universidad de Boston— como aliada, Jim presentó así la hipótesis de Gaia: «La vida, o la biosfera, regula o mantiene por sí misma el clima y la composición atmosférica en un punto óptimo.» La expresión «por sí misma» lastró teológicamente la idea, como si implicara un propósito. De resultas, la mayoría de artículos sobre Gaia no pudieron llegar a la prensa científica convencional. El hecho de que Jim buscara otros medios para propagar su idea —es decir, a través de artículos en las revistas de divulgación cien-

tífica y en libros— sirvió para convencer a la mayoría de los científicos de que Gaia era, en realidad, acientífica.

Jim admite que algunos de sus escritos divulgativos eran un poco «poéticos». Por ejemplo, en su libro de 1979, *Gaia: una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, escribió que la llegada del *Homo Sapiens* había cambiado la naturaleza de Gaia: «Ahora por medio de nosotros está despierta y es consciente de sí misma. Ha visto el reflejo de su cara a través de los ojos de los astronautas y las cámaras de televisión de la nave espacial en órbita. Nuestras sensaciones de asombro y placer, nuestra capacidad para el pensamiento consciente y la especulación, nuestra curiosidad y nuestro impulso implacables son suyos para que los compartamos.» Eso sí que es poético, dije. «Es cierto», dijo reflexivamente. «En realidad soy un científico duro, y eso suena a herejía.» Tras una breve pausa, dijo: «Maldita sea, cuando tienes una buena idea en ciencia se trata de pura intuición, y eso es a menudo muy difícil de describir. Si hubiera sabido entonces lo que ahora sé, no habría escrito eso. Pero me alegro de que causara polémica. Lo peor que podía pasar era que la gente hiciera caso omiso de ella.»

No fue así. Muchos la atacaron con fuerza. «Creación mítica pseudocientífica», así la definió el biólogo británico John Postgate. Richard Dawkins afirmó que la hipótesis estaba fatalmente sesgada, algo que «le habría sido evidente en el acto [a Lovelock] si se hubiera preguntado por el nivel de selección natural exigido para producir las supuestas adaptaciones de la Tierra». Como sólo hay un planeta Tierra, argumentó Richard, no había posibilidad de competencia entre otros cuerpos similares a él y, por lo tanto, ninguna posibilidad de selección para dar lugar a la clase de mecanismos homeostáticos que constituyen Gaia. Punto. Ford Doolittle, genético de la Universidad de Dalhousie, Canadá, decía en una crítica del libro de Lovelock de 1979: «No es nuevo sugerir que la vida ha cambiado profundamente la Tierra, pero sí es nuevo y atrevido sugerir que lo ha hecho de un modo adaptativo aparentemente deliberado, con el fin de asegurar su propia existencia».

Las críticas calaron hondo, sobre todo la sugerencia de que Gaia tenía un propósito. «Ni Lynn Margulis ni yo hemos propuesto nunca una hipótesis teleológica», dijo Jim. «Es cierto que algunas de las cosas que he escrito han sido imprecisas, y ello fue ferozmente interpretado como indicio de un propósito en Gaia. Las críticas de Doolittle y Dawkins me arredraron. Estuve deprimido durante un año. Necesitaba poder demostrar a los demás lo que sabía de forma intuitiva de Gaia: que la homeostasis emergía como propiedad del sistema.» Como inventor de sistemas de control, Jim posee una gran intuición sobre ellos, pero repite a menudo que suelen ser difíciles de explicar a los demás. Eso le preocupó mucho. «Entonces, en las Navidades de 1981, la idea acudió a mi mente, completamente formada como ocurre con frecuencia con estas cosas», me contó, recordando con claridad el alivio que sintió en ese momento. «Todo me pareció tan obvio. Me senté y escribí el programa en una hora.» ¿El mundo de las margaritas? «Sí, el mundo de las margaritas.»

Pero el mundo de las margaritas, dije, parece un sistema muy simple. ¿Demuestra realmente la validez de Gaia? «Recuerda lo que estaba intentando demostrar. Afirmaba que los mundos biológico y físico estaban estrechamente unidos, y que el biota opera de tal modo que asegura condiciones físicas óptimas por sí mismo. Tenía en mente un sistema biológico que trabaja según las reglas evolutivas convencionales y que, como todos los sistemas complejos del universo, tiene una tendencia a producir estabilidad y a sobrevivir. Necesitaba mostrar que la estabilidad emerge de las propiedades del sistema, no de alguna mano intencional. El mundo de las margaritas hace eso.»

Le pregunté si podía estar seguro de que mundos más complejos serían también estables. «Espera un momento», dijo Jim, mientras buscaba en el directorio del ordenador hasta encontrar lo que quería. «Este tiene veinte margaritas, de diferentes tonos entre el blanco y el negro. Una estabilidad enorme.» Parecía muy convincente. «Puede ser tan complejo como quieras», dijo Jim, ofreciendo un desafío. ¿Y diferentes niveles tróficos, con herbívoros y carnívoros? «¿Te parece bien veinte especies de margaritas, cinco de conejos y tres de zo-

ros?» De acuerdo, dije. Eso representaría tres niveles tróficos: productividad primaria (las margaritas), herbívoros (los conejos) y carnívoros (los zorros).

Todo un desafío para un modelo de biología de poblaciones, ¿no es cierto?, dije. «Bueno debo admitir que ya había generado las diversas formas del mundo de las margaritas antes de leer gran parte de la bibliografía», dijo Jim con una risa ahogada. «Suelo hacerlo, y es una suerte. De haber leído la bibliografía habría descubierto que trabajar con modelos como éste es prácticamente imposible con más de unas pocas especies, porque se vuelven caóticos. Quizá no lo habría intentado de “saber” que no funcionaría.» Pero funcionó. De nuevo la biosfera informática —con margaritas, conejos y zorros— interaccionó con el medio ambiente físico, y el resultado fue la regulación de la temperatura. «Mira lo que pasa si perturbo el sistema matando algunas margaritas», dijo Jim. La población de margaritas descendió brevemente, seguida de las poblaciones de conejos y zorros, brevemente. También se produjeron, brevemente, oscilaciones en el de otro modo estable gráfico de la temperatura. «¿Lo ves? El sistema puede soportar las perturbaciones», dijo Jim. «En mis sistemas lo que encontramos es estabilidad, no caos.»

¿Por qué funciona el mundo de las margaritas de este modo, cuando todos los mejores biólogos de poblaciones «saben» que no puede ser así?, pregunté. «La mayoría de los ecólogos teóricos hace caso omiso en sus modelos del entorno físico y químico, y ésta es una parte muy importante de los mundos de las especies. Voy a enseñarte algo.» Sacó un libro de Alfred Lotka, *The Elements of Physical Biology*, publicado en 1925. Lotka es el padre de la biología de poblaciones, y el clásico ciclo de Lotka-Volterra describe la fluctuación periódica de las poblaciones en simples pares de depredador-presa. «Todo el mundo conoce a Lotka, pero parecen haber olvidado esto», dijo Jim. Me señaló un breve pasaje:

«Es habitual discutir la “evolución de una especie de organismos”. A medida que avancemos, veremos muchas razones por las que tener constantemente en cuenta la evolución del

sistema como un todo (organismo más entorno). Quizás, a primera vista, parezca que esto sopondrá un problema más complicado que la consideración de sólo una parte del sistema. Pero resultará evidente, a medida que avancemos, que las leyes físicas que rigen con toda probabilidad la evolución adoptan una forma más sencilla cuando se refieren al sistema como un todo que cuando lo hacen a cualquiera de sus partes».

«¿Interesante?», preguntó Jim. Mucho, contesté. «Lotka sabía que el mundo físico era una parte vital de la ecuación, pero carecía del equipo informático para hacer ni siquiera el mundo de las margaritas más simple, y nadie lo intentó hasta que yo lo hice.»

Así pues, le pregunté, ¿ha logrado el mundo de las margaritas lo que esperabas, es decir, persuadir a los críticos de que Gaia carece de un motivo intencional? «Es difícil de saber», dijo Jim encogiéndose de hombros. «No puedo publicarlo en una revista científica. Lo he intentado en *Nature* dos veces, pero los críticos fueron muy despectivos. No creo que estén preparados para asimilar mis resultados e intentan fingir que es inútil.» (Jim tiene razón en esto: le pregunté a Robert May, destacado ecólogo teórico de la Universidad de Oxford, su opinión sobre el mundo de las margaritas. «Una nota marginal en una empresa más profesional», dijo. Richard Dawkins me dijo que el mundo de las margaritas «produce una ilusión de control».) «De modo que he tenido que publicar el mundo de las margaritas en mi segundo libro», continuó Jim. «He hablado en congresos y encuentro a los climatólogos mucho más receptivos ante el concepto global. Los climatólogos son menos reduccionistas que los biólogos y están más familiarizados con los sistemas complejos. Por eso lo comprenden mejor.»

¿Ilusión o realidad? Veía, mientras Jim me la describía, que la hipótesis de Gaia satisfacía algunos de los criterios de los sistemas complejos adaptativos que Stu Kauffman había esbozado. De modo específico, la emergencia de mecanismos homeostáticos que Stu había descrito como una posible consecuencia de un sistema adaptándose al límite del caos. Sin

duda esto es suficiente para convencer a los científicos serios de que tomen en serio la hipótesis, pensé. Lo más importante, sin embargo, era que Gaia debía tener algún poder predictivo. ¿Lo tiene?, pregunté a Jim. «Ya sabes lo que decía William James del destino de cualquier idea nueva: “Primero, es absurdo; luego quizás; y, por último, lo hemos sabido siempre”. En algunas cosas, Gaia está en la segunda etapa, en otras está en la tercera, así que algunas de las predicciones tienen que ser correctas.»

Por ejemplo, la hipótesis hablaba de largos pero fuertes vínculos entre los bosques tropicales y el clima: sin lluvia no hay árboles, pero, también, sin árboles no hay lluvia. «Y hoy en día es difícil coger un periódico y no leer algo sobre esta clase de relación», dijo Jim. «Los mecanismos biológicos para hacer disminuir los niveles atmosféricos de dióxido de carbono, y enfriar así el planeta, son consistentes con Gaia. Y la teoría de Gaia también condujo a la identificación de un posible control climático global mediante la emisión de sulfuro de dimetilo por parte de los océanos. Esto puede llegar a ser tan importante como los efectos invernadero del dióxido de carbono y el metano.»

Jim habló de la *teoría* de Gaia, según observé, no de la *hipótesis* de Gaia. En ciencia, la distinción es importante. Una hipótesis puede concebirse como un holgado marco de ideas, algo para guiar la dirección de las preguntas. Cuando las respuestas a las preguntas empiezan a respaldar la hipótesis, el marco se fortalece y acaba mereciendo la denominación de *teoría*. Hay una teoría de la gravedad, por ejemplo, y una teoría de la evolución. Pero, ¿una teoría de Gaia? ¿Es eso lo que querías decir?, pregunté. «Exacto», replicó Jim con seguridad. «Con las observaciones hechas en el mundo real y la fuerza del mundo de las margaritas, creo que Gaia se merece ser llamada teoría. ¿No crees?»

Era ya casi la hora del obligado paseo de media mañana. «Quiero enseñarte sólo una cosa más antes de que salgamos», dijo Jim. Sacó un mundo de las margaritas poblado por un centenar de especies, pero esta vez con la luz solar manteniéndose constante. «Mira lo que ocurre con el número de es-

pecies.» A medida que pasaba el tiempo, las especies de margaritas empezaron a disminuir en la población global, hasta que el sistema llegó a un equilibrio con sólo dos. «Ahora voy a aumentar la radiación solar en un 4 por ciento, lo cual es equivalente al cambio entre los periodos glacial y posglacial que la Tierra experimentó hace 10 000 años.» Al ascender la temperatura, se produjo una tremenda explosión en el número de especies, un estallido de la biodiversidad.

«¿Te recuerda esto algo?», preguntó Jim. Conocía mis intereses y estaba seguro de mi respuesta. Bueno, me aventuré, parece como una pauta de estasis y luego cambio rápido, de equilibrio puntuado. «¿Verdad que sí?», dijo. «Y, sin embargo, la teoría evolutiva convencional predice un cambio gradual.» Si el sistema ha alcanzado un punto de reposo en el límite del caos, una sacudida medioambiental podría empujarlo hasta el régimen caótico, dije pensativamente, y se podría predecir una avalancha de cambio, un estallido de especiación. Interesante, dije. Muy interesante. «Vamos, es hora ya de dar ese paseo.»

Sabía que tenía que hablar con Stuart Pimm. Ecólogo en la Universidad de Tennessee, Knoxville, Stuart ha escrito recientemente un libro titulado *The Balance of Nature*, que establece muy bien el terreno para una nueva comprensión del mundo de la naturaleza. «Es una expresión difusa», dijo refiriéndose al título, «pero la mayoría de la gente entiende que se refiere a alguna capacidad de la naturaleza para restaurarse a sí misma tras algún tipo de perturbación. Y esa capacidad es concebida como surgiendo del interior de la “naturaleza”, los procesos ecológicos en el seno de las poblaciones, de las interacciones entre las especies en una comunidad y entre la comunidad y el entorno físico.»

La expresión ha tenido también connotaciones místicas, ¿verdad?, pregunté. «Es cierto. Hubo una moda hace un tiempo de lo que yo llamo ecología mística, la noción de todo tipo de propiedades emergentes de la naturaleza que no podías comprender, que no había que comprender y, en caso de que

pudieras, ya no se consideraban importantes. Desconfío de las propiedades emergentes que no puedo comprender.»

Caminábamos por las estribaciones de los montes Great Smoky, al sur de Knoxville. A principios del siglo pasado, los colonos se establecieron en esta zona y plantaron maizales entre los antiguos bosques de hoja caduca. Regada con agua abundante procedente de las montañas, que alcanzan los tres mil metros de altitud, la tierra era productiva. Hasta hace medio siglo, creció ahí una pequeña comunidad, Forks of the River, con veinticinco granjas, una iglesia, una escuela, una tienda, una oficina de correos, un molino y un aserradero. Desde entonces, el lugar ha formado parte del Parque Nacional de los Montes Great Smoky, y un ojo no entrenado tendría dificultad en distinguir las huellas de su pasado reciente, ya que el bosque se repara a sí mismo.

Había explicado a Stuart mi interés en explorar el grado en que la nueva ciencia de la complejidad podría ser relevante para la naturaleza, para las regularidades importantes de la biología. La estructura y el comportamiento de las comunidades ecológicas constituyan una buena parte de esta empresa, no sólo como simples componentes potenciales de Gaia, sino por derecho propio. Pregunté si era razonable pensar en las comunidades ecológicas como sistemas dinámicos complejos. Nos habíamos detenido en un pequeño río que los colonos habían utilizado como medio de transporte antes de construir sencillos caminos. Los árboles cercanos eran de diámetro pequeño, un signo de que estábamos viendo una tierra que antaño había sido despejada para el cultivo. Los bosquecillos de tuliperos de Virginia y pinos blancos, así como la madre-selva, son indicios del bosque en proceso de reparación. «Esa pregunta tiene una respuesta muy larga», dijo Stuart, «y la veremos en parte. Pero la respuesta corta es un sí categórico.»

No es ésa la concepción convencional de la ecología moderna, ¿verdad? ¿No se basa gran parte de la ecología en la idea de los equilibrios simples y en que el comportamiento de las especies en los ecosistemas es predecible en esa clase de marco? «Sí. Pero, para mí, es evidente que tenemos que con-

cebir las especies como engastadas en sistemas dinámicos complejos, y eso proporciona una visión muy diferente del mundo. Durante los próximos cinco años la gente va a decirme que estoy completamente equivocado. Luego, cuando la idea haya conseguido calar, me dirán que ya lo sabían.»

Stuart no es un caso frecuente entre los ecólogos académicos. Es un teórico destacado y un entusiasta trabajador de campo. También se apasiona por la restauración y la conservación ecológicas. Ni la teoría ni la práctica dominan su visión del mundo; ambas se funden en una unión creadora.

Le pregunté qué indicios de los ecosistemas apuntan a que la dinámica de los sistemas complejos subyace a gran parte de la naturaleza. «Las redes tróficas, por ejemplo», dijo. «Puedes considerar las redes tróficas como una propiedad emergente de los sistemas complejos.» Las comunidades ecológicas pueden estar formadas por sólo un puñado de especies, o por muchos centenares, y pueden incluir toda la gama de roles biológicos: productores primarios, como plantas y algas, herbívoros, carnívoros, parásitos, etcétera, viviendo todos en una red de compleja interdependencia. Darwin, al final de *El origen de las especies*, retrató la interconectividad de las comunidades ecológicas en un pasaje célebre: «Es interesante contemplar un enmarañado ribazo cubierto por muchas plantas de varias clases, con aves que cantan en los matorrales, con diferentes insectos que revolotean y con gusanos que se arrastran entre la tierra húmeda». Las redes tróficas, tal como existen en la naturaleza, son el resultado de quién come a quién y, tal como son elaboradas sobre el papel por los ecólogos, representan un mapa de carreteras a través del enmarañado ribazo».

«Lo notable de las redes tróficas es que sólo tienen unas pocas características principales», dijo Stuart, «como la longitud de las cadenas tróficas (una progresión de quién come a quién, desde el nivel inferior de la red al superior) y la relación entre especies depredadoras y presas. Ves pautas comunes allá donde mires.» De modo global, hay un equilibrio entre el número de especies de la comunidad, así como el esquema y la fuerza de los lazos entre ellas. El hecho de que estas marcadas pautas se den allí donde existe el potencial para una

desconcertante diversidad indica algo profundo en la organización de las comunidades ecológicas. Mientras Stuart describía todo esto, recordé el orden que emerge de las redes booleanas de Stu Kauffman. ¿Hay algo fundamentalmente similar entre tales redes y el orden que encuentras en las redes tróficas?, pregunté a Stuart. «Sí, creo que es razonable.»

Continuamos nuestra caminata y pasamos por la cabaña de John Ownby, que el servicio del parque rehabilitó en 1963, usando tulipero de Virginia y pino blanco. Una diminuta estructura a la que el señor Ownby añadió un anexo lateral para acomodar a su creciente familia en las primeras décadas del siglo XIX. Cerca, está el manantial del que dependían los Ownby y, alrededor de la cabaña, hay altos nogales, una fuente de preciadas nueces. Durante un breve lapso en la historia del bosque, el señor Ownby y los demás colonos impusieron la ecología humana a la gran comunidad ecológica de un antiguo bosque de hoja caduca.

Stuart siguió hablándome de las estructuras de redes tróficas, cómo influyen en el comportamiento de las especies individuales y por qué intentar predecirlo es a menudo tan difícil. «Te pondré un ejemplo sencillo», dijo. «Los ecólogos estudian con frecuencia los pares depredador-presa, y se podría imaginar que si se eliminara el depredador de una comunidad la presa se beneficiaría, ¿no?». Estuve de acuerdo. «Bueno, imagina que el depredador de la presa A también come una segunda especie, la presa B. Imagina que A y B son competidores; comen las mismas hojas, por ejemplo, o anidan en los mismos árboles, algo de ese estilo. De modo que, si se elimina el depredador, la especie A puede salir perdiendo porque sufrirá una competencia mayor de la especie B.» ¿Eso es un ejemplo sencillo? «Sí, casi siempre las ramificaciones son mucho más complejas», dijo Stuart. «A medida que nos familiarizamos con las complejidades reales del comportamiento, notamos oleadas cada vez más largas que surgen de lo profundo de la red trófica» Es una bonita imagen, dije, como barcas que se bambolean en un mar agitado por corrientes poderosas pero invisibles. Háblame de las pautas que ves. «Sí, pero antes subiremos hasta Newfound Gap.»

Estábamos a principios de mayo y, al subir a más de mil seiscientos metros, dejamos atrás una verde primavera, con la temporada de los cornejos en sus últimos y gloriosos momentos, para volver de modo fugaz al invierno. Los árboles de hoja caduca aún no habían brotado y el único verde que se veía era el de las coníferas, que, desgraciadamente, mostraban signos del daño causado por la lluvia ácida. Sin embargo, la vista era espectacular, como Stuart había prometido: los picos de los montes Great Smoky a nuestro alrededor eran la culminación de las tierras altas de los Apalaches. Como ornitólogo apasionado desde pequeño, Stuart no paraba de identificarme pájaros, casi siempre a partir del canto. «Incluso con esta clase de follaje suele ser difícil verlos.»

Stuart me contó que durante la última década más o menos, él y varios colegas habían pasado de estudiar las propiedades de las redes tróficas a buscar el modo en que se combinaban en la naturaleza. De esa empresa habían surgido varias ideas notables sobre la dinámica de las comunidades ecológicas.

Todo empezó cuando Stuart y Mac Post intentaron construir comunidades ecológicas en un modelo informático. Fueron añadiendo las especies una tras otra (plantas, herbívoros y carnívoros), cada una de ellas definida matemáticamente con una pequeña serie de comportamientos, como la cantidad de territorio que necesita de modo típico un individuo, la cantidad y la clase de alimento, así como qué otras especies podrían ser sus presas o depredadores. Algunas especies consiguieron penetrar en el creciente ecosistema, otras fracasaron. «Obtuvimos dos resultados», explicó Stu. «Primero, que tenían éxito hasta unas doce especies cualesquiera, más o menos, siempre que fuera ecológicamente sensato: no se puede poner herbívoros si antes no hay plantas, por ejemplo.» ¿Quieres decir que una especie puede invadir con éxito una comunidad cuando ya tiene sólo unas pocas especies? «Sí, las comunidades con pocas especies son fáciles de invadir. El segundo resultado tiene dos partes», continuó Stuart. Déjame adivinar,

dije. ¿Las comunidades con muchas especies son difíciles de invadir? «Exacto, pero es más interesante que eso, y nos dejó perplejos durante mucho tiempo. Descubrimos que las comunidades recién establecidas con muchas especies son más difíciles de invadir que aquellas con pocas especies, pero que el grado de dificultad es aún mayor en las comunidades maduras.»

Había leído el año anterior un artículo de Ted Case, un ecólogo de la Universidad de California, San Diego, en el que mostraba un fenómeno similar en un modelo informático de ecosistema. Decía que las interacciones entre especies de una comunidad crean «una red protectora invisible» que tendía a repeler a los invasores potenciales. Pregunté a Stuart si ése era el mismo tipo de fenómeno que el de sus primeros modelos. «Sí», contestó. «Y la pregunta es: ¿cuál es la naturaleza de la red protectora?»

Antes de que entremos en eso, dije, estás hablando de modelos informáticos, ¿verdad? «Sí.» Bueno, ¿encajan con el mundo real?, pregunté. «Te hablaré de Hawaii», contestó Stuart. Durante unos tres meses cada año, Stuart hace trabajo de campo en Hawaii, en la selva tropical, donde la precipitación anual sobrepasa la espectacular cota de los 9000 mm. (Eso colocaba en una modesta perspectiva mis protestas sobre la selva tropical costarricense de Bill Ray.) Stuart conoce bien el terreno, sobre todo el trayecto de tres días desde la civilización hasta su lugar de estudio.

«En Hawaii se han introducido más especies de plantas y pájaros que en ninguna otra parte del mundo», explicó Stuart. «Pero hay dos mundos ecológicos separados. Está la región de las tierras altas, que todavía está intocada, con plantas y animales nativos. Relativamente pocas especies la han invadido, y eso representa para mí la comunidad persistente, la comunidad establecida desde hace tiempo que resiste la invasión. Y está la región de las tierras bajas, en la que la colonización humana ha perturbado las comunidades establecidas y las ha hecho vulnerables a la invasión. Es como las comunidades inmaduras de nuestros modelos. A menudo es desconcertante ir caminando entre la vegetación exuberante, la selva tropical de

las tierras bajas, y oír un “swit.. swit... swit”; piensas: “Debe de ser un pájaro exótico” y, al final, ves posado en un árbol típico de la selva tropical lleno de lianas y epífitos un cardenal común, como los que hemos visto esta mañana.»

Los modelos de comunidades ensambladas de Stuart y Mac consumían grandes cantidades de tiempo de ordenador y producían grandes cantidades de resultados. «El trabajo de un verano podía apilarse en tres metros de altura», dijo Stuart. «Nos sorprendimos de que las comunidades maduras fueran más persistentes que las recién establecidas, que resistieran con mayor eficacia la invasión. Pensamos que quizás había en marcha un proceso de selección mediante el cual sólo podían penetrar con el tiempo las mejores especies, las más preparadas.» ¿Qué quieres decir con las mejores especies, las más preparadas? «Las plantas con un mayor índice de producción, los herbívoros capaces de conseguir más alimento, los carnívoros más rápidos, ese tipo de cosas», respondió Stuart. «Parecía plausible, pero no pudimos confirmar nuestros datos.»

Mientras tanto, Jim Drake, ecólogo en la Universidad de Purdue pero en la actualidad colega de Stuart en Knoxville, estaba trabajando en el mismo problema. Jim empezó con un grupo de plantas, herbívoros y carnívoros, 125 especies en total, y dejó que el ordenador eligiera cada vez las especies individuales para una posible entrada en una comunidad ensamblada. Si la especie fracasaba la primera vez, podía tener una segunda oportunidad. Como en el modelo de Stuart y Mac, al final emergió una comunidad extremadamente persistente, con unas quince especies. A continuación, Jim fue más allá y descubrió dos importantes y fascinantes resultados.

Primero, si empezaba de nuevo con el mismo grupo original de especies, el resultado era otra vez una comunidad extremadamente persistente, aunque con una composición diferente de la primera. Volvió a intentarlo una tercera vez, con el mismo resultado: una comunidad persistente, diferente de las otras dos. «Jim produjo muchas comunidades persistentes diferentes», me contó Stu. «Y te dirá que no había nada particularmente especial en las especies en sí; no eran en ningún modo particularmente mejores que sus competidoras. Lo espe-

cial era la dinámica de las propias comunidades persistentes. La mayoría de las especies podía convertirse en miembro de una comunidad persistente, dadas las circunstancias correctas. No es posible encontrar propiedad más emergente para una comunidad ecológica.» La propiedad global de la persistencia, surgiendo de la interacción entre especies y sin especies particularmente especiales. Sí, es un maravilloso ejemplo de emergencia, dije.

«El segundo resultado es aún más sorprendente», dijo Stuart. «Coge una de esas comunidades persistentes con sus, pongamos, quince especies. Ahora reensambla la comunidad desde el principio utilizando sólo esas quince especies, y te encuentras con que no funciona, al margen del orden o la combinación de órdenes en que lo intentes. Sencillamente no puedes volver a componer la comunidad una vez la has separado. Lo llamo el efecto Humpty Dumpty.» Una hermosa imagen, dije. Pero, ¿cómo la explicas? «Jim no lo sabía y yo tampoco. Y luego Stu Kauffman vino a Knoxville a dar una charla sobre sus redes booleanas y sus relieves adaptativos rugosos y me dije: “Eso es. Aquí encontraremos la respuesta”.»

Mientras que para Stu las redes booleanas producían diferentes estados genómicos, para Stuart se convirtieron en la presencia o ausencia de especies en una comunidad. «Para nosotros fue un salto intelectual, no grande, pero sí crucial», dijo Stuart. «Enseguida pudimos ver lo endiablidamente complejas que eran nuestras comunidades en términos de transición de un estado a otro.» El gran avance se produjo cuando Stuart vio a partir del análisis de las redes booleanas que algunas de las transiciones deseadas para conseguir reensamblar una comunidad persistente no podían ocurrir. Era el viejo problema «desde aquí no puedes llegar hasta allí» escrito en matemáticas superiores y esclareciendo un importante enigma ecológico. «Eché a correr por el pasillo y golpeé la puerta de Jim gritando: “¡He encontrado a Humpty Dumpty!”», recordó Stuart con una mezcla de hilaridad y triunfo.

Era una idea emocionante, pero difícil de captar. Pregunté a Stuart si estaba afirmando que las comunidades persistentes pueden ensamblarse sólo si, camino de ellas, otras especies

entraban y salían de la comunidad, como escalones hacia un estado más estable. «Sí», dijo. «Pero te pondré otra imagen. ¿Ves los picos que nos rodean?» Sí. «¿Ves cómo entre los picos no pueden verse los valles por culpa de la neblina y las nubes bajas?» Sí. «Pues a eso se parece nuestro ensamblaje.» Hermosa imagen, concedí, pero ¿qué significa?

«Cuando desmontamos nuestro modelo de comunidad ensamblada y utilizamos la idea de paisaje rugoso de Stu, descubrimos varias cosas sorprendentes. Primero, que incluso el ensamblaje aleatorio nos daba cierto grado de orden que yo no esperaba. Y, segundo, que las comunidades se comportaban como si escalaran picos adaptativos. No podemos decir gran cosa de lo que ocurre en los valles, pero más arriba, así es la vista. Esta es la imagen de los Smokies aquí, picos que sobresalen entre las nubes.» ¿Es legítimo hablar de comunidades escalando picos adaptativos, haciéndose más aptas? «No, porque no podemos definir la eficacia biológica para una comunidad», replicó Stu. «Pero, en lugar de vagar perdidas, las comunidades escalan enseguida los picos y eso representa los estados persistentes, muchos.» ¿Y una vez en un pico local, no se puede ir fácilmente a otro? «Eso es. ¡Humpty Dumpty vive!»

Había esperado encontrar alguna huella de la dinámica de los sistemas complejos en las comunidades ecológicas, pero no estaba preparado para lo que Stuart me contó. La emergencia estaba en todas partes, no de forma misteriosa sino como resultado de la interacción local. Tal como había dicho, la respuesta a mi pregunta original era un sí categórico. La ecología de la comunidad había demostrado ser extraordinariamente difícil de descubrir por medio del análisis convencional y la razón era en ese momento obvia: la dinámica compleja es difícil de penetrar. Pero, en cuanto empiezan a concebirse las comunidades ecológicas en el contexto de los sistemas dinámicos complejos, aparecen las pautas.

Había una regularidad más por la que quería preguntar. Has hablado con Stu Kauffman, dije. Conoces su interés por

el límite del caos y la criticalidad autoorganizada. ¿Ves algún signo de eso en tus sistemas? «No hace mucho, Jim Drake me mostró más datos sobre lo que ocurría cuando perturbaba sus comunidades persistentes», contestó Stuart. «Miré los datos, que mostraban una amplia gama de episodios de extinción, y dije: “Jim, ¿has oído hablar de la criticalidad autoorganizada?”. No había oído hablar. Así que le expliqué: “Apuesto lo que quieras a que si representamos esto gráficamente nos sale una ley exponencial”.» Stuart tenía razón. Eso significa que la conectividad en el interior de las comunidades tiene que ser considerable, ¿verdad? «Tiene que serlo, de lo contrario las avalanchas de extinciones no se propagarían por ellas.» Stu Kauffman estaría encantado.

Le pregunté a Stuart qué implicaba eso para las comunidades ecológicas reales. «Es difícil conseguir los datos deseados de las comunidades naturales», se lamentó Stuart. «Pero podemos decir que las pautas de las redes tróficas que vemos en nuestros modelos de comunidad se parecen mucho a las que se han hecho para las comunidades naturales, con lo cual eso se puede considerar sugerente.» ¿Como para sugerir que las comunidades naturales se mueven durante el ensamblaje hacia un estado crítico, el límite del caos? «Si me obligas a ser rotundo, tengo que decir que sí.»

Con eso empezó nuestro descenso, caminando de nuevo entre bosques de pinos marcados por la lluvia ácida. «Quién sabe de dónde viene», suspiró Stuart. El ejemplo que teníamos delante de interacción hostil entre los mundos físico y biológico me recordó una frase que había leído no hacía mucho en uno de los artículos de Stuart. Cuando dijiste: «No hay una diosa Gaia», ¿qué querías decir? «Quería decir que no había “algo” externo que controlara la ecología global.»

El artículo describía el nuevo trabajo sobre ensamblaje de comunidades en paisajes rugosos; Stuart y su colega Hang-Kwang Luh escribían: «Parece *como si* hubiera algo que empujara el conjunto hacia los picos del paisaje y *como si* hubiera algo semejante a la eficacia biológica.» ¿De modo que afirmáis que, hagan lo que hagan las comunidades, lo hacen como resultado de la dinámica interna, no en respuesta a algo

externo? «Sí.» ¿Concebís propiedades emergentes en una escala global capaces de producir homeostasis de la variedad de Gaia? «Si es eso lo que Lovelock ha estado diciendo, para mí resulta bastante oscuro», replicó Stuart. «Lo he oído hace poco y francamente me pareció que estaba cerca de hacer un llamamiento al misticismo.»

Le dije a Stuart que había visitado a Lovelock hacía poco y que él estaba convencido de que cualquier misticismo que se le asociara era producto de la traducción del mensaje, no del propio mensaje. También dije que la clase de propiedades emergentes que él, Stuart, y sus colegas estaban descubriendo en las comunidades ecológicas parecían ser del mismo cariz que el mecanismo que Lovelock tenía en mente cuando se vinculaban con los sistemas físicos. O, como habría dicho Stu Kauffman, las entidades individuales del sistema persiguen de forma miope sus propios fines, y el resultado es el beneficio colectivo.

¿Por qué no te pones en contacto con Lovelock?, sugerí a Stuart. Quedarías sorprendido. «Sí», dijo. «Podría hacerlo.»

Coombe Mill está situado en un pedazo de tierra estrecho y alargado de unas catorce hectáreas, la atraviesa un kilómetro y medio del río Carey. Desde que se trasladaron, Jim y su familia han plantado más de veinticinco mil árboles, fresno, saúco, haya y roble. La intención es restaurar la tierra para que vuelva a ser como era antes de que la deforestación de la Edad del Hierro arrasara toda la región, incluyendo Dartmoor. «Podemos caminar cinco kilómetros si subimos hasta allí, siguiendo la antigua vía del ferrocarril y volviendo por el río», dijo Jim dando muestras del placer que le produce su caminata diaria.

Le pregunté si estaba preocupado por el hecho de que la gente reaccionara de manera negativa al modo en que solía discutirse sobre Gaia. «Hay una ingente cantidad de bibliografía que se supone que trata de Gaia, esas cosas New Age. Es desechable al ciento por ciento. Pero, ¿no te refieres a eso?» No, dije. Me refiero a tus libros y artículos, el material a par-

tir del cual la gente ha inferido un propósito en Gaia. «Reconozco que a veces uso palabras que irritan a los biólogos», empezó. «Los biólogos han sostenido largas batallas contra el vitalismo, el animismo, todo lo que huele a algún tipo de fuerza más allá de la mecánica inmediata del sistema. De modo que cualquier cosa que suene a holística —de por sí, una palabrota— se considera sospechosa. Yo no tengo una reacción instintiva contra palabras como ésa.»

Habíamos llegado a la antigua vía del ferrocarril, desprovista desde hacía tiempo de raíles. En Inglaterra, como en todas partes, las vías del ferrocarril albergan flores silvestres que han desaparecido en otros lugares. Por desgracia, febrero en Inglaterra es una época demasiado temprana para las flores silvestres, excepto para algunos tojos, de brillantes flores amarillas contra las hojas verde oscuro. «¿Sabes lo que dicen los lugareños del tojo?», preguntó Jim. «Cuando el tojo está en flor, es el tiempo de los besos» Se echó a reír. «El tojo siempre está en flor.»

«Pero me habías preguntado sobre el lenguaje y Gaia», continuó Jim. «Te contaré una historia. Hace unos años hubo un debate en la Sociedad Linneana. Yo hablé a favor de Gaia y Brian Clark en contra. Brian es el secretario biológico de la Royal Society. Soltamos nuestros discursos, se votó, y el resultado fue a favor de Gaia, aun cuando el público estaba formado mayoritariamente por biólogos. Brian me dijo despues: “Me gustaría saber de qué estás hablando, pero no hablas nuestro lenguaje”.» Jim hizo un pausa, sonrió y dijo: «Algún día lo entenderá».

Villa Serbelloni está situada en un promontorio que llega hasta el lago Como, en Italia. Con una historia que se remonta al siglo I, cuando Plinio el Joven tuvo ahí una villa, la localidad tiene una magnífica vista del lago, resaltada por los elevados picos de los Alpes cercanos. En 1959, la actual villa fue legada a la Fundación Rockefeller, que la utiliza como centro de congresos.

Conrad Waddington —que era un hombre sensible— eligió el lugar para sus encuentros anuales sobre la naciente biología teórica a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970. Fue en uno de estos congresos donde Stu Kauffman presentó por primera vez sus redes booleanas aleatorias, su descubrimiento del «orden espontáneo». Fue también ahí donde Stu recibió la primera oferta de trabajo, de la Universidad de Chicago, como resultado de esa intervención. Y las cuidadas pendientes de los alrededores del lago fueron el escenario de otro triunfo más de Kauffman: ganó un concurso de aviones de papel.

«Con un poco de trampa, en realidad», admitió Stu, riendo mientras lo recordaba. «Estábamos discutiendo sobre todas aquellas ideas nuevas y fantásticas y, en medio de aquello, lancé un desafío: ¿quién puede hacer el avión que vuele más lejos?» Para John Maynard Smith, que había sido ingeniero aeronáutico antes de convertirse en uno de los principales teóricos evolucionistas del mundo, el desafío fue irresistible. A Morel Cohen, físico teórico de exquisita percepción, ya le parecía tener el premio en el bolsillo: elaborar un diseño a partir de los principios fundamentales. Para

Lewis Wolpert, experto en biología del desarrollo de renombre universal, no había ningún desafío que pudiera quedar sin respuesta. Richard Lewontin también se les unió, así como Richard Levins y varios más. «Lo que no sabían», dijo Stu, «era que llevaba mucho tiempo perfeccionando un diseño. Desde los ocho años.»

¿Qué diseño usaste?, pregunté, excitada mi curiosidad. ¿El ala recta o el ala delta? «El ala delta», contestó Stu. Estábamos hablando en su despacho de la Universidad de Pennsylvania; rebuscó en sus papeles hasta dar con una hoja que consideró adecuada y empezó a doblarla siguiendo la pauta conocida por generaciones de niños. El primer pliegue es longitudinal, por la mitad. El segundo hace un ángulo de 45 grados; el tercero otro impecable ángulo de 22,5 grados. Se doblan las alas y aparece el básico avión con ala delta. «Mi modificación clave fue doblar la punta hacia abajo, un par de centímetros, de modo que acaba despuntado», confió Stu, tan satisfecho por su invento como podía estarlo de un descubrimiento en el laboratorio vecino. «Le da peso», explicó. «Me pasaba horas en el lago Tahoe, lanzando aviones al aire.» Tras lo cual, lanzó por el despacho el avión, que voló suavemente, con poco ángulo, a todas luces destinado a un largo vuelo... hasta que se estrelló en un archivador viejo. «Deberíamos haber salido.»

Nuestra conversación se había desviado hasta la aerodinámica de los aviones de papel por una buena razón. Habíamos estado hablando de los sistemas dinámicos complejos, incluyendo los sistemas biológicos y la frecuencia con la que generan orden. Nos habíamos metido en la historia de esos sistemas y en el modo en que cambian a lo largo del tiempo. Había observado en cierto número de ocasiones que, cuando se hablaba de modelos de sistemas evolutivos, como los de Tom Ray o Kristen Lindgren, la gente se refería con frecuencia a la tendencia de tales sistemas a generar una complejidad creciente. Se empieza con un sistema simple, se permite que opere la dinámica fundamental, y emergen productos de creciente complejidad. Era la naturaleza de los modelos matemáticos de los sistemas complejos adaptativos. Sucedió en el

mundo real de los sistemas biológicos. Ese, inequívoca y repetidamente, era el mensaje.

Tú eres biólogo, dije a Stu. Eres consciente de que tus colegas tienen dificultades con la noción de complejidad, ya que no están seguros de cómo definirla, ni están seguros de lo que realmente significa. «Sí, lo sé», contestó, examinando pensativamente el avión y haciendo pequeños ajustes. «También sé que los sistemas biológicos no pueden evitar la complejidad; emerge de forma espontánea. Y la complejidad parece aumentar a lo largo del tiempo.» Me contó que si dos redes booleanas interactúan y juegan entre sí, se vuelven más complejas y lo hacen mejor en cada nueva interacción. Repitió lo que otros decían sobre el modelo del dilema del prisionero de Kristen Lindgren, que las estrategias se vuelven más complejas, mejoran en el juego. «Y todos tenemos la sensación de que los sistemas biológicos se hacen más complejos con el tiempo», añadió. ¿Mejoran?, pregunté. «Aquí es donde empieza la trampa. Mira este avión. Doblar el morro así —hacer el diseño más complejo, si quieres— hace que vuele más. Podrías decir que “mejor”, ¿verdad? Pero no puede hacer acrobacias. Algunos de los aviones que se hicieron en Villa Serbelloni hacían acrobacias maravillosas. Así que depende de lo que quieras decir con mejor.»

Me di cuenta de que estábamos entrando en un terreno difícil, que a veces puede sonar a contradicción semántica. Más ordenado, más complejo, mejor, ¿son lo mismo? ¿Es siquiera una descripción adecuada de lo que ocurre en los sistemas biológicos a lo largo del tiempo evolutivo? «Es una pregunta profunda», dijo Stu. «Hay que pagar un precio por hacerse más complejo; es más probable que el sistema se rompa, por ejemplo. Necesitamos una razón de por qué los sistemas biológicos se hacen más complejos a lo largo del tiempo. Tiene que ser muy simple y muy profunda.» ¿Estás dando por sentado un aumento inexorable de la complejidad? Stu pensó otra vez durante unos instantes, el avión a punto de volar. «Sí», dijo, pero con una clara nota de cautela. Una vez lanzado, el avión repitió el mismo trayecto y, de nuevo, se estrelló contra el archivador.

«Habla con Dan McShea», se me insistió varias veces. Había decidido que tenía que mirar más de cerca la visión de la complejidad de los biólogos. Me parecía evidente que si las ideas del Instituto de Santa Fe significaban algo en el mundo biológico, tenía que haber un terreno conceptual común entre ambos. ¿Dónde lo encontraría? Contacté con varios amigos, biólogos que, con los años, me había parecido que reflexionaban sobre los grandes problemas de la ciencia. ¿Qué es la complejidad biológica?, pregunté. «Si hay alguien que te pueda ayudar a contestar a eso, es Dan McShea.»

Dan, en la actualidad en la Universidad de Michigan, Ann Arbor, fue discípulo de Dave Raup en Chicago. Ha hecho un estudio sobre la imperfección del registro fósil, una cuestión que abrumó a Darwin y que sigue siendo un asunto de profunda importancia práctica para los paleontólogos modernos. Luego, en el verano de 1985, un amigo le dio a Dave un libro, *The Recursive Universe*, de William Poundstone. «Cambié por completo mis intereses intelectuales», me contó Dan. El libro estaba ingeniosamente estructurado en torno a las ideas de la cosmología y el juego de la vida de Conway. La cosmología era fascinante, pero el juego de la vida desencadenó algo profundo en Dan. Persona reflexiva, ya se interesaba por la estructura y la complejidad en la naturaleza. El hecho de que tanta complejidad fluyera de un conjunto de reglas tan simple, como sucede en el juego de la vida, fue una idea estimulante para él, como lo ha sido para mucha gente. «Como en Chicago son muy teóricos, esa experiencia se vio transformada en un nuevo proyecto personal de investigación: ¿cuál ha sido el papel de la complejidad en la historia de la vida?»

Lo primero que había que hacer era rebuscar en la bibliografía, tanto moderna como histórica. «Enseguida aprendí dos cosas», dijo Dan. «Primero, que hay un consenso general, aunque vago, de que la complejidad ha aumentado a lo largo de la historia evolutiva. Segundo, que *complejidad* es una palabra muy resbaladiza. Puede significar muchas cosas.» Una de las cosas con la que suele ir asociada, por ejemplo, es el «pro-

greso», la noción de que la evolución procede por un vía que conduce hacia la mejora inevitable. En la actualidad, los biólogos se sienten muy incómodos con la idea de progreso, debido a las connotaciones de una fuerza rectora externa. «Es aceptable hablar de complejidad», explicó Dan, «pero no de progreso.»

La imagen de un mundo ordenado, con organismos dispuestos desde las formas «inferiores» hasta las «superiores», está muy asentada en nuestra cultura. Se encuentra en Platón y también, implícitamente, en el orden de la creación del Génesis. Mucho más tarde, en el siglo XVII, este ordenamiento de la naturaleza se trasladó a lo que se conoció como la Gran Cadena del Ser. En esa época predarwinista, la cadena se consideraba como una descripción estática del lugar de cada especie en el mundo, no como un registro del cambio a través del tiempo. Los seres humanos, sin que ello constituyera ninguna sorpresa, estaban situados en la cabeza de la cadena, «un poco más abajo que los ángeles». Con la llegada de la teoría darwinista de la evolución, los organismos pasaron a ser vistos como un producto del cambio a lo largo de periodos muy largos de tiempo. El orden estático de la Gran Cadena del Ser quedó efectivamente transformado en las mentes en un registro de esa historia evolutiva, desde las formas simples a las complejas. Un aumento de la complejidad a lo largo del tiempo evolutivo parecía evidente.

«Darwin lo creía, como la mayoría de sus contemporáneos», dijo Dan. «Y también la mayor parte de la comunidad paleontológica angloamericana, desde la última década del siglo XIX hasta mediados del nuestro. Luego empezaron a deslizarse algunas dudas, pero se puede decir que la mayoría sigue creyéndolo hasta cierto punto.» Quizá porque es cierto, insinué. «Tengo la impresión de que a mucha gente le gustaría que fuera cierto, pero hay muy pocas pruebas sólidas», contestó Dan. «Pero, en primer lugar, hay que ser muy claros cuando se habla de complejidad. Es muy fácil que empieces una conversación con un acuerdo de que la complejidad es X y, un momento más tarde, oírte argumentar que esto y lo otro no es complejo porque no es Y.» ¿Puedes ser más concreto?

«En mi investigación me he centrado en la complejidad morfológica, los detalles de la estructura anatómica. Pero sospecho que estás interesado en algo más general, por ejemplo, algo que incluya el comportamiento.»

Dan estaba en lo cierto. Mi noción de complejidad era rudimentaria, pero era consciente de que el comportamiento formaba parte de ella. Había visto bandadas de cercopiteos en Kenia y no tengo inconveniente en pensar en ellos como una forma de vida más compleja que los árboles, que son una parte tan importante de sus vidas cotidianas. Los cercopiteos, a título individual pero también como una red socialmente interactiva, parecen biológicamente más complejos que los árboles. También me parecen más complejos en términos de comportamiento que las cebras y los ñúes que viven en manadas cerca de ellos.

De acuerdo, dije, supón que dejamos de lado por un momento el comportamiento, ¿cómo enfocas la complejidad morfológica? «También tienes que dejar de lado toda noción de "mejor"», previno Dan. «Esa es una idea muy escurridiza. Se puede afirmar que un aumento en el número de componentes representa algo más complejo —y mejor— olvidando que un reloj de sol se avería con menos frecuencia que un reloj de pulsera.» Unos pocos biólogos han intentado establecer criterios para medir la complejidad, incluyendo la cantidad de partes anatómicas diferentes, y sólo han conseguido un éxito modesto. ¿Es más complejo un gato que una almeja? Podría ser así según este criterio, pero ¿es cierto en un sentido absoluto? ¿Y soy injusto con los árboles al considerar los cercopiteos más complejos? Al fin y al cabo, puedo empatizar con la vida de un cercopiteo pero no con la de un árbol. ¿Olvido quizás algo sobre la complejidad de la condición de árbol?

Hay una tendencia natural a pensar también en los mamíferos como más complejos de algún modo que los reptiles. Un león parece una máquina más avanzada que, digamos, un tiranosaurio, aun cuando ambos son (o eran) carnívoros. Las cebras son sin duda más complejas de algún modo que los hadrosaurios, aun cuando ambos son (o eran) herbívoros y animales sociales. Pero algo que los biólogos ven ahora claro

es que el mundo moderno de los mamíferos es idéntico al mundo antiguo de los grandes reptiles. En ambos es posible identificar pequeños y grandes carnívoros, pequeños y grandes herbívoros, pequeños y grandes insectívoros, etcétera. Los mismos nichos ecológicos están ocupados en ambos mundos, y con aproximadamente el mismo número de especies. En eso no hay nada que los distinga. Pero ¿son los mamíferos, con su superior tasa metabólica, más complejos que los reptiles en un sentido general porque canalizan más energía? Es probable que algunos dinosaurios fueran también de sangre caliente, de modo que esa noción tampoco es definitiva. «Si tenemos que llegar a algún sitio con esto, necesitamos centrarnos en algo discreto, algo medible», dijo Dan.

Uno de los intentos más respetados de una medida objetiva de la complejidad fue desarrollado por John Tyler Bonner, de la Universidad de Princeton. Hay que contar el número de tipos celulares diferentes, sugirió. En principio, eso proporciona una idea del número de funciones especializadas que un organismo puede realizar, y eso huele a complejidad. También tiene la ventaja de considerar todo el organismo, no sólo una parte. (Deja de lado el comportamiento, pero aquí sólo se considera la complejidad morfológica.) Bonner fue capaz de demostrar una complejidad superior en las especies grandes con este parámetro, pero no intentó determinar si aumentaba a lo largo del tiempo evolutivo. Lo cual, sin embargo, sería una inferencia razonable. Todo esto me recordaba lo que me dijo una vez Edward O. Wilson: «No es difícil reconocer la complejidad, Roger. La dificultad está en cómo medirla.»

«Te enseñaré algo que intenté hacer», dijo Dan. De un gran cajón sacó un pequeño esqueleto, una ardilla. «Decidí buscar la complejidad en las columnas vertebrales», explicó. «Si miras la columna vertebral de un pez, todas las vértebras son prácticamente idénticas. Cualquiera otra cosa, un mamífero por ejemplo, es más complejo que eso: hay estructuras diferentes en la región cervical, la región torácica y las otras regiones de la columna vertebral. De modo que parece haber un aumento de la complejidad, desde el pez a, digamos, la ardilla, ¿verdad?» Asentí. «Veamos ahora las ardillas modernas y

sus antepasados. Si existe una tendencia hacia una mayor complejidad, cabe esperar ver una anatomía más compleja en las especies modernas, ¿no?» De nuevo asentí. «Medí diversos aspectos de las vértebras de la columna, en antepasados y descendientes. Lo hice con las ardillas, los rumiantes, los camellos y unos pocos casos más y luego ideé tres parámetros, tres formas de medir la complejidad morfológica en las vértebras de antepasados y descendientes.» Se volvió hacia un montón de papeles y sacó una hoja. «Mira esto.»

Ante mí tenía una tabla de datos, que mostraba tres tipos de animales y diversos parámetros de complejidad en las vértebras. La tabla estaba llena de D e I, disminuciones e incrementos de la complejidad. «Son sorprendentemente iguales, el mismo número de disminuciones que de incrementos», explicó Dan. ¿No se llega a ningún sitio, no hay pruebas de un incremento de la complejidad? dije. «Ninguna. Es cierto que se trata sólo de un breve periodo de tiempo, unos 30 millones de años. Pero cabía haber esperado ver alguna tendencia hacia una mayor complejidad, si eso es lo que ocurre en la evolución.»

Habíamos pasado con alarmante facilidad de «¿qué es la complejidad?» a «¿aumenta a lo largo del tiempo evolutivo?». Dan tenía razón al decir que *complejidad* era una palabra escurridiza. Y, debo admitirlo, mi sensación era «¿y qué?» en relación con los resultados sobre la columna vertebral de Dan. Me pregunté qué se habría podido decir si los datos hubieran mostrado un aumento en el parámetro de complejidad elegido. «Que a lo largo de ese periodo de tiempo las columnas vertebrales habían aumentado en complejidad», contestó Dan. Pero podría ser lo único en aumentar, con lo cual no sería demasiado profundo, ¿no? «Tienes razón. Me parece que estás empezando a darte cuenta de lo difícil que es todo este asunto.»

Dan tenía razón. Me daba la sensación de que la complejidad era un espejismo: estaba seguro de su existencia, hasta que intentaba alcanzarla, anclarla en la realidad. ¿Dónde ancla-

ría la complejidad biológica alguien con la visión del mundo del Instituto de Santa Fe? «No veo cuál es el problema», me dijo Norman Packard. «La complejidad biológica tiene que ver con la capacidad de procesar información. Capacidad de procesamiento de la información, es lo que vemos en nuestros modelos de autómatas celulares y en otros sistemas complejos adaptativos. Concibo los organismos como sistemas complejos adaptativos, y lo que guía su evolución es el incremento de la capacidad de procesamiento de la información.»

Pero, ¿es de verdad válido describir lo que ves en los modelos evolutivos como un aumento de la complejidad?, pregunté. «No sé de qué otra forma puedes llamarlo», dijo Norman. «Mira, con el modelo de Kristen Lindgren empiezas con la estrategia más simple posible y acabas con estrategias individuales complejas y un sistema interactivo complejo. Y es sencillamente la dinámica la que produce eso, dado el objetivo de jugar el juego. Ves el mismo tipo de cosas en el modelo de Tom Ray, y eso se parece aún más a la evolución biológica.» Pero algunos de los bichos de Tom se vuelven más sencillos, le recordé a Norman, algunos reducen su código y se convierten en parásitos, de aproximadamente la mitad de tamaño que el organismo anterior. «Es cierto, pero, en primer lugar, no estoy diciendo que todo organismo tenga que hacerse más complejo, nada de eso. Ya lo has visto. Sabes lo que quiero decir.»

El razonamiento de Norman me hizo recordar los comentarios de algunos biólogos. Por ejemplo, en un texto clásico de 1977 sobre evolución escrito por Theodosius Dobzhansky, Francisco Ayala, G. Ledyard Stebbins y James Valentine, se afirma que la «capacidad de recoger y procesar información» ha aumentado a lo largo de la historia evolutiva y, de hecho, constituye una marca de progreso. Unos pocos años atrás había asistido a un congreso en el Museo Field de Chicago, donde el tema era el «progreso evolutivo». Francisco Ayala fue uno de los primeros en hablar. «La capacidad de obtener y procesar información sobre el entorno, y reaccionar de modo adecuado, es una adaptación importante porque permite que el organismo busque entornos y recursos adecuados, así como

evitar los inadecuados», dijo. Ed Wilson también considera el procesamiento de información como una medida de la complejidad. «No hay duda de ello», me dijo. «Ha habido un aumento general del procesamiento de información en los últimos 550 millones de años y, en especial, en los últimos 150 millones de años.» Si al menos algunos biólogos y los investigadores de los sistemas complejos apuntaran de modo colectivo hacia el procesamiento de información como marca de la complejidad, podríamos llegar a algún lado.

Puedo concebir lo que significaría el procesamiento de la información en organismos dotados de un cerebro de tamaño considerable, dije a Norman, pero ¿y las almejas y los árboles? «La supervivencia tiene que ver con la captación de información acerca del entorno y con responder de forma apropiada», respondió Norman, haciéndose eco con claridad de lo que había dicho Ayala. «Las bacterias lo hacen, respondiendo a la presencia o ausencia de ciertas sustancias químicas y desplazándose. Los árboles también se comunican químicamente. El procesamiento de la información es una propiedad fundamental de los sistemas complejos adaptativos, que, como recordarás, se optimiza en el límite del caos. Cualquier sistema complejo adaptativo puede procesar información; ése es el punto clave. No hace falta un cerebro para procesar información en la manera en que digo.» Pero ¿eso ayuda? «Está más arriba en la escala de capacidad de procesamiento de la información, si quieres.»

La expresión «más arriba en la escala» tiene un efecto provocador instantáneo sobre los biólogos, porque, citando a Darwin como ejemplo, aprenden que «más arriba» y «más abajo» son juicios de valor, no términos con significado biológico. También aprenden que más arriba y más abajo implican un elemento progresivo en la evolución, un ascenso en la escala de la naturaleza desde lo simple a lo complejo. Como dijo Dan McShea, los biólogos están dispuestos a adoptar la noción de complejidad y aceptan que haya aumentado a lo largo de la historia de la vida de algún modo mal definido, pero hablar de «progreso» se considera disparatado. Si se afirma que la evolución es progresiva, es muy

fácil considerarla como dirigida, siguiendo una flecha de mejora. Y esto evoca demasiado el designio divino de los días predarwinistas.

Al decir «más arriba en la escala», ¿estás sugiriendo una historia de aumentos sucesivos en la capacidad de procesamiento de la información a lo largo de la evolución?, pregunté a Norman. «Es lo que me parece», contestó. «Intuitivamente, parece razonable que la tarea de sobrevivir exija procesamiento de la información. De ser cierto, la selección entre organismos conducirá a un aumento de las capacidades de procesamiento de la información. Eso crea una flecha de cambio, no sólo una tendencia ascendente.» ¿Se te puede acusar de ser antropocéntrico, de contemplar el mundo desde este pináculo de poder de procesamiento de la información que tenemos en nuestras cabezas?, pregunté. «Los seres humanos destacamos muchísimo, con nuestro cerebro relativamente enorme, pero si nos quitas de la ecuación, sigue siendo correcto afirmar que la capacidad de procesamiento de la información ha aumentado a lo largo del tiempo, y eso es sólo lo que cabría esperar.»

Hoy, la mayoría de las especies de la Tierra son organismos unicelulares, igual que en el precámbrico, y gran parte del resto son insectos, dije. No parece demasiado que haya habido un inexorable progreso hacia una mayor capacidad de procesamiento de la información, ¿no? «Estamos hablando de supervivencia», dijo Norman. «Y, sí, hay innumerables nichos ahí fuera en los que las especies se las arreglan muy bien con ciertos niveles de procesamiento de la información. Pero, donde la supervivencia está en cuestión, casi siempre verás un aumento. Considéralo como una exploración constante de la utilidad de una mayor complejidad computacional en la evolución. A veces proporciona una ventaja, y eso te da la flecha.»

Pregunté a Norman si era consciente de que la mayoría de los biólogos se sentirían incómodos con la clase de progreso que él ve en la evolución. «A la gente no le gusta no tanto por razones científicas como sociológicas», respondió. «No concedo un juicio de valor a la superioridad en el procesamiento de la información.»

«El progreso es una idea perniciosa, culturalmente arraigada, inestable e inoperativa que debe ser abolida si queremos comprender las pautas de la historia.» Con semejante afirmación Stephen Jay Gould inició su intervención en el congreso de 1987 sobre progreso evolutivo en el Museo Field de Chicago. Expresado de modo más enérgico que casi todos los demás, el razonamiento de Steve caracterizaba sin embargo la opinión del momento. Con la excepción de Francisco Ayala, quien de modo provisional admitió que, con ciertos matices, podía ver progreso en la evolución, un orador tras otro negó su existencia. ¿Por qué consideras que el progreso es pernicioso?, pregunté a Steve. Es una palabra fuerte.

Me di cuenta de que necesitaba comprender mejor la animadversión de los biólogos hacia el concepto de progreso si tenía que dar una visión clara de la concepción de la evolución biológica en el Instituto de Santa Fe. Había visitado a Steve muchas veces en el Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard. Situado en el ala más antigua del museo, su «despacho» es un rincón de una enorme habitación dividida por grandes armarios de colecciones, muchos de los cuales contenían miles de conchas de *Cerion*, un caracol terrestre de las Indias Occidentales, el organismo de estudio preferido de Steve. Las estanterías de libros marcan una especie de límite en el área de despacho y una ojeada permite ver ediciones victorianas de Darwin, Thomas Henry Huxley, Herbert Spencer y el conde Georges de Buffon (treinta y un volúmenes), entre otros. La descolorida pintura verde de las paredes también es victoriana, y de ellas cuelga una lámina con la visión del mundo biológico de esa época. SINOPSIS DEL REINO ANIMAL reza un letrero, medio oculto por los armarios. Otras etiquetas —como «Esponjas y Protozoos», «Mamíferos» y «Vermes»— se ven aquí y allá, a menudo parcialmente ocultos tras estantes y mesas. Steve suele sentarse en una vieja silla de mimbre, de cuyo cojín sobresale el relleno. Ese día, sin embargo, estaba en una mesa, a punto de salir para dar una conferencia.

«El progreso no es ni intrínseca ni lógicamente pernicioso», replicó. «Es pernicioso en el contexto de las tradiciones culturales occidentales.» Con raíces que se remontan al siglo XVII, el progreso como ética social central alcanzó su cima en el siglo XIX, con la revolución industrial y el expansionismo victoriano, explicó Steve. Los temores de las décadas recientes a la autodestrucción, ya sea por vía militar o a través de la contaminación, han amortiguado el eterno optimismo de las eras victoriana y eduardiana. No obstante, el supuesto avance inexorable del descubrimiento científico y el crecimiento económico siguen alimentando la idea de que el progreso es un elemento deseable y natural de la historia. «El progreso ha sido la doctrina imperante en la interpretación del devenir histórico», continuó Steve, «y, dado que la evolución es la mayor de las historias, la noción de progreso se transfirió inmediatamente a ella. Se es consciente de algunas de las consecuencias de ello.»

Una de las consecuencias fue que se consideró que la evolución, en tanto progresión de las formas inferiores a las superiores, conducía de modo ineludible a la emergencia de los seres humanos. Así aparecía de forma manifiesta en la obras, por ejemplo, de Robert Broom, un paleontólogo que descubrió muchos fósiles humanos antiguos en Sudáfrica en las décadas de 1940 y 1950. «Sin duda no puede haber tema más interesante para el Hombre que el porqué apareció sobre la Tierra», escribió en 1933. «Gran parte de la evolución parece como planeada para concluir en el Hombre, así como en otros animales y plantas que hicieran del mundo un lugar adecuado donde él pudiera vivir.» Aunque pocos fueron tan lejos como Broom, muchos fomentaron la noción de la inevitabilidad del *Homo sapiens*. «La vida, plenamente entendida, no es un monstruo en el universo, ni el Hombre es un monstruo en la vida», escribió hace décadas Pierre Teilhard de Chardin, filósofo, antropólogo y jesuita. «Al contrario, la vida culmina físicamente en el Hombre, como la energía culmina físicamente en la vida.»

La misma noción sigue hoy vigente y aparece en *The New York Times*, aunque expresada en un lenguaje menos florido

que el de Teilhard. Un artículo que informaba sobre el descubrimiento de un nuevo antepasado más antiguo de los vertebrados lo describía como «el grupo que *condujo* a los seres humanos». (El subrayado es mío.) Quizá fue un descuido periodístico; quizás el autor realmente quiso decir que el *Homo sapiens* es el producto culminante de la evolución de los vertebrados en estos últimos 550 millones de años. Cualquiera de las docenas de especies de cíclidos que han evolucionado en el lago Victoria en los últimos miles de años parecen tener más derecho que el *Homo sapiens* a ser el producto final de la evolución de los vertebrados, al haber aparecido en escena mucho más recientemente.

Una segunda consecuencia, relacionada con la primera y merecedora de ser tachada de perniciosa, es el racismo, que aparecía de modo explícito en la bibliografía antropológica del cambio de siglo. «La noción de progreso en la historia evolutiva hizo fácil la aceptación del dominio de una raza sobre otra», dijo Steve. Los científicos británicos y norteamericanos de esa época concebían la evolución humana como un progreso fruto del esfuerzo de nuestros antepasados (reflejando así muy bien la ética del trabajo victoriana). Nuestros primos los simios quedaron atrás en la oscuridad biológica, víctimas de su indolencia. Eso también quería decir que algunas «razas» de la humanidad tenían mejor suerte que las otras gracias a su empeño: no hace falta ser muy listo para adivinar quiénes son los primeros y los últimos de la escala.

Las imágenes del árbol de la familia humana mostraban claramente esta escala de supuesta superioridad entre las razas. Y las palabras de docenas de respetados antropólogos lo proclamaron: «La doctrina de la evolución de Darwin [...] ha sido, y siempre será, el medio de la evolución progresiva», escribió Henry Fairfield Osborn, director del Museo Americano de Historia Natural en la primeras décadas de este siglo. «Extinguir el espíritu competitivo es buscar el suicidio racial.» Roy Chapman, colega de Osborn, expresó sentimientos similares: «El progreso de las diferentes razas es desigual. Algunas evolucionaron hasta convertirse en los señores del mundo a una velocidad increíble.» Tales eran las afirmaciones de los

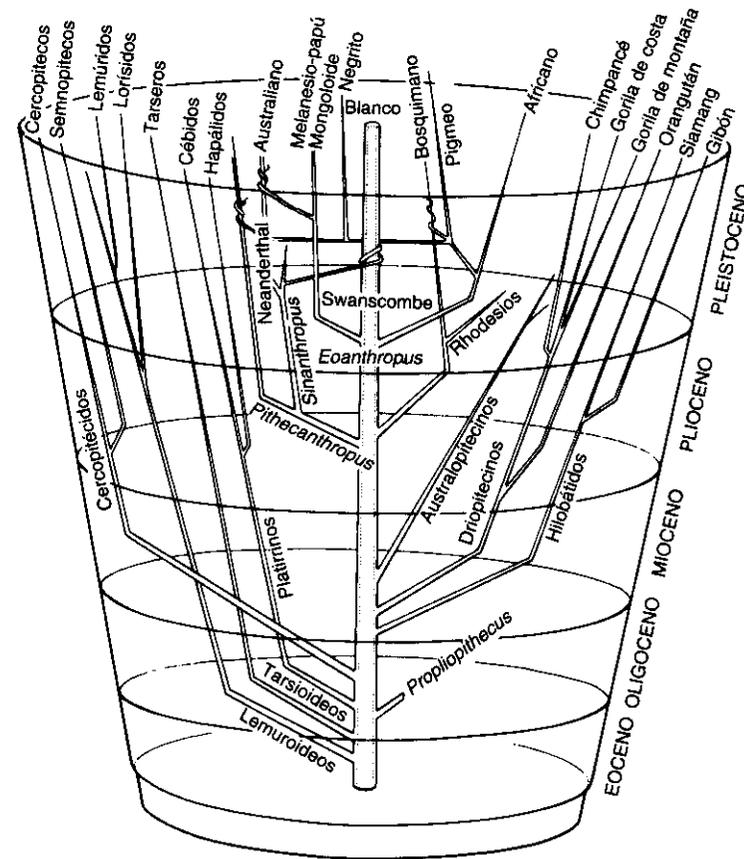


Figura 7. Los árboles evolutivos humanos de las primeras décadas de este siglo solían colocar a los «blancos» en el centro, en tanto «raza» más avanzada, como se ve en *Up from the Ape* de Earnest Hooton (1946).

membros más destacados de la profesión, no de una franja marginal. Los textos evolucionistas modernos no contienen nada así. No obstante, dijo Steve: «Hay una profunda reticencia a abandonar una visión de la vida como progreso predecible, porque hacer eso sería admitir que la existencia humana

no es otra cosa que un accidente histórico. Para muchos es difícil de aceptar». El progreso da sentido a la vida.

La idea original no queda invalidada sólo porque una idea científica se traslade a unos valores sociales —por muy inapropiadamente que se utilicen—, dije a Steve. «Por supuesto que no. Pero el progreso global no es una consecuencia de la mecánica de la selección natural. Darwin lo reconoció y, por eso, escribió a Hyatt: “Tras larga reflexión no puedo evitar la convicción de que no existe ninguna tendencia innata hacia la evolución progresiva”.» Steve tiene la envidiable capacidad de citar en extenso de memoria, como hizo en este caso. Alpheus Hyatt, un biólogo estadounidense, mantuvo correspondencia con Darwin durante la década de 1870 y esta frase de una de las cartas de Darwin se ha hecho célebre. También es polémica.

«Tienes que comprender que la posición de Steve en este tema es profundamente ideológica», me dijo Robert Richards. «No es el único de los biólogos evolucionistas modernos que niega el progreso, pero sí es de los más ruidosos.» Bob, filósofo e historiador de la ciencia de la Universidad de Chicago, acaba de terminar un erudito libro, *The Meaning of Evolution*, en el que sostiene que Darwin consideró la evolución como progresiva. «Mira esto», dijo, buscando en su libro un pasaje de uno de los primeros cuadernos de notas de Darwin. «Darwin escribió: “Lo más simple no puede evitar convertirse en más complicado; y si miramos el primer origen, tiene que haber progreso”. Está bastante claro, ¿no?» Tuve que admitirlo. Pero, contesté, también había visto comentarios antiprogreso de Darwin. «Sin duda; hay bastantes. Podrías estar todo el día jugando a las citas a favor y en contra del progreso. Pero mi opinión es que, en conjunto, Darwin es progresivista.» ¿Entonces por qué Steve Gould se opone con tanta vehemencia al progreso?, pregunté. Has dicho que era algo ideológico.

«Si quieres ver de dónde viene el rechazo al progreso de Steve, lee esto», dijo Bob, entregándome un ejemplar de su libro. Estaba abierto en una cita de un libro de Steve, donde

señala cómo las ideas germanas de fines del siglo XIX acabaron contribuyendo al ascenso del nazismo. «Ya ves por qué Steve es incapaz de pensar que Darwin abrazó esas mismas ideas de progreso», dijo Bob. «Su rechazo de la idea de progreso, tanto en su nombre como en el de Darwin, está influido por la ideología.»

Le pregunté a Steve si sus opiniones están influidas por la ideología. «¿Y las de quién no?», respondió en el acto. «Pero si quieres saber cuáles eran las opiniones de Darwin, lee el *Origen*. Está lleno de afirmaciones en el sentido de que su teoría no conduce al progreso global.» Es cierto, admití, pero Darwin también parece reconocer el progreso en muchos lugares, ¿verdad? «Sí», dijo Steve. «La más famosa está casi al final: “Y como la selección natural obra solamente mediante el bien y para el bien de cada ser, todos los dones intelectuales y corporales tenderán a progresar hacia la perfección”. Pero los historiadores cometen un error al intentar encontrar una consistencia total en el mundo de los grandes pensadores. En Darwin había una esquizofrenia, una dualidad: por un lado era un filósofo radical en muchas cosas y, por otro, un acomodado caballero victoriano que vivía en un país en el que el progreso era una presunción tan intrínseca como en cualquier cultura histórica. Pero la mecánica esencial de su teoría de la selección natural no afirma nada sobre el progreso. Sobre eso es muy claro, se recrea en eso y por eso asegura que “nunca hay que decir superior o inferior”.»

La selección natural se refiere simplemente a la adaptación a las circunstancias locales, continuó Steve, y como tal no contiene ninguna tendencia hacia el progreso global. El entorno cambia en una dirección, y la adaptación lo sigue. El entorno cambia en otra dirección, y la adaptación vuelve a seguirlo, ciegamente y sin dirección. Pensando en la noción de Norman Packard de un inexorable aumento de la capacidad de procesamiento de la información, me pregunté qué pensaría Steve de los cerebros. El registro fósil muestra un espectacular aumento en el tamaño cerebral medio asociado a la evolución de los mamíferos a partir de los reptiles, hace unos 230 millones de años; un aumento similar se

produjo cuando evolucionaron los mamíferos «modernos», hace 50 millones de años; y los primates son el doble de «cerebrales» que el mamífero medio (los seres humanos, como dijo Norman Packard, destacan muchísimo y es mejor dejarlos de lado en la ecuación). ¿No significa eso algo?, pregunté a Steve. ¿No muestra un crecimiento en la capacidad para procesar la información?

«Mira, cuarenta mil especies de vertebrados, ¿no? Unos veinticinco mil son peces... ahí no hay tendencias. Bien, ya tenemos un 55 o 60 por ciento de vertebrados sin tendencia a un cerebro más grande. Luego tienes ocho mil especies de aves... tampoco hay una tendencia hacia un cerebro más grande desde su origen. Seis mil especies de mamíferos, una fracción de todos los vertebrados y, sí, ves tendencias en algunos grupos. ¿Pero afirmas que lo que ocurre en algunos grupos entre las seis mil especies de mamíferos representa el impulso de la evolución?»

La respuesta no era fácil. No obstante, dije, *existen* tendencias y es difícil hacer caso omiso del efecto de los cerebros más grandes. Me cuesta no pensar que eso representa algo creativo en la evolución, cierto grado de mayor complejidad. ¿No representan los cerebros un nivel superior de complejidad que, digamos, la estructura del cráneo o las plumas? «Sin duda los cerebros han tenido más influencia que cualquier otra estructura», dijo Steve. ¿No es ésa una medida legítima de la complejidad? «Oh, no, porque es probable que los siguientes en influencia sean las bacterias. El efecto tiene que divorciarse de la complejidad.» Como Dan McShea, Steve parecía decidido a excluir de la complejidad los aspectos del comportamiento.

«En todo esto, la motivación no-tan-oculta es el interés por la conciencia humana», dijo Steve. «No se nos puede culpar por estar fascinados por la conciencia; representa una enorme puntuación en la historia de la vida. La concibo como un accidente caprichoso, pero al parecer la mayoría no quiere verlo así. Si crees que hay un inexorable aumento en el tamaño del cerebro a lo largo de la historia evolutiva, la conciencia humana se vuelve predecible, no es un accidente caprichoso. Te-

nemos una visión de la evolución muy “cefalocéntrica”, un sesgo que distorsiona nuestra percepción del verdadero curso de la historia.»

He encontrado a muchos biólogos claramente incómodos al hablar del aumento del tamaño cerebral como medida de la complejidad. «Soy hostil a todo tipo de fuerza mística que conduzca a una mayor complejidad», dijo Richard Dawkins cuando le pregunté si cabía considerar un aumento de la complejidad computacional como parte inevitable del proceso evolutivo. «Te gustaría pensar que ser capaz de resolver problemas contribuye a la adaptación darwiniana, ¿verdad?», dijo John Maynard Smith. «Pero es difícil relacionar el mayor tamaño cerebral con la eficacia biológica. Al fin y al cabo, las bacterias son aptas.» Michael Ruse, filósofo de la ciencia de la Universidad de Guelph, Canadá, que me dijo: «Rasca en cualquier biólogo evolucionista y encontrarás debajo a un progresivista», también da una respuesta ambigua en este tema: «¿Puedes realmente afirmar que un cerebro es mejor que una concha?». Ed Wilson, sin embargo, no tenía dudas: «¿Cefalocéntrico?», rió. «Debe de ser la última moda políticamente correcta de pensar... ¿Hace falta que añada algo más?»

Lo que ya había quedado claro era que, si Norman Packard tiene razón al afirmar que un aumento de la capacidad en el procesamiento de la información representa una flecha en el progreso evolutivo, muchos biólogos tendrán problemas al enfrentarse con el mensaje que la nueva ciencia de la complejidad pueda aportarles.

Cuando hablé con Dan McShea, me dijo que, si bien había pocos datos sólidos sobre la cuestión de la generación de la complejidad biológica, las teorías no escaseaban. «La mayoría de las teorías pueden definirse como internalistas o externalistas, y algunas son más místicas que otras.» ¿Místicas?, dije. «Puede parecer injusto, pero ya verás lo que quiero decir.» Por ejemplo, Jean-Baptiste de Lamarck, cuya teoría pre-darwinista de la evolución influyó mucho a Darwin, creía que

los organismos respondían a un impulso innato hacia una mayor complejidad, transmitido por fluidos invisibles. ¿Internalista y místico? «Absolutamente místico», dijo Dan.

«Sin embargo, Spencer es más interesante.» Herbert Spencer, intelectual inglés decimonónico, conocido tanto por su prosa recargada como por sus radicales teorías sociales, fue enormemente influyente en su época. Elaboró grandes síntesis entre ciencia y naturaleza, sociedad y psicología y eligió la teoría de la selección natural de Darwin como teoría de los sistemas sociales. Suya es la expresión «supervivencia del más apto», y su teoría se hizo famosa con el nombre de darwinismo social. «El progreso ... no es un accidente, sino una necesidad», escribió en 1851. «En lugar de ser artificial, la civilización constituye una parte de la naturaleza; en todo punto parecida al desarrollo de un embrión o al crecimiento de una flor.» La gran reputación social y la influencia intelectual de Spencer sólo tienen parangón con la rapidez de su caída en desgracia con el rechazo del darwinismo social. «Hoy apenas se lo menciona», dijo Dan. «O la gente lo ha olvidado por completo o no se atreve a mencionarlo, por miedo a ser estigmatizada.»

¿Por qué mencionarlo entonces? Spencer tenía una gran teoría —todas sus teorías eran grandes— sobre la condensación del orden a partir del desorden, de la heterogeneidad a partir de la homogeneidad, en sus propias palabras, explicó Dan. «Decía que los sistemas dinámicos tienen una tendencia a hacerse más concentrados y heterogéneos a medida que evolucionan. Lo llamó la Ley de la Evolución.» Por heterogéneo, ¿quieres decir estructura, orden útil? «Spencer hablaba de todos los sistemas dinámicos, no sólo de los sistemas biológicos: los mundos físicos, los mundos biológicos y los mundos sociales.» ¿La formación de las estrellas, la forma biológica y las sociedades complejas? «Sí.» Sonaba muy adelantado a su tiempo, comenté. Recuerda mucho al tipo de cosa que dirían los miembros del Instituto de Santa Fe: el orden cristalizando a partir del caos. ¿Es una comparación correcta? «Es exactamente lo que decía Spencer: consideremos un sistema homogéneo gobernado por reglas o fuerzas simples. Con sólo darle

un empujón aparecerá la estructura heterogénea. Spencer dice que el sistema simple, u homogéneo, es inestable: como una escalera estable, inevitablemente se desestabiliza debido al óxido, el viento, etcétera.»

La de Spencer es una teoría internalista de la complejidad y, aunque un poco mística también, es una especie de antecedente intelectual de la ciencia de la complejidad. Muchas grandes ideas tienen antecedentes, en espíritu por lo menos. Pero la ley de la evolución de Spencer se deja algo, porque la nueva ciencia de la complejidad incluye tanto factores externos como internos. El factor externo es la selección.

La selección natural se consideraría un mecanismo externalista de generación de complejidad, ¿no?, pregunté a Dan. «Sí, entre varios otros.» La metáfora de Darwin del efecto de la selección natural es la cuña, cristalizada en un famoso pasaje de *El origen de las especies*. Imaginemos un mundo biológico rebosante de especies donde el único modo de que una nueva especie tenga éxito sea desalojando a otra ya existente: «La naturaleza puede compararse a una superficie cubierta por diez mil cuñas afiladas [...] que representan a las diferentes especies, todas apretadas y sujetas a golpes incesantes [...] a veces una cuña es golpeada de una forma u otra; la que es golpeada con fuerza empuja a las otras».

La competencia abunda, cada especie pelea con sus rivales ecológicos. Es fácil imaginar una especie que obtiene una ligera ventaja y luego sus competidores luchando por atraparla. Es el ejemplo de la rana y la mosca de Stu Kauffman, pero a lo grande. Al final, cada especie puede resultar mejorada —es decir, ser más rápida, más dura de comer o más lista de lo que era— pero ninguna habría conseguido una ventaja absoluta sobre las demás. Se ha producido el progreso (si podemos utilizar esa palabra), las especies pueden ser mejores de lo que fueron, pero ninguna estará mejor. El efecto reina roja de Leigh Van Allen —todas las especies corriendo continuamente para permanecer en el mismo sitio— es una imagen popular. Como lo es la carrera de armamentos, por razones obvias. Como quiera que se lo llame, el efecto representa un proceso por medio del cual la complejidad —según algún pa-

rámetro— aumenta, y podemos ver que es impulsada externamente.

Si las carreras de armamento son frecuentes en los sistemas biológicos, las oportunidades para explorar la «utilidad de la mayor complejidad computacional en el marco de la evolución» —la frase de Norman Packard— también lo serían. Y la capacidad para hacer eso constituiría un importante hito en el paisaje evolutivo. En *El relojero ciego*, Richard Dawkins parece indicar que ha vislumbrado ese hito, aun cuando se niegue a aceptar cualquier tendencia hacia el progreso en la evolución. Las carreras de armamentos conducen a mayores cerebros en los mamíferos herbívoros y los carnívoros que los depredan, observa Richard. «Parece que estamos presenciando [...] una carrera de armamentos o, más bien, una serie de carreras de armamentos que comienzan una y otra vez, entre carnívoros y herbívoros», escribe. «Esta es una historia paralela a las carreras de armamentos humanas, ya que el cerebro es el ordenador de a bordo utilizado por carnívoros y herbívoros, y la electrónica es el elemento que avanza con más rapidez en la tecnología de armamentos humanos de hoy día.»

Así, pues, la visión spenceriana pura del mundo es que la mayor complejidad es una manifestación inevitable del sistema y está movida por la dinámica interna de los sistemas complejos: heterogeneidad a partir de la homogeneidad, orden a partir del caos. La visión darwinista pura es que la complejidad se construye únicamente por medio de la selección natural, una fuerza ciega, no direccional; y no hay aumento inevitable de la complejidad. La nueva ciencia de la complejidad combina elementos de ambos: se aplican fuerzas internas y externas, y se espera que se produzca una mayor complejidad como propiedad fundamental de los sistemas complejos adaptativos. Una propiedad fundamental de los sistemas complejos adaptativos es la contraintuitiva cristalización del orden —orden espontáneo, según Stu Kauffman— sobre la cual puede actuar la selección. Tales sistemas pueden, por medio de la selección, alcanzar por sí mismos el límite del caos, un constante proceso

de coevolución, una adaptación constante. Parte del atractivo del límite del caos es una optimización de la capacidad de procesamiento de información, bien sea el sistema un autómata celular o una especie biológica evolucionando junto a otras como parte de una compleja comunidad ecológica. En el límite del caos, se construyen los cerebros más grandes.

¿También ahí se encuentra la conciencia humana?

«Fue una experiencia extraordinaria», recordó Chris Langton. «Es difícil describirla de algún modo preciso, pero es como si el cerebro entrara en otro nivel de actividad. Quizá se debió a una insolación.» Estábamos en casa de Chris, a mitad de camino entre Santa Fe y Los Alamos, y me estaba contando un aspecto extraño de su recuperación tras el grave accidente de escalada. «Cuando al caer me di con la rodilla en la cara, recibí un buen golpe en el cerebro, me lo dañé de un modo difuso, nada específico. Traumatismo generalizado, creo que se llama. Cuando me recuperé, no era el mismo “yo”. Lo supe con mucha claridad. Faltaba una parte de mi “yo”. Luego, me despertaba de vez en cuando y regresaba alguna parte de mí; como arrancar el ordenador en un nivel nuevo. Todavía me atormenta pensar que no soy la persona que era, y que nunca lo seré.»

El accidente ocurrió en el otoño de 1975. Una década después de su encuentro con la muerte estaba obsesionado con la fundación de una nueva empresa científica. El primer encuentro internacional sobre vida artificial, celebrado en Los Alamos en septiembre de 1987, constituyó de hecho un reconocimiento de que Chris había tenido éxito. Fue mientras preparaba el capítulo introductorio al volumen de las actas del congreso —el mismo capítulo que inspiró a Tom Ray— cuando experimentó otro arranque de su cerebro, el que quizá estuvo provocado por una insolación.

«Había tanta actividad en el laboratorio que me fui a Tsankawi Mesa a escribir», dijo Chris. «Es un lugar tranquilo, con espectaculares vistas al valle del río Grande, y es un buen

lugar para pensar.» La mesa forma parte de la meseta Pajarito, en los montes Jemez, donde el olor a pino y enebro llena el aire puro y hay riachuelos de aguas cristalinas que bajan llenos durante los meses secos. Los indios anasazi vivieron allí en asentamientos sencillos cuando la comunidad del cañón del Chaco estaba en su apogeo. Cuando el Chaco se derrumbó a finales del siglo XII, muchos chaqueños se trasladaron a esta parte del valle del río Grande, donde la sequía no había llegado. «Debí de pasar ahí demasiados días», continuó Chris. «Hace calor y el aire es seco y, aunque llevé agua conmigo, el mecanismo de sudoración debió de fallar y cogí una insolación.»

Cuando volvió a casa, al final del cuarto día consecutivo de visita en la mesa, sintió un gran dolor de cabeza y la fiebre empezó a subirle con rapidez. En mitad de la noche, con todos los síntomas empeorando de forma alarmante, acudió al hospital, donde le administraron suero. «Al final volví a casa y dormí mucho tiempo. Al despertar tuve la conciencia de haber recuperado algo del “yo” que había perdido. Era una sensación de mi presencia en el mundo.» Antes del regreso de esta parte perdida, Chris sentía que vivía en medio de un cubo, cuyos lados eran pantallas de cine en las que se proyectaban películas. «Es difícil de describir», me dijo. «Era como si pudiera ver el mundo, pero como si de alguna manera no estuviera en él, sin presencia emocional. Como ver la película de algo en lugar de ver el algo de verdad y reaccionar a eso como persona. Era consciente de lo que había perdido, pero no podía recuperarlo. Me angustiaba mucho. Y entonces volvió, de golpe.» Poco después, Chris regresó a la mesa Tsankawi, para verla por primera vez.

Intenté imaginar el mundo tal como Chris lo había visto durante un tiempo, pero me fue imposible. Sencillamente no podía imaginar en otro sitio algunos de los procesos de pensamiento que hacen de «mí» lo que «yo» soy. Parece un aspecto de la conciencia, dije. «Sí, creo que sí», respondió Chris pensativamente. «Y aunque el “yo” anterior experimentaba el mundo de ese modo, al nuevo “yo” le es difícil recordar con

claridad cómo era y aún más difícil le es transmitirlo a otra persona.»

Al preguntar a Chris por primera vez acerca del ámbito de la nueva ciencia de la complejidad, aproximadamente un año antes de esa conversación, le pregunté si esta nueva ciencia podía explicar la conciencia. «Si la teoría de los sistemas complejos no es alguna clase de seductor espejismo y si el cerebro puede describirse como un sistema complejo adaptativo, entonces sí, también la conciencia puede explicarse», había contestado Chris decididamente, para matizar luego: «Al menos en principio». Se lo recordé y le dije: ¿crees de verdad que lo que te pasó en la cabeza ese día, esa clase de sensación que todos experimentamos en nuestras cabezas, es manejable con lo que nos ofrece la complejidad? «Quizá no con lo que nos ofrece la complejidad, pero sí con lo que nos ofrecerá», replicó Chris.

Estábamos sentados en una mesa redonda dentro de un comedor y una cocina que se fundían en un solo espacio, con suelos de madera, paredes blancas y techos con vigas. «Somos unos auténticos cocineros», me había dicho Chris con anterioridad. Veía el equipo de unos auténticos cocineros por todas partes y oía planes inminentes de ampliar la casa, que incluían la instalación de un horno profesional en el centro de una cocina mucho más grande. En ese momento, las cosas estaban un poco hacinadas y Chris tenía dificultades para encontrar papel y lápiz con que aclararme las cosas. «Estoy convencido de que la conciencia es un fenómeno inductivo, emergente», dijo Chris, empezando a dibujar. Estaba haciendo versiones de su diagrama favorito, que muestra las propiedades globales surgiendo de la interacción local, la imagen icónica de la emergencia en los sistemas complejos.

«Mira, lo que creo es que la conciencia está probablemente cinco o seis niveles por encima», dijo, dibujando más diagramas. ¿Quieres decir que tienes una serie de sistemas, cada uno de los cuales produce algún tipo de propiedad global, y que esas propiedades globales interaccionan con cada una de las otras para generar otro nivel de propiedades emergentes y así sucesivamente a lo largo de cinco o seis niveles?

«Eso es. Es una jerarquía, con muchos niveles ascendentes, y tendría que haber propiedades extremadamente distribuidas.» Parece horriblemente complicado, dije, difícil de manejar. «Estoy convencido de que lo es, y quizá sea imposible describir el comportamiento del nivel superior. Puede que necesitemos conocer los comportamientos de las partes en algunos de los niveles inferiores.»

La imagen era poderosa, pero también escurridiza. ¿La conciencia como una propiedad emergente a partir de un sistema complejo adaptativo? Sonaba bien, pero me pregunté cómo podría ser instructiva más allá de la mera descripción. ¿Y qué ocurría con los otros dos pilares de los sistemas complejos adaptativos: la cristalización del orden y el procesamiento complejo de información en el límite del caos? Necesitaba descubrir cómo podían iluminar el fenómeno de la conciencia, si es que lo hacían. La ciencia de la complejidad había demostrado ser una herramienta poderosa aunque intransigente; penetrar el velo de la conciencia será un duro reto para ella, quizás el más duro de todos. Sabía que Jim Watson, codescubridor de la estructura del ADN, había descrito recientemente el cerebro humano como «la cosa más compleja que hemos descubierto hasta ahora en nuestro universo». Y la conciencia puede ser el mayor enigma que emerge de ese kilo de pastosa materia gris.

El psicólogo de Princeton Julian Jaynes escribió: «Pocas cuestiones han soportado o atravesado una historia más complicada que ésta, el problema de la conciencia y su lugar en la naturaleza [...] Algo acerca de ella vuelve una y otra vez, sin obtener una solución.» A juzgar por la floreciente industria editorial de los últimos años sobre el tema, nuestra sed de conocimientos sobre qué es ese «algo» no muestra signos de disminuir. Y es sin duda significativo que el número de tales libros —escritos por eminentes estudiosos de la filosofía, la psicología, la neurobiología, la informática y otras disciplinas— sólo pueda compararse con la diversidad de sus conclusiones sobre la naturaleza de la conciencia y su generación en

el cerebro humano. Nos tragamos todas las ofertas, pero nuestra sed sigue insaciada.

Para el neurobiólogo de la Universidad de Washington William Calvin, por ejemplo, la conciencia consiste en «contemplar el pasado y prever el futuro, planear qué se va a hacer mañana, sentir pesar ante una tragedia y narrar la historia de nuestra vida». Para el psicólogo de la Universidad de Cambridge Nicolas Humphrey, una parte esencial de la conciencia es «la sensación bruta». Roger Penrose, físico matemático de la Universidad de Oxford, afirma que la conciencia es «la capacidad de adivinar o intuir la verdad a partir de la falsedad en circunstancias apropiadas, de formar juicios inspirados». Según Stevan Harnard, director de la respetada revista *Behavioral and Brain Sciences*, «la conciencia es sólo la capacidad de tener experiencias».

Cada uno de nosotros tiene una sensación de lo que se entiende por conciencia. Utilizo la palabra «sensación» a propósito porque o bien concebimos el proceso que subyace a la conciencia como un simple procesamiento de la información o bien se inmiscuye algo más misterioso, un fuerte sentimiento del yo. Esta sensación de yo, que parece existir como entidad separada de nuestro yo físico, es la fuente del asombro y el misterio con que contemplamos la conciencia. Lo mismo le ocurrió al filósofo francés René Descartes, quien, hace tres siglos y medio, escribió: «Tan serias son las dudas en las que me he visto arrojado [...] que no puedo apartarlas de mi mente ni concebir algún modo de resolverlas. Me da la impresión de haber caído de improviso en un profundo remolino que me arrastra dando vueltas sin que pueda incorporarme en el fondo ni nadar hacia arriba». La solución de Descartes al enigmático misterio del problema mente-cuerpo, como se sabe, fue decir que la sensación del yo y el yo físico estaban en realidad separados, una filosofía conocida con el nombre de dualismo: la mente reside en el cuerpo, pero separada de él.

El dualismo cartesiano dominó el pensamiento filosófico durante tres siglos hasta que el filósofo británico Gilbert Ryle lo demolió contundentemente en su libro de 1949 *The Con-*

*cept of the Mind* con la tajante expresión: «El dogma del fantasma en la máquina». Es cierto que el dualismo cartesiano no está muerto del todo, como se pone de manifiesto en las opiniones de sir John Eccles, uno de los más grandes neurólogos del siglo. En su *Evolution of the Brain*, publicado en 1989, ha escrito: «Dado que las soluciones materialistas han fracasado a la hora de explicar nuestro carácter único, me veo obligado a atribuir el carácter único del Yo o el Alma a una creación espiritual sobrenatural», que, añadía, es «un milagro que siempre estará más allá de la ciencia». Sin embargo, en general, el materialismo, la alternativa al dualismo, domina el pensamiento moderno sobre la conciencia. Como dice el filósofo de la Universidad de Tufts Dan Dennett: «De algún modo, la mente no es más que un fenómeno físico. En otras palabras, la mente es el cerebro.» Por lo tanto, el debate hoy es entre materialistas que discuten sobre cómo surge la conciencia de la materia física del cerebro (aunque algunos sostendrán que el dualismo se esconde aquí y allá bajo diferentes formas, en particular dentro de algunas presunciones de la investigación sobre inteligencia artificial).

Decidí que debía hablar con Dan Dennett, que tenía fama de ser un pensador creativo y abierto y estaba relacionado con los miembros del Instituto de Santa Fe. Su despacho del edificio Easton de la Universidad de Tufts es pequeño, cuadrado y sin ventanas. Una pizarra completamente limpia ocupa una pared. Una máscara de vudú, con dos bocas, dos narices y tres ojos, mira desde una estantería. Debajo hay un busto blanco de frenología y una cabeza de plástico transparente llena de circuitos electrónicos, iconos de las visiones de la mente de los siglos XIX y XX (quizá XXI). En un rincón, una mesa es un revoltijo de libros (entre ellos *La nueva mente del emperador*, de Penrose) y un ejemplar del *Times Literary Supplement* en el que Dan hace una crítica vitriólica de un libro de la última hornada sobre la conciencia. Barbudo y con aspecto de hermano mayor, Dan tiene juicios firmes y es rápido en darlos a conocer. Cogió otro de los libros recientes sobre

la conciencia. «Un lamentable ejercicio de filosofía», soltó volviendo a dejarlo en la mesa.

Su nuevo libro se llama *Consciousness Explained*. Un título ambicioso, insinué. «Sí», reconoció, riendo. «En realidad, no pretendo tener todas las respuestas, ni siquiera la mayoría. Pero creo haber hecho un progreso importante en lo que estamos intentando explicar.» Su mensaje es doble. En primer lugar, que la noción de que hay algo dentro del cerebro que controla las sensaciones y los pensamientos, generando así un yo consciente, es falsa. Dan denomina a este concepto el «teatro cartesiano». En segundo lugar, que el flujo de conciencia secuencial que experimentamos es una ilusión, el producto filtrado de lo que él llama múltiples borradores de estados mentales. La visión de Dan es una visión cerebral de la mente, centrada en los niveles superiores del yo más que en las sensaciones brutas, o lo que los filósofos llaman cualidades (*qualia*). Es también una visión con la que pueden identificarse los partidarios de la inteligencia artificial «fuerte», la visión de que el procesamiento de la información es la mente.

En su libro, Dan escribe que la sugerencia de algún tipo de control en el cerebro es «la mala idea más tenaz que sesga nuestros intentos de pensar sobre la conciencia». Unas palabras fuertes, dije. «Es difícil escapar a ella», replicó Dan. «Soy el observador de mi conciencia, y tú de la tuya, pero la mala idea es que hay un observador dentro del observador, lo que antes solía considerarse como un homúnculo dentro del cerebro, viendo todo lo que sucedía, bajando palancas, apretando botones. Es una mala idea porque tenemos que dejar de pensar en un área del cerebro emitiendo esa clase de mensajes: “Se acerca un hombre vestido de azul”. De hecho, hay que pensar en sistemas descentralizados, distribuidos, y eso es difícil. Es una razón de la tenacidad del concepto del teatro cartesiano. Los mensajes que las áreas cerebrales emiten son en realidad muy básicos. Mira esto.» Dan me mostró una viñeta de Gary Larson con un hombre paseando al perro, con muchos perros alrededor. «El lenguaje de los perros traducido», decía la leyenda. Y los bocadillos con las voces de cada perro decían lo siguiente: «¡eh, eh! ¡eh, eh!».

«Es uno de los más brillantes», dijo Dan, mirando otra vez el dibujo cuando se lo devolví. «Si pudiéramos oír directamente lo que dice cada una de nuestras áreas cerebrales, sería: “¡eh, eh! ¡eh, eh!”». Y, de esta conversación monosilábica entre muchas áreas cerebrales, todo el sistema obtiene información sobre el hombre vestido de azul.» En lugar de un único homúnculo sentado en el centro del cerebro, hay un pandemónium de homúnculos, dice Dan, esbozando una imagen sobre la arquitectura de la vida artificial. «La información fluye en muchos sentidos y está sujeta a una continua revisión editorial, que produce múltiples borradores de fragmentos narrativos por todo el cerebro.»

Suena a un verdadero pandemónium, dije. ¿Cómo se puede sacar algo sensato de ahí? «Me gustaría que imaginaras algo que llamo la “máquina joyceana”, una máquina que filtra los múltiples borradores y al final ofrece la ilusión de un relato único en forma de flujo de conciencia», replicó Dan. «Estamos buscando la emergencia de la coherencia a partir de una máquina de proceso en paralelo masivo, el cerebro. Puedes pensar en una máquina virtual. Contraintuitivo, sí. Difícil de aceptar, cierto. Escandaloso, eso te lo garantizo. Pero ¿qué esperarías de una cosa que tuviera que imponerse a siglos de misterio, controversia y confusión? No se puede decir que Dan no sea atrevido.

El modo en que lo describes, dije, me suena muy similar al enfoque del Instituto de Santa Fe, ¿verdad? «Tienes toda la razón», respondió Dan. «Lo que mi modelo y su enfoque tienen en común es la emergencia. Hace unos pocos años, tenía que hablar de “características inocentemente emergentes” para que los biólogos no se inquietaran y pensarán que estaba hablando de algo místico. Pero, sí, la emergencia es un fenómeno de la ciencia dura y real y es central para la comprensión de la conciencia.»

Tu modelo pone un gran énfasis en el lenguaje, dije. «Así es, y por una buena razón», dijo Dan. «Añade el lenguaje al cerebro, y el resultado es que son muchas más las cosas que puedes hacer con el hardware. Sin él, el modelo de borradores múltiples no podría funcionar.» ¿De modo que estás negando esta clase de conciencia a todos los animales excepto al hom-

bre? «Sí. Wittgenstein dijo una vez: “Si un león pudiera hablar, no lo entenderíamos”. No creo que eso sea correcto. Creo que seríamos capaces de entenderlo, pero de ese león parlanchín no aprenderíamos mucho de la vida de los leones corrientes, porque el lenguaje habría transformado en gran medida su mente.»

Ningún animal sin lenguaje experimenta una sensación del yo, sostuvo Dan, no de la manera en que los seres humanos experimentan el yo. No hay borradores múltiples, no hay flujo de conciencia, sólo un yo biológico. «¿Puedo demostrar que un murciélago carece de esos estados mentales?», preguntó retóricamente. «No, no puedo. Pero tampoco puedo demostrar que las setas no son naves intergalácticas que nos espían.»

El libro de Dan ha recibido amplios elogios, se ha dicho que su modelo es inventivo y poderoso, pero se le ha criticado por apuntar demasiado alto en lo referente a lo que es la conciencia. «La gente dice que dejo de lado las cualidades, pero creo que me refiero a eso», dijo, refiriéndose al nivel más básico de conciencia: el nivel que se refiere a la simple sensación. Un par de años atrás, el psicólogo de la Universidad de Cambridge Nicholas Humphrey pasó un año sabático en Tufts, para hablar específicamente con Dan sobre la conciencia. Fue un periodo intenso y creativo, y ambos escribieron un artículo titulado «Speaking for Our Selves», que examinaba la conciencia desde el punto de vista del síndrome de la personalidad múltiple. También hablaron mucho de las cualidades. «El modelo de los borradores múltiples de Dan es excelente», me dijo Nick, «pero no me cabe duda de que omite las cualidades, o sensaciones brutas.»

Conozco a Nick desde hace veinte años y he visto evolucionar sus ideas sobre la conciencia. Durante la década de 1970, provocó un enorme revuelo planteando y respondiendo la pregunta: «¿Para qué sirve la conciencia?» Su respuesta fue que había evolucionado como instrumento para jugar al ajedrez social, la compleja interacción y manipulación social que tiene lugar en las vidas de los primates superiores y, en particular, los seres humanos. Un individuo, al controlar sus propios sentimientos y reacciones ante las situaciones, es capaz

de predecir con mayor precisión las reacciones ajenas, con lo que obtiene una ventaja en el juego del ajedrez social. La noción de Nick de la función social del intelecto y la conciencia se convirtió, y lo sigue siendo, en una explicación preferida entre los antropólogos y los primatólogos para la evolución de características únicas en el cerebro del primate superior. Por ejemplo, un reciente e importante análisis de la cognición de los primates decía que «entre los primates no humanos, las capacidades cognitivas sofisticadas son más evidentes durante las interacciones sociales [con otros miembros del grupo]».

«Esta visión de la conciencia, como la que tiene Dan, se centraba en la conciencia de nivel superior, de segundo orden», dijo Nick. «Sigo creyendo que la autoconciencia, que los seres humanos experimentan y también los chimpancés, aunque en menor grado, es importante en el contexto social. Nos permite moldear nuestras propias mentes y eso constituyó un factor crucial en el hecho de convertirnos en humanos. Pero cada vez me he sentido más incómodo con eso y ahora tengo una visión diferente de lo que es la conciencia.» Nick ha contribuido a la industria editorial sobre la conciencia con su *History of the Mind*. Su tesis es que la conciencia es una sensación, un sentimiento bruto, ni más ni menos: sensaciones de color, sensaciones de dolor, sensaciones de hambre, una experiencia preproposicional, no categorizada, sin elaborar. «Las sensaciones entran en la conciencia, no como acontecimientos que nos suceden, sino como actividades que nosotros mismos engendramos y en las que participamos: actividades que se repliegan sobre sí mismas para crear el momento denso del presente subjetivo», escribió.

Eso suena muy básico, dije. «Lo es», replicó Nick. ¿Y no estás abandonando la función social de la conciencia en los seres humanos? «No. Los seres humanos experimentan eso, no hay duda, y lo conocemos con el nombre de introspección. Es muy importante para el modo en que llevamos nuestras vidas y qué sentimos acerca de ellas. Pero, al restringir la conciencia al nivel cerebral tal como había hecho, excluía la mayor parte del resto del reino animal. Razonando como razono ahora que la sensación en el presente constituye la conciencia

puedo devolver al redil a gran número de animales.» Pregunté por qué quería hacerlo; una pregunta que, a todas luces, no era fácil de contestar. «Bueno, tenía el convencimiento de que no era cierto», empezó de modo defensivo. «De lo que había estado hablando era de la capacidad de reflexionar sobre un estado mental, no del propio estado mental. Cuanto más defendía la cuestión más miradas inexpresivas me ponían y, cada vez más, empecé a compartir esas miradas.»

¿Estás afirmando que ahora consideras que el propio estado mental constituye la conciencia y que la capacidad para reflexionar sobre él es algo adicional, un nivel secundario de la conciencia que sólo los seres humanos experimentamos? «Sí, he llegado a esa conclusión», dijo Nick. «Cuanto más miras los animales, más difícil se hace negarles la sensación. Los animales saben en cierto nivel que sienten dolor; sólo que no son conscientes de ello en la forma en que lo somos nosotros. Es el presente lo que es crucial en la conciencia, no reflexionar sobre el pasado o el futuro.» Al extender la conciencia a gran parte del resto del reino animal, estás haciendo que los seres humanos parezcan algo menos especiales, ¿verdad? «Sí, y creo que se está acumulando un fuerte impulso en esa dirección», dijo Nick. «La gente parece querer creer en una especie de continuidad entre nosotros y los demás animales. Eso no es negar que los seres humanos tengamos cualidades especiales. Las tenemos, pero también compartimos con ellos ese nivel básico de conciencia. Creo que el impulso por restablecer la continuidad es una reacción a la arrogancia de los especialistas en inteligencia artificial que afirman haber resuelto el problema de la conciencia en un nivel mecánico.»

Pregunté si creía que un ordenador no tendría capacidad de sentir, aunque ejecutara programas que imitaran el pensamiento humano. «Las máquinas pensantes no son difíciles de construir», respondió Nick, «pero no son máquinas sensibles». Los superordenadores de hoy, sobre todo los grandes ordenadores en paralelo, que están un paso más cerca de la arquitectura del cerebro que los ordenadores en serie convencionales, son capaces de procesos de pensamiento muy respetables y poderosos. Pero eso no basta para engendrar sentimientos, sostiene

Nick. «La razón por la cual los ordenadores no pueden sentir es que en ellos no hay lugar para sentir algo. Los ordenadores vienen en una caja, que no constituye un límite significativo para ellos. La caja en la que nosotros venimos es el límite de nuestra experiencia, y nuestras sensaciones son la experiencia de lo que está sucediendo en ese límite.»

Dos tesis sobre la conciencia; en realidad, dos formas muy diferentes de conciencia. La de Dan Dennett es un fenómeno computacional, de nivel superior. La de Nick Humphrey es una sensación básica, no computacional en esencia. Cuando los filósofos o los psicólogos hablan de conciencia saben siempre que, mirando por encima del hombro, está la comunidad de la inteligencia artificial. Mezcla de filósofos e ingenieros inspirados, enfocan la mente humana de un modo perfectamente resumido por la descripción que Marvin Minsky hace del cerebro humano: «Un ordenador hecho de carne».

Decir que el cerebro es una computadora es una verdad evidente porque, de modo incuestionable, lo que tiene lugar en él es computación. Pero, hasta la fecha, ningún ordenador hecho por el hombre iguala el cerebro humano, ya sea en capacidad o en diseño. Danny Hillis, la inspiración científica que se encuentra detrás del ordenador más avanzado del mundo, Connection Machine-5, describe su máquina como «de complejidad trivial comparado con el cerebro de una mosca». De todos modos, la pregunta puede seguir planteándose: ¿puede pensar un ordenador? Y, en última instancia, ¿puede un ordenador generar un nivel de conciencia como el que Dan Dennett o Nick Humphrey, o cualquier otro, tiene en mente?

En la ciencia de la inteligencia artificial es famoso el test de Turing, un Rubicón que separa la simple computación de la computación similar a la mente. Formulado en 1950 por el matemático británico Alan Turing, el reto es crear un sistema informático que pueda inducir a un interrogador a pensar que está teniendo un diálogo con otro ser humano, no con una máquina. Para los partidarios de la IA fuerte, un ordenador

que pase semejante prueba no es sólo un modelo de la mente humana, sino que es mente humana en un sentido muy real. Según este punto de vista, la mente —es decir, la cognición y la conciencia— es el resultado de ejecutar el programa correcto, al margen de que el hardware esté formado de silicio o de membranas lipídicas.

Hasta ahora ningún ordenador ha pasado de algún modo convincente la prueba, aunque recientemente se han obtenido algunos éxitos limitados. Aun cuando un ordenador pasara la prueba, mucha gente seguiría sin quedar impresionada, aunque por diferentes motivos. «El test de Turing consagra la tentación de pensar que, si algo se comporta como si se dieran ciertos procesos mentales, debe darse realmente esos procesos», escribió no hace mucho John Searle en un artículo en *Scientific American*. Por ejemplo, el hecho de que el sistema informático Deep Thought pueda competir en ajedrez a un nivel de gran maestro no dice nada sobre la comprensión del juego del sistema. El ordenador obtiene su nivel competitivo de su capacidad para ejecutar 700 000 movimientos posibles por segundo, no gracias a la estrategia creativa. Deep Thought juega bien al ajedrez, pero no es un jugador de ajedrez.

Searle, filósofo de la Universidad de California, Berkeley, sugiere que los partidarios de la inteligencia artificial están persiguiendo sin querer una nueva forma de dualismo. «A menos que uno acepte la idea de que la mente es del todo independiente del cerebro o de cualquier otro sistema físicamente específico», escribió, «no puede esperar crear mentes sólo diseñando programas.» Searle considera que tal empeño es fútil.

En el mismo número de *Scientific American*, Paul y Patricia Churchland, filósofos de la Universidad de California en San Diego, también rechazan el test de Turing por inadecuado para reconocer mentes, aunque por razones diferentes. Como Searle, sostienen que lo que sucede dentro del ordenador es un criterio importante de mente, pero dejan abierta la posibilidad de que algún día pueda construirse un ordenador similar a la mente. Eso exigiría un desplazamiento del proceso en serie convencional a las máquinas de proceso en paralelo. «La

inteligencia artificial, en una máquina no biológica pero de funcionamiento masivo en paralelo, sigue siendo una perspectiva irresistible y discernible», escribieron.

El ataque más notorio y vigoroso a la escuela computación-igual-a-mente de la inteligencia artificial ha sido el reciente libro de Roger Penrose *La nueva mente del emperador*. «Pensé el título antes de escribir el libro», me dijo Roger cuando lo visité en su despacho del Instituto de Matemáticas, un edificio moderno en St Giles, rodeado por las antiguas facultades de Oxford. «Luego descubrí que pocas personas entendían lo que quería decir con él, así que escribí una pequeña historia para arropar el libro.»

La historia, ambientada en el futuro, trata de la presentación de un nuevo ordenador, tan poderoso que podría ejecutar los asuntos de Estado. Con  $10^{17}$  «unidades lógicas», la máquina suplantaría a cualquier cerebro o comité de cerebros humanos. En el momento de la inauguración, el diseñador jefe pregunta si alguien desea hacer una pregunta a esa mente última, a modo de iniciación. Un muchacho se levanta y pregunta: «¿Cómo se siente?». Hay mucha ironía implícita en esa pregunta tan ingenua, y el diseñador jefe informa que el ordenador no entiende lo que el muchacho quiere decir. «En la traducción francesa eso se perdió por completo, y el editor quiso cambiarle el título», dijo Roger. «La cuestión es que los partidarios de la IA se están engañando a sí mismos y a los demás cuando sostienen que computación y mente son lo mismo.» ¿Estás diciendo que ninguna actividad mental es computacional?, pregunté. «No, algunas sin duda lo son. Pero cuando estamos hablando de conciencia y creatividad, la analogía computacional resulta inadecuada. Los algoritmos son inadecuados como medio de conseguir la conciencia y el pensamiento creativo.»

Pregunté si las nuevas posibilidades computacionales abiertas por los computadores de proceso en paralelo masivo podrían acercarse a la creatividad y la conciencia. «No, no lo creo», contestó Roger. «Todavía estás hablando de algoritmos en el seno de las matemáticas tal como las conocemos, y lo que yo estoy buscando es algo fuera de eso.» Raya en lo más

tico, ¿verdad?, pregunté. «Puede parecerlo y, tengo que admitirlo, a veces siento simpatía por las interpretaciones místicas. Pero, no, estoy buscando una nueva física cuántica de la mente.»

*La nueva mente del emperador* es un *tour de force* de matemáticas, física y filosofía, un largo razonamiento sobre la inadecuación del modelo informático de la conciencia. No obstante, una razón por la que Roger se lanzó «allí donde los físicos matemáticos es probable que no se aventuren» surgió de su propia experiencia. Las ideas importantes se le han presentado a menudo completamente formadas, procedentes de un fermento cognitivo, y sólo es necesario pulirlas un poco. «Me da la impresión de que, cuando tengo una idea matemática, mi mente está estableciendo contacto con el mundo platónico de los conceptos matemáticos», explicó Roger. «Es como llegar al mundo ideal platónico y recuperar algo que ya existe. No parece un proceso algorítmico de descubrimiento. Parece algo bastante diferente y, por ahora, en mi opinión, no puede explicarse con nada de lo que hablan quienes se dedican a la inteligencia artificial. No es simple computación.» Sentí, de nuevo, oír aquí los tambores de la emergencia, distantes pero claros.

Se dice que la neurociencia está inundada de datos sobre lo que el cerebro hace, pero que está prácticamente desprovista de teorías sobre cómo funciona. Algunas descripciones globales de las propiedades del cerebro humano son instructivas. Por ejemplo, en el cerebro hay 10 000 millones de neuronas, cada una de las cuales, por término medio, tiene un millar de uniones con otras neuronas, lo cual da cien mil kilómetros de cables. La conectividad a esa escala está más allá de toda comprensión, pero no cabe duda de que es fundamental para la facultad del cerebro de generar la cognición. Aunque en un ordenador electrónico los sucesos individuales son un millón de veces más rápidos que en el cerebro, su conectividad masiva y el modo simultáneo de actividad permite a la biología superar a la tecnología en cuanto a velocidad. Por

ejemplo, el ordenador más rápido realiza aproximadamente mil millones de operaciones por segundo, que se vuelven insignificantes junto a los 100 000 millones de operaciones que tienen lugar en el cerebro de una mosca en reposo.

La magia de todo esto es que, si bien ninguna neurona individual es consciente, el cerebro humano en su conjunto sí que lo es y genera los saltos de percepción intuitiva que tanto impresionan a Penrose y otros. ¿Cómo lo hace? ¿Cómo se transforman en cascadas de cognición las simples señales eléctricas a lo largo de las membranas celulares individuales? ¿Cómo están ensamblados los miles de millones de neuronas individuales en un cerebro, la sede de la mente?

Patricia Churchland, filósofa, decidió hace algunos años que si tenía que comprender cómo funciona la mente, necesitaba saber algo de neurobiología. Ni la filosofía por sí sola ni la neurobiología por sí sola podían prometer una respuesta, creía. Su libro de 1986 *Neurophilosophy* constituyó la primera piedra de la vinculación entre las dos disciplinas. La segunda ha sido su libro de 1992, *The Computational Brain*, coescrito junto a Terrence Sejnowski. Nos conocimos en un congreso científico en Berlín y, tras asistir en grupo a un concierto en la Sala Filarmónica, fuimos a un restaurante local a hablar sobre la conciencia. De forma muy apropiada, se llamaba Café Einstein.

¿Es razonable concebir el cerebro humano como un sistema dinámico complejo?, pregunté. «Eso es a todas luces cierto», respondió rápidamente. «Pero, ¿y qué? ¿Cuál es después tu programa de investigación?» Pat combina una apreciación de la función del cerebro en su conjunto con un examen de la mecánica de sus sistemas individuales internos. «La naturaleza no es un ingeniero inteligente», continuó. «No empieza de cero cada vez que quiere construir un sistema nuevo, sino que tiene que trabajar con lo que ya hay.» Esa es la noción de François Jacob de la evolución como bricolaje, haciendo remiendos con lo que tiene a mano, ¿no es cierto? «Sí, y el resultado es un sistema que ningún ingeniero humano habría podido diseñar, pero asombrosamente poderoso, eficaz en términos de energía y brillante en términos computacionales.

Es también una maravilla de miniaturización. Los sistemas nerviosos son fruto de la evolución, y eso dificulta a los neurobiólogos y, en especial, a quienes trabajan en la IA, buscar el diagrama de cables y descubrir lo que está ocurriendo.» ¿Por qué a quienes trabajan en la inteligencia artificial en especial?, pregunté. «Porque tienden a enfocar el problema dentro del marco de la ingeniería eléctrica y con prejuicios sobre el modo en que creen que los cerebros deberían procesar la información, en lugar de averiguar cómo lo hacen.»

Hay una tendencia cada vez mayor entre los investigadores de la inteligencia artificial a desplazarse de los ordenadores convencionales de proceso en serie a las máquinas de proceso en paralelo, cosa que Pat aplaude. «Es obvio que es la dirección que hay que tomar», dice. «El sistema nervioso es un instrumento de proceso en paralelo, lo cual da lugar a varias propiedades interesantes. Para empezar, las señales se procesan en muchas redes de forma simultánea. Luego, las neuronas son en sí mismas pequeños ordenadores analógicos muy complejos. Por último, las interacciones entre neuronas son no lineales y modificables. Las redes neuronales reales son sistemas dinámicos no lineales y por ello pueden emerger nuevas propiedades en el nivel de la red.» Por lo tanto, ¿puedes describir el resultado como una propiedad emergente? «Exacto. Cuando piensas en la actividad del cerebro debes tener en cuenta propiedades emergentes en niveles superiores que dependen de fenómenos de nivel inferior en el sistema.»

Explicué los principios de la nueva ciencia de la complejidad, la importancia de la emergencia a partir de los sistemas dinámicos, la noción contraintuitiva de la cristalización del orden a partir de las redes complejas, el poder de procesamiento de información en el límite del caos. «La idea de Stuart Kauffman del orden innato en las redes tiene un aire correcto en algunos aspectos de la operación del cerebro», respondió Pat. «Pero, de nuevo, te enfrentas a la pregunta: ¿qué clase de investigación haces luego? Prefiero tomar una vía por el nivel más básico. Las teorías tienen que ser comprobables, y la comprobabilidad es más factible de ese modo.»

¿Y qué hay de la noción del límite del caos?, pregunté.

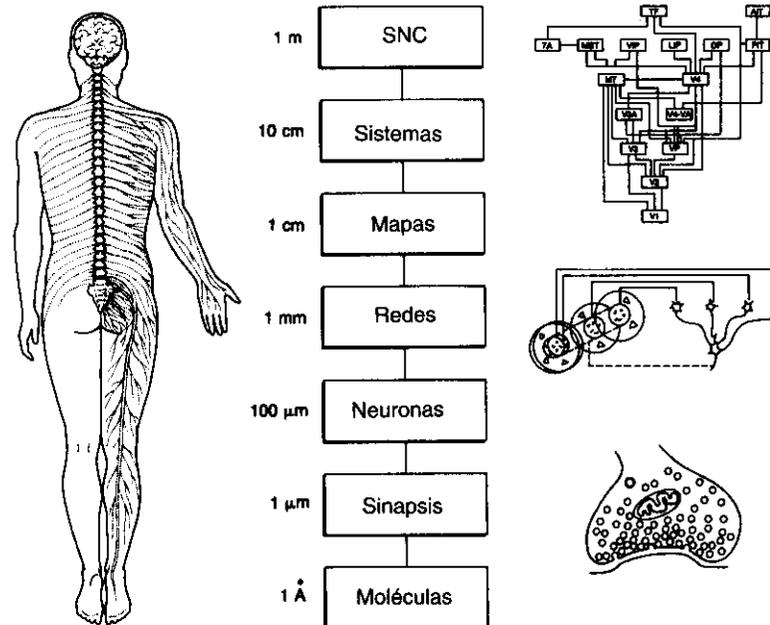


Figura 8. Niveles estructurales en la organización del sistema nervioso, un reflejo de los sistemas jerárquicos que pueden subyacer a la generación de funciones cognitivas superiores, incluyendo la conciencia. Cortesía de Patricia Churchland y Terrence Sejnowski.

«Sí, podría haber algo en eso. Podría proporcionar un marco que nos permitiera enfrentarnos con algunos enigmas de las funciones superiores. Pero antes de enfrentarnos a la neurobiología de la creatividad y la impredecibilidad, necesitamos comprender la precisión y predictibilidad del sistema nervioso. ¿Cómo consigue una lechuza atrapar con tanta frecuencia un ratón que huye? ¿Cómo suelo arreglármelas para decir lo que quiero? Estas hazañas del sistema nervioso indican que hay una precisión, una adaptabilidad y una predictibilidad tremendas. Mi corazónada particular es que los problemas muy complejos pueden enfocarse mejor después de tener a mano las soluciones de problemas menos complejos: como en física, que te quedas irremediamente atascado si insistes en com-

prender la turbulencia antes de comprender cómo rueda una pelota por un plano inclinado.»

También yo sentía que, al menos en el nivel de la analogía, el límite del caos tenía mucho sentido: un sistema preparado para responder, empujado a la actividad creadora por simples perturbaciones. Pero, sí, ¿cómo se pasa de la analogía fructífera a los experimentos prácticos?

«Me gustaría volver a algo que estaba diciendo sobre la redes», dijo Pat. «Te dará alguna idea de a qué nos enfrentamos.» Describió una red de neuronas famosa en la actualidad entre los neurobiólogos, el ganglio estomatogástrico de la langosta. El ganglio, que contiene unas veintiocho neuronas, dirige el movimiento muscular rítmico del sistema gástrico del animal. Allen Selverston, de la Universidad de California, San Diego, ha llevado a cabo un heroico estudio del ganglio. «Se sabe muchísimo de la anatomía general, las conexiones de las redes», explicó Pat. «Sabemos qué neuronas se comunican con otras, y con qué efecto. Pero, incluso con toda esa información, una descripción muy abundante de la red, seguimos sin comprender cómo produce el resultado rítmico que vemos. El mensaje es que los detalles del sistema son necesarios si queremos comprender su actividad, pero a todas luces no son suficientes.»

Se me ocurrió una analogía. Ya sabes que, aun con la secuencia completa de ADN de un organismo, los biólogos moleculares son incapaces de deducir cómo se ensambla un organismo durante su desarrollo, dije. Se necesita algo más. (Estaba pensando en el enfoque holístico del desarrollo de Brian Goodwin.) Así que, de la misma manera, aun cuando dispusieras del diagrama completo de los cables del cerebro humano, seguirías siendo incapaz de decir cómo surgen de él los procesos cognitivos, ¿no? «Tienes razón. No basta con conocer la microarquitectura. También tenemos que comprender las propiedades de la red que surgen de la microarquitectura y, por ahora, eso no es en absoluto evidente.» Ese, dijo Pat, es el mensaje de su nuevo libro.

A continuación, hablamos de las misteriosas cualidades que posee en el plano subjetivo la conciencia. Ni siquiera una

comprensión del problema podría eliminar eso, acordamos, y, en cualquier caso, tener una experiencia del azul es completamente diferente de conocer los mecanismos cerebrales de esa experiencia. A continuación en tono especulativo, Pat dijo: «Hacemos nuestra investigación como si el materialismo fuera un hecho probado, pero por supuesto no lo es.» ¿Quieres decir que el dualismo cartesiano podría ser verdad? «Quiero decir que no podemos pretender haberlo descartado. El problema mente-cuerpo ha sido un misterio durante tanto tiempo que puedes comprender el atractivo de la idea de que hay realmente algo más allá de lo que sabemos sobre la física y la química del cerebro, o incluso de lo que podemos saber. No creo ni por un instante que pueda haber de verdad un alma no física, pero también me doy cuenta de que tenemos muchísimo que aprender sobre cómo funciona el cerebro.»

Colin McGinn, filósofo británico de la Universidad de Rutgers, es uno de los estudiosos más consistentes en el tratamiento de la misteriosa naturaleza de la conciencia. Sin embargo, su enfoque es inusual. «El misterio es real», me dijo, «pero no estoy afirmando que exista algo mágico en la conciencia. Soy tan materialista como el que más. Lo que sostengo es que una comprensión de la conciencia está más allá del alcance de la mente humana, que cognitivamente no estamos equipados para comprender el modo en que comprendemos otros fenómenos que experimentamos en el mundo físico.»

El razonamiento de Colin está basado en lo que llama realismo biológico. En palabras sencillas, dice lo siguiente: del mismo modo que el cerebro de una ostra está limitado en cuanto a lo que puede abarcar, también lo está el de una rata, un mono y un ser humano. «Los seres humanos no tienen garantizada la apertura cognitiva completa, y no cabría esperarla», me dijo. «La profunda sensación de misterio que experimentamos en relación con la conciencia debería al menos animarnos a explorar la posibilidad de que su comprensión nos esté sencillamente vedada.» Los seres humanos están pre-

parados para representar un mundo espacial, explicó Colin. Debido a que la conciencia es en esencia una experiencia subjetiva, nuestros sentidos analíticos, que tienen éxito a la hora de explorar el resto del mundo natural, fracasan a la hora de abarcarla.

«Puedes analizar la estructura y la función del cerebro del mismo modo en que analizamos otros fenómenos», dijo Colin, «pero la información obtenida habla de células y circuitos nerviosos. De modo alternativo, puedes pensar la conciencia en tanto que experiencia subjetiva. Y lo que descubres es que las dos facetas de la investigación no se encuentran nunca y, según creo, nunca lo harán.» Pregunté a Colin si estaba diciendo que la conciencia se generaba al margen de la física y la química que conocemos, algo al estilo del razonamiento de Roger Penrose. «No, como digo, soy tan materialista como el que más. No hay nada misterioso en la física y la química que subyacen a la conciencia. Nuestro problema es que el fenómeno que surge de esa química y esa física —la conciencia— no es asequible a la clase de pensamiento analítico de que somos capaces los seres humanos.»

Dan Dennett se muestra muy despectivo en relación con esta línea de razonamiento. «Creo que es objetable», me dijo. «Está adornada con un tinte pseudobiológico al decir que la ostra y la hormiga tienen limitaciones y que, por lo tanto, también debemos de tenerlas nosotros. El lenguaje transforma tanto nuestras mentes que estamos en una escala diferente.» El motivo de la línea de razonamiento de Colin, insinúa Dan, es «construir una línea Maginot alrededor de la mente de modo que los científicos no puedan entrar». Su indignación es apenas contenible. «Es una doctrina religiosa», acabó burlándose.

«La posición de Dan es una gran muestra de dogmatismo», me dijo Colin. «Mi razonamiento es la forma más fuerte de naturalismo que puedas imaginar. Lo que estoy diciendo, y lo que dijo Chomsky durante mucho tiempo, es que tenemos que ser naturalistas primero respecto a nuestras capacidades cognitivas.» Colin sostiene que nos resulta fácil aceptar que, a diferencia de algunas otras criaturas, los humanos no podemos ver la luz ultravioleta debido a simples razones

biológicas. Los humanos no podemos oír ultrasonidos, mientras que algunas otras criaturas sí, de nuevo por simples razones biológicas. ¿Así que por qué se espera que los humanos seamos capaces de comprender todo fenómeno surgido del cerebro? «Cuando digo que la conciencia es un misterio, estoy haciendo una afirmación naturalista sobre las capacidades cognitivas humanas, no sobre cualquier cualidad mística de la propia conciencia. La conciencia puede ser una característica biológica bastante sencilla, como la digestión.»

«Por supuesto que la conciencia parece misteriosa, pero ése es sólo el elemento subjetivo que experimentamos los humanos», dijo Norman Packard. Estábamos hablando en los despachos de Santa Fe de la Prediction Company, donde, en varias habitaciones vecinas al lugar lleno de luz de la parte posterior del edificio en que nos hallábamos, algoritmos secretos exploraban en poderosos ordenadores los misterios de los mercados financieros. «Pero no creo que sea un misterio en ningún sentido importante, en nuestro apremio por intentar comprenderlo.»

Por entonces ya me había formado una imagen de la conciencia como el mayor reto intelectual con que se enfrentaba la nueva ciencia de la complejidad, un fenómeno de propiedades mercuriales. William James, en *Principles of Psychology* (1890), escribió: «Cuando adoptamos [...] una visión general del maravilloso flujo de nuestra conciencia, lo que nos sorprende en primer lugar es el diferente ritmo de sus partes. Como en la vida de un pájaro, parece estar hecha de una alternancia de vuelos y reposos.» En su búsqueda por comprender la conciencia, los investigadores modernos no se ponen al parecer de acuerdo sobre la dirección en que está volando el pájaro, dónde podría posarse y ni siquiera sobre la naturaleza del pájaro. Un verdadero misterio.

Deseaba, por último, descubrir qué podría aportar de único la ciencia de la complejidad a esta búsqueda. Había oído que en una reunión anterior del Instituto de Santa Fe en la que se exploró el ámbito de sus investigaciones, la gente se arredró

ante el reto de la conciencia. Philip Anderson había provocado varias veces a los presentes con la pregunta: «¿Y qué hay de la palabra "C"?». Nadie había aceptado el envite. Me parecía, tras mi odisea a través de todos los patrones de la naturaleza, que había una prometedora línea en este contexto: la de la tendencia de los sistemas complejos adaptativos hacia el procesamiento de información. También recordaba que en la reunión sobre progreso evolutivo en el Museo Field de Chicago, Francisco Ayala había descrito la conciencia humana como «el clímax de un tipo de progreso, el del procesamiento de información».

Le pregunté a Norman si pensaba que su intuición era válida. «Completamente», contestó. «La idea es algo natural. En la evolución de la biosfera ves computación y procesamiento de información que tienen lugar en diferentes niveles y diferentes lugares. Tienes procesamiento de información en el interior de los organismos, en el interior de las células de los organismos y en el interior de unidades compuestas de muchos organismos.» ¿Como en las colonias de hormigas, quieres decir? «Sí, y en las colonias de otros insectos sociales. Y, por supuesto, en la sociedad humana.»

¿De qué clase de información estamos hablando aquí?, pregunté. «Datos sensoriales brutos, que son procesados en forma de algún tipo de representación del mundo.» Pero eso sin duda no tiene que aparecer en el nivel de conciencia para que el organismo sea capaz de operar, ¿no? Los organismos procesarían este tipo de información como autómatas eficientes. «Eso es, ¿pero no crees que tu impresión del mundo, por medio de la autoconciencia, influye en cómo piensas que otros animales experimentan sus mundos? Creo que tienen un nivel de conciencia que no es necesariamente tan agudo como el nuestro, debido a este fenómeno adicional de la autoconciencia. La conciencia no es un fenómeno binario, de sí o no. Tiene grados.»

De acuerdo, dije, ¿puede la ciencia de la complejidad aportar algo único al estudio de la conciencia? «En última instancia, sí. Tal como la concibo, la ciencia está relacionada con el procesamiento de información en toda la biosfera; el pro-

cesamiento de información es central para el modo en que la biosfera evoluciona y opera. La conciencia es sólo una parte de ese rompecabezas mucho más grande, y es importante recordarlo. La mayoría de estudios sobre la conciencia se centran sólo en el propio fenómeno, y eso es solipsista. No estoy diciendo que no sea válido, pero me has preguntado qué contribución única podría aportar a la empresa la ciencia de la complejidad, y es situar la conciencia dentro del rompecabezas más amplio que representa el procesamiento de información en la biosfera.»

Tengo que admitir que no esperaba esa vigorosa línea de argumentación de Norman. Había sacado el tema antes con Chris Langton, Stu Kauffman y otros, y había entrevistado razonamientos de que, en principio, la ciencia de la complejidad tiene que enfrentarse de algún modo a la conciencia, pero poco más. Norman parecía dispuesto a ir más allá. Con un modo de hablar sosegado, determinado, frecuentemente interrumpido por largas y reflexivas pausas, Norman da la impresión de mirar al futuro a través de una ventana, una vista que no está al alcance de todos.

Eso suena impresionante, dije, pero ¿puedes hacer que toque el suelo de un modo práctico? «Oh, supongo que sí», respondió Norman. «Los modelos evolutivos simples como los que tenemos entre manos acabarán desarrollando un comportamiento lo bastante rico como para ver emerger alguna clase de conciencia.» ¿Estás diciendo que tu modelo informático, una forma de vida artificial, desarrollará conciencia? «Estoy diciendo que el nivel de procesamiento de información del sistema evolucionará hacia lo que llamaríamos conciencia, que los organismos alcanzarán un punto donde procesarán información por sí mismos, y serán conscientes.» ¿La vida artificial, volviéndose consciente de sí misma? «Sí.»

Norman describe su sistema informático actual como de lo más simple, ya que había empezado con organismos «estúpidos» que «iban dando tumbos para conseguir comida trabajosamente». Sin embargo, a medida que el programa evolucionó, los organismos mejoraron, se volvieron más eficaces en la consecución de alimento e incluso apareció el sexo. «El sexo

es una interacción tan complicada como cualquier otra», dijo Norman. «Pero es un principio. No me cabe la menor duda de que la mejora de comportamiento que he visto a través de la evolución representa estrategias de procesamiento de información mejoradas. Un día desarrollarán algún tipo de conciencia. Estoy seguro.» ¿Pero cómo lo sabrás?, pregunté. Hubo una pausa más larga de lo normal. «Sus cerebros son simples y su mundo es diferente del mío, así que no lo sé, será difícil.»

Otra pausa. «Si nos ponemos así, yo sé que soy consciente, pero no sé si tú lo eres.»

## 9

### La vista desde el límite

Según la portada del dominical de *The New York Times* del 22 de julio de 1990, Edward O. Wilson es «El hombre hormiga». Y con razón. Ed, educado en una familia baptista de Alabama, era ya antes de llegar a la adolescencia un naturalista apasionado y nada le gustaba más que perder el tiempo en los riachuelos y el bosque. Nunca salió de esa fase de afición por los animales por la que pasan muchos niños y hoy, medio siglo después, ocupa la cátedra de ciencias Frank B. Baird, Jr., de Harvard, y es conservador de entomología del Museo de Zoología Comparada de esa universidad. Las hormigas están por todas partes en su gran oficina del cuarto piso en el moderno anexo del museo.

Una matrícula de coche de Georgia donde se lee HOLA HORMIGAS cuelga en una pared. «Es de un amigo», explicó. En la puerta de la nevera hay pegada una foto gigante de una hormiga. En la mesa que ocupa el centro de la habitación, hay una escultura de bronce de una hormiga. Sobre una mesa lateral, hay un ejemplar de *The Ant*, un compendio de 732 páginas escrito con su colega Bert Hölldobler. Pensado como guía para todo el que quiera ser mirmeecólogo, el volumen, maravillosamente ilustrado, es tan arrebatador en su prosa descriptiva, que le valió a sus autores el premio Pulitzer de 1991 (el segundo de Ed). Contra un ordenador, hay apoyada una caja que contiene el juego de ordenador SimAnt, basado en los estudios de Ed sobre la vida de las hormigas. Y luego están las hormigas de verdad, tres colonias de hormigas cortadoras de hojas sobre unas mesas a los dos lados de la habitación. Cada colonia está dividida en dos partes principales,

cada una con muchos compartimientos, unidas por un arco de bambú por encima del cual las obreras llevan copos de avena (sustitutos de hojas), que serán el abono para el jardín de hongos de la colonia.

«Unas criaturas maravillosas», dijo Ed, mientras contemplábamos el movimiento constante de los individuos en una de las colonias, innumerables fragmentos de actividad fundiéndose en un propósito: la vida de la colonia. Pregunté si esas colonias procedían de la finca El Bejuco, el trozo de selva tropical costarricense de Tom Ray. «No, éstas no, pero mis colonias anteriores sí. Esas proceden de La Selva, un lugar cercano. Pero Bert y yo fuimos al terreno de Tom hace un par de años, en busca de ejemplares. Así que, si viste troncos desgarrados por los caminos, fuimos nosotros.» Con su figura alta y delgada, Ed contempló la colonia en silencio durante unos instantes, absorto. «Nosotros los humanos tenemos una visión distorsionada del mundo», dijo por fin. «Cuando reflexionamos sobre la naturaleza solemos pensar en seres como nosotros, grandes vertebrados. Pero los vertebrados son rarezas en el mundo de la naturaleza, en comparación con los insectos.» Y las hormigas son los reyes de los insectos o, al menos, los reyes de la selva. Un científico del Instituto Smithsonian demostró recientemente que en la bóveda arbórea de la selva tropical las hormigas constituyen el 70 por ciento de la población total de insectos.

«Puedes pensar en las hormigas como la culminación de la evolución de los insectos en el mismo sentido en que los humanos son la culminación de la evolución de los vertebrados», continuó Ed. «Ambos han desarrollado sistemas sociales complejos, y eso ha tenido una repercusión tremenda en su éxito evolutivo. Sólo el 2 por ciento de las especies de insectos son sociales, pero representan más de la mitad de la biomasa de insectos. Y podemos medir el éxito humano a partir de nuestra creciente población y a partir del hecho de que hemos colonizado prácticamente todos los lugares del globo. En realidad, diría que nosotros tenemos demasiado éxito.» Señaló, con más de un destello de triunfo mirmecológico, que las hormigas aprendieron el recurso de la sociabilidad unos buenos

100 millones de años antes de que los humanos aparecieran en escena. Un tanto a favor de las hormigas.

Al poco de iniciar mi exploración de las implicaciones biológicas de la nueva ciencia de la complejidad supe que en algún punto tendría que hablar de hormigas con Ed Wilson. Ed es hoy más famoso —y, para algunos, tiene más bien mala fama— por ser el «padre de la sociobiología», gracias al enorme libro publicado en 1975 con el simple título de *Sociobiología*. En él sostenía que gran parte del comportamiento, incluyendo gran parte del comportamiento humano, debía entenderse en última instancia en términos de determinación genética, una noción que algunos consideraron atrevida mientras que otros denunciaron como fascista. Ed es fascinante y convincente hablando del tema, pero esa vez había ido a verlo por las hormigas. Había dos razones, estrechamente unidas. La primera era el impacto biológico de la sociabilidad, algo que los humanos comparten con los insectos sociales, en especial, las hormigas y las termitas. Para los insectos, la sociabilidad se ha convertido en parte de su naturaleza interna, algo grabado en los genes. Para los humanos, la sociabilidad —en el nivel de complejidad observado en las colonias de insectos— ha surgido como expresión cultural de un potencial interno, una propiedad mucho más dinámica. No obstante, los puntos comunes son evidentes, y ambos están unidos por la segunda de las dos razones: el fenómeno de la emergencia. Las vidas de las hormigas individuales y los seres humanos individuales están transformadas por la pertenencia a una entidad más grande, una entidad que también contribuyen a crear.

Me estaba resultando cada vez más evidente que la emergencia es la característica central de la nueva ciencia de la complejidad. Lo habíamos visto en los modelos evolutivos de Tom Ray y Kristen Lindgren, por ejemplo, y en los modelos de sistemas coevolutivos de Stu Kauffman. Lo habíamos visto en la progresión morfológica durante el desarrollo embriológico. Lo habíamos visto en las propiedades de los ecosistemas, como la existencia de las redes tróficas y la persistencia de las comunidades, y en todo el camino hasta el control global, en Gaia. Lo habíamos visto en los diferentes niveles de

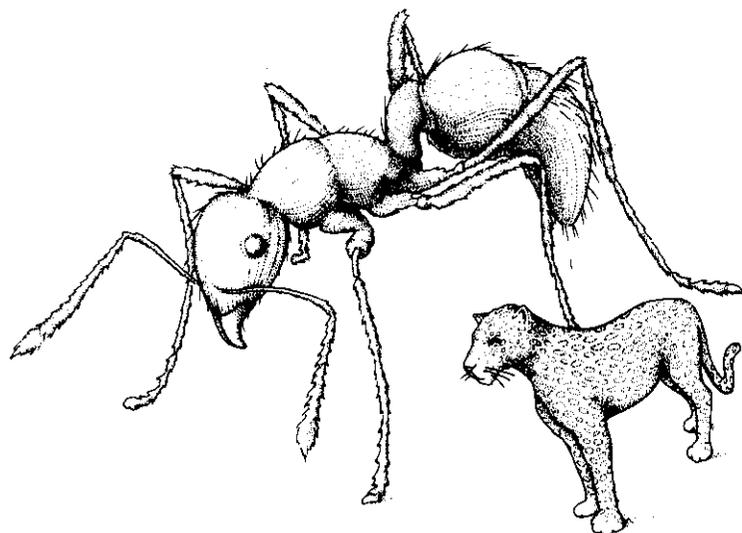


Figura 9. En la selva tropical brasileña, la biomasa de hormigas es aproximadamente cuatro veces mayor que la biomasa de todos los vertebrados (mamíferos, pájaros, reptiles y anfibios) juntos, como muestran los tamaños relativos de una hormiga, *Gnamptogenys pleurodon*, y de un jaguar. Cortesía de E.O. Wilson y Katherine Brown-Wing.

complejidad dinámica de las sociedades humanas, desde las bandas hasta el Estado. Y, en el nivel de detalle en el que trabaja Ed Wilson, podíamos verlo en las vidas de los insectos sociales.

«Los insectos sociales empujaron a los insectos solitarios hasta una posición menor en el ecosistema», explicó Ed. «Las propiedades emergentes de la vida social son, pues, muy poderosas.» ¿Hay algo cualitativamente nuevo en la sociabilidad de los insectos? «Sin duda», replicó Ed. «Para empezar, la colonia como un todo procesa más información», contestó Ed. «Un insecto social individual procesa menos información que un insecto solitario individual, pero como parte de una actividad agregada, el insecto social contribuye a un proceso de in-

formación más complejo. La colonia obra como un único organismo.»

Al inicio de sus estudios, Ed se dio cuenta de la importancia de la comunicación en el funcionamiento de la colonia. Gran parte de la comunicación es de carácter químico, como Ed y otros han descubierto. En las hormigas de fuego, por ejemplo, las necesidades tróficas de la colonia son «conocidas» por el conjunto de la comunidad, porque las obreras intercambian constantemente muestras de los contenidos de sus estómagos, creando efectivamente un único estómago para toda la colonia. Las obreras que se encuentran en las primeras líneas de la búsqueda de alimentos saben, por lo tanto, lo que va a parar a las bocas de las jóvenes en lo más profundo de la colonia. «La respuesta masiva a los requisitos de la colonia puede ser más precisa de este modo que si cada obrera tuviese que valorar por sí misma las necesidades de la colonia», explicó Ed.

Uno de los ejemplos favoritos de comunicación en las colonias fue descubierto por su colega Bert Hölldobler. Las hormigas melíferas, que viven en Arizona, se alimentan de termitas cuando pueden, una fuente de alimento rica y abundante. Sin embargo, a veces las exploradoras de dos colonias separadas encuentran al mismo tiempo un termitero y hay que establecer quién tiene derecho al preciado tesoro. En lugar de una verdadera batalla, las dos colonias realizan un torneo en el que grupos de obreras de cada bando se pavonean como si fueran sobre zancos y sacuden el cuerpo al acercarse a las oponentes. La exhibición se limita a parejas o pequeños grupos de las bandas rivales, que pueden alcanzar los doscientos individuos y representan de esta manera sólo una pequeña muestra de las colonias. Rara vez se llega al recurso de los mordiscos o los chorros de ácido fórmico, que hacen de estas criaturas mortíferas máquinas de asalto. Hölldobler descubrió que típicamente vencía la colonia de hormigas con mayor número de obreras exhibiéndose, que obtenía el acceso a las termitas «con escaso derramamiento de hemolinfa», en palabras de Ed. La colonia toma una decisión, que es el resultado del comportamiento individual agregado.

«Estos ejemplos constituyen la mayor demostración de emergencia que cabría esperar», dijo Ed. «Esto te da una idea de por qué la sociabilidad tiene tanto éxito en términos evolutivos.» Sabía que este éxito se había expresado muchas veces en la evolución de los insectos. «Doce veces, en linajes independientes», me informó Ed. «Puedes concebir la sociabilidad como un atractor biológico. Funciona en el caso de los insectos y de los humanos, pero no hay nada con la misma intensidad de la sociabilidad en medio.» La expresión «atractor biológico» era precisamente la misma con la que Brian había descrito la generación de la forma biológica, incluyendo los órganos individuales y los organismos completos. Aquí, la expresión de Ed se aplicaba a lo que hacían los organismos, a su comportamiento colectivo. «Obviamente, con los humanos las cosas son un poco más complicadas», continuó Ed, «pero la sociabilidad en los humanos es tanto un atractor biológico como lo es en los insectos.» Se aprecian diferentes niveles de complejidad en las sociedades de diferentes especies de insectos, pero no se aprecia la progresión a través de los diferentes niveles —como las humanas pueden progresar de la banda, a la tribu, a la jefatura y al Estado— dentro de las mismas especies. «La sociabilidad humana es un sistema más dinámico», observó Ed.

Había algo de lo más agradable en el hecho de pasar de la sociabilidad humana, que traté en mi primer contacto con la complejidad, a la sociabilidad de los insectos, en esa mi última entrevista. Con ella se cerraba un ciclo intelectual, que completaba lo que sería una poderosa imagen de lo que podría significar la nueva ciencia de la complejidad en el mundo de la naturaleza. Para mí, el proceso de exploración estaba tocando a su fin.

Pero quería hablar más con Ed de su referencia a la colonia de hormigas —cualquier colonia de insectos sociales— en el sentido de que operaba como un organismo único. Cuatro décadas atrás, estaba de moda referirse a las colonias de insectos sociales como superorganismos, y no como simple analogía. Para William Morton Wheeler, el predecesor de Ed Wilson en el Museo de Harvard, una colonia de hormigas era

un organismo único: exhibía una especialización de funciones, las unidades individuales eran completamente dependientes del conjunto, que a su vez era una consecuencia de su actividad colectiva, y el resultado final no se parecía a nada de lo existente en el mundo de los insectos solitarios.

«El superorganismo era una idea engañosa, estaba bien para hablar unos minutos», me dijo Ed. «Pero pronto se deshacía, al menos en los términos en los que se concebía entonces, que, francamente, eran bastante místicos. La emergencia era importante en esa época, pero estaba muy lastrada también por la mística.» Pero has hablado de propiedades emergentes en tus colonias de hormigas, dije. ¿No estabas siendo místico? «No. Cuando llegué aquí en la década de 1950, me esforcé por alejarme del concepto de superorganismo e intenté basar nuestro enfoque en la obtención de detalles en un nivel inferior.» ¿Lo describirías como un enfoque reduccionista? «Sí. Necesitamos comprender cómo funcionan las partes del sistema antes de poder contemplar el conjunto. Pero es el momento de volver a mirar el conjunto y, sí, creo que podemos empezar a hablar de las colonias de insectos como superorganismos, pero sin que en ello haya misticismo alguno.» ¿Afirmas que el conocimiento de los detalles a escala inferior del modo en que operan las colonias no es suficiente para comprender el conjunto? «No, no digo eso. Afirmo que hay algo auténticamente emergente en el comportamiento de un sistema complejo como es una colonia de insectos, pero lo que es importante en nuestra comprensión de él también se adquiere con la mecánica del sistema.»

Le expliqué que el concepto de emergencia era una parte vital de la nueva ciencia de la complejidad, de modo específico, en los sistemas complejos adaptativos, ya fuera en los reinos de la biología o de la física. También dije que eso, según veía, representa un problema porque los biólogos modernos recelan de la emergencia como concepto explicativo. «Si, muchos recelan, y por una buena razón», contestó Ed. «En sí misma, la emergencia no puede constituir una explicación si no tienes una idea de la mecánica del sistema y eso puede parecer como una llamada al misticismo.» Pero, como fenó-

meno, afirmas que la emergencia en los sistemas biológicos es real. «Sí. No hay duda de ello.»

Al centrarse en la emergencia como fenómeno biológicamente importante, la nueva ciencia de la complejidad ha irrumpido en un debate con una larga historia y un fuerte contenido emocional. Durante dos milenios, una división intelectual separa las visiones del mundo natural de los estudiosos, una es esencialmente platónica y la otra aristotélica. En el lado aristotélico, los mecanicistas han afirmado que los organismos vivos «no son más que máquinas» y pueden explicarse por completo por medio de las leyes de la mecánica, la física y la química. Los platónicos han aceptado que los organismos vivos obedecían esas leyes físicas, pero han insistido en que la esencia de la propia vida era algo adicional, una fuerza vital insuflada en la mera materia. Para los vitalistas, por lo tanto, muchas de las propiedades más interesantes estaban, por su propia naturaleza, más allá del análisis científico.

En las primeras décadas de este siglo habían prevalecido los mecanicistas, por dos razones. La primera, porque el descubrimiento científico había demostrado repetidas veces que las propiedades de los organismos consideradas inexplicables hasta entonces tenían en realidad explicaciones mecanicistas. Y la segunda que los mecanicistas se habían desplazado desde la posición estricta de «no son más que máquinas» a la aceptación de que los objetos vivos y no vivos eran en realidad diferentes. Las diferencias residían en la organización del material físico, de modo que los organismos poseían propiedades no compartidas por los objetos no vivos. Por lo tanto, la corriente principal de la biología se volvió esencialmente mecanicista.

Sin embargo, la victoria de los mecanicistas nunca fue completa, hubo filósofos e incluso físicos que defendieron de modo explícito alguna forma de vitalismo. Por ejemplo, en 1932, Niels Bohr, el descubridor de la estructura básica del átomo dijo lo siguiente: «El reconocimiento de la importancia esencial de las características fundamentalmente atomísticas en

las funciones de los organismos vivos no es en modo alguno suficiente para la explicación total de los fenómenos biológicos». El vitalismo de Bohr, que se derivaba de su física cuántica, obtuvo cierta popularidad durante un tiempo.

Al mismo tiempo, algunos biólogos continuaron sosteniendo que las leyes de la química y la física por sí solas eran insuficientes para explicar características importantes de la vida, no por la adición de algún tipo de *élan vital*, sino debido a la complejidad emergente. En 1961, Conrad Waddington lo dijo así: «El vitalismo equivalía a la afirmación de que las cosas vivas no se comportan como si sólo fueran mecanismos contruidos a partir de simples componentes materiales; pero esto presupone que uno sabe cuáles son los simples componentes materiales y qué clase de mecanismos pueden llegar a formar». Waddington era un emergencista, pero no un vitalista. Creía que el ensamblaje de un organismo vivo está sujeto a las leyes físicas, pero que su resultado no es derivable de las propias leyes. La nueva ciencia de la complejidad es, de muchas maneras, heredera de esta línea de razonamiento. Se trata de un nuevo emergentismo, de un tipo mucho más poderoso en potencia que cualquiera de sus predecesores.

No obstante, es probable que los partidarios de la complejidad descubran que su mensaje se recibe con mucho más recelo que cualquiera de sus predecesores, principalmente debido al enorme éxito de la biología molecular en las últimas tres décadas y, sobre todo, en la última. En la actualidad, las herramientas para manipular el material genético rayan en la fantasía de la ciencia ficción y prometen la consecución de logros aún mayores. El ADN de los organismos puede examinarse al más pequeño detalle, y comprenderse la más minúscula fracción del mensaje que encierra. O, al menos, es lo que se supone. Por lo tanto, la biología molecular moderna es lo último en cuanto al enfoque reduccionista para la comprensión de los organismos y su historia, y representa las antípodas del emergentismo.

No hace mucho tiempo asistí a un pequeño encuentro donde eminentes científicos de diferentes disciplinas ofrecieron sus puntos de vista sobre el futuro de la ciencia. Un biólogo

molecular galardonado con el premio Nobel se levantó y dijo: «Con nuestra nueva capacidad para manipular y analizar el ADN, podemos empezar a comprender el proceso de la evolución». Lo decía en serio. Basta leer el mensaje de los genes y todo será revelado: ése era su punto de vista. Ninguna concesión a las complejidades del desarrollo. Ningún indicio de que la biología de las poblaciones pueda desempeñar un papel en el destino de una especie. Ninguna sugerencia de que las especies son parte de los ecosistemas, que son ellos mismos componentes de estructuras mayores, todo lo cual influye en el desarrollo de la historia evolutiva. Y, por supuesto, nada acerca de la inmanente creatividad de los sistemas dinámicos complejos. Mientras otros biólogos consideren la biología molecular como paradigma de la biología moderna —como muchos hacen—, no es probable que el fenómeno de la emergencia sea acogido como portador de una poderosa perspectiva.

¿O sí?

«Nos encontramos en el umbral de un cambio importante», me dijo Brian Goodwin. «El reduccionismo de la biología molecular ha sido importante y no cabe duda de que aprenderemos mucho más de él. Pero, en el entusiasmo por acumular más y más datos sobre lo que la gente considera como el nivel fundamental de los sistemas biológicos, se ha hecho caso omiso del organismo. Es el momento de cambiar.» Brian, uno de los últimos discípulos de Waddington, sigue la línea de su mentor, que muchos observadores consideran una extraña mezcla de matemáticas duras y misticismo oriental. Es un biólogo teórico del mayor calibre y, sin embargo, para desasosiego de algunos de sus colegas, a menudo se desliza hasta un tono profundamente filosófico. «Rechazo el auténtico vitalismo», me dijo Brian. «Pero, tomando en serio el organismo en biología, diciendo que hay algún tipo de organización que es distintiva de lo vivo, podemos acercarnos a una mejor apreciación de la cualidad del organismo.»

¿Qué quieres decir con «cualidad»? pregunté. Parece un poco confuso, no demasiado científico. «Estoy hablando del

organismo como la causa y el efecto de sí mismo, su propio orden y su propia organización intrínsecos» contestó Brian. «La selección natural no es la *causa* de los organismos. Los genes no *causan* los organismos. No hay *causas* de organismos. Los organismos son agentes autocausales.» Eso sí que suena místico, dije. «No si piensas en términos de los rasgos emergentes de la autoorganización y los procesos de desarrollo de los que hemos hablado antes. No si concibes los organismos como resultado de un atractor biológico, tu remolino en el mar de un sistema dinámico complejo. Cuando empiezas a pensar así, comienzas a acercarte a lo que quiero decir con cualidad.»

Sigue teniendo un matiz de vitalismo, afirmé. «No niego que haya una sensación de misterio en la vida», dijo Brian. «Siempre lo habrá. Pero tienes que deshacerte de la idea de que hay algo añadido desde fuera que es responsable de la vida. Ese es el viejo vitalismo. No se añade nada desde fuera, todo proviene de dentro, del propio organismo, el atractor biológico. En mi clase de vitalismo, no hay lugar para ningún “algo” externo que sea la causa de todo.» ¿Describirías esta visión como holística? «Sí. A la gente no le gusta la palabra, porque suena demasiado a vitalismo de viejo cuño. Pero es difícil deshacerse de ella. Lo he intentado con “integrado” e “integral”, pero siempre vuelvo al holismo. A mí me funciona.»

Había hablado con William Provine sobre la nueva ciencia de la complejidad, con su énfasis en la emergencia y su posible papel como precursora de un nuevo impulso hacia una visión holística de la naturaleza. Will, historiador de la ciencia en la Universidad de Cornell, fue rápido en sus críticas. «Los emergencistas pueden afirmar ser verdaderos materialistas y, al mismo tiempo, decir lo que más deseaban los vitalistas», me dijo. «A saber, que las irreductibles y encantadoras propiedades de la evolución se hacen cada vez más elevadas, cada vez más complejas.» Pero, dije, la gente de Santa Fe habla de autoorganización en los sistemas complejos, de la emergencia de

pautas en modelos evolutivos que imitan las pautas de la naturaleza. Sugieren que los organismos vivos, en tanto sistemas dinámicos complejos, están movidos por las mismas pautas. Están diciendo que hay una profunda teoría para el orden que vemos en la naturaleza.

Will siguió sin impresionarse. «Veo gente intentando establecer conexiones entre las pautas en los mundos bióticos y abióticos, y a mí eso solo no me convence», dijo. «Que me digan qué mecanismo produce esas pautas, entonces quizá me interese.» Para él lo principal, como historiador, es que la gente de Santa Fe, como nuevos emergencistas, están siguiendo un camino trillado. «Cada nuevo grupo de emergencistas afirma ser más mecanicista que el anterior», dijo Will. «Está en una larga tradición de una búsqueda de propósito en la vida, una búsqueda de significado de la vida. Teilhard de Chardin lo hizo a su modo. Dobzhansky lo hizo a su modo. Waddington lo hizo a su modo. Y la gente de Santa Fe lo está haciendo al suyo. En esa línea de razonamiento, pronto llegas al libre albedrío y el determinismo.»

¿Es eso lo que estás haciendo?, pregunté a Brian. ¿Estás buscando el significado de la vida, como afirma Will Provine? «Tiene razón en que la gente que está estudiando los sistemas complejos está redescubriendo las propiedades que los vitalistas intuyeron», dijo Brian. «Hay una especie de convergencia. Pero, no, vemos cosas diferentes. Los vitalistas veían una fuerza exterior dirigiendo la vida mientras nosotros vemos principios internos y autoorganizativos. Así que no, no estamos buscando el significado de la vida, más bien el significado en la vida, la generación de patrones, la generación de orden, la cualidad del organismo.»

Cuando le hice la misma pregunta a Stu Kauffman, se mostró categórico: «No, no estoy buscando el sentido de la vida. Estoy buscando una teoría profunda del orden en la vida a lo largo de todo el espectro, desde el propio origen de la vida, a través de la dinámica de la evolución y los ecosistemas, a través de la complejidad en la sociedad humana y, sí, en una escala global, la de Gaia. Creo que la ciencia de la complejidad nos acercará a esa comprensión.» ¿No puede

verse eso como un deseo de algo más que una explicación de la forma y el orden biológicos; más un deseo de que haya alguna clase de propósito en la vida? Al fin y al cabo, las discusiones sobre la conciencia terminan a menudo con un deseo de algo más, un deseo de algo profundo e inexplicable, y eso parece ser una característica humana. «Quizá suene a eso, pero el lenguaje hace trampas. Como dice Brian, y creo que tiene razón, el darwinismo puro nos deja sin una explicación de la generación de la forma biológica. Desde el punto de vista darwinista, los organismos son sólo productos remendados de la mutación aleatoria y la selección natural, respondiendo estúpidamente a la adaptación primero en una dirección y luego en otra. Lo encuentro profundamente insatisfactorio, y no creo que sea porque quiera que haya algún propósito en la evolución.»

Me has contado muchas veces que desde el principio de tu carrera estabas convencido de que tiene que haber algo profundo en la fuente del orden en la naturaleza, dije. Querías encontrar la fuente de la autoorganización y lo has hecho, con tus redes booleanas aleatorias. Y la ciencia de la complejidad proclama que es cierto de modo bastante general en el mundo. Y, sin embargo, nadie puede decir todavía cómo emerge el orden, sólo que parece hacerlo en tus sistemas informáticos. ¿Verdad que aún hay que dar un salto fideísta para que todo esto se aplique al mundo real? «¿Crees que en lo más profundo estoy buscando una fuente de orden en la naturaleza como consuelo psíquico, la tranquilizadora mano de Dios en los controles de la vida?», respondió Stu. «Todos nos hemos formado en el conocimiento de la segunda ley de la termodinámica, que afirma que los sistemas tienden al desorden. La segunda ley es buena hasta donde llega, pero resulta inadecuada como descripción de todos los sistemas: algunos sistemas tienden hacia el orden, no hacia el desorden, y ése es uno de los grandes descubrimientos de la ciencia de la complejidad. Así que no, no creo que Dios tenga las manos en los controles de la vida. Te diré por qué hay gente que piensa eso.»

»Tiene que ver con la diferente manera en que físicos y

biólogos vemos el mundo. Los físicos se sienten muy cómodos con la noción de autoorganización. La ven en todas partes. Piensa en las formas maravillosamente complejas de un copo de nieve, el orden que literalmente cristaliza a partir del caos. Pero los biólogos vemos la autoorganización con profundo recelo, y no es difícil adivinar por qué. La revolución darwinista consistió en la eliminación de explicaciones de apariencia mística del orden biológico.» ¿El relojero de William Paley?, insinué. «Eso es», dijo Stu. «La teología natural de Paley explicaba la forma biológica como la obra de la mano de Dios. Llegó Darwin y dijo: no, la forma biológica es consecuencia de la selección natural. Los biólogos modernos tienden a considerar cualquier sugerencia de autoorganización como un retroceso hacia Paley, y se resisten.»

¿Os gustaría reformular la teoría darwinista para incluir la autoorganización? «Así es», dijo Stu. «No tenemos una teoría en química, física, biología u otros ámbitos que una la autoorganización y la selección. Hacer eso, como creo que debemos hacer, aporta una nueva visión de la vida.» ¿Y extiende la autoorganización desde el reino de la física, donde es aceptada, a la biología, donde todavía se considera como mística en el mejor de los casos y herética en el peor? «Sí, y nos acerca a una física de la biología. Como dice Brian, la ciencia de la complejidad hará más inteligible el orden biológico.»

Llegado a ese punto de mi exploración de la complejidad, debo admitirlo, me había convertido en un entusiasta, aunque no lo bastante para satisfacer la pasión proselitista de Stu Kauffman. «Pero, ¿no vas a proclamar en tu libro que estamos en el umbral de una revolución?», me preguntó con incredulidad cuando un día le expliqué mi postura. Quizá tú creas que la revolución está aquí, pero yo no estoy seguro. Si todo lo que dices de la complejidad es correcto, sí que estamos al borde de la revolución. Pero no puedes decir que todo es correcto, ¿verdad? «No, no puedo», admitió, «pero hay una gran cantidad de ciencia de lo más rigurosa que se deriva de todo

esto. Y», añadió, «tengo la fortísima intuición de que resultará ser correcto. La intuición es muy importante en ciencia.»

Mi cautela procedía de varias fuentes. De modo instintivo, respondo de forma positiva al fenómeno de las estructuras emergentes de los sistemas complejos, da la impresión de que es correcto. No obstante, me pongo nervioso cuando no puedo ver exactamente cómo se ensambla el orden. Cuando Stuart Pimm me dijo: «Desconfío de las propiedades emergentes que no puedo comprender», eso me tocó una fibra sensible. Quizá Stuart y yo somos demasiado cautos. Will Provine siente a todas luces lo mismo y aun con más fuerza. Mostradnos el funcionamiento de la máquina y nos convertiremos en creyentes, parecemos estar diciendo.

También me encontré con algunas valoraciones completamente negativas de la empresa del Instituto de Santa Fe. Por ejemplo, el ecólogo de la Universidad de Oxford Robert May me dijo que lo que el instituto hace es «matemáticamente interesante pero biológicamente trivial». Los modelos informáticos están demasiado alejados de la biología real para su gusto y son irremediablemente simplistas. «Bueno, no se podía esperar otra cosa de Bob», oí como refutación en Santa Fe. Bob tiene fama tanto por su brillantez como por su arrogancia. «No creo que Bob sepa de verdad lo que hacemos aquí», me dijo Stu. «Si lo supiera, creo que vería las cosas de modo diferente.»

Bob admitió que el instituto estaba repleto de talento y luego añadió que donde mejor lo mostraban era en la hipérbolo. Jack Cowan, el matemático de la Universidad de Chicago que le facilitó a Stu Kauffman su primer puesto docente en 1969, estaba de acuerdo. «No me mal interpretes», dijo, «en el instituto hay una gran cantidad de trabajo bien hecho, pero a veces salgo de allí preguntándome adónde conducen algunas cosas.» Jack, miembro de la junta científica del instituto, tiene una larga experiencia en investigación sobre sistemas dinámicos complejos. «Ha habido episodios de enorme progreso en la comprensión de los sistemas complejos, pero también episodios de enorme desengaño», me dijo. «¿Te acuerdas de la teoría de las catástrofes?»

A finales de la década de los sesenta, el matemático francés René Thom desarrolló lo que se consideró, y aún se considera, una brillante y poderosa teoría para describir la dinámica de ciertos sistemas no lineales. Concretamente, la teoría parece ser capaz de predecir cómo los sistemas podrían cambiar catastróficamente de un estado a otro, de ahí su nombre. «No hay en absoluto nada equivocado en la teoría de las catástrofes», explicó Jack, «salvo que algunos de sus partidarios, incluyendo el propio Thom, proclamaron que era una ley prácticamente universal que lo explicaba todo, desde el desarrollo embriológico a la revolución social. A Waddington le gustó porque pensaba que ayudaría a iluminar el desarrollo embrionario.»

Me suena familiar, dije, pensando en las afirmaciones hechas en nombre de la complejidad. «¿Verdad?», replicó Jack. «Quizás encierre algunas verdades universales la teoría de la complejidad, pero el modelo todavía tiene que formularse pensando en la física y la biología para que funcione de modo adecuado. Y eso es lo que nos falta por ahora.» ¿Estás diciendo que la complejidad está condenada al mismo destino que la teoría de las catástrofes, que sólo tendrá interés para una pequeña fracción de la comunidad matemática, sin que tenga la amplia relevancia proclamada? «No», replicó Jack con cautela. «Estoy diciendo que la teoría de la complejidad parece prometedora, que puede que ofrezca todo lo que sus entusiastas proclaman, pero sencillamente no lo sabemos. Es difícil de precisar.» Con «difícil de precisar» Jack quería decir que todavía tiene que discernirse plenamente la mecánica de los diferentes sistemas —desde los autómatas celulares al desarrollo embrionario, los ecosistemas, las sociedades complejas, Gaia— y, cuando eso ocurra, se planteará cuánto tienen en común.

¿Qué hay de la aleccionadora experiencia de la teoría de las catástrofes?, pregunté a Stu Kauffman. «Es una hermosa teoría», contestó, «y funciona a la perfección para describir flujos en superficies de potencial. Pero la mayoría de las cosas en la naturaleza no son flujos en superficies de potencial.» ¿Qué te hace pensar que la teoría de la complejidad pueda aplicarse de forma más general?, pregunté. «Sabemos que la

mayor parte de la naturaleza está compuesta de sistemas complejos no lineales, ¿verdad? Y sabemos que algunos de esos sistemas, aun cuando pueden ser descritos con ecuaciones simples, divergen de forma espectacular.» ¿Quieres decir que se vuelven caóticos? «Sí, ésa es la teoría del caos, sólo una parte de la teoría de los sistemas complejos. Otra parte, probablemente mucho más grande, describe los sistemas que no divergen, sino que producen un flujo convergente, producen estructura. Esto se aplica a nuestros modelos evolutivos informáticos y a los sistemas biológicos. Es cierto que no sabemos cómo se produce exactamente la estructura, pero sabemos que se produce, y en una amplia gama de sistemas.» En otras palabras, ¿podéis afirmar ya que la teoría de los sistemas complejos adaptativos —lo que he estado llamando complejidad— es aplicable de modo general? «Sí, podemos; lo hemos demostrado.» ¿Aplicable de un modo más general de lo que resultó ser la teoría de las catástrofes? «No me cabe la menor duda al respecto.»

El lenguaje, como dijo Stu, hace trampas, a veces revela ideas sobre aquello de lo que se habla y a veces sobre la mente del hablante. Había advertido muchas veces, al hablar de la dinámica de los sistemas complejos, que la gente utilizaba el lenguaje del propósito, del comportamiento que busca un objetivo. «Un sistema en coevolución se sitúa en el límite del caos», por ejemplo. Y el límite del caos es «un lugar preferido», porque «es donde se maximiza el procesamiento de información» o porque «el sistema optimiza ahí la eficacia biológica sostenida». Incluso la expresión «orden a partir del caos» posee cierta cualidad mágica. Me pregunté si Will Provine había estado en lo justo al afirmar que la gente del Instituto de Santa Fe estaba buscando en realidad el sentido de la vida y que la clave del motivo subyacente quedaba revelada por su lenguaje. O si la dinámica de los sistemas complejos adaptativos era tan poderosa, tan inmanentemente creativa, que hacía difícil evitar el lenguaje teleológico.

«Tienes razón al decir que a veces hablamos así, como si

fuéramos vitalistas o algo parecido», concedió Chris Langton. «Pero creo que eso dice más de la naturaleza de los sistemas con los que trabajamos que de cualquier motivo oculto que podamos tener.» Estuvimos de acuerdo en que la imagen del límite del caos, con su escalofrío de lo desconocido, era de lo más poderosa. «A veces me recuerda cuando estaba aprendiendo submarinismo en Puerto Rico», dijo Chris. En esa época, a principios de la década de 1970, Chris trabajaba en una colonia de primates en Puerto Rico, tras dejar el Hospital General de Massachusetts en Boston y antes de embarcarse en su aventura con la vida artificial. Tenía mucho tiempo para la exploración.

«Al principio nadábamos en aguas cristalinas y pensábamos: eh, estamos en aguas profundas, somos submarinistas de verdad. Entonces un día el monitor nos llevó al límite de la plataforma continental, a más o menos una milla de Puerto Rico. Al acercarnos vimos el azul claro transformarse, de pronto, en azul oscuro, una drástica línea divisoria. Estábamos a unos veinte metros de profundidad; nadamos hasta el límite de la plataforma y nos asomamos. La pendiente, de unos ochenta grados, se hundía rebosante de vida, hasta desaparecer en la oscuridad. La imagen ha permanecido: la vida floreciendo en el límite del caos. He pensado en ella muchas veces, una especie de icono de la creatividad en el límite del caos.»

La imagen de Chris era realmente poderosa. Y resulta ser algo más que simple iconografía, porque hay buenas pruebas de que la evolución es particularmente innovadora en semejantes aguas, en equilibrio entre el caos de las zonas cercanas a la costa y la frígida estabilidad del océano profundo. Ahí, en cualquier caso, el abstracto límite del caos y el límite físico se funden en uno solo, creativo como imagen y como realidad.

Bob May había descrito gran parte de los intentos del Instituto de Santa Fe en la confección de modelos como «biológicamente triviales». Pero si el concepto del límite del caos puede trasladarse en efecto de los modelos informáticos al mundo real, de lo que están firmemente convencidos Stu

Kauffman, Chris Langton y otros, entonces no tendrá nada de trivial. Los sistemas coevolutivos de Stu se colocan solos en el límite del caos, y también los modelos ecológicos de Stuart Pimm y Jim Drake. Nadie puede afirmar todavía si los ecosistemas individuales hacen lo mismo, pero los datos de las extinciones en masa sugieren al menos que, globalmente, lo hacen. «Es un atractivo mensaje de una poderosa dinámica intrínseca», dijo Chris. «Los sistemas en equilibrio en el límite del caos alcanzan un control exquisito, y creo que es algo que se puede trasladar hasta Gaia.»

Es cierto que, por ejemplo, las comunidades ecológicas se desplazan hacia el límite del caos, donde emergen propiedades nuevas (como las redes tróficas y la capacidad de una comunidad establecida desde hace tiempo para resistir la invasión de una especie extraña), así que parece legítimo hablar de semejantes comunidades como sistemas reales. Puede ser incluso legítimo pensar que se comportan y evolucionan como un todo, de forma análoga al concepto de superorganismo del que Ed Wilson hablaba en relación con las colonias de insectos sociales. Las comunidades en coevolución actúan en concierto como resultado de la dinámica del sistema; lo hacen como resultado del comportamiento de los individuos de la comunidad que, de forma miope, optimizan sus objetivos, y no de un acuerdo colectivo hacia una meta común; y las comunidades llegan a conocer de verdad su mundo de un modo que era bastante impredecible antes de que la ciencia de la complejidad empezara a iluminarlo. En caso de ser cierta.

«Tiene que ser cierta», dijo Cris. «Puedes verlo claramente en nuestros modelos informáticos y también da la impresión de ser verdad en los sistemas biológicos. Así que, en efecto, esta sensación de sistemas coevolutivos que responden a la dinámica interna de formas que no se podían predecir nos proporciona una visión muy diferente del mundo.» Me estaba invadiendo la sensación de que los sistemas biológicos, desde el nivel más bajo al más alto de la jerarquía, se comportan como superorganismos, siendo Gaia el último. Una sensación común de la dinámica de la vida —de los sistemas vivos— palpita a través de todos los niveles. Reconocí el peligro de esta línea

de pensamiento y podía ver lo peligrosamente cerca del misticismo que me estaba deslizado. «Ya ves por qué utilizamos el lenguaje como lo hacemos», dijo Chris.

Estábamos sentados en una mesa redonda en la cocina de Chris y él encontró más papel para dibujar. «Veo en todo esto un hermoso acercamiento entre el mecanicismo y el vitalismo», explicó Chris mientras empezaba a dibujar. Una vez más, adquirió forma en el papel la imagen de la estructura emergente a partir de la interacción de entidades en un sistema complejo. Las flechas que ascendían desde la interacción inferior y local hasta llegar a la nube superior, llamada «propiedad global emergente»; y las flechas que descendían a derecha e izquierda desde la nube hacia las entidades interaccionantes de abajo, indicando un flujo de influencia en su comportamiento.

«Si eres un mecanicista estricto, todo lo que ves son las flechas ascendentes, mostrando que la interacción local causa alguna propiedad global, como la vida o un ecosistema estable», explicó Chris. «Si eres un vitalista estricto, todo lo que ves son las flechas descendentes, indicando algún tipo de propiedad global mística que determina el comportamiento de las entidades del sistema. El mecanicismo se mueve de abajo hacia arriba, y el vitalismo va de arriba hacia abajo», dijo haciendo más trazos. «Lo que la ciencia de la complejidad proporciona es la idea de que ambas direcciones son importantes, unidas por un estrecho e interminable bucle retroactivo. El sistema en su conjunto presenta una pauta dinámica, a lo largo de la cual se disipa la energía. Los vitalistas quedarán desilusionados si esperan que esta clase de pauta apoye su postura, porque, si se elimina la energía, se colapsa todo. Nada externo mueve el sistema; la dinámica procede de su propio interior.»

Estaba presenciando una fusión de los mundos platónico y aristotélico. ¿No hay, pues, fuerza vital?, pregunté. «No hay fuerza vital», dijo Chris. Pero hay algo más que el producto de las leyes mecánicas fundamentales del mundo. «La vieja visión del mundo de la naturaleza era que giraba alrededor de los equilibrios simples. La ciencia de la complejidad afirma que eso no es cierto. Los sistemas biológicos son dinámicos,

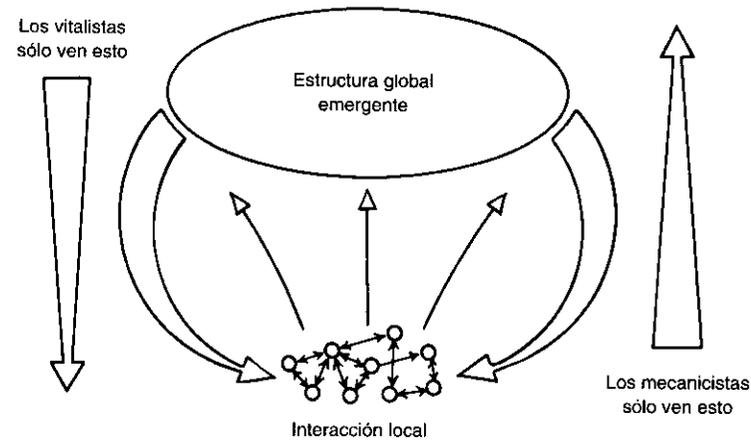


Figura 10. Según Chris Langton, los mecanicistas y los vitalistas ven el mundo de maneras opuestas.

no se predicen con facilidad y son creativos de muchas maneras. Has hablado con Stuart Pimm; ya lo sabes.» ¿Has dicho que la ciencia de la complejidad permite ver el mundo como creativo? «Sí. En la vieja visión del mundo en equilibrio, las ideas referentes al cambio estaban dominadas por la fórmula de la acción-reacción. Era un mundo de engranajes, predecible en última instancia de modo tedioso. En esa clase de mundo, no podía haber avalanchas de extinción y especiación de todas las magnitudes provocadas por la misma magnitud del cambio medioambiental, por ejemplo, como vemos en los modelos dinámicos complejos.»

Pero los biólogos han hablado de la naturaleza como algo increíblemente complejo, apenas predecible, protesté. «Es cierto y eso encierra una paradoja», empezó Chris. Explicó que, sí, se ha considerado la naturaleza como extremadamente complicada y difícil de penetrar. La presunción era que esa complejidad debía ser el resultado de causas complejas: la fórmula de la acción-reacción. «La ciencia de la complejidad nos enseña que la complejidad que vemos en el mundo es el resultado de la simplicidad subyacente», dijo Chris, «y eso significa dos cosas. La primera, que puedes concebir como creativos los sis-

temas simples subyacentes a todo, tal como he mencionado. Y, la segunda, dado que los sistemas simples generan pautas complejas, que se puede tener una verdadera oportunidad de comprender esas pautas. Tenemos la posibilidad de descubrir modelos simples que expliquen la creatividad que vemos. Los físicos comprenden esa clase de razonamiento, pero la mayoría de los biólogos creen que los modelos simples no pueden abarcar la complejidad que existe ahí fuera. Ahora sabemos que sí pueden hacerlo. Podemos demostrar la emergencia de la complejidad en los modelos informáticos y estamos empezando a comprender cómo se aplicarán en la naturaleza.»

¿En qué medida se aplicarán en la naturaleza?, pregunté. Chris pensó un instante. «No veo por qué no podría incluir todo el espectro, desde el desarrollo embrionario, la evolución, la dinámica de los ecosistemas, las sociedades complejas, hasta Gaia: todas las cosas de las que hemos estado hablando durante más o menos el último año.» ¿Así que estamos considerando una Teoría de Todo? «No estoy seguro de que se pueda decir que es una teoría de todo», dijo con cautela. «Creo que lo que tenemos es una idea de la dinámica que subyace a todo. Puede haber diferentes clases de sistemas en su interior, lo que se llama clases de universalidad diferentes.» En otras palabras, la dinámica global de todos los sistemas —desde los autómatas celulares hasta Gaia— puede ser común de un modo general, pero puede haber subgrupos de sistemas, las clases de universalidad, que también comparten dinámicas detalladas. Así que, en principio, ¿podría haber una descripción matemática general para todos los sistemas complejos adaptativos, con descripciones más detalladas para cada clase de universalidad?, pregunté. «Sí, podría ser.» Eso es casi una teoría de todo. «Casi.» Y, luego, con una risa conspiradora: «Quién sabe; a lo mejor algún día será así».

La noción de emergencia, tan antitética a gran parte de la biología moderna, es el principal mensaje de la ciencia de la complejidad y su papel en el esclarecimiento de las pautas de la naturaleza. Emergencia de la dinámica autoorganizadora

que, de ser cierta, obligará a una reformulación de la teoría darwinista. Emergencia de una creatividad en la dinámica de los sistemas complejos de la naturaleza que, de ser cierta, obligará a una revaloración del modo en que surge la complejidad. Emergencia del control dentro de los ecosistemas que, de ser cierta, implica la existencia de una «mano invisible» que aporta estabilidad desde el nivel más bajo al más elevado de la jerarquía ecológica y culmina en la propia Gaia. Y emergencia de un impulso inexorable hacia una complejidad cada vez mayor y hacia un procesamiento cada vez mayor de la información en la naturaleza que, de ser cierta, sugiere la evolución de una inteligencia lo suficientemente poderosa como para contemplarlo todo como inevitable. La vida, a todos los niveles, no es una maldita cosa detrás de otra, sino el resultado de una dinámica interna, fundamental y común. En caso de que eso sea cierto.

Pregunté a Norman Packard cómo quedaría alterada nuestra visión del mundo por esas implicaciones de la nueva ciencia de la complejidad, en caso de que fuera cierta. Lo pensó unos instantes y luego, con una sucinta frase, atrapó el mensaje en su forma más atractiva:

«Veríamos el mundo con más unidad.»

Nos quedamos inmóviles un rato, Patty Crown, Chip Wills, Jeff Dean y yo, sentados en medio de los restos parcialmente excavados de Pueblo Alto. Estábamos mirando hacia el sur, hacia el cañón del Chaco, oculto por una elevación del suelo, y hacia el desfiladero Sur, que separa mesa Oeste de mesa Sur. El sol estaba en su cenit otoñal, y una brisa constante soplabá entre las desperdigadas artemisas y silbaba por las minúsculas y abiertas habitaciones que teníamos a nuestras espaldas. Pueblo Alto fue una de las últimas Casas Grandes en construirse, ¿verdad, Jeff?, pregunté. «Es difícil obtener buenas fechas», contestó, «pero, sí, fue tardía.» La parte principal de la estructura tiene unos 120 metros en dirección este-oeste, con extensiones norte-sur de unos 50 metros en los extremos, formando un rectángulo incompleto. Cada uno de los tres la-

dos del rectángulo tiene varias habitaciones de profundidad, como en todas las Casas Grandes chaqueñas, con algunas grandes kivas incorporadas aquí y allá. «El último edificio se hizo quizá en 1130, 1140», dijo Jeff, moviendo el brazo para mostrar cómo se había completado el rectángulo, pero con una pared meridional en forma de arco, formando así una gran plaza.

La edificación en Pueblo Alto no fue una actividad aislada en las Casas Grandes del cañón del Chaco. Si no exactamente un frenesí constructor, sin duda un nuevo compromiso edificador floreció en el periodo cercano a 1150, y las obras en Pueblo Alto fueron parte de él. Para un ojo inexperto, eso podría constituir un signo de vitalidad de la comunidad. Pero para el arqueólogo experimentado en la dinámica de las sociedades complejas puede presagiar algo más siniestro: el inminente hundimiento. Joseph Tainter, un arqueólogo al que todos habíamos conocido el año anterior en el congreso del Instituto de Santa Fe, ha identificado varias características reveladoras del colapso de las sociedades complejas. Una de ellas es una actividad colectiva, a menudo acompañada de construcción, justo antes del colapso, como si la sociedad intentara desesperadamente contrarrestar los crecientes signos de alguna clase de tensión. Tainter detecta el fenómeno en las etapas terminales de sociedades tan diferentes como el Imperio romano, la civilización maya y en el Chaco.

¿Te parece que es así?, pregunté a Jeff. «Diría que es una pauta común en todo el Sudoeste», respondió. «A menudo se ve un agregado de comunidades, una gran cantidad de actividad nueva, justo antes del colapso.» En nuestro grupo de debate en el congreso del Instituto de Santa Fe, habíamos hablado sobre algunas de las pautas de la historia de las sociedades complejas, la trayectoria de la evolución, a través de la banda, la tribu, la jefatura y, por último, el Estado. Al tiempo que reconocían que semejantes términos debían utilizarse de un modo laxo, los arqueólogos estuvieron de acuerdo en que las transiciones entre esos diferentes niveles de organización —niveles crecientes de complejidad— ocurrieron con rapidez. Eran puntuaciones en la historia de las sociedades, rá-

pidas transiciones como las que también se ven en los sistemas biológicos y los sistemas físicos, donde se conocen como transiciones de fase.

El reconocimiento de pautas dinámicas comunes en los reinos de la física, la biología y la sociedad había sido importante a la hora de impulsar mi exploración de las grandes implicaciones de la nueva ciencia de la complejidad. Les hablé a Jeff, Patty y Chip de otra pauta de comportamiento que era común en la evolución de las sociedades complejas, que había aprendido del arqueólogo de la Universidad de Michigan Henry Wright. Henry Wright me había dicho que la fase preestatal —la jefatura— puede ser estable durante largos periodos de tiempo. Pero la transición hasta el nivel de organización estatal iba siempre precedida de un minicolapso. Era como si la estabilidad de la fase preestatal tuviera que ser perturbada antes de que pudiera conseguirse una mayor complejidad, un proceso que entonces ocurría muy rápidamente.

«Estaba pensando en eso el otro día», dijo Jeff. «Pensaba en cómo una comunidad llega a un estado de equilibrio, cuando los niveles de población, los recursos y la organización institucional alcanzan alguna especie de dinámica estable. Y se puede imaginar que sigue así hasta que pasa algo y lo perturba. A veces se obtiene un aumento de la complejidad, hasta la formación del Estado; otras, se colapsa hasta un nivel inferior.» Como en Chaco, dije, viniéndose abajo. «Sí. Pero, quién sabe, si las condiciones hubieran sido diferentes —las posibilidades de recursos, las posibilidades de transporte, ese tipo de cosas—, Chaco se podría haber convertido en un Estado en vez de derrumbarse.»

El fenómeno del colapso cultural capta nuestra atención, aviva nuestras emociones. Es, como dice Jo Tainter, un recordatorio de la fragilidad de la civilización. Nos preguntamos: ¿qué causa esas catástrofes? Y, ¿puede suceder otra vez? La historia de la civilización, ese breve episodio de cinco mil años en los cientos de miles de existencia del *Homo sapiens*, es claro: los Estados surgen y luego se desploman, como si marcharan al son de una dinámica inexorable. Las razones inmediatas del colapso pueden ser en cada caso muy diferentes,

como el agotamiento de los recursos o el conflicto militar, pero la pauta general se mantiene en pie.

La comunidad del cañón del Chaco se vino abajo entre 1150 y 1200 por razones todavía oscuras. «Hubo una gran sequía entre 1130 y 1180», dijo Jeff, «y, al mismo tiempo, la capa freática descendió por otras razones. La agricultura de verano debió de haber sido dura, de eso no hay duda.» Los anasazi habían sobrevivido a sequías antes; ninguna tan intensa como ésta, es cierto. Quizá la comunidad había alcanzado un punto en su trayectoria de evolución económica que la hacía más vulnerable a ese tipo de tensión, dije. «Quizá», reconoció Patty. «Pero quizá la perturbación ocurrió en otra parte, fue el resultado de que otros pueblos modificaran lo que estaban haciendo. Eso quizá alteró el relieve adaptativo de los chaqueños, e hizo que su estrategia tuviera menos éxito.» La imagen de Patty estaba inspirada en el modelo de Stu Kauffman de relieves adaptativos emparejados. «Es el tipo de cosa que a los arqueólogos nos cuesta pensar, pero tenemos que intentarlo.»

A menudo es tentador pensar que los Estados existen y operan en la historia de modo aislado, que atraen nuestra atención como nítidas señales entre el ruido arqueológico. Pero es una ilusión, y el sistema del Chaco nos ayuda a evitarla. El cañón del Chaco, con su extraordinaria red viaria a lo largo de miles de kilómetros cuadrados de territorio, se contempla como una comunidad central de Casas Grandes, como una araña en el centro de una red de influencia que abarca cientos de poblaciones más pequeñas. Una de ellas es Mesa Verde, ciento treinta kilómetros al norte del cañón. Y cuando el cañón del Chaco, por alguna razón, se vino abajo, Mesa Verde pasó a ser el centro de influencia, aunque a una escala más pequeña.

«Debió de haber muchos contactos entre el cañón del Chaco y Mesa Verde antes de 1150», dijo Chip. «Se puede ver por la semejanza de estilos en la cerámica y la arquitectura. Y, cuando el Chaco perdió la influencia que había llegado a tener, el centro de poder se desplazó hacia el norte, a Mesa Verde.» Tan espectaculares en términos arquitectónicos

como el cañón del Chaco, las poblaciones de Mesa Verde diferían en que solían construirse en la pared de abruptos precipicios, el mayor de los cuales es el Palacio. «Durante casi un siglo, la comunidad de Mesa Verde prosperó, como había hecho Chaco», dijo Chip. «Y luego también se vino abajo. De modo que tenemos prácticamente una repetición de lo que sucedió en Chaco.» ¿La misma clase de dinámica?, pregunté. «Lo bastante similar como para pensar que tenemos delante la misma clase de procesos fundamentales.» La historia se repite, pensé, y por una buena razón. «Es mejor que nos pongamos en marcha», dijo Chip.

Desandamos nuestros pasos hacia el cañón, siguiendo en algunos lugares la antigua carretera anasazi. Ante nosotros, de horizonte a horizonte, se extendía la esfera de influencia de la antigua comunidad del cañón del Chaco; pensé en la repetida pauta del auge y la caída de los Estados a lo largo de la historia. Eso ocurrió en octubre de 1991, sólo unos pocos meses después del fallido golpe de Estado en la Unión Soviética y justo antes del colapso de la en otro tiempo gran potencia. George Bush había proclamado que los acontecimientos en Europa oriental, entre los que se incluiría la desintegración de la Unión Soviética, darían lugar a «un nuevo orden mundial». Recordé una conversación con Chris Langton en la que, animado como siempre, sacó una copia de los resultados de un modelo informático de evolución. «Mira», dijo. «Aquí tienes estas dos especies coexistiendo durante un largo periodo de estabilidad; luego una de las dos desaparece y el infierno se desata. Una tremenda inestabilidad. Esta es la Unión Soviética», dijo señalando la especie que había desaparecido. «No soy ningún entusiasta de la guerra fría, pero apuesto a que vamos a ver bastante inestabilidad en el mundo real a partir de ahora. Es decir, si estos modelos nuestros tienen alguna validez.»

A medida que nos acercábamos al borde del cañón, empezamos a ver el serpenteante curso del río Chaco, el amarillo brillante de los tuliperos de Virginia, los tonos terrestres de la

vieja arenisca en la abrupta pared del acantilado y el cerro Hosta a lo lejos. No tardamos en llegar al borde y contemplar una vez más Pueblo Bonito, el caparazón de una comunidad a la que un acontecimiento histórico llevó al colapso en lugar de conducirla a nuevas alturas de complejidad. Al cabo de un instante, Chip dijo: «¿Listos?» Y, poco después, estábamos bajando con sumo cuidado el escarpado y estrecho camino hasta el suelo del cañón.

## Apéndices

## Bibliografía seleccionada

### 1. La vista desde el cañón del Chaco

Una rápida introducción a la arqueología del cañón del Chaco puede encontrarse en un artículo de *Investigación y Ciencia*, publicado en septiembre de 1988 por Stephen H. Lekson, Thomas C. Windes, John R. Stein y W. James Judge. Para entusiastas no expertos, *People of Chaco Canyon*, de Kendrick Frazier, publicado por Norton, 1986, es una lectura muy atractiva e informativa. (¡Aunque nada supera una visita al propio lugar!)

El libro de Heinz R. Pagels *Dreams of Reason*, Bantam Books, 1989 (traducción española, *Los sueños de la razón*, Gedisa, Barcelona, 1990), ofrece un panorama de los inicios de la ciencia de la complejidad y es una buena muestra de un intelecto agudo e imaginativo. Las actas del primer congreso importante del Instituto de Santa Fe, publicadas como *Emerging Syntheses in Science*, compiladas por David Pines y publicadas por Addison-Wesley, 1988, proporcionan una idea del campo de aplicación de la complejidad en su etapa formativa.

### 2. Más allá del orden y la magia

Stuart Kauffman ofrece una breve introducción a lo que él llama «orden espontáneo» en un artículo de *Scientific American*, «Antichaos and Adaptation», agosto de 1991. También tiene una gran obra sobre el tema *The Origins of Order*, publicada por Oxford University Press, 1992, que es sólo para iniciados. Algunas de las ideas científicas de Brian Goodwin están en «Development as a Robust Natural Process», en *Thinking About Biology*, compilado por F. Varela y W. Stein, publicado por Addison-Wesley, 1992; y su lado más filosófico en «A Science of Qualities», en *Causality in Modern Science*, compilado por

Willis Hartman, en prensa. Para una visión de la oposición, no tiene igual el libro de Richard Dawkins *The Blind Watchmaker*, Norton, 1987 (traducción española, *El relojero ciego*, Labor, Barcelona, 1988).

### 3. El descubrimiento del límite del caos

Los primeros artículos sobre el tema fueron los de Chris Langton, «Studying Life with Cellular Automata», *Physica* 22D (1986), págs. 120-49, y de Norman Packard, «Adaptation Toward the Edge of Chaos», informe técnico, Center for Complex Systems Research, Universidad de Illinois, CCSR-88-5 (1988). No son una lectura fácil, pero todavía no hay nada en la prensa de divulgación. Sin embargo, Per Bak y Kan Chen ofrecen un resumen de la criticalidad autoorganizada en un artículo de ese nombre en *Investigación y Ciencia*, marzo de 1991.

### 4. Explosiones y extinciones

El resumen más accesible y detallado de la explosión cámbrica y las nuevas interpretaciones de los procesos que hay detrás de ella se encuentra en el libro de Stephen Jay Gould *Wonderful Life*, Norton, 1989 (traducción española, *La vida maravillosa*, Crítica, Barcelona, 1991). Stuart Kauffman da una explicación alternativa en «Cambrian Explosion and Permian Quiescence: Implications of Rugged Fitness Landscapes», *Evolutionary Ecology* (1989), vol. 3, págs. 274-81.

Para una exploración de las ideas sobre las causas de las extinciones en masa no hay nada mejor que la obra meridianamente clara y legible de David Raup *Extinction: Bad Genes or Bad Luck?*, Norton, 1991.

### 5. La vida en un ordenador

El reciente libro de Steven Levy *Artificial Life*, Pantheon, 1992, constituye una buena introducción a los temas y las personalidades de la materia. Los estudiantes avanzados querrán sumergirse en las actas de los dos encuentros sobre inteligencia artificial, compilados por Chris Langton y amigos: *Artificial Life* y *Artificial Life II*, Addison-Wesley, 1989 y 1992.

### 6. La estabilidad y la realidad de Gaia

Hay muchos libros que se supone que tratan de la teoría de Gaia, pero lo mejor es acudir al propio Lovelock, cuyo libro más reciente es *The Ages of Gaia*, Bantam, 1990 (traducción española, *Las edades de Gaia*, Tusquets, Barcelona, 1993). Para una mezcla de voces a favor y en contra, *Scientists on Gaia*, compilado por Stephen H. Schneider y Penelope J. Boston, publicado por MIT Press, 1991, que presenta las actas de un congreso sobre Gaia, organizado por la Unión Geofísica Estadounidense en San Diego, 1988.

En *The Balance of Nature*, University of Chicago Press, 1991, Stuart Pimm ofrece un panorama del pensamiento ecológico de la próxima década. No se propone ser un libro general en ningún sentido, pero su argumentación es irresistible y está hermosamente presentada.

### 7. La complejidad y la realidad del progreso

El pequeño volumen *Evolutionary Progress*, compilado por Matthew Nitecki y publicado por University of Chicago, Press, 1988, es la mejor presentación de estos temas. El libro, que reúne las actas del congreso del mismo nombre celebrado en el Museo Field de Chicago en 1987, transmite el abrumador mensaje de que no hay progreso en la evolución. La obra de Robert Richard *The Meaning of Evolution*, University of Chicago Press, 1992, es una cuidadosa y elocuente exploración de parte de la historia de las ideas y la realidad de la postura de Charles Darwin.

El artículo de Daniel McShea «Complexity and Evolution: What Everybody Knows», *Biology and Philosophy* (1991), vol. 6, págs. 303-324, constituye una excelente visión de conjunto de lo que todo el mundo no sabe. Quienes deseen leer a Herbert Spencer saben sin duda dónde encontrarlo.

### 8. El velo de la conciencia

Se ha escrito tanto sobre la conciencia que es difícil saber por dónde empezar. Tres importantes libros recientes son el de Daniel Dennett *Consciousness Explained*, Little, Brown, 1991; el de Nicholas Humphrey *A History of Mind*, Chatto and Windus, 1992; y el de

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, 1989 (traducción española, *La nueva mente del emperador*, Mondadori, Barcelona, 1991). Aunque es el que ha recibido (hasta ahora) menos atención, el de Humphrey es sin duda el mejor y, también, el elaborado con la prosa más elegante. El artículo de Colin McGinn «Can We Solve the Mind-Body Problem?», *Mind* (abril de 1989), vol. 98, n.º 390, es un razonamiento atractivo acerca de la posible inexplicabilidad de la conciencia. Vale la pena buscar dos críticas sobre el tema (en forma de reseñas de libros): «What Can't Computer Do?», de John Maynard Smith, en el ejemplar del 15 de marzo de 1990 de *The New York Review of Books*, y «A Parliament of Mind», de Adina L. Roskies y Charles C. Wood, en *The Sciences*, mayo/junio de 1992.

Desde una perspectiva ligeramente diferente, el libro de Patricia Churchland y Terrence Sejnowski *The Computational Brain*, MIT Press, 1992, es una obra maestra de la neurobiología subyacente a la generación del pensamiento. El ejemplar de marzo de 1990 de *Investigación y Ciencia* contiene un útil debate sobre inteligencia artificial, con John Searle por un lado y Paul M. Churchland y Patricia Churchland por otro.

### 9. La vista desde el límite

No hay ninguna obra más completa sobre las hormigas que la de Edward O. Wilson y Bert Hölldobler *The Ant*, Harvard University Press, 1991.

El erudito pero muy legible libro de Joseph Tainter, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press, 1988, es un fascinante resumen de la repetida pauta del colapso cultural a lo largo de la historia.

Y si alguien sigue sin creer que las sociedades complejas no pueden pasar de una situación de equilibrio casi estable a un caos repentino, es mejor que empiece a leer los periódicos.

## Índice onomástico y de materias

- Acetabularia acetabulum*, 51-55  
 «Adaptation Toward the Edge of Chaos» (Packard), 72  
 Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA), 134-136  
 ADN, 29, 51, 115, 116, 125, 181, 196, 211-212  
 algoritmos genéticos, 62, 72  
*Alicia a través del espejo* (Carroll), 76  
 Alvarez, Luis, 96  
 anasazi, indios, 14-21, 31, 32, 90, 91, 179, 228  
 Anderson, Philip, 78, 200  
 Andrews, Roy Champman, 168  
*Ant, The* (Hölldobler y Wilson), 203  
 Aristóteles, 38  
 aristotelismo, 210, 222  
 armamentos, carrera de, 176-177  
*Artificial Life* (Langton), 111-112  
 «Artificial Life: an Ecological Approach» (Ray), 112  
 asteroides, impactos de, 96-98, 102  
 atractores, 34-35, 42, 62  
   morfo-genéticos, 54, 55-56, 92-94  
 autómatas celulares, 62-67, 70-73, 112, 119, 127, 163, 218, 224  
 autoorganización, 59, 216, 224-225  
 Ayala, Francisco, 163-164, 200  
 Bak, Per, 78-79, 98, 102  
*Balance of Nature, The* (Pimm), 143  
 Bateson, William, 56  
*Behavioral and Brain Sciences* (Harnad), 182  
 biología molecular, 51, 211  
 biomorfos, 125  
 Bohr, Niels, 210-211  
 Bonner, John Tyler, 161  
 Boole, George, 41  
 Broom, Robert, 167  
 Buffon, Georges de, 166  
 Burgess Shale, 86, 90  
 «Burgess Shale Faunas and the Cambrian Explosion» (Morris), 33  
 Bush, George, 229  
 Calvin, William, 182  
*Caos* (Gleick), 25, 113  
 caos, teoría del, 25, 62, 69  
 Case, Ted, 148  
 catástrofes, teoría de las, 95-96, 217-219  
 cerebro, 26  
   conciencia y, 178, 181-94, 197-198

evolución del, 172-173  
 Chaco, cultura del cañón del, 13-22, 34-36, 90, 179, 225-230  
 Chomsky, Noam, 198  
 Churchland, Patricia, 190, 193-97  
 Churchland, Paul, 190  
 ciclos límite, 42-43, 45  
 Club de Go de Cambridge, 109  
 Cohen, Morel, 155  
 Colectivo de Sistemas Dinámicos, 69  
*Computational Brain, The* (Churchland and Sejnowski), 193  
*Concept of the Mind, The* (Ryle), 182-183  
 conciencia, 26, 172-173, 117-202  
 conectividad, 102-103  
 Connection Machine-5, 189  
*Consciousness Explained* (Dennett), 184  
 Conway, John, 66, 79, 120  
 cosmología, 159  
 Cowan, Jack, 217-218  
 criticalidad autoorganizada, 78-79, 152  
 Crown, Patricia, 14-16, 19, 20, 21, 29-32, 225-228  
 Crutchfield, J., 74  
 cualidades, 184, 186  
 Cuvier, Georges, 56, 96  
  
 Dartmouth College, 39  
 Darwin, Charles, 37, 38, 48-50, 52, 56-59, 85-86, 94-95, 145, 160, 164, 166, 168-171, 173-175, 216  
 darwinismo social, 174  
 Dawkins, Richard, 49, 56, 124-125, 138-139, 141, 173, 176  
 Dean, Jeffrey, 14-18, 20-21, 29-30, 34, 225-228  
 Deep Thought, 190  
 Dennett, Daniel, 183-187, 189, 198  
 Derrida, Bernard, 73  
 Descartes, René, 182  
 detección remota, técnicas de, 18  
 detector de captura de electrones, 131  
 dilema del prisionero, 122-123, 157  
 Dobzhansky, Theodosius, 163, 214  
 Doolittle, Ford, 138, 139  
 Drake, Jim, 149-152, 221  
*Dreams of Reason, The* (Pagels), 23  
 Driesch, Hans, 56  
 dualismo cartesiano, 182, 197  
 dualismo, 182-183, 190, 197  
  
 Eccles, John, 183  
 economía capitalista, 26, 77  
 ecosistemas, 24, 104, 145, 205, 216  
   modelos informáticos de, 78, 148-152, 221  
   pautas en los, 107  
   perturbaciones de los, 79-80, 98, 102  
 Edad del Hierro, 153  
 Einstein, Albert, 57  
 Eldredge, Niles, 123  
*Elements of Physical Biology, The* (Lotka), 140  
 embriología, 26, 40, 46, 51, 54, 205-206, 218  
   mecánica de la, 92  
 equilibrio puntuado, 34, 35, 123-124, 143  
 Ecole Normale Superieure, 73  
 especiación, 79, 143  
 espejos giratorios, 62

Estación Experimental de Combe Mill, 130, 131, 133, 153  
 Estado, formación del, 22, 30-31, 33, 35  
 evolución biológica, 29, 31-34, 46, 51, 74-75, 108-109, 159-162, 212, 220  
   concepto de bricolaje de la, 193-194  
   modelos informáticos de, 108-119, 122-128, 131, 167, 171, 213, 221  
   creatividad de, 69  
   cultural, 21, 32-35, 63, 90, 91, 227-228  
   progreso y, 158-159, 163-175, 199-200  
   *Véase también* Selección natural  
*Evolution of the Brain* (Eccles), 183  
*Evolutionary Ecology* (Kauffman), 88  
 explosión cámbrica, 31-33, 35, 45, 82-94, 104, 125-126  
 extinción pérmica, 84, 87, 89, 99, 103  
 extinciones en masa, 83-84, 87, 89, 94-104,  
   en modelos de ecosistemas, 118-119, 123, 126-127  
 extinción cretácica, 96  
  
 Farmer, Dooyne, 69, 70, 113, 114, 119  
 física cuántica, 210-211  
 Fontana, Walter, 113  
 Forrest, Stephanie, 113  
 Fundación Rockefeller, 58, 155  
 Fundación MacArthur, 38, 106  
  
 Gaia, hipótesis de, 78, 103, 130-133, 136-139, 141-142, 144, 152-154, 205, 214, 218, 221, 224-225  
*Gaia: Una nueva visión de vida sobre la Tierra* (Lovelock), 138  
 Gell-Mann, Murray, 21, 27-30, 106  
 genética, 40-41, 44-46, 50-51, 74-75, 211-212  
 genómica, teoría, 87  
 Gleick, James, 25, 113  
 Goethe, Johann Wolfgang von, 56  
 Golding, William, 137  
 Goodwin, Brian, 43-44, 46-59, 92-94, 196, 208, 212-215  
 Gould, Stephen Jay, 59, 85, 92-94, 100, 123, 166-172  
 gradualismo, 85, 95  
 Gran Cadena del Ser, 159  
 guerra fría, 229  
 Gumerman, George, 32-33, 90, 91  
  
 Hamad, Stevan 182  
 Hiang-Kwang Luh, 152  
 Hillis, Danny, 189  
 hipótesis ecológica, 86, 87  
*History of the Mind, A* (Humphrey), 187  
 Hölldobler, Bert, 203, 204, 206-207  
 Hospital General de Cincinnati, 61  
 Hospital General de Massachusetts, 63, 120, 220  
 Humphrey, Nicholas, 182, 186-189  
 Hutton, James, 96  
 Huxley, Thomas Henry, 166  
 Hyatt, Alpheus, 170

Ilustración, 56  
 Imperio romano, 226  
 innovación tecnológica, 90  
 Instituto Nacional para la Investigación Médica, 130  
 Instituto Smithsonian, 85, 204  
 Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), 46-47, 60, 61, 109  
 Instituto de Tecnología de California (CalTech), 21, 65  
 Instituto de Santa Fe, 22-35, 38, 61, 64, 90, 108, 122, 126, 158, 163, 166, 175, 183-185, 199, 213, 214, 219, 220, 226  
 Institutos Nacionales de la Salud, 61  
 inteligencia artificial, 184, 185, 188-194  
  
 Jacob, François, 40, 43, 57, 193  
 James, William, 142, 199  
 Jaynes, Julian, 181  
 Johnsen, Sonke, 98  
 juego de la vida, 66, 79, 112, 120-121, 158  
  
 Kant, Immanuel, 39, 56  
 Kauffman, Elizabeth, 47  
 Kauffman, Stuart, 29, 33-34, 37-47, 50, 54, 56-64, 72-80, 64, 87-90, 97-99, 102-103, 118-119, 126-127, 131, 132-133, 141, 146, 149-153, 155-157, 175, 177, 1194, 201, 214-221, 228  
 Koobi, selva de, 29  
  
 Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, 100  
 Laboratorio Nacional de Brookhaven, 79  
 Laboratorio Nacional de Los Alamos, 28, 69, 70, 111-117, 120, 178  
 Lamarck, Jean-Baptiste de, 173  
 lambda, parámetro, 67, 70  
 Langton, Chris, 23-27, 29-32, 34-36, 63-68, 70-72, 108, 111-112, 116-117, 119-124, 127, 178-180, 201, 220-224, 229-230  
 Larson, Gary, 184  
 Leibnitz, Jacob, 24  
 lenguaje, 185-186, 198  
 Levin, Simon, 75  
 Levins, Richard, 156  
 Lewontin, Richard, 156  
 ley potencial, 67, 98-102, 127, 152  
 Lindgren, Kristen, 122, 156, 157, 163, 205  
 Linneo, Carl von, 38  
 «Lopsided Look at Evolution, A» (Kauffman), 83  
 Lotka, Alfred, 140  
 Lotka-Volterra, ciclo de, 118-119, 140-141  
 Lovelock, Jim, 130-143, 153-154  
 Lovelock, Sandy, 130  
 Lyell, Charles, 95  
  
 Marco Aurelio, 57  
 Margulis, Lynn, 137, 138-139  
 mariposa, efecto, 24  
 Marte, vida en, 134-136  
 materialismo, 183, 197, 198  
 May, Robert, 141, 217, 220  
 mayas, 226  
 McCulloch, Warren, 47, 60-61  
 McGinn, Colin, 197-199  
 McShea, Dan, 158-164, 172-175  
*Meaning of Evolution, The* (Richards), 170

mecanicismo, 178, 212, 214, 222  
 mente-cuerpo, problema, 182-183, 196-197  
 Mesopotamia, 31  
 Minsky, Marvin, 189  
 Monod, Jacques, 40, 43  
 Montefiore, Hugh, 131  
 morfología, 52, 54, 55-56, 92-74, 110, 160-162, 205-206  
 morfología racional, 56  
 Morris, Simon Conway, 33, 91-92  
 movimiento, leyes del, 24-25  
 Museo Americano de Historia Natural, 123, 168  
 Museo Field (Chicago), 163, 166, 200  
  
*Natural Theology* (Paley), 48, 56, 216  
*Nature*, 141  
 navajos, 17-18  
 nazismo, 171  
 neodarwinismo, 55-56, 58  
 neurociencia, 192-196  
*Neurophilosophy* (Churchland), 193  
 New Age, 17, 153  
*New York Times, The*, 167, 203  
 Newton, Isaac, 24  
*Nueva mente del emperador, La* (Penrose), 183, 191, 192  
  
 ojo, evolución del, 49, 56-56  
 Olduvai, garganta del, 29  
 ordenador paralelo, 190, 191, 194  
 ordenadores virtuales, 114  
*Origen de las especies, El* (Darwin), 49, 85, 95, 109, 145, 171, 175  
*Origins of Order, The* (Kauffman), 74  
  
 Osborn, Henry Fairfield, 168  
 Owen, Richard, 56  
 Ownby, John, 146  
  
 Packard, Norman, 68-74, 163-164, 172, 173, 176, 199-202, 192  
 Pagels, Heinz, 28  
 Paley, William, 48-49, 216  
 palo roto, modelo del, 101  
 Pangea, 103  
 Parque Nacional de los Montes Great Smoky, 144  
 Penrose, Roger, 182, 183, 190-192, 198  
 personalidad múltiple, síndrome de, 186  
 perturbaciones, 80, 89, 152  
 extinciones y, 97-98, 102  
 Pimm, Stuart, 143-153, 217, 221, 222  
 Platón, 159  
 platonismo, 192, 210, 222  
 Plinio el Joven, 155  
 Post, Mac, 147, 149  
 Postgate, John, 138  
 Poundstone, William, 158  
 predicción meteorológica, 24  
 prediction Company, 69, 199  
 Primer Congreso de Vida Artificial, 111  
*Principios of geología* (Lyell), 96  
*Principles of Psychology* (James), 199  
 procesamiento universal de información, 66, 71, 72  
 progreso evolutivo, 158-159, 163-175, 199-200  
 Provine, William, 213, 217, 219  
  
 racismo, 167-170  
 Rassmussen, Steen, 113

- Raup, David, 94-103, 127, 158  
 Ray, Tom, 105-119, 122-128, 148, 156, 163, 178, 204, 205  
*Recursive Universe, The* (Pounstone), 158  
 redes neuronales, 40, 62, 194, 196  
 redes tróficas, 145-146, 152, 207, 221  
 redes booleanas, 41-47, 50, 54, 57, 60-62, 73, 145, 155, 157, 215  
 relieves adaptativos y, 74-75, 150  
 reduccionismo, 50, 211, 212  
 reina roja, efecto, 76, 77  
 relieves adaptativos, 74-77, 79-80, 127, 132  
 rugosos, 83, 88, 150-152  
*Relojero ciego, El* (Dawkins), 49, 125, 176  
 Reserva Biológica de La Selva, 105-108, 204  
 Richards, Robert, 170-171  
 ritmos circadianos, 37  
 Rockford College, 63  
 Royal Society de Londres, 136, 154  
 Ruse, Michael, 173  
 Ryle, Gilbert, 182  
 Saint-Hilaire, Geoffroy, 56  
*Science*, 33, 51, 83, 84, 90  
*Scientific American*, 190  
 Searle, John, 190  
 Sejnowski, Terrence, 193  
 selección natural, 38, 39, 41, 49-50, 55-59, 71, 85, 92, 101, 174, 175, 212, 215  
 en modelos informáticos, 115  
 extinción y, 95  
 hipótesis de Gaia y, 139  
 progreso y, 170, 171  
 relieves adaptativos, 74-77  
 Selverston, Allen, 196  
 Sepkoski, Jack, 96, 100  
 Service, Elman, 33  
 SimAnt, 203  
 Simberloff, Dan, 100  
 Smith, Adam, 26, 77  
 Smith, John Maynard, 58-59, 61, 75, 155, 173  
 Sociedad Linneana, 154  
 sociedades precolombinas, 14  
*Sociobiología* (Wilson), 205  
 «Speaking for Our Selves» (Dennett y Humphrey), 186  
 Spencer, Herbert, 166, 174-175  
 Stanley, Steve, 101  
 Stebbins, G. Ledyard, 163  
 Stent, Gunther, 51  
 «Studying Artificial Life with Cellular Automata» (Langton), 70  
 Tainter, Joseph, 226-228  
 tectónica de placas, 103  
 Teilhard de Chardin, Pierre, 167-168, 214  
*Temporal Organization in Cells* (Goodwin), 43, 47  
 termodinámica, segunda ley de la, 215  
 Thom, René, 218  
 Thompson, D'Arcy Wentworth, 56  
 Tierra, 108, 116-119, 122-128  
*Times Literary Supplement*, 183  
 tipos, 84-85, 86, 91  
 transiciones de fase, 31, 33, 68, 71, 72  
 turbulencia, 28, 123-124, 196  
 Turing, Alan, 65-66, 189-190  
 Turing, máquina de, 66  
 Turing, test de, 189-190  
 Unión Soviética, 229  
 Universidad a Distancia, del Reino Unido, 47  
 Universidad de Arizona, 14, 31, 63  
 Universidad de Boston, 63, 137  
 Universidad de California, Berkeley, 40, 51, 84, 190  
 San Diego, 148, 190, 196  
 San Francisco, 37  
 Santa Barbara, 33, 84  
 Santa Cruz, 69  
 Universidad de Cambridge, 33, 85, 182, 186  
 Universidad de Chicago, 61, 74-75, 94, 155, 158, 170, 217  
 Universidad de Cornell, 75, 213  
 Universidad de Dalhousie, 138  
 Universidad de Delaware, 106, 108, 111, 113, 117, 126  
 Universidad de Edimburgo, 43  
 Universidad de Guelph, 173  
 Universidad de Harvard, 39, 109, 130  
 Museo de Zoología Comparada, 166, 203, 208-209  
 Centro de Ciencias, 109  
 Universidad de Michigan, 63, 64, 70, 114, 119, 158, 227  
 Universidad de Nuevo México, 14  
 Universidad de Oxford, 39, 40, 43, 124-125, 141, 182, 191, 217  
 Universidad de Pennsylvania, 29, 37, 38, 60, 61, 98, 156  
 Universidad de Princeton, 65, 69, 70, 78, 161, 181  
 Instituto de Estudios Avanzados, 65, 69  
 Universidad de Purdue, 149  
 Universidad de Rutgers, 197  
 Universidad de Sussex, 58  
 Universidad de Tennessee, Knoxville, 143  
 Universidad de Tufts, 183, 186  
 Universidad de Washington, 182  
 Universidad Estatal de Arizona, 14  
 Universidad McGill, 43  
 Universidad Rockefeller, 22  
*Up From the Ape* (Hooton), 169  
 Valentine, James, 84, 86-87, 163  
 Van Valen, Leigh, 76, 175  
*Vida maravillosa, La* (Gould), 85  
 vida artificial, 63-65, 70, 108-127, 178, 201, 220  
 Vietnam, guerra de, 40, 63, 120  
 vitalismo, 38, 210, 213, 214, 220-222  
 Volterra, 140  
 Von Neuman, John, 62, 64  
 Waddington, Conrad H., 43, 56, 155, 211, 212, 214, 218  
 Walcott, Charles, 85-86  
*Wall Street Journal, The*, 21  
 Wallace, Alfred Russell, 49, 59  
 Watson, Jim, 181  
 Weishbuch, Gérard, 73  
 Wheeler, William Morton, 208  
 Whittington, Harry, 85, 86  
 Wills, Chip, 13-21, 29-32, 225, 227, 228-229, 230  
 Wilson, Edward O., 109, 161, 164, 173, 203-210, 221  
 Wittgenstein, Ludwig, 186  
 Wolfram, Steve, 65-67, 69, 73  
 Wolpert, Lewis, 156  
 Wright, Henry, 227  
 Wright, Sewell, 74  
 yo, sensación del, 182, 186  
 Yoffee, Norman, 31