

Física y sociedad
por
Gerardo García Naumis

Este es un capítulo separado que integra el libro

Fronteras de la Física en el Siglo XXI

Octavio Miramontes y Karen Volke (Editores)

CopIt-arXives, 2013

México, D.F.

ISBN: 978-1-938128-03-5

©CopIt-arXives

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html>

Índice general

Gerardo García Naumis	Física y Sociedad	1
1.	Introducción	1
2.	Econofísica	5
	Reparto de riqueza en un mundo de recursos limitados	6
	Termodinámica de la riqueza	10
3.	Sociofísica	10
	Transiciones de tipo social	14
	Conflictos y formación de alianzas	19
4.	Análisis de las sociedades mediante leyes fundamentales de la física	25
	El gran balance de energía y entropía	26
	La civilización humana en el Universo	29
5.	El dilema del futuro	30
6.	Referencias	30

Física y Sociedad

Gerardo García Naumis, Instituto de Física, UNAM, México

1. Introducción

Existe una opinión generalizada entre los investigadores de las ciencias naturales. Piensan que el progreso de la humanidad depende primordialmente de avances científicos y tecnológicos los cuales resolverán “los grandes problemas”. Esta visión es incompleta. En esta época existen suficientes conocimientos y riqueza para resolver muchos de los dilemas civilizatorios. Si no se aplican es por una combinación de conflictos, intereses e ignorancia. Esto se plantea claramente en los objetivos de desarrollo del milenio propuestos por la ONU. Así, hay una problemática social preponderante en un mundo que se enfrenta a cuestiones fundamentales de supervivencia, tales como el calentamiento global, agotamiento de recursos naturales (acuíferos, reservas minerales, combustibles fósiles), contaminación, etcétera. Esto no es poca cosa, después de todo, las sociedades resultan de la interacción entre cerebros y su medio ambiente. Si se pregunta dónde estará la frontera de la ciencia en el siglo XXI, se podría decir que arriba de nuestros hombros. En efecto, los misterios de cómo se procesa la información en el cerebro, el origen de la conciencia, el reconocimiento de patrones, etcétera. aún no han sido resueltos [1]. Ni siquiera existe un consenso en la cuestión de si puede o no existir inteligencia artificial [1].

En este capítulo abordaremos una faceta poco conocida pero fascinante de la física: su uso en el estudio de sistemas sociales. Esta faceta puede dividirse en dos grandes ramas las cuales estudiaremos de manera separada. La primera de ellas plantea el uso de métodos desarrollados por la física para el estudio de sistemas sociales. Dentro de esta rama, podemos citar la econofísica y la sociofísica que, como veremos aquí, modelan diversos aspectos de la economía, organización social, política, antropología, etcétera. La otra gran rama consiste en el estudio de cómo la física, mediante sus leyes fundamentales, provee un marco de restricciones y posibilidades a las sociedades en su conjunto. Ambas ramas nos dotan de herramientas poderosas para el análisis y toma de decisiones. Debe decirse además que estos enfoques han podido aplicarse también al estudio de ecosistemas [2] y sociedades animales [3].

Las cuestiones sociales caen definitivamente dentro de los sistemas complejos, los cua-

les han sido estudiados en otros capítulos. Esto se debe a la interacción entre sí de 7,000 millones de personas, así como con otros seres vivos, el planeta, el sistema solar, etcétera. Como en cualquier sistema complejo, el sistema está formado por una jerarquía de subsistemas interdependientes entre sí, dando lugar a comportamientos emergentes diferentes a cada escala (es decir, tamaño) que se observe. En otras palabras, en la práctica no se puede deducir la historia del siglo XX estudiando una neurona o la física del modelo estándar. De allí la famosa frase del premio Nobel P. Anderson “more is different” (más es diferente); a cada escala hay fenómenos nuevos que en sí mismos son tan fundamentales como cualquier otro. El ejemplo más típico es el código genético. El descubrimiento de la estructura y función del DNA como molécula fundamental para la vida es considerado un hito fundamental dentro la ciencia, aún cuando desde el punto de vista químico y físico sigue las mismas leyes que cualquier otra molécula conocida antes de su descubrimiento.

De hecho, la existencia misma de sociedades altamente tecnificadas se debe a un proceso de auto-organización emergente cuyo origen se remonta a la expansión del universo [4]. Ello se debe a que el orden en ciertas regiones del universo reduce la entropía de manera local. Esto sólo puede obtenerse si existe un flujo de energía libre en las regiones ordenadas. Así, deben existir gradientes térmicos que permitan extraer trabajo para realizar la tarea de ordenar, de manera análoga a una máquina térmica que opere entre dos reservorios. Por esta razón, el dominio energético actual de la materia sobre la radiación es el responsable de que existan regiones con gradientes térmicos fuera del equilibrio termodinámico. Estas islas de orden, permiten la complejidad suficiente para la evolución biológica y eventualmente dan lugar a sociedades avanzadas. Si se piensa al flujo de energía libre como una medida aproximada de la complejidad del sistema, se ha logrado evidenciar un crecimiento monótono continuo que lleva desde la formación de los átomos a las sociedades humanas, pasando por galaxias, estrellas, planetas, plantas y animales [4]. Uno de los mayores flujos ocurre en nuestra sociedad, con unos $10^6 \text{ erg/s} - \text{gr}$, lo cual es 6 órdenes de magnitud mayor que el valor observado en galaxias.

En general, la idea de usar la física para describir lo social, se basa en considerar a las sociedades como sistemas formados por muchas partículas con cierta clase de interacciones, de manera análoga al tratamiento dado por la física estadística a los sistemas atómicos. El problema es que las interacciones son difusas, tienen elementos aleatorios, etcétera. En otras palabras, las personas o animales no son átomos. Sin embargo, según A. Kolmogorov, no hay nada más predecible que la suma de muchos factores aleatorios. La física de los últimos 30 años ha confirmado, y llevado aún más lejos esta idea. La teoría moderna de los fenómenos críticos está basada en el concepto fundamental de que muchos detalles microscópicos de los compuestos físicos son irrelevantes para describir el cambio macroscópico que, por otro lado, parece ser universal. Fenómenos que parecían estar desconectados, como el magnetismo y los cambios de fase en líquidos y gases, resultan tener características similares. Mientras el número de sistemas físicos que sufren transiciones de fase es muy grande, todas estas pueden ser descritas en términos de un pequeño número de clases de universalidad. Sólo unos cuantos parámetros, como la dimensión espacial,

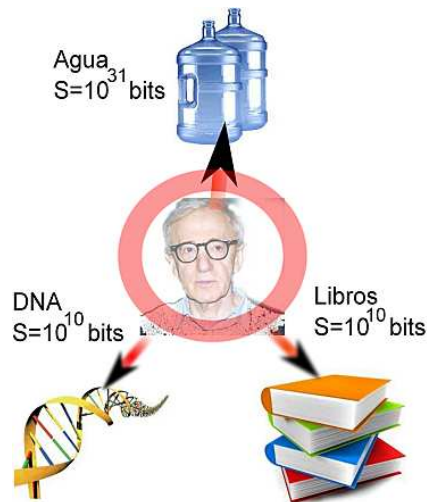


Figura 1: Hasta el mismísimo Woody Allen tiene acotada su complejidad, medida usando la entropía en unidades de bits. Esta puede obtenerse de varios modos: con su peso equivalente en agua o mediante la información de su DNA. También puede hacerse con una buena biblioteca de comportamiento humano e historial personal.

determinan a qué clase de universalidad pertenece el sistema. El concepto de universalidad plantea que los detalles no son importantes. De manera simultánea, los matemáticos encontraron que los sistemas no-lineales comparten estas características; mapeos y ecuaciones diferenciales no-lineales diferentes dan lugar a comportamientos análogos. Esta explosión de ideas hace tentadora su aplicación a sistemas no físicos, en particular a sistemas sociales, para los cuales existe una relación entre propiedades microscópicas y realidades macroscópicas.

Antes de entrar a estudiar algunas de las técnicas usadas en la descripción de sistemas sociales, realizemos aquí un breve ejercicio de reflexión acerca de los límites de la tarea planteada en describir una sociedad humana. Existen varias maneras de estimar la complejidad de un sistema; una de ellas se basa en la información mínima necesaria para describirlo. Esta mínimo viene dado por la teoría de la información de Shannon, en la cual la entropía de un sistema nos da idea de su contenido de información. Pensemos por ejemplo, que la complejidad humana está acotada por la entropía física de los átomos que lo componen. Esta entropía en unidades de bits $S/k_B \ln 2$ (donde k_B es la constante de Boltzmann), puede estimarse usando la entropía del equivalente a nuestro peso en agua a temperatura ambiente, de donde obtenemos que vale 10^{31} bits.

Esta cota es demasiado grande para los propósitos del estudio de sistemas sociales. En realidad, nos interesa la complejidad a una escala espacial y temporal relevante a los propósitos de explicar comportamientos sociales, por lo cual debería realizarse un renor-

malización, es decir, promediar de alguna manera inteligente varios grados de libertad para reducir su número. Para bajar la cota, podríamos recurrir entonces al contenido de información necesaria para formar un ser vivo. Esta información está contenida en su código genético. Se estima en 10^{10} bits, calculada de considerar que el genoma está formado por cuatro letras, correspondientes a las cuatro bases que sirven para codificar los aminoácidos y, estos a su vez, a las proteínas.

Desde luego que la educación y el medio ambiente influyen sobre el resultado. De manera alternativa podemos usar otra cota si pensamos otra vez en que nos interesa una descripción a escalas mayores que la molecular. Una manera simple sería pensar en analogía a los lenguajes de computación. Podríamos estimar el tamaño mínimo del programa requerido para describir el comportamiento de los humanos [5]. Se puede empezar por animales más sencillos, usando libros de etología tomados de una biblioteca. El comportamiento de un pez se puede describir en unas páginas, de las hormigas en varios capítulos de libro, de los tigres en un libro, y de los primates en varios libros. Si cada letra puede representarse por un bit (usando por ejemplo el código ASCII), una página contiene aproximadamente 3,000 caracteres, es decir, 10^4 bits, de donde se sigue que un libro típico tiene del orden de 10^6 bits. El comportamiento humano podría entonces describirse con varios libros, es decir, 10^7 bits. Es claro que se requiere información extra para entender que significa cada palabra, dado que en realidad el lenguaje es un mecanismo sistemático para la comprensión de información. Pensando de manera pragmática, podríamos usar un diccionario para definir cada palabra del texto usado. Si hay 10 palabras por página en el diccionario, cada palabra necesita 10^3 bits para ser definida. Usando este método, la complejidad del comportamiento humano queda en 10^{10} bits, lo cual coincide sorprendentemente con el cálculo obtenido mediante el código genético. Desde luego que muchos de los aspectos anteriores son criticables (por ejemplo, gran parte del DNA es redundante, etcétera) y requieren de más análisis, pero en esencia esta clase de cálculos pertenecen a la manera de enfocar los problemas en el contexto de física y sociedad. Por un lado, la física nos da una cota superior para la complejidad, y por otro, la teoría de la información, surgida mediante una analogía con la física estadística, nos da una cota mínima. De este modo, la complejidad del ser humano, puede cuantificarse de manera aproximada, dando una idea general de la complejidad inherente de la sociedad humana.

El ejercicio anterior no sólo es relevante por develar cuantitativamente la complejidad básica de los elementos que forman la sociedad humana, sino que además muestra como la física sirve para tender un puente entre ciencias exactas y sociales. Claro que las ciencias exactas y sociales comparten algo en común: su categoría de ciencia. Es decir, en principio tienen al método científico como herramienta fundamental para entender, clasificar y predecir los diversos fenómenos que les competen. El apellido de "exactas" en una de ellas parecería implicar que las otras dos no lo son. De hecho, la física tiene la reputación de ser "el paradigma de todas las ciencias" debido a que puede condensar una cantidad enorme de fenómenos usando unas pocas leyes básicas. Gran parte de su éxito se debe a su enfoque reduccionista, que trata de hacer mínimo el número de variables, dejando sólo

aquellas que sean relevantes para un fenómeno particular. Este procedimiento implica en realidad un aceptación tácita del precepto de renormalizar grados de libertad.

Sin embargo, han existido muchos intentos de racionalizar las ciencias sociales usando algunas leyes simples. Por ejemplo, la teoría de la evolución de Darwin ha sido citada como un antecedente claro del materialismo histórico de Marx o del psicoanálisis de Freud, ambos esquemas propuestos para reducir la complejidad histórica o psicológica a leyes más o menos simples. Históricamente han habido dos puntos débiles en los intentos de volver a las ciencias sociales más cuantitativas; por un lado, la dificultad de realizar predicciones exactas y al mismo tiempo la gran cantidad de variables involucradas en los procesos, y el hecho de que la sociedad humana es, en sí misma, un experimento único e irrepetible. En realidad, un análisis más detallado muestra que ni la física es tan exacta como se pretende, ni las ciencias sociales son tan inexactas como los físicos piensan. En efecto, en la física estadística, la mecánica cuántica y la física no-lineal hay cierto grado de incertidumbre. Si la física presenta estos problemas, es de esperarse que las ciencias sociales sean aún más problemáticas. En los últimos años, varios factores se han conjugado para lograr avances en el análisis cuantitativo de las ciencias sociales. El primer factor ha sido el desarrollo de nuevas herramientas de la física, como física no-lineal, teoría del caos, redes, fenómenos fuera del equilibrio, sistemas complejos, etcétera. El otro gran paso ha sido la disponibilidad de bases de datos enormes como, por ejemplo, teléfonos celulares, preferencias de búsqueda en internet, análisis masivos de textos, redes de intercambio científico, etcétera. Potenciando estos dos factores tenemos computadoras poderosas que permiten el análisis de datos y su comparación con diversas teorías, así como la posibilidad de formular modelos para explicar las tendencias observadas en las bases de datos.

Dejemos aquí estas ideas generales, para estudiar algunos ejemplos de como abordar problemas de econofísica, sociofísica, ciencias políticas y geoestrategia.

2. Econofísica

El término Econofísica fué acuñado a fines del siglo XX para englobar el trabajo que los físicos hacían sobre diversos aspectos de la economía¹ [6]. Muchos de estos pensaban que los métodos de la economía clásica eran demasiado limitados por estar basados en sistemas en equilibrio, los cuales no siempre pueden aplicarse a la realidad. Mas aún, los economistas clásicos no tenían las herramientas para describir esta economía fuera del equilibrio, ya que requerían ideas y matemáticas nuevas como dinámica no-lineal, grupo de renormalización, procesos estocásticos, percolación, fractales, auto-organización crítica, etcétera. Esta tendencia se vió reforzada por un hecho histórico interesante. La decisión de no construir un super acelerador de partículas en EUA llevó a varios físicos al desempleo. Muchos de ellos encontraron trabajo en el sector financiero donde potenciaron el

¹ Ver también el capítulo "Econofísica" de Ana M. Contreras y Hernán Larralde, en este mismo volumen para una visión complementaria.

uso de analogías físicas en la economía. Sin embargo, el interés en sí de los físicos en el tema no era nueva. David Bernoulli sentó en 1738 las bases para uno de los puntos claves de la teoría neoclásica de economía, desarrollando la teoría de la utilidad y el riesgo en economía. Los otros fundadores de la teoría neoclásica, I. Fisher y J. Tinbergen (quien obtuvo el primer el primer Nobel de Economía), fueron alumnos de destacados físicos. El primero de ellos fué alumno del fundador de la teoría de ensambles en Física Estadística, J. Willard Gibbs, mientras que el segundo fué alumno de Paul Eherenfest. En esta breve capítulo desde luego no haremos una revisión de un tema tan extenso. En lugar de ello, mostraremos algunos ejemplos de cómo aparece de manera natural la física en la economía, tratando de enlazar nuestros ejemplos con la siguiente sección de sociofísica, para después analizar algunas de las cuestiones abiertas en el campo.

Reparto de riqueza en un mundo de recursos limitados

Empezaremos con una pregunta sencilla. ¿De que depende ganar un cierto salario? Si preguntamos esto a diversas personas, seguramente obtendremos varias respuestas, tal y como han mostrado diversas encuestas sobre el tema. Nos pueden decir que de su educación, esfuerzo, dedicación, talento, suerte, voluntad divina, contactos, belleza, etcétera. Viendo los árboles, no podemos apreciar el bosque. Decidimos entonces hacer una estadística del número de personas en el país que ganan cierto salario (r), i.e., construimos la distribución de salarios del país $P(r)$. Dado que esta distribución puede contener algunos picos, es mas sencillo considerar la cantidad acumulada de personas que ganan hasta cierto salario, es decir,

$$C(r) = \int_0^r P(r') dr' \quad (1)$$

En la figura 2 aparece graficada esta cantidad, obtenida de los datos de recaudación de impuestos en EUA en diversos años. La escala usada es de tipo log-log para resaltar el tipo de ley que se obtiene. De los datos, se sigue la sorpresa de que $P(r)$ es una distribución de Boltzmann-Gibbs para salarios bajos y medios, i.e., $P(r) \approx \exp(-r/\lambda)$, la cual describe la distribución de energías de las moléculas en un gas. Mas extraño es el caso para salarios muy altos, es decir, arriba del 97% de la población. Allí la distribución de Boltzmann-Gibbs deja de ser válida y se aplica la “ley de Pareto”, consistente en una ley de potencias. Veamos como explicar algunos de estos resultados en terminos de una teoría basada en la física estadística [7].

Consideremos para ello N “agentes”, donde el i -ésimo de ellos tiene un balance de dinero m_i . Estos agentes pueden interaccionar entre sí mediante transacciones donde se intercambia dinero. Si el agente i interacciona con el j , intercambiandose una cantidad de dinero δM , tenemos que,

$$m_i \rightarrow m_i - \delta M \quad m_j \rightarrow m_j + \delta M \quad (2)$$

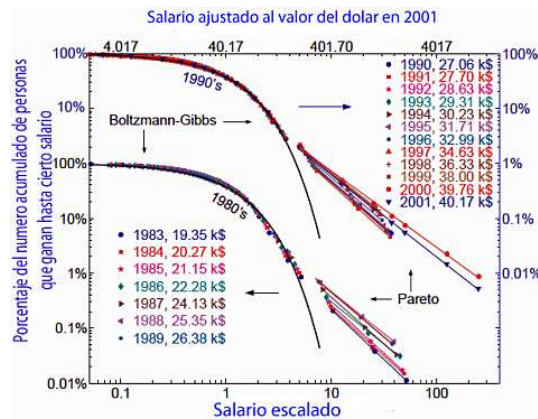


Figura 2: Porcentaje acumulado de personas que ganan hasta cierto salario obtenido de su declaración de impuestos en E.U.A para diferentes años. El salario aparece en el borde inferior escalado de manera que el promedio queda en 1, mientras que en el superior aparece en miles de dólares ajustados a su valor en el año 2001. Hay una translación arbitraria en el eje y para poder apreciar las diferencias entre los 80's y 90's. Adaptado de [7].

La cantidad neta de dinero para ambos agentes antes y después de la transacción resulta la misma,

$$m_i + m_j = m'_i + m'_j \quad (3)$$

Debe notarse así que la compra-venta es en principio un operación que conserva la cantidad de dinero, y por lo tanto, recuerda de manera inmediata la conservación de energía en las colisiones entre moléculas que ocurren en un gas. En este enfoque hay una distinción clara entre dinero y los bienes. Aquí no consideramos la producción o bienes consumidos en la transacción, los cuales evidentemente no se conservan. Sin embargo, estos entrarán posteriormente en la discusión.

En un sistema cerrado, la ley local de conservación (2) lleva a la conservación del dinero en el sistema,

$$\sum_i m_i = M \quad (4)$$

Para economías reales, M puede variar debido a la emisión de dinero, lo cual eventualmente puede tomarse en cuenta. Aquí consideraremos que M es constante. Otra cuestión importante es la deuda, la cual puede considerarse asumiendo que m_i pueda ser negativo. Para simplificar aún mas el análisis supondremos que $m_i \geq 0$.

Ahora asumimos que después de cierto intervalo de tiempo, el sistema llega a un estado estacionario. Este estado se caracteriza por una distribución de dinero dada por $P(m)$. Para encontrar esta distribución, supongamos que partimos el eje del dinero m en intervalos de tamaño δm , donde el número entero k etiqueta a cada intervalo. Si N_k es el número de agentes con una cantidad de dinero entre m_k y $m_k + \delta m$, la probabilidad de tener un balance de dinero en este intervalo viene dada por $P(m_k) = N_k/N$.

Una posibilidad es que todos los agentes tuvieran lo mismo, es decir, $m_i = M/N$. Bajo las reglas del mercado actual, esta distribución es altamente improbable. En cambio, podemos suponer que la distribución observada es aquella que maximiza la entropía, i.e., el desorden. Esta puede obtenerse procediendo mediante una analogía con el caso de un gas. Para ello consideremos el número de posibles realizaciones Ω de un estado en términos de las diferentes configuraciones que podemos tener usando una partición del dinero en términos del conjunto $\{N_1, N_2, \dots, N_k\}$. Dado que los agentes son distinguibles, Ω viene dado por,

$$\Omega = \frac{N!}{N_1!N_2!N_3!\dots} \quad (5)$$

La entropía del sistema se define como $S = \ln \Omega$. Ahora se puede proceder como en la mecánica estadística usual, es decir, debemos maximizar Ω con respecto al conjunto de las $\{N_1, N_2, \dots, N_k\}$ bajo las restricciones de conservación del número de agentes económicos $N = \sum N_k$ y dinero total $= \sum m_k$. El resultado de este proceso es bien conocido, llevándonos a la distribución exponencial de dinero $P(m)$ dada por,

$$P(m_k) = \frac{N_k}{N} = \exp^{-(m_k - \mu)/T} \quad (6)$$

donde se han introducido dos parámetros, μ y T , asociados a los multiplicadores de Lagrange debido a las leyes de conservación. Aquí μ y T representan los análogos del potencial químico y la temperatura en el caso económico. Usando,

$$\langle m \rangle = \frac{M}{N} = \sum_k m_k P(m_k) = \int_0^\infty \frac{dm}{m} m \exp^{-(m - \mu)/T} = T \quad (7)$$

De este modo, la temperatura del sistema económico no es otra cosa que la cantidad promedio por agente de dinero, ya que $T = \langle m \rangle$. Se puede dar una interpretación análoga al potencial químico. Notamos en esta deducción una gran generalidad, ya que hemos encontrado como distribuir entre agentes una cantidad limitada de recursos asumiendo el principio de máxima entropía. En el caso de un gas clásico, la energía total es el recurso total disponible mientras que en un sistema social es el dinero. Así pues, hemos demostrado de una manera sencilla el porqué los salarios siguen una distribución de Boltzmann-Gibbs. Desde luego, estos argumentos pueden extenderse a otros recursos

como acceso a la alimentación, energía, educación, etcétera. Por otra parte, podemos llevar un poco más allá las analogías para predecir que sucede al poner en contacto dos economías con temperaturas diferentes ($T_2 > T_1$). El cambio en entropía será,

$$\delta S = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \delta M + \ln(T_2/T_1) \delta N. \quad (8)$$

Si asumimos que la entropía es siempre creciente, $\delta S > 0$, entonces el dinero deberá fluir del sistema con mayor riqueza (país rico) al de menor riqueza (país pobre). Del mismo modo, el último término muestra que la migración será del país pobre al país rico. Tanto migración como flujo de dinero son bien conocidos como fenómenos globales en nuestro mundo actual.

Finalmente, queda por explicar la desviación respecto a la distribución exponencial para el 3% de salarios más grandes, conocida como ley de Pareto. Esta ley tiene una forma muy interesante,

$$P(m) = \frac{C}{m^{1+\alpha}}. \quad (9)$$

siendo C una constante de normalización, y α un exponente. El hecho de que sea una ley tipo potencias, con un exponente, recuerda inmediatamente la teoría de fenómenos críticos en física. De hecho, un estudio en el período 1983-2001 [7] muestra que esta distribución es muy dinámica y volátil, mientras que la exponencial correspondiente al 97% es muy estable, correspondiente a un caso de equilibrio térmico. Así, parece ser que la ley de Pareto resulta de procesos fuera de equilibrio, los cuales pueden analizarse mediante procesos estocásticos dependientes del tiempo [8], tales como ecuaciones del tipo Fokker-Planck que aparecen en sistemas fuera del equilibrio térmico. Es interesante destacar que la ley de Pareto fue introducida en 1895 para describir la distribución de ingreso, mediante una regla abreviada conocida como 80 – 20, la cual indica que el 20% de la población controla el 80% de los recursos. Esto lleva a la idea de que en realidad sólo existen dos clases sociales, fenómeno que ha sido observado en muchas sociedades [9]. La estabilidad de la clase de menores recursos refuerza la idea de usar ideas de la física estadística en equilibrio, mientras que la ley de Pareto requiere técnicas mucho más modernas. Desde luego debemos agregar que existe una infinidad de sistemas donde se ha observado esta ley por tratarse de un fenómeno fuera de equilibrio emparentado con la teoría del caos, sistemas complejos y fractales. Podemos citar la distribución de tamaños en los agregados de los condensados de Bose-Einstein, el valor de las reservas en los campos petroleros, el tamaño de los meteoritos y arena, eventos extremos de lluvias, etcétera. Otra posibilidad con la cual podría obtenerse la distribución de Pareto partiendo de la entropía, sería maximizando la llamada entropía- q de Tsallis [10], en vez de la entropía normal. De este modo, se obtiene una distribución con colas largas [11].

Pasemos ahora a estudiar algunas consecuencias del equilibrio térmico de una parte de la distribución de ingresos.

Termodinámica de la riqueza

La mecánica estadística del dinero puede llevarse mas lejos aún si se toma en cuenta la propiedad material de los agentes, de manera que dé lugar a una teoría similar a la termodinámica. Para ello consideramos que los agentes tienen dos clases de riqueza. Por un lado, su dinero dado como antes por m_i , y sus bienes materiales como casa, coche, acciones en la bolsa, joyas, etcétera. Consideraremos por simplicidad sólo un tipo de propiedad, por ejemplo coches. Si cada agente tiene v_i unidades que valen cada una P , el equivalente en dinero será simplemente Pv_i . La riqueza individual de cada agente será $w_i = m_i + Pv_i$, y la del sistema total,

$$W = M + PV. \quad (10)$$

donde $V = \sum_i v_i$ es el número total de unidades físicas de riqueza.

Dado que hemos identificado a M con la energía total, podemos hacer la analogía entre M y la energía interna total del sistema U . De este modo, W puede identificarse con la entalpía. Consideremos ahora la diferencial de M ,

$$dW = dM + dPV + VdP. \quad (11)$$

En un *sistema cerrado*, $dM = 0$ y $dV = 0$, de donde $dW = VdP$. Así, la única manera de aumentar la riqueza es mediante un cambio de precio. Para entender estas ideas, es posible construir un ciclo de Carnot considerando un ciclo cerrado en un diagrama (P,V) . Este ciclo puede entenderse como un modelo de especulación en el mercado o de exportación e importación entre dos países. Para ello, consideremos que un agente incrementa su cantidad V_1 de bienes a V_2 , comprando a un precio bajo P_2 . Si el agente compra muchos bienes, la ley de la oferta y demanda provocará que se incremente el precio unitario del bien. El precio pasará entonces de P_2 a P_1 . El agente vende entonces los mismos bienes, pasando de V_2 a V_1 , al precio P_1 mas alto. Debido a la sobreoferta, el bien bajará de P_1 a P_2 , cerrandose así el ciclo. En este proceso, el cambio de riqueza para el especulador vendrá dado por el área encerrada en el ciclo,

$$\Delta W = \oint VdP = (P_1 - P_2)(V_2 - V_1). \quad (12)$$

Dado que la riqueza total no varía en este modelo simple, es claro que la ganancia del especulador es obtenida de los otros agentes del mercado.

3. Sociofísica

En la sección anterior analizamos varias características de la economía que pueden ser estudiadas mediante analogías físicas. Quedan sin embargo varias preguntas que respon-

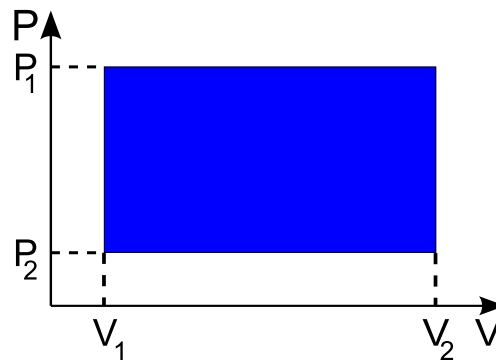


Figura 3: Ciclo de Carnot correspondiente a un ciclo de especulación donde se compra y vende una cantidad $V_2 - V_1$ de bienes a dos precios diferentes dados por P_1 y P_2 . El área encerrada es la riqueza acumulada por el especulador, tomada de otros agentes.

der. Por ejemplo, es claro que los datos muestran la existencia de dos clases sociales. Una pregunta interesante es cómo aparecieron estas dos clases y de qué depende nuestra pertenencia a una clase u otra. Podrían argumentarse otra vez muchos factores, pero estadísticamente está determinada por la clase donde se nace [12]. Ello llevaría inmediatamente al campo de la historia. Desde este punto de vista, es sabido que las sociedades primitivas no muestran clases definidas. Al parecer, las clases surgieron cuando las sociedades pasaron de nómadas a sedentarias debido al uso de la agricultura. En las sociedades nómadas, era difícil generar un excedente de recursos para su acumulación, y todavía más difícil era el poder transportar dicho excedente. De este modo, podría entenderse el surgimiento de clases como un proceso social histórico. Nuestro camino nos cruza con el estudio de la historia, la antropología, la sociología, política, etcétera. Como veremos, la física puede proveer de algunos enfoques novedosos a estas disciplinas, dando lugar a la sociofísica. Es interesante decir aquí que si bien la sociofísica comenzó como una rama claramente definida a mediados de la década de 1990, hay muchos antecedentes históricos. Por ejemplo, uno de los primeros intentos para desarrollar algo de esta naturaleza fue hecho por el filósofo inglés Thomas Hobbes en 1630-1640. En su famosa obra *Leviathan* escrita en 1651, utilizó la física del movimiento creada por Galileo para concluir que el despotismo absoluto es la mejor forma de gobernar una nación [14]. El astrónomo, matemático y sociólogo Adolphe Quetelet, en 1835 describe el proyecto de crear una física social, basada en lo que él llama el hombre medio, caracterizado por tener todas las medias de diversas variables distribuidas según una curva normal. Auguste Comte sustituyó al término *física social* por *sociología* al descubrir que Quetelet lo había propuesto antes para describir el estudio de sistemas sociales. Otra idea al respecto, se remonta al escritor de ciencia ficción Isaac Asimov. En su famosa serie de novelas conocida como *Fundación e Imperio*, se describe cómo la psichistoria, basada en la teoría estadística de los gases, permitía a su fundador Hari

Seldon predecir el futuro. Esta teoría estaba basada en dos axiomas,

- La población a modelar debería ser suficientemente grande.
- La población debía mantenerse ignorante de la aplicación de los análisis de la psicohistoria.

Las ecuaciones resultantes eran resueltas en una especie de computadora llamada el Radiante. Cada cierto número de años, el radiante emitía un holograma donde Seldon discutía los sucesos que muy probablemente habrían ocurrido en la etapa concluida. Basado en el resultado de las ecuaciones, se decide formar una fundación encargada de hacer una enciclopedia galáctica con todo el conocimiento de la época.

Aunque la serie de *Fundación e Imperio* fué muy popular desde su publicación, la sociofísica no nació inmediatamente, y de hecho, hay críticos que señalan como indeseable confundir a Asimov como uno de los antecedentes de la sociofísica, dado que en realidad no contribuyó a la creación de una rama de la ciencia, justamente por carecer de una base experimental sólida. Aún mas, algunos le atribuyen el haber retrasado su creación por darle un cierto barniz de ficción a lo que en realidad es una ciencia [13]. Otro antecedente se debe al famoso físico italiano E. Majorana, quien propuso el uso de ideas cuánticas a los sistemas sociales [14]. Sin embargo, S. Galam fué uno de los primeros en tratar de publicar un artículo con algunas ideas al respecto. En ese entonces, Galam escribía su disertación doctoral sobre teoría de escalamiento en transiciones de fase, dándose cuenta del potencial que tenía en el estudio de sistemas sociales. Su manuscrito fué confiscado por el director del laboratorio, con el argumento de que podría dañar la reputación del mismo. Sólo después de varios años, y con la ayuda de un entusiasta con sólidas credenciales científicas, el alemán D. Stauffer, se pudo publicar el primer artículo del tema. El resultado fué un largo y gélido silencio. Mas tarde, el campo reviviría con el trabajo de Axelrod et. al., el cual paradójicamente, fué refutado parcialmente por Galam. Galam demostró que en realidad Axelrod introducía de manera velada sus propios prejuicios en el modelo. Sin duda, ese es justamente el mayor peligro al que se enfrenta la sociofísica, i.e., como modelar e interpretar a un sistema social cuando el investigador forma parte de él. Aún a pesar de esto, en los últimos años este campo ha tenido un crecimiento verdaderamente explosivo por el surgimiento global de las redes, especialmente las sociales. Por ejemplo, es posible cuantificar aproximadamente el grado de amistad usando el tiempo que se habla con otra persona en el celular. Se ha construido un mapa de la conectividad pesada de amistad usando la red de telefonía celular en Europa [15]. Obviamente, esta clase de estudios van de la mano con el desarrollo de tecnologías que permitan el manejo de bases de datos enormes, pero lo importante aquí es la existencia de datos experimentales que requieren ser explicados mas allá de los prejuicios o formación cultural del investigador. Aquí surge un punto importante relacionado con el axioma 2 de Asimov; la sociofísica podría tener el paradójico efecto de influir eventualmente en el desarrollo de la sociedad,

con buenos y malos fines. Sin duda, este será un tema de discusión que eventualmente tendrá que ser planteado.

Para entender la relevancia de estos temas, basta con recordar la famosa fórmula de Drake, la cual da el número esperado de civilizaciones en la Galaxia con al menos nuestro mismo nivel tecnológico [16],

$$N = R_* f_p n_e f_1 f_i f_c L. \quad (13)$$

Esta fórmula es básicamente una multiplicación de factores que dan cuenta de los sucesos que deben ocurrir para generar civilizaciones. R_* es el ritmo de formación estelar promediado para toda la vida de la Galaxia, en estrellas por año, f_p es la fracción de estrellas con sistemas planetarios; n_e es el promedio de los planetas que son ecológicamente apropiados para la vida; f_1 es la probabilidad de que aparezca vida, f_i es la fracción de tales planetas en los cuales nace vida inteligente una vez que aparece la vida, f_c es la fracción de tales planetas en los cuales los seres inteligentes desarrollan tecnologías de comunicación; y L es la vida media de esas civilizaciones técnicas. Como vemos, esta fórmula abarca la astrofísica, la biología, la química, la física, la neurofisiología. f_c y L involucran la antropología, arqueología, política, historia, etcétera. En la fórmula, la confianza que se tiene en la estimación de cada factor decrece de izquierda a derecha, siendo f_c y L los términos para los cuales existe mayor incertidumbre. Desde luego que con fines de entender la supervivencia humana, el término más importante es L . La amenaza de guerras nucleares, destrucción de ecosistemas o agotamiento de reservas energéticas plantea una gran interrogante sobre L . Cada año que pasa desde el inicio de las pruebas de armas termonucleares abona nuestra confianza en poder aumentar L . Una postura contraria es la planteada por Erico Fermi quien se preguntaba, "si existen tantas civilizaciones extraterrestres, ¿dónde están?". L podría ser entonces bastante pequeña (por cierto, esto daría probablemente una cota superior para el avance científico medio de una civilización). Lo interesante de la fórmula de Drake es que parece ser un paradigma de la interdisciplina, en la cual la física se haya entremezclada a todos sus niveles.

Así pues, hagamos ahora un ejercicio por resumir algunos de los temas de investigación estudiados por la sociofísica,

- Evolución y organización social.
- Toma de decisiones.
- Formación de alianzas.
- Modelos de votación.
- Estrategias de supervivencia

- Comportamiento
- Formación de opinión
- Conflictos
- Flujo y fenómenos de pánico de multitudes

En este capítulo, abordaremos algunos de estos aspectos a modo de ejemplos de cómo aplicar la física a sistemas sociales. Empezaremos con uno de los problemas planteados en la parte de econofísica ¿cómo aparecen dos clases? Desde luego, el modelo planteado no responde totalmente a esta cuestión. Es más, el modelo planteado fué propuesto para entender la jerarquía entre animales. Sin embargo, es muy ilustrativo de las hipótesis y manera de abordar un problema de organización social.

Transiciones de tipo social

Como se mencionó en la introducción, existe un consenso entre historiadores, antropólogos, economistas y politólogos sobre la evolución de la organización social. En los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a la comprensión de cómo se dan estos cambios en los sistemas. Un enfoque consiste en formular modelos plausibles de comunidades animales y humanas mediante la introducción de reglas simples para producir sociedades artificiales. Por ejemplo, la transición desde sociedades igualitarias de caza a una jerárquica de tipo agrícola puede ser descrito por una transición de fase, similar al modelo de jerarquías sociales propuesto por Bonabeau [17]. Este modelo se hizo para explicar la territorialidad y jerarquías sociales observadas en los animales. Es muy sabido por ejemplo que los gatos y gallinas comen en un estricto orden. Este orden da a ciertos individuos un acceso privilegiado a los recursos y parejas para reproducción. Como sociedad, se cree que esto da ventajas para la superviviencia y selección natural. La sociofísica intenta modelar cómo se establece esta jerarquía.

En el modelo original de Bonabeau [17], los agentes deambulan siguiendo una caminata aleatoria en un territorio consistente en una red cuadrada con N sitios. Inicialmente, se coloca una cierta concentración de agentes (p) en la red al azar, de tal manera que dos agentes nunca ocupan la misma posición. Eventualmente, los agentes se moverán a un sitio ocupado, desatándose una pelea entre los dos. El resultado de la pelea se decide al azar, pero tomando en cuenta una distribución que es función de peleas pasadas. Un agente con un buen historial de luchas podrá tener mayor probabilidad de ganar una pelea. Esta probabilidad se decide mediante una distribución parecida a la de Fermi-Dirac a temperatura cero, usada para conocer la ocupación de los estado cuánticos por los electrones. La probabilidad q de que i gane viene dada por,

$$q = \frac{1}{1 + \exp(\sigma [h(k) - h(i)])} \quad (14)$$

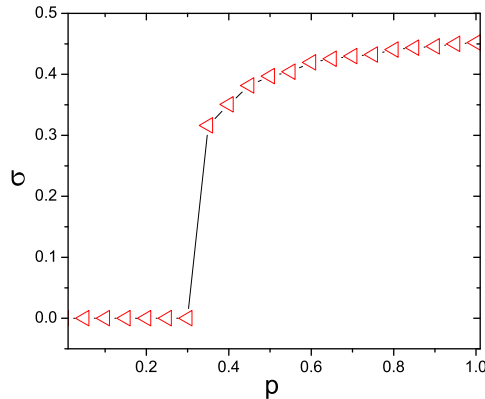


Figura 4: Desigualdad en la habilidad para ganar peleas como función de la densidad de población p . Nótese la transición de fase entre una sociedad igualitaria a una jerárquica alrededor de $p = 0.35$

donde $h(i)$ es el historial de cada agente. Este cuenta el número de victorias menos el número de pérdidas de la persona i , ponderado por el número total de peleas. Inicialmente, la probabilidad de perder o ganar es de 50% ya que todos los $h(i)$ son cero. Sin embargo, al evolucionar la sociedad, ocurren peleas dado que los agentes intentan ocupar los mismos sitios. Esto da lugar a que los agentes empiezen por acumular un historial. Las fluctuaciones estadísticas harán entonces que pueda existir una desigualdad en la habilidad de los agentes. Esta desigualdad se puede medir mediante un parámetro, llamado de orden, por su analogía con las transiciones de fase que ocurren en la termodinámica o física estadística,

$$\sigma = \sqrt{\langle q^2 \rangle - \langle q \rangle^2} \quad (15)$$

donde el promedio de $\langle q \rangle$ se lleva a cabo en toda la población de agentes. El caso $\sigma = 0$ indica una sociedad igualitaria en el sentido de que todos los agentes tienen la misma posibilidad de ganar una pelea, $\sigma = 1$ corresponde a jerarquía máxima.

El resultado principal de este modelo es la aparición de una transición de fase en la sociedad cuando la densidad de agentes en la red supera cierto valor crítico. En la figura 4 presentamos la evolución de σ en función de la densidad de agentes. Si la ocupación de los agentes es menor a 0.35, σ es cero, indicando una sociedad igualitaria. Para una $p > 0.35$, aparecen dos clases sociales, una fuerte y la otra débil. [18]

Una posible crítica del modelo anterior, es que supone a los sitios del territorio como equivalentes, en el sentido de que tienen el mismo valor estratégico. Por ello los agentes deciden la dirección del movimiento al azar. Aunque esta suposición conduce a una

importante comprensión del mecanismo básico de creación jerarquía social, en muchos ambientes esto no resulta cierto [19]. En realidad, algunos sitios son más valiosos que otros debido a varios factores, como por ejemplo la disponibilidad de recursos naturales o una sitio geoestratégico valioso. Por lo tanto, las peleas en los sistemas reales suelen tener lugar con el fin de dominar territorios de alto valor, y es poco probable que difusión tenga lugar como una caminata al azar. Para mejorar el modelo de Bonabeau, los agentes se mueven de manera que localmente tratan de alcanzar los sitios de valor. Este tipo de sitios son atractivos para los agentes. Es importante señalar que este modelo introduce un aspecto de optimización para la problema de las jerarquías sociales, es decir, las peleas tienen lugar de aumentar la riqueza media de los agentes.

Así, para mejorar el modelo Bonabeau, se pueden mantener las normas de combate, pero cambiando la manera en que los agentes se mueven [19]. Al principio se asigna a cada sitio de la red un valor determinado, para simular algunas condiciones geográficas, como por ejemplo pozos de agua donde los animales deben ir a beber. Las nuevas reglas de los movimientos de los agentes podrían ser las siguientes [19]:

- Si los valores de todos los vecinos del sitio son menores que el valor del sitio ocupado originalmente por el agente, el agente permanece en el sitio, ya que no vale la pena tener un sitio de menor valor.
- Si la condición anterior no se cumple, el agente se mueve al sitio vecino con el valor más alto. Sin embargo, puede suceder que más de uno de los sitios vecinos tengan el mismo valor. En tal caso, se escoge uno al azar entre los más valiosos.
- Por último, también puede ocurrir que el sitio original tenga el mismo valor que el valor máximo de sus vecinos, entonces el agente se mueve siempre a un sitio vecino elegido aleatoriamente entre los vecinos valiosos. Hemos establecido esta regla con el fin de recuperar el límite de la modelo de Bonabeau para un territorio homogéneo, ya que bajo Bonabeau siempre es necesario saltar a un sitio vecino. Así, en el modelo modificado si todos los sitios son ricos o pobres, las normas de movimiento se reducen al caso Bonabeau.

El siguiente paso es producir un territorio en el que los agentes se mueven. A fin de comprender los efectos de las nuevas normas, el territorio más simple que se puede imaginar es tener dos tipos de sitios: sitios no atractivos o pobres, con valor cero, y atractivo o valioso, con un valor igual a 1. La distribución de los sitios puede hacerse al azar, con una probabilidad x de tener un sitio valiosos, y $1 - x$ para los no valiosos. Por lo tanto, la red es similar a un problema de percolación en $2D$. Vale la pena observar que la transición de percolación se produce para $x = 0.59$, es decir, para x mayores a este valor, hay un camino de sitios valiosos que atraviesa el territorio.

La figura 5 (a) muestra los resultados de la desigualdad como una función de la densidad p de los agentes. Lo primero que debe notar es que para $x = 1, 0$, recuperamos los

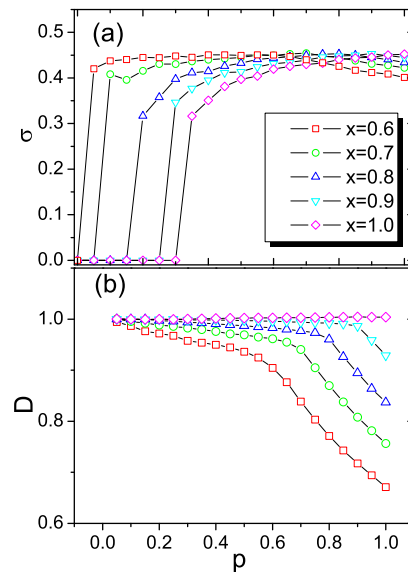


Figura 5: a) Desigualdad en la habilidad para ganar peleas como función de la densidad de población p para diferentes concentraciones de riqueza. Nótese como la transición de fase entre una sociedad igualitaria a una jerárquica se desplaza para diferentes x . b) Difusividad de los agentes en la red. Esta disminuye cuando la población es mayor que la cantidad de sitios atractivos.

resultados originales de Bonabeau [17], donde se observa una transición de fase alrededor de $p = 0,35$, con un desigualdad de 0.45. Cuando la concentración de sitios ricos disminuye, se observan dos características importantes. El primero es un cambio gradual de la transición de fase hacia poblaciones de baja densidad. Cuando $x = 0.60$ la transición de fase ocurre casi en $p = 0$. En ese sentido, la introducción de sitios de valor tiende a aumentar la desigualdad a bajas p . La razón es sencilla, al buscar los agentes los sitios de valor, ocurren muchos más conflictos dado que los agentes se congregan en los pocos sitios valiosos. En otras palabras, los conflictos sociales aumentan al disminuir la riqueza del territorio. Aunque este resultado es intuitivamente claro, como sabemos de los conflictos en ambientes ecológicos degradados, lo interesante es la transición de fase, indicando que el cambio no sucede de manera gradual. En la figura 5 (b) se incluye también el coeficiente de difusión D , obtenido de la relación $\langle \mathbf{r}^2 \rangle = Dt$, donde \mathbf{r} es el desplazamiento cuadrático medio. Puede notarse como disminuye la difusión al haber más sitios pobres.

Un hecho interesante de este modelo modificado, es que permite incluir no sólo la habilidad para pelear, sino evaluar la riqueza promedio de los agentes m , definida como,

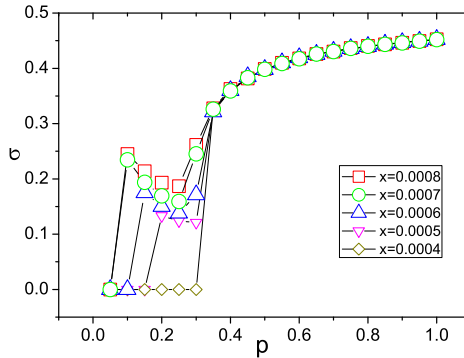


Figura 6: Habilidad como función de la densidad p para territorios con diferentes grados de pobreza x , en el límite donde x y p son pequeños. La fase de caciques es el pequeño escalón que se forma antes de la subida a $\sigma = 0.5$

$$m = \frac{N_R}{N} \quad (16)$$

donde N_R es el número de agentes en sitios atractivos y N el número total de agentes. Si $x > p$, entonces podría en principio haber suficiente riqueza para todos, dado que hay más sitios atractivos que agentes. Una de las sorpresas de este modelo es que dicha observación es cierta si x no es pequeña comparada con el límite de percolación. Para x muy pequeñas respecto a $p = 0.35$, podemos ver en la figura 7 que aparece un estado intermedio entre el de desigualdad máxima y el cero. Un análisis de este estado, revela que se trata de una fase donde el sistema llega a una especie de mínimo local, ya que los agentes se agolpan en torno a unos pocos sitios valiosos, peleándose en la vecindad de algunos de ellos sin que la sociedad pueda evolucionar a otro estado [19]. Lo curioso del modelo es que en este límite, pueden existir sitios valiosos no ocupados, sin embargo, la falta de información global, dado que las reglas de movimiento son locales, hacen que el sistema quede atrapado en esas peleas locales, donde domina un agente mientras muchos otros tratan todo el tiempo de tomar su lugar, quedando cada vez más débiles. Por eso, hemos denominado a esta fase como *de caciques y cabezones* (cabezón usado en el sentido de terco o necio), el cual tiene cierta analogía con la formación de vidrios. Así, en la fase de caciques y cabezones, el valor de m es casi siempre menor al teóricamente posible. Aunque para $x = 0$ recuperamos el modelo de Bonabeau, tal y como sucede para $x = 1$, la diferencia estriba en el modo de llegar al estado homogéneo. En el caso de un territorio pobre, hay muchos conflictos locales mientras que en un territorio rico respecto a la población, la transición es suave. En el caso de pobreza, el conocimiento de la información global es muy relevante para evitar caer en un estado no óptimo.



Figura 7: Caricatura de la fase de caciques y cabezones. Aunque hay dos círculos que representan sitios valiosos, los agentes permanecen en sólo uno de ellos debido al horizonte local de las reglas de movimiento. Como resultado, hay muchos conflictos donde el cacique es cada vez mas fuerte, representado aquí por el rey con el león.

Conflictos y formación de alianzas

Uno de los temas donde la sociofísica ha sido más fructífera, es en el estudio de la formación de coaliciones, la cual puede aplicarse en muchos contextos como guerras, alianzas comerciales, políticas, formación de opinión, etcétera. Una coalición debe entenderse como una forma de agregación entre un conjunto de actores (países, empresas, individuos, etcétera). La idea principal detrás de estos modelos es que deben de existir algoritmos que los agentes aplican de manera empírica para decidir entre varias opciones. La tarea de la sociofísica es obtener estos algoritmos observando los datos de la experiencia y mediante simulaciones en mundos artificiales.

Típicamente, se piensa que las opciones escogidas por los agentes se toman de modo que el grado de insatisfacción total produzca el menor conflicto posible, llevando esto a definir un Hamiltoniano del sistema. Por ejemplo, en el trabajo seminal de Axelrod y Bennett [20], se obtuvo la alineación de diecisiete países europeos en la Segunda Guerra Mundial (WW II) y la pertenencia a alianzas competidoras de nueve empresas de informática para establecer normas para los sistemas operativos Unix informáticos. Para la Segunda Guerra Mundial, los parámetros del modelo fueron obtenidos a partir de los conflictos del pasado, las fronteras físicas, la religión, etcétera [20]. Galam demostró posteriormente que este modelo tenía algunos problemas. Mejorándolo, Florian y Galam [21] usaron el modelo para describir la fragmentación de la ex-Yugoslavia.

Las analogías más usuales toman prestados modelos de sistemas magnéticos, usados por los físicos para entender cómo aparece el ferromagnetismo o el antiferromagnetismo. La razón de ello es simple. Según muchos expertos en el tema, cuando realmente se quie-

re "jugar duro", las opiniones se polarizan en dos bandos que compiten intensamente. Eventualmente, los actores deben escoger una de las dos opciones (*o están con nosotros, o contra nosotros, George Bush dixit*). Esto recuerda inmediatamente al espín. En ausencia de campos externos, los espines pueden alinearse por su interacción entre ellos, dando lugar a un momento magnético neto, lo cual produce un material magnetizado de manera espontánea, conocido como ferromagneto. Dado que los modelos magnéticos son básicos en el estudio de formación de coaliciones u opinión, pasemos a realizar un breve repaso de ellos.

El modelo de Ising es especialmente apropiado para su uso en sociofísica. El Hamiltoniano de Ising se obtiene de simplificar el modelo de Heisenberg, en el cual el Hamiltoniano viene dado por la interacción entre parejas de dipolos magnéticos situados en una red,

$$H = - \sum_{i>j} \sum_{\alpha} J_{ij}^{\alpha} S_i^{\alpha} S_j^{\alpha} \quad (17)$$

Aquí S_j^{α} es la componente $\alpha = x, y, z$ del operador de espín en el sitio j , J_{ij}^{α} es la magnitud de interacción entre el sitio i y el j . El signo menos indica que la energía baja cuando los espines se alinean en la misma dirección. Este Hamiltoniano se puede reducir si se considera sólo espín 1/2 y la componente z . En ese caso, obtenemos el famoso Hamiltoniano de Ising,

$$H = - \sum_{i>j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (18)$$

donde ahora σ_i vale simplemente 1, correspondiente a un espín para arriba en la dirección z , o -1 en caso contrario. Si $J_{ij} = J > 0$ para átomos vecinos y 0 en caso contrario, es sencillo demostrar que el estado de energía mas baja se obtiene cuando todos los espines apuntan en una dirección. Para ello notamos que el valor esperado de la energía en el estado base denotado por $|0\rangle$ es,

$$E_0 = \langle 0 | H | 0 \rangle = - \sum_{\langle i,j \rangle} J \sigma_i^0 \sigma_j^0, \quad (19)$$

siendo σ_j^0 el valor de σ para el estado base, y la notación $\langle i, j \rangle$ se usa para indicar que la suma se realiza sólo sobre átomos cercanos. Para ser el estado base, E_0 deberá tener el valor mas negativo posible, lo cual se obtiene si todos los productos $\sigma_i \sigma_j$ son $+1$. Hay dos opciones, o todos apuntan hacia arriba con $\sigma_j = 1$ o bien hacia abajo, $\sigma_j = -1$. Esto describe justamente el fenómeno del ferromagnetismo. En cambio, si $J_{ij} = J < 0$, el estado base requiere que todas las parejas valgan $\sigma_i \sigma_j = -1$. El estado base corresponde ahora a un antiferromagneto, en el cual los átomos deben de tener siempre el espín contrario a su vecino. Si llegara a existir un campo externo, se agrega un término de interacción con el

mismo,

$$H = - \sum_{i>j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \mu_0 B \sum_j \sigma_j, \quad (20)$$

siendo μ_0 la norma del momento magnético del dipolo atómico correspondiente.

Un fenómeno interesante es el rompimiento espontáneo de la simetría. En ausencia de campos externos, no hay una dirección privilegiada, por lo cual el estado base puede tener magnetización total para arriba o para abajo. Ambos estados son igualmente probables. La magnetización observada resulta de alguna pequeña perturbación que finalmente acaba por “convencer” a los espines que se alineen en su dirección. En un ferromagneto, hay dominios o regiones que comparten una misma magnetización en la misma dirección. En presencia de campo, el estado con mínima energía será el que haga mínimo el primer y segundo términos del Hamiltoniano. Así, el segundo término se hace mínimo cuando los espines se alinean en la dirección del campo. Suponiendo que $J_{ij} = J$ para los vecinos y cero en caso contrario, la energía de este estado es,

$$E_0 = \langle 0|H|0 \rangle = -ZJN/2 - \mu_0 B \sum N, \quad (21)$$

donde Z es el número de vecinos que tiene un átomo en la red y N es el número total de átomos.

Estas ideas pueden usarse en problemas de toma de decisiones. Empezemos con un ejemplo. Supongamos que se organiza una cena de solteros con la idea de que estos conozcan potenciales parejas. La pregunta es como sentarlos de manera que se maximice el número de posibles parejas con sexos opuestos, como se muestra en la figura 8. Para resolver el problema, se propone primero que hay tres tipos de interacción entre pares: hombre-hombre, mujer-mujer y hombre-mujer. Luego podemos suponer que para estos fines, la interacción hombre-hombre es igual a la de mujer-mujer. Así, sólo nos quedan dos interacciones diferentes. Es evidente que una cena de este tipo, la interacción entre sexos opuestos es favorable mientras que entre sexos iguales es menos favorable. Pensamos entonces en medir el grado de insatisfacción de los comensales con el orden escogido, lo cual podría evaluarse experimentalmente mediante encuestas de salida. El grado de insatisfacción individual puede obtenerse mediante un puntaje, usando el siguiente método,

- poner $-J$ puntos por cada vecino del sexo opuesto que se tuvo en la cena.
- poner un $+J$ puntos por cada vecino del mismo sexo.

siendo J un número arbitrario mayor que zero, i.e., de aquí en adelante consideraremos que $J > 0$. Así, la persona j puede dar el siguiente puntaje ϵ_j al terminar la cena,

- $2J$ si ambos vecinos fueron del mismo sexo que el encuestado.
- 0 si tuvo vecinos de uno y otro sexo.

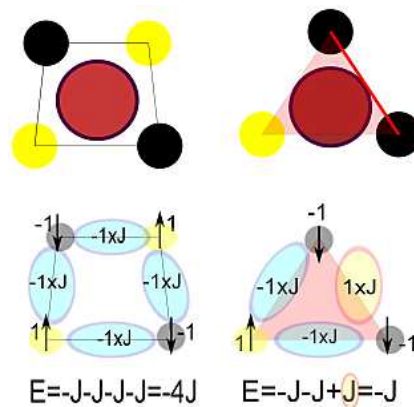


Figura 8: Cena de solteros con cuatro y tres comensales. En el caso de cuatro, se puede minimizar el conflicto sentando en la mesa redonda a cada mujer (círculos amarillos) rodeada de un hombre (círculos negros), y viceversa. En cambio, en el caso de tres, necesariamente hay dos hombres sentados juntos. Esto genera una interacción conflictiva marcada en rojo. Abajo de cada situación se muestra como entender la situación usando el hamiltoniano de Ising. En ese caso, las mujeres se representan con el espín hacia arriba y los hombres abajo. Entre cada par de comensales vecinos, la energía de interacción viene dada por el producto de sus respectivos espines, multiplicada por el factor de peso J . Para cuatro comensales, el estado base es el mostrado en la figura, donde cada pareja da lugar a un $-J$. La energía del estado base es $E = -4J$. Con tres comensales, el estado base presenta una interacción conflictiva con valor $+1$, marcada con un círculo rojo, dando una energía $E = -J$.

- $-2J$ si ambos vecinos fueron del sexo opuesto al entrevistado.

Si sentamos a los comensales en un orden dado, el grado de insatisfacción en el grupo vendrá dado por la suma de los puntajes individuales (ver figura 8),

$$E = \sum_j \epsilon_j \quad (22)$$

Esta energía, para N individuos corresponde justamente a la de un posible estado de un hamiltoniano de Ising antiferromagnético en una red unidimensional con condiciones de frontera cíclica, haciendo:

$$H = |J|(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_4 + \dots + \sigma_1\sigma_{N+1}), \quad (23)$$

donde $\sigma_{N+1} = \sigma_1$. Ello se debe a que el puntaje individual puede obtenerse si asignamos arbitrariamente un valor $+1$ a las mujeres y -1 a los hombres. Luego multiplicamos para cada pareja de vecinos el valor de cada uno de ellos, como se muestra en la figura 8. De este modo,

- vecinos hombre-hombre, $J(+1 \times +1) = J$.
- vecinos mujer-mujer, $J(-1 \times -1) = J$.
- vecinos mujer-hombre $J(-1 \times +1) = -J$.

De este hamiltoniano podemos aprender varias cosas:

- El estado de mínima insatisfacción para un número N_h hombres y N_m de mujeres será aquel que minimize la energía del hamiltoniano de Ising
- Para $N_h = N_m$, el estado de mínima energía es aquel en el cual se sientan alternadamente un hombre y una mujer. Dicho estado tiene energía,

$$H = -(N_h + N_m)|J| \quad , \quad (24)$$

- Si $N_h \neq N_m$, la energía mínima alcanzable será mas alta que $-JN$ porque necesariamente habrán personas del mismo sexo sentadas juntas. Esto se ilustra claramente en el caso de tres personas (ver figura 8). Aquí hay dos "enlaces" cuyo puntaje total da $-J$, mientras que hay uno con puntaje J , siendo el total $-2J + J = -J$ en lugar de $-3J$, que sería el mínimo posible si se pudiera tener tres enlaces con puntaje $-J$. Este fenómeno se conoce como *frustración*. Indica que si existen en la red un número impar de personas, o un número diferente de hombres y mujeres así como interacciones que formen triángulos, entonces habrá un costo de insatisfacción en el sistema. El estado base del hamiltoniano de Ising antiferromagnético dará la configuración de menor conflicto posible, por lo cual se postula usualmente como el estado de equilibrio final al que llegan estos sistemas.

Hagamos un alto en el camino y veamos que se ganó al formular el problema en términos de un hamiltoniano de Ising. Lo inmediato es la posibilidad de resolver sistemas con un gran número de interacciones mediante el uso de computadoras, proporcionando soluciones que no son obvias a simple vista. Pero también está la posibilidad de estudiar transiciones de fase, incluir una dinámica en el tiempo, etcétera. Además, podemos llevar mas allá las analogías, modificando un poco las ideas para estudiar la formación de alianzas. Así, Axelrod y Bennett [20] trataron de explicar la composición de las coaliciones mediante el empleo de la afinidad relativa por parejas o propensión bilateral p_{ij} entre los actores i y j , definiendo una energía del sistema,

$$E(X) = \sum_{i>j} s_i s_j p_{ij} d_{ij}(X), \quad (25)$$

aquí s_i es un factor de peso positivo que mide el poder del agente i y $d_{ij}(X)$ es la distancia j desde i en la configuración X . Esta distancia es 0 si i y j pertenecen a la misma

coalición, y 1 cuando se encuentran en una coalición diferente. Este modelo tiene sólo dos posibles coaliciones, y por lo tanto se le llama bimodal. Si $p_{ij} > 0$, los agentes i y j tienden a ser aliados, y de lo contrario $p_{ij} < 0$. A continuación, se postula que la configuración del sistema es el que minimiza la energía. El camino seguido por el sistema en el espacio de posibles soluciones, sigue la dirección de mayor gradiente de energía. Una vez que se alcanza un mínimo, el sistema se vuelve estable. Este modelo ha sido aplicado al estudio tanto de las alianzas de la Segunda Guerra Mundial y UNIX [20]. Galam demostró que en el caso de las coaliciones bimodales (A y B), el modelo es equivalente a un sistema de Ising a temperatura cero. Para ello, las configuraciones pueden ser expresados por las variables de espín σ_i , donde el espín es $+1$ si el agente i pertenece a la coalición A y -1 si pertenece a la B . Al volver a escribir las distancias como $d_{ij}(X) = \frac{1}{2}(1 - \sigma_i(X)\sigma_j(X))$, la energía se convierte en

$$E(X) = E_r - \sum_{i>j}^n J_{ij}\sigma_i(X)\sigma_j(X) \quad (26)$$

con,

$$E_r \equiv \frac{1}{2} \sum_{i>j} s_i s_j p_{ij} \quad J_{ij} = \frac{1}{2} s_i s_j p_{ij} \quad (27)$$

que es básicamente el estado fundamental de un modelo de Ising, dado por el siguiente hamiltoniano,

$$H^{(2)} = - \sum_{i>j}^N J_{ij}\sigma_i\sigma_j - \sum_i^N h_i\sigma_i \quad (28)$$

donde el espín σ_i en el sitio i puede ser 1 o -1 , con un campo magnético (H_i). La coalición a la que pertenece un agente i , está dada por el valor del espín. La interacción entre los agentes i y j es J_{ij} , tomada de la experiencia histórica, cultural y económica. La interacción J_{ij} favorece la cooperación si $J_{ij} > 0$, conflicto $J_{ij} < 0$ y la neutralidad $J_{ij} = 0$. Una particularidad interesante de este hamiltoniano es que las J_{ij} pueden tomar tanto valores positivos como negativos. En general, los valores J_{ij} no siguen un patrón dado, sino que semejan mas bien un patrón aleatorio. Llegamos entonces a un modelo donde las J_{ij} vienen dadas de manera aleatoria. Este modelo es bien conocido en la física estadística. Se conoce como vidrio de espín, debido al carácter aleatorio de las interacciones. Un ejemplo de vidrio de espín son las aleaciones desordenadas de dos metales con momentos magnéticos diferentes. Durante las décadas de 1980 y 1990, la física estadística dedicó un gran esfuerzo al entendimiento de estos sistemas. Su complejidad necesitó del desarrollo de varios conceptos nuevos, como la técnica de réplicas. Uno de los conceptos mas interesantes fué el reconocimiento de la fractalidad del espacio de soluciones.

Sin embargo, hay dos objeciones en todos estos modelos. La primera proviene de la falta de claridad al intentar cuantificar algunos de los parámetros de un sistema real. Por lo tanto, una mejor y más detallada cuantificación de las propensiones bilaterales debe

ser el objetivo de cada problema particular. Pero la segunda crítica es muy general y es que en la mayoría de los modelos, la interacción es siempre entre pares. Esto es tanto como decir que si existe un triángulo amoroso, por ejemplo, dos hombres, Juan y Pedro, y una mujer, Alicia, la relación Juan-Alicia no se ve afectada por la relación Pedro-Alicia. Por ejemplo, recientemente se analizó la segunda guerra de Irak (2005) mediante los preceptos de Galam [22]. Según ese modelo, la solución indicaba que Israel debería atacar a Irak. Sin embargo, se mantuvo neutral. La razón es simple; la neutralidad de Israel permitió a los E.U.A contar con el apoyo de algunos países Musulmanes, lo cual no hubiera sucedido con Israel en guerra. De este modo, la relación Israel-E.U.A. afecta la relación E.U.A.-Musulmanes. Este indica que existe una interacción de muchos cuerpos, de manera parecida a como ocurre con la física de altas energías. En Naumis *et al.* [22], se propuso una manera simple de resolver este problema agregando al hamiltoniano de Ising H un término que toma en cuenta esta interacción H_3 , para construir un nuevo hamiltoniano H_{mb}

$$H_{mb} = H + \alpha H_{(3)} \quad (29)$$

donde α es un parámetro que mide la magnitud del efecto de tres cuerpos. La forma más simple de la perturbación es,

$$H^{(3)} = \sum_{i,j,k} \frac{t_{ijk}}{3} \sigma_i \sigma_j \sigma_k, \quad (30)$$

con un parámetro de acoplamiento t_{ijk} por cada triángulo de actores de i , j y k que se produce en la red. Los parámetros vienen dados por,

$$t_{ijk} \equiv \gamma_{ijk} J_{ij} J_{jk} J_{ki} \quad (31)$$

donde γ_{ijk} es la magnitud del conflicto o daño asociado con una interacción de tres cuerpos. Los resultados usando este modelo, resuelven el problema de la neutralidad de Israel en la 2a. Guerra del Golfo [22].

4. Análisis de las sociedades mediante leyes fundamentales de la física

En las secciones anteriores, mostramos un panorama general de cómo se pueden modelar algunos aspectos sociales mediante el uso de la física. Sin embargo, no podemos finalizar sin mencionar el gran poder de síntesis que proporcionan las leyes de la física a ciertos aspectos genéricos de la civilización. Este enfoque debería ser fundamental en los planes de desarrollo y políticas sociales. En efecto, la física puede ayudar a calcular cuántas personas pueden habitar el planeta, como hacer más eficiente una sociedad, cuantificar la sustentabilidad de un modelo económico, etcétera.

Aquí haremos un simple ejercicio de reflexión acerca de los tópicos que se pueden abordar mediante un enfoque físico.

El gran balance de energía y entropía

En realidad, las claves más fundamentales para cualquier ecosistema o economía es su consumo y eficiencia energética [23]. De la termodinámica, sabemos que la eficiencia está íntimamente ligada con la entropía. Los seres vivos son en sí mismos, sistemas fuera de equilibrio termodinámico luchando de manera permanente por preservar su información requiriendo para ello incrementar la entropía del resto del universo, tal y como se mencionó en las primeras páginas de este capítulo.

Hagamos una vez más un análisis rápido de este punto. Veamos por ejemplo los requisitos energéticos mínimos para la subsistencia en un país como México. Simplemente por tener una temperatura entre los 36°C y 37°C, los humanos emiten radiación electromagnética con un máximo en frecuencias del infrarrojo. Asumiendo que fuéramos un cuerpo negro a temperatura T , un cálculo simple usando la ley de Stefan-Boltzmann muestra que la potencia radiada P en un área A ,

$$P = A\sigma T^4, \quad (32)$$

es aproximadamente la misma que la de un foco de 100 Watts. En la ciudad de México hay 25 millones de habitantes, lo cual equivale a 2500 MWatts. En el país hay 110 millones de habitantes, es decir, se disipa como calor al menos 11,000 MWatts. A modo de comparación, los reactores nucleares de Laguna Verde suministran 1,365 megawatts (MW). Vemos así que simplemente por estar vivos, existe una demanda mínima de potencia equivalente a 8 reactores nucleares. Se puede argumentar que la potencia requerida no sale de las plantas de energía sino que proviene de la comida, la cual a su vez es simplemente energía acumulada del sol. Si bien esto es cierto, hay un factor capital que se escapa en este argumento. Se estima que para producir 1 caloría de alimento, se requieren al menos 10 calorías de energéticos para producirla (los cuales en el caso de México provienen en gran parte de combustibles fósiles). La razón es simple, para poder alimentar una población tan grande se necesitan técnicas que involucran mucha demanda de energía. En el caso de México, se debe bombear el agua del subsuelo o traerla de grandes distancias, se deben fabricar y transportar al lugar de consumo los fertilizantes, semillas mejoradas y utilizar tractores o animales de tiro los cuales a su vez consumen energía. Finalmente, la comida debe transportarse grandes distancias a los centros de consumo. En el siglo pasado, se estimaba que la comida provenía de un radio menor a los 30 Km, mientras que en la actualidad la cadena se extiende, en promedio, a unos 700 Km, demandando esto energía. (En el caso de la Cd. de México podemos poner como ejemplo la leche. Antes se producía en la zona de Chalco, actualmente se trae de la región Lagunera, distante unos 1000 Km). Es muy importante notar que la energía consumida se utiliza en generar entropía, dado

que la temperatura de los humanos permanece constante. Esta observación será relevante al medir el flujo de energía libre como una medida de la complejidad.

Hagamos otro cálculo rápido de los requisitos energéticos para alimentar la población de México. La dieta diaria requiere de al menos unas 2,000 Kcal por persona, es decir, aproximadamente 8,000 KJoules diarios. Multiplicada por la población de México, se obtiene unos 9×10^{14} Joules diarios. Usando la regla de que se necesitan al menos 10 cal de energéticos para obtener 1 de alimentos, se concluye que el consumo diario es de 9×10^{15} Joules. A modo de comparación, la producción de petróleo en México es de unos 2.3×10^6 barriles diarios. Cada barril equivale en energía a,

$$1 \text{ barril} = 6.1 \text{ GJoules} \quad (33)$$

de donde la producción diaria es $2.3 \times 10^6 \times 6.1 \times 10^9 = 1.4 \times 10^{16}$ Joules. De este modo, se utiliza el equivalente al 64 % de todo el petróleo producido para alimentar a la población. Sorprende saber que México importa de alimentos un 61 % de lo que consume. Si tomamos en cuenta que la producción de energía en México es del 38 %, esto representa un 24 % de toda la energía. A nivel mundial, se sabe que la producción de alimentos consume aproximadamente el 10 % de la energía generada, lo cual muestra que hemos sobrestimado algunos factores, aunque el orden de magnitud es correcto.

Otro ejemplo es el costo energético de traer el agua a la Cd. de México. El sistema comprende 11,900 Km de tuberías y 68 estaciones de bombeo [24]. Solamente el sistema del Cutzamala nos provee de 17 m^3 de agua por segundo (en realidad, la mayor parte del agua viene de pozo de bombeo, los cuales proveen [24] $60 \text{ m}^3/\text{s}$). Dado que esta debe subir unos 1000m de altura para cruzar la sierra que separa al DF del Valle de Toluca, podemos estimar la potencia necesaria calculando primero la energía potencial requerida,

$$dE = m_A gh = (\rho dt)gh \quad (34)$$

siendo g la gravedad, h la altura y m_A la masa de agua que pasa en un tiempo dt . De aquí, tomando en cuenta que 1 m^3 de agua pesa una tonelada,

$$P = \frac{dE}{dt} = \rho gh = (17 \times 10^3 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) \times (1000 \text{ m}) = 170 \text{ MW} \quad (35)$$

lo cual requiere en KW-hora, unos $170000 \text{ KW} \times 3600 \text{ s} = 680 \times 10^6 \text{ Kw} - \text{h}$. En realidad, el sistema consta de 6 plantas de bombeo que en conjunto consumen 2280 millones de kilowatts cada hora, el equivalente al consumo de energía eléctrica de la ciudad de Puebla [24]. Notamos que nuestro cálculo da tres veces menos que el real; la diferencia se debe a la viscosidad del agua que disipa energía, especialmente en una tubería de cientos de kilómetros. Lo interesante es que nuestro cálculo da una idea bastante buena del reto energético de traer el agua.

Claramente, podemos apreciar que una crisis energética es al mismo tiempo una crisis alimentaria, y no sólo un problema de si se puede usar o no coche. El problema es que

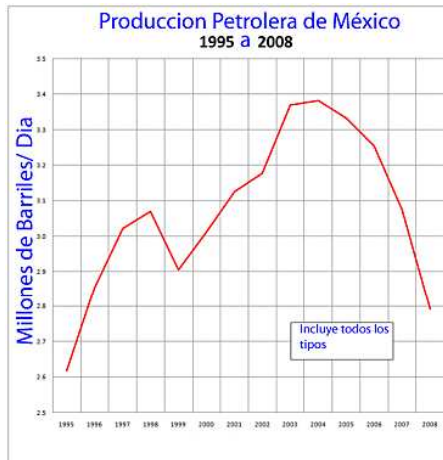


Figura 9: Producción petrolera de México en millones de barriles diarios.

según el Departamento de Energía de Estados Unidos, la producción mundial de energía debe aumentar en un 57% en los próximos 25 años para satisfacer la demanda prevista [25]. Al mismo tiempo, los costos de extracción de combustibles fósiles van en aumento y la opción nuclear al parecer está fuertemente cuestionada. Países como Japón han vivido de cerca esta dramática situación. Tras el accidente nuclear de Fukushima han decidido cerrar todos sus reactores nucleares, tratando de buscar soluciones más seguras y con una visión a largo plazo, aunque con un gran impacto en su economía. México obtiene el 37% de su energía del petróleo. En la figura 9 presentamos la producción petrolera de México. Podemos ver un descenso continuo de la producción. Un punto importante aquí es el costo de producción del barril. En pozos como Cantarell, este es mínimo, mientras que aumentan de manera considerable en los nuevos yacimientos de aguas profundas o Chicontepec. De hecho, se sabe que la producción de combustibles fósiles sigue la ley de Hubbert, es decir una campana Gaussiana. En el caso de México, el pico se alcanzó en el 2005, con reducciones anuales de hasta 2.3% de la producción. Si tomamos en cuenta el incremento continuo de la población, la producción de petróleo per cápita va en un rápido descenso con un costo por barril en aumento. De aquí podemos concluir que muchas de las políticas del país están equivocadas: en lugar de construir carreteras se debería fomentar el ferrocarril que resulta hasta 4 veces más eficiente energéticamente, las regiones de alta insolación solar deberán considerarse estratégicas, el reciclaje de agua debe ser obligatorio, etcétera. Debe agregarse que si bien la extracción de petróleo de las arenas bituminosas en Canadá y Estados Unidos han levantado dramáticamente la producción de combustibles, estos tienen un costo de producción mucho mayor con un impacto ecológico mucho más negativo.

Es interesante mencionar que el astrónomo soviético Nikolai Kardashev propuso al

consumo de energía como una medida para poner en perspectiva cósmica a las posibles civilizaciones [16]. En su clasificación hay 3 categorías. Las de tipo I usan toda la energía disponible en su planeta, las de tipo II la de su sol, y las de tipo III de toda la galaxia. Usando el consumo anual de energía, Carl Sagan propuso la fórmula [16],

$$K = \frac{\log_{10} MW}{10} \quad (36)$$

donde MW es la potencia usada en MegaWatts y K es el rango de Kardashev de la civilización. Usandola, estimó que nos encontramos en el rango de 0.7, mientras que si se toma en cuenta solamente la conversión de energía por fotosíntesis [16], se obtiene un 0.8.

Finalmente, el calentamiento global, vinculado al uso exagerado de los hidrocarburos, es parte fundamental de la ecuación. El aumento del nivel de los mares, la intensidad mayor de los huracanes, el uso del aire acondicionado, etcétera. harán más difícil sostener el consumo de energéticos. Al mismo tiempo, la gran pregunta que tantos energéticos no-renovables quedan con respecto al nivel de aumento de gases invernadero. Si estos se acaban en un período relativamente corto, el problema del calentamiento global se vería parcialmente resuelto.

La civilización humana en el Universo

Una pregunta recurrente es el papel la civilización terrestre en el Universo. Aunque al principio parecería una problemática mas propia de la ciencia ficción, lo cierto es que hay algunos elementos, desde luego muy polémicos, que permiten abordar la cuestión. Un ejemplo típico es el principio artrópico, el cual postula que las constantes físicas toman ciertos valores tales que puedan permitir la vida y una sociedad capaz de observarla [26]. Si la constante de estructura fina fuera ligeramente diferente, no existirían estrellas ligeras como el sol, y la vida pluricelular no habría tenido tiempo para desarrollarse [26]². Aunque parezca increíble, este principio sirvió a Fred Hoyle para proponer una corrección a las tablas de niveles energéticos del núcleo de Carbono, ya que debía existir una resonancia con la reacción Helio-Berilio de modo que el Carbono pudiera ser sintetizado en las estrellas y eventualmente, dar lugar a la vida. Este nivel fué medido posteriormente por un grupo de Caltech [26]. El principio artrópico tiene diversas variantes, como el fuerte o débil, pero lo cierto es que no existe un consenso de su validez, y muchos lo consideran como una tautología.

Otra teoría desarrollada por Karo Michaelian del Instituto de Física de la UNAM, indica que los animales son un mecanismo primordial para disipar entropía (S), ya que actúan como catalizadores para que las plantas y bacterias puedan incidir en el ciclo del agua [27]. La idea es que la producción neta de entropía en un tiempo dt viene dada por la diferencia entre la producción incidente a la tierra y la radiada, integrada sobre toda la banda de frecuencias ω ,

²Véase el capítulo "Evolución y materia compleja" de Octavio Miramontes, en este mismo libro.

$$P = \int_0^{\infty} \left(\frac{dS_{radiada}(\omega)}{dt} - \frac{dS_{incidente}(\omega)}{dt} \right) d\omega \quad (37)$$

Al parecer, la vida juega un papel fundamental al modificar el espectro de la parte radiada, aumentando la producción de entropía neta [27].

Otra faceta importante que fué mencionada en la introducción, es el flujo de energía libre. Esta energía, definida como $F = E - TS$, donde E es la energía interna, y S la entropía, contiene las dos entidades básicas que generan el orden o desorden, ya que existe una competencia entre E y S debida al signo menos. La ventaja de usarla como medida de la complejidad, radica en su menor ambigüedad comparada con la teoría de la información. Un estudio completo del flujo de energía libre, ha demostrado una evolución continua desde los átomos a los humanos [4]. Es interesante agregar que la tecnología aumenta de manera natural la complejidad medida de esta forma. Los circuitos de alta densidad presentan valores 4 órdenes de magnitud arriba de la complejidad humana, indicando que para continuar en el camino de una complejidad creciente, será necesario pasar a una tecnoespecie, híbrida entre humanos y máquinas. La sociedad humana parece ser un escalón en la evolución de la cada vez mas creciente complejidad observada en las islas de orden de un universo que acelera su expansión.

5. El dilema del futuro

Sea cual sea el papel de la civilización, al menos algunos aspectos del futuro lejano pueden ser vislumbrados. A nivel planetario, sabemos que dentro de 6 millones de años el sol empezará a crecer hasta llegar a la órbita de Mercurio. En ese momento, la tierra deberá empezarse a evacuar. Esta tarea requerirá enormes cantidades de energía, conocimiento, tecnología y organización. todas estas actividades implican un esfuerzo considerable a los ya de por si mermados recursos del planeta. Las sociedades menos sustentables son al mismo tiempo las grandes potencias espaciales. Con el estado actual de la tecnología, la sustentabilidad parecería estar peleada con el designio último de la civilización: dar el salto final hacia el espacio. Al mismo tiempo, la sustentabilidad parece ser la única salida a la supervivencia en el momento actual. He ahí el gran dilema al cual se enfrentarán las futuras generaciones.

Agradecimientos

Agradezco a M. del Castillo, S. Galam, K. Michaelian, J. Montemayor, D. Stauffer por sus valiosas opiniones sobre el tema.

6. Referencias

- [1] R. Penrose, *La nueva mente del emperador*. Grijalbo Mondoval, Madrid, 1991.

- [2] I. Prigogine and G. Nicolis, *La estructura de lo complejo*. Alianza Editorial, Madrid, 1994.
- [3] O. Miramontes, D. Boyer, and F. Bartumeus, "The effects of spatially heterogeneous prey distributions on detection patterns in foraging seabirds," *PloS one*, vol. 7, no. 4, p. e34317, 2012.
- [4] E. Chaisson, "Exobiology and complexity," in *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, R. A. Meyers, Ed. Springer, Berlin, 2009.
- [5] Y. Bar-Yam, *Dynamics of complex systems*. Westview Press, Boulder Colorado, 1997.
- [6] H. Stanley, P. Gopikrishnan, V. Plerou, and L. Amaral, "Quantifying fluctuations in economic systems by adapting methods of statistical physics," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 287, no. 3, pp. 339–361, 2000.
- [7] A. Silva and V. Yakovenko, "Temporal evolution of the thermal and superthermal income classes in the USA during 1983-2001," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 69, no. 2, p. 304, 2007.
- [8] D. Fiaschi and M. Marsili, "Economic interactions and the distribution of wealth," *Econophysics and Economics of Games, Social Choices and Quantitative Techniques*, pp. 61–70, 2010.
- [9] V. Yakovenko and J. Rosser Jr, "Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income," *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, no. 4, p. 1703, 2009.
- [10] C. Tsallis, "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics," *Journal of statistical physics*, vol. 52, no. 1, pp. 479–487, 1988.
- [11] J. Bercher, "Tsallis distribution as a standard maximum entropy solution with 'tail' constraint," *Physics Letters A*, vol. 372, no. 35, pp. 5657–5659, 2008.
- [12] S. Fiske and H. Markus, *Facing social class: How societal rank influences interaction*. Russell Sage Foundation Publications, 2012.
- [13] S. Galam, *Sociophysics: A Physicist's Modeling of Psycho-political Phenomena*. Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [14] E. Majorana, "Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali, *Scientia*, Quarta serie, Febbraio-Marzo 1942 pp. 58. english translation in Ettore Majorana, the value of statistical laws in physics and social sciences," *Quantitative Finance*, vol. 5, p. 133, 2005.

- [15] J. P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, G. Szabó, D. Lazer, K. Kaski, J. Kertész, and A. L. Barabási, "Structure and tie strengths in mobile communication networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. 18, pp. 7332–7336, 2007.
- [16] C. Sagan, R. Carbo, and M. Torres, *Comunicación con inteligencias extraterrestres*. Grupo Editorial Planeta, Barcelona, 1990.
- [17] E. Bonabeau, G. Theraulaz, and J. Deneubourg, "Mathematical model of self-organizing hierarchies in animal societies," *Bulletin of mathematical biology*, vol. 58, no. 4, pp. 661–717, 1996.
- [18] L. Lacasa and B. Luque, "Bonabeau hierarchy models revisited," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 366, pp. 472–484, 2006.
- [19] G. Naumis, M. del Castillo-Mussot, L. Pérez, and G. Vázquez, "Phase transition and diffusivity in social hierarchies with attractive sites," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 369, no. 2, pp. 789–798, 2006.
- [20] R. Axelrod, *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton University Press, 1997.
- [21] R. Florian and S. Galam, "Optimizing conflicts in the formation of strategic alliances," *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 189–194, 2000.
- [22] G. Naumis, F. Samaniego-Steta, M. del Castillo-Mussot, and G. Vazquez, "Three-body interactions in sociophysics and their role in coalition forming," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 379, no. 1, pp. 226–234, 2007.
- [23] G. Pie, F. Bello, P. Morrison, and J. Winovsky, *La energía: Colección Scientific American*. Alianza Editorial, Madrid, 1975.
- [24] C. Tortajada, "Water management in Mexico City metropolitan area," *Water Resources Development*, vol. 22, no. 2, pp. 353–376, 2006.
- [25] M. T. Klare, *Planeta sediento, recursos menguantes: La nueva geopolítica de la energía*. Tendencias Editores, 2008.
- [26] A. Delsemme, *Les origines cosmiques de la vie*. Flammarion, Paris, 1995.
- [27] K. Michaelian, "Thermodynamic function of life," *arXiv:0907.0040*, 2009. [Online]: <http://arxiv.org/abs/0907.0040>