

Geometría de los sistemas vivos y su importancia en Medicina

Mauricio Canals L¹, Rigoberto Solís².

Geometry of living systems and its importance in Medicine

We analyze the most relevant concepts about complexity of sciences, showing examples and consequences in medical sciences. In the first section we introduce some basic concepts about fractals and its relationship with the geometry of nature and chaos dynamics. We also introduce notions of critic systems, the role of energy in them and we propose a conceptual model for living systems. In this model we identify the non-linear dynamics as the dynamics of the living forms and fractals as the form resulting from that dynamics. In the second section we review medical and biological examples: infectious diseases, cardiovascular and behavior dynamics, from which useful concepts and medical hypotheses emerge. One of the most important concepts, is the proposition that homeostasis would have an irregular dynamic. Then, we could expect that healthy individuals should be characterized by irregular dynamics, but old or sick individuals would change, probably decreasing the complexity of its dynamics. Therefore, we ask ourselves if the use of therapies to obtain a constant internal medium can be a mistake (Rev Méd Chile 2005; 133: 1097-107).

(Key Words: Chaos theory; Fractals; Nonlinear dynamics)

Recibido el 23 de diciembre, 2004. Aceptado el 7 de abril, 2005.

¹Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. ²Departamento de Ciencias Biológicas Animales, Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias, Universidad de Chile.

Recientemente se ha incorporado a la biología un gran cuerpo de conocimientos teóricos provenientes de las matemáticas y la física¹ permeando los cimientos de la biología y de la medicina. Conceptos como complejidad, caos dinámico, fractales, sistemas disipativos y autoorganización, ya no son ajenos a estas disciplinas²⁻⁶.

El objetivo de este artículo es analizar los conceptos más relevantes que emergen de las

ciencias de la complejidad, mostrando ejemplos y derivando consecuencias que podrían ser de utilidad conceptual y práctica en medicina.

FRACTALES: LA GEOMETRÍA DE LA NATURALEZA

La geometría nació en Grecia como un intento para comprender la naturaleza a través de la idealización de las formas. Sin embargo, en la naturaleza es muy difícil encontrar estas figuras geométricas ideales.

Mandelbrot⁷ (1975) creó el concepto de fractal para objetos de morfología irregular, plegados

Correspondencia a: Mauricio Canals L. Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. Casilla 653, Santiago, Chile. E mail: mcanals@uchile.cl

sobre sí mismos o ramificados. Inicialmente restringidos a objetos abstractos, posteriormente el mismo Mandelbrot (1982) extendió el concepto a las formas de la naturaleza.

Si tomamos en la mano una hoja de papel, ésta representa un plano, cuya dimensión es $D = 2$. Si ahora, arrugamos fuertemente esta hoja hasta formar una pelota de papel: ¿Qué dimensión tiene ahora, 2 ó 3? Este objeto, aun ocupando un espacio de dimensión 3, sigue siendo un plano de dimensión 2. Esta es una de las propiedades de los objetos fractales: la capacidad de «vencer» su propia dimensión, mediante convolución o fraccionamiento, ocupando un espacio de dimensión superior. Para caracterizar este hecho se utiliza el concepto matemático de dimensión fractal:

$$D_F = \frac{\text{Ln}(N(\epsilon))}{\text{Ln}(l/\epsilon)}$$

donde Ln representa al logaritmo natural, $N(\epsilon)$ el número de elementos de longitud ϵ en que se puede dividir el objeto. En el caso de los objetos fractales esta dimensión es no entera (Figura 1).

Una segunda característica de los objetos fractales es la propiedad de la autosimilitud, caracterizada por la presencia de «simetrías» invariantes bajo contracción o expansión (invarianza bajo escala). Cada parte debería ser una reducción geométrica de la totalidad con la misma escala en todas las direcciones⁸, sin embargo, hoy día el concepto se ha extendido en sentido amplio a mayor número de escalas.

Existen muchos ejemplos de morfología fractal en la naturaleza: las neuronas, el tubo digestivo y sus pliegues, la superficie alveolar, el árbol bronquial, la vascularización, los árboles, las costas etc⁹. Sin embargo, las formas naturales difieren de los fractales matemáticos en que son estructuras finitas, donde la autosimilitud no puede mantenerse hasta el infinito. Así, en general, las estructuras terminales no son similares a la totalidad. Ni las hojas se parecen al árbol ni los alvéolos a la vía aérea (Figura 2).

DINÁMICAS NO LINEALES,
CAOS Y SU RELACIÓN CON LOS FRACTALES

La palabra caos habitualmente se asocia a desorden. Sin embargo, en términos matemáticos y físicos el caos determinístico corresponde a la

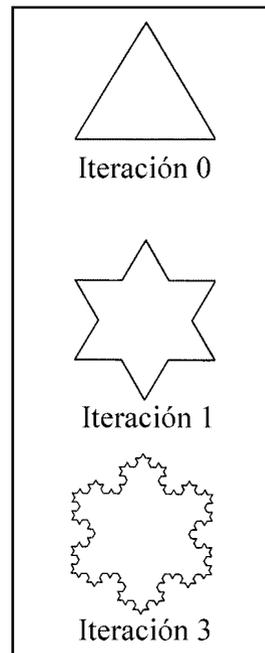


Figura 1. Primeros pasos en la construcción del fractal conocido como «isla de Koch». Se inicia con un triángulo equilátero y después cada segmento recto se reemplaza por $N(\epsilon) = 4$ segmentos de $\epsilon = 1/3$ de la longitud inicial, dispuestos como en la Figura. Entonces su dimensión es:

$$D_F = \frac{\text{Ln}(4)}{\text{Ln}(1/(1/3))} = \frac{\text{Ln}(4)}{\text{Ln}(3)} = 1.26$$

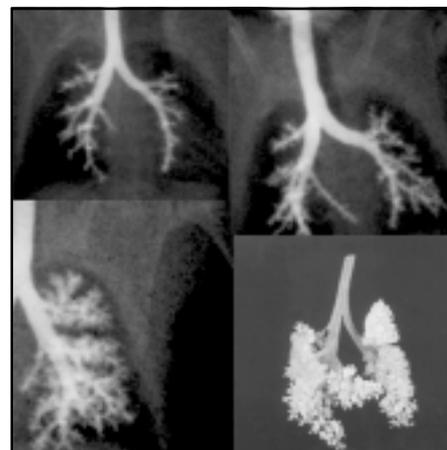


Figura 2. Geometría fractal del árbol bronquial. Radiografías seriadas del árbol bronquial de un mamífero. En la esquina derecha, abajo, molde acrílico de la vía aérea completa de un pequeño roedor.

irregularidad impredecible de las trayectorias temporales de un cierto sistema. Su origen se encuentra en sistemas que, aunque pueden ser muy simples, son no-lineales y muy sensibles a las condiciones iniciales¹⁰.

Los sistemas lineales son sistemas del tipo $X' = F(X,t)$, donde X' representa la variación instantánea (derivada) de una variable, X es la variable, t el tiempo y $F(X,t)$ es una función lineal, pareciéndose a la ecuación de una recta. Los sistemas lineales son siempre predecibles (Figura 3). Su conducta se puede graficar en el llamado espacio de fases, que corresponde a una representación de la variación en el tiempo de las coordenadas (x,y) de la variable X ¹¹.

En los sistemas no-lineales la función $F(X,t)$ no es lineal. En éstos, los ejes coordenados (o

variedades) que los definen son curvas que pueden entrecruzarse generando nuevos puntos¹². Así, podemos visualizar el espacio de fases de un sistema no lineal como un campo «minado» por un conjunto de puntos y líneas que condicionan las trayectorias del sistema. En estos sistemas, las trayectorias son dependientes de la cercanía con este entramado de puntos y líneas, pudiendo ocurrir que dos puntos que inician su trayectoria muy cerca uno del otro, se encuentren en posiciones muy alejadas después de un pequeño intervalo de tiempo. Esto es lo que se conoce como sensibilidad a las condiciones iniciales. Por ejemplo, si el sistema que regula la incidencia de meningitis fuera así, podríamos partir hoy con 2 casos en Maipú y 3 en Pudahuel (dos valores muy cercanos), y tener después de una semana 1 caso

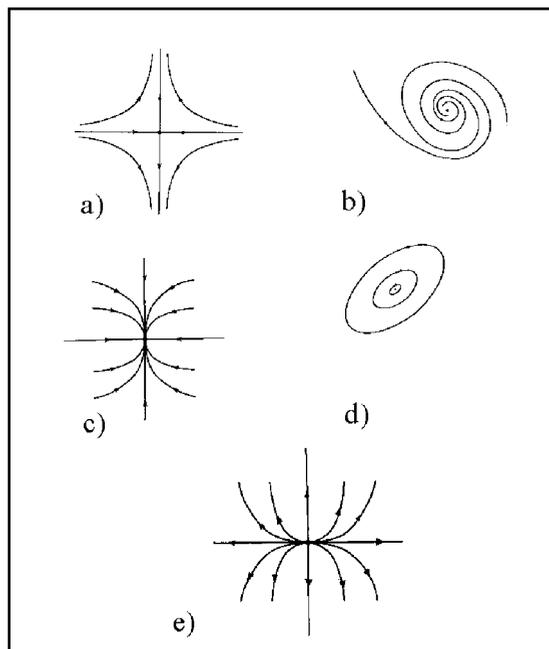


Figura 3. Algunos atractores para un sistema dinámico lineal homogéneo. En un sistema lineal de una variable de dos coordenadas ($X = (x,y)$) son sólo posible algunos tipos de conductas, que se pueden graficar en el llamado espacio de fases que corresponde a una representación de la variación en el tiempo de las coordenadas (x,y) de la variable X , centrado en un punto singular. El punto central corresponde a éste, y los ejes (o variedades) corresponden a las coordenadas. En a) se representa un punto de silla, esencialmente inestable donde un eje es convergente (variedad estable) y el otro es divergente (variedad inestable); b) corresponde a un sumidero espiral que se puede asociar a oscilaciones amortiguadas de un sistema; c) corresponde a un nodo, donde las trayectorias convergen a un punto fijo; d) corresponde a centros que se asocian a oscilaciones no amortiguadas y e) representa una fuente, donde todas las trayectorias se alejan del punto de interés.

en Maipú y 45 en Pudahuel (dos valores muy diferentes). En los sistemas caóticos, la dinámica es impredecible e irregular y sin embargo, es determinística, o sea se encuentra perfectamente determinada en la función que la define. Esto es lo que debemos entender por caos.

El caos puede aparecer en sistemas muy simples desde la perspectiva de los componentes. May¹⁰ (1976) mostró que sistemas con sólo dos componentes, pueden tener dinámicas muy complejas, estableciendo claramente la diferencia entre complejidad estructural (componentes) y complejidad dinámica (caos).

A pesar de la irregularidad o inestabilidad instantánea o puntual de las trayectorias, éstas convergen hacia una figura o conjunto límite en el espacio de fases que se denomina atractor. En el caso de los sistemas caóticos, por su especial morfología convolucionada se conocen como atractores extraños¹³⁻¹⁴. Este, a pesar de contener trayectorias inestables en todos sus puntos, como conjunto límite puede permanecer con la misma

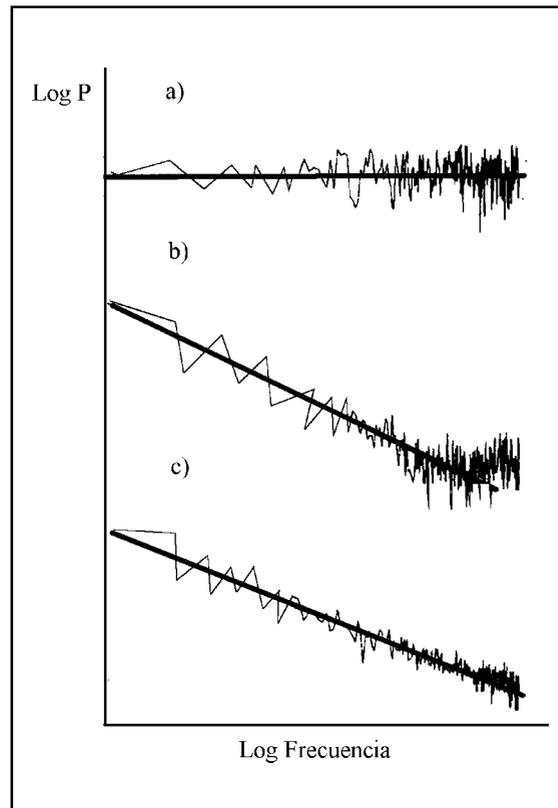
forma a lo largo del tiempo. Es decir puede ser estructuralmente estable (o robusto). Refinamientos posteriores del estudio de la dinámica en general, han permitido reconocer algunos patrones en las trayectorias (Figura 4).

La no-linealidad es la norma en los sistemas y seres vivos y las dinámicas caóticas son habituales a nivel de la fisiología⁵, de la epidemiología¹⁵⁻¹⁷ y la conducta¹⁸.

SISTEMAS CRÍTICOS Y EL ROL DE LA ENERGÍA

Las estructuras pueden encontrarse en equilibrio o en no equilibrio. Estas últimas estructuras son denominadas disipativas pues sólo existen mientras disipan energía, permaneciendo en intercambio con el mundo exterior¹⁹. Entonces son sistemas termodinámicamente abiertos, cuyas reacciones son irreversibles (en sentido termodinámico), caracterizados por una mínima producción de entropía¹⁹. Un ejemplo lo constituye la inestabilidad de

Figura 4. Representación Log-Log del espectro de potencias de una serie temporal (Log frecuencia vs Log Potencia (LogP) o intensidad). En a) una serie completamente azarosa o «ruido blanco» donde intervienen infinitas frecuencias, que en el espectro (con escala logarítmica) aparece con una tendencia lineal de pendiente $\beta = 0$; en b) una dinámica 1/f o «flicker» caracterizada por un exponente espectral $\beta = -1$ es considerada la «huella digital» de la complejidad, encontrándose en un sinnúmero de procesos naturales y en c) un movimiento browniano («random walk»), donde predominan las frecuencias bajas, caracterizado por un exponente espectral $\beta = -2$. (Modificado de Gisiger 2000).



Bénard. Al crear y aumentar un diferencial de temperatura entre dos placas en un fluido las moléculas de éste se «desordenan» adquiriendo gran energía, alejándose del equilibrio. Sin embargo, al alcanzar un cierto umbral, aparecen remolinos en los que se suceden millones de partículas, formando una estructura parecida a un remolino (celdas de Bénard). Así este sistema, un sistema crítico, tiene una transición de fase, dando origen a un nuevo sistema.

Los sistemas cerca de una transición de fase se denominan sistemas críticos. En esta etapa no exhiben ninguna escala característica (invarianza de escala) y espontáneamente se organizan en fractales¹. Cuando esto ocurre, es posible caracterizarlos a través de funciones potenciales o leyes de potencia ($y = aX^b$), pues estas funciones reflejan esta invarianza. Esto se comprende fácilmente cuando en la función reemplazamos X por una nueva variable X' tal que $X = \alpha X'$ (cambiamos la escala) y observamos que el exponente no cambia, es decir independiente de la escala de observación se conserva la morfología de la función. Los exponentes de tales funciones son denominados exponentes críticos. Estos últimos, experimentalmente han demostrado ser pocos, definiendo un conjunto limitado de conductas en sistemas complejos, especificando conjuntos o clases universales¹. Algunos ejemplos de criticalidad de sistemas son la transición de fase en materiales ferromagnéticos y la percolación.

EL MODELO DE LOS «SISTEMAS VIVOS»:
PREMISAS BÁSICAS Y PREDICCIONES

Utilizando una definición meramente operativa se puede llamar sistema vivo a cualquier sistema que incluya vida en cualquier nivel de organización, pasando por los niveles molecular, celular, de órganos, sistemas de órganos, individual, poblacional, comunitario, ecosistemas, etc. Tienen una frontera con la que establecen el intercambio de energía con el medio, estructura (componentes) y organización (relación entre sus componentes)²⁰. Tienen además dos aspectos dinámicos: un origen y desarrollo (ontogenia) y una conducta o comportamiento.

Se puede ver que cualquier sistema vivo, incluyendo los seres vivos, es un sistema termodi-

námicamente abierto, alejado del equilibrio. Es por tanto un sistema disipativo autónomo que mantiene su estructura y organización mediante el intercambio de energía con el medio, con mínima producción de entropía. A pesar del transcurso del tiempo y los cambios en estructura, podemos reconocerlos como tales independientemente de las pequeñas perturbaciones externas, mientras permanezcan termodinámicamente abiertos. Es decir, se pueden considerar como sistemas robustos o estructuralmente estables²¹.

Estos sistemas son generados durante el desarrollo (ie embriogénesis) por sistemas dinámicos en que la interacción entre los componentes es esencialmente no lineal y además la conducta que realizan es del mismo tipo. Así por ejemplo, en el desarrollo de un órgano intervienen gran cantidad de factores que interactúan en forma no lineal para producir la forma final de éste. Además la función de este órgano depende de otros múltiples factores interactuando no linealmente entre ellos.

Si los sistemas vivos son sistemas críticos, entonces se deberían encontrar formas fractales e invarianza de escala caracterizada por leyes de potencia en cada nivel de organización. Además se deberían encontrar dinámicas no lineales en la ontogenia y en la conducta, función o evolución de estos sistemas. En este sentido, la dinámica no-lineal compleja (incluyendo el caos) caracterizaría la dinámica de las formas y, la geometría fractal caracterizaría la forma de las dinámicas (Figura 5).

EJEMPLOS EN CIENCIAS BIOLÓGICAS Y MEDICINA

a) La forma de las dinámicas: fractales y energía. Sernetz et al²² (1985) caracterizaron a los organismos vivos como híbridos área-volumen y los consideraron como biorreactores, sistemas de catálisis enzimática heterogénea gobernados por reacción y transporte de masa, esencialmente turbulentos. Además lograron relacionar estas características con la geometría fractal (equivalente estructural de la turbulencia) de los sistemas de transporte de los organismos, determinando que la reducción del metabolismo masa específico con la masa es la consecuencia fisiológica de estos hechos. Del mismo modo, West et al²³ (1997), considerando que la vida se sostiene por el

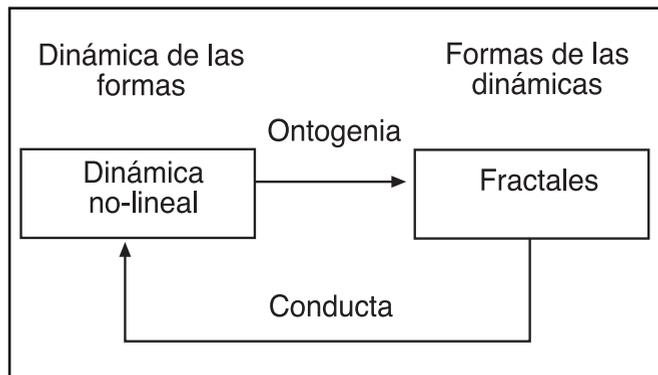


Figura 5. Representación conceptual de un sistema vivo. Tiene un aspecto dinámico caracterizado por la no-linealidad y una forma característicamente irregular cuasi-fractal. El sistema en sí mismo es originado por una dinámica no-lineal que conocemos como evolución, desarrollo, sucesión u ontogenia, según sea el nivel de organización del que se trate, y además se comporta como un sistema no lineal. Este comportamiento lo conocemos como la conducta del sistema y cuando lo insertamos en un nivel de organización superior, a esta conducta le damos el sentido y el nombre de la función o rol de dicho sistema.

transporte de materiales a través de ramificaciones fractales que distribuyen materiales con mínima pérdida de energía, propusieron un modelo que permite predecir el exponente alométrico de Kleiber (1961), $b = 3/4$ para la relación entre metabolismo y masa. Con una generalización de este modelo es posible predecir los exponentes alométricos de gran cantidad de funciones cardio-

vasculares y respiratorias (Tabla 1). En este trabajo y un modelo posterior para las plantas, West et al²⁴⁻²⁶ (1999) establecieron una clara relación entre la estructura fractal, la optimización de la obtención y uso de la energía y la alometría.

La superficie digestiva corresponde a un sistema tubular plegado sobre sí mismo, que en su lumen alberga una superficie epitelial repleta de

Tabla 1. Relación entre los valores observados y esperados para el exponente alométrico de un conjunto de funciones fisiológicas. Los valores esperados provienen de un modelo que parte de las premisas: i) la geometría de los sistemas de conducción es fractal, ii) el tamaño del elemento terminal del sistema es un invariante e iii) la pérdida de energía es mínima (West et al, 1997)

Función	Exponente esperado	Exponente observado
Metabolismo	0,75	0,75
Frecuencia cardíaca	-0,25	-0,25
Gasto cardíaco	0,75	0,74
P ₅₀ afinidad por O ₂	0,083	-0,089
Resistencia cardiovascular	-0,75	-0,76
Presión interpleural	0,00	0,004
Flujo pulmonar	0,75	0,8
Area respiratoria	0,92	0,95
Capacidad de difusión de O ₂	1,00	0,99

pliegues que, a su vez, presenta vellosidades y microvellosidades. Esta ha sido reconocida como de naturaleza fractal²⁷ y es otro ejemplo de optimización de diseño, evidenciada por el ajuste del tamaño de las cámaras gástrica y cecal en rumiantes y equinos con una máxima absorción de energía^{28,29} y también por el ajuste entre las tasas de flujo de digestión, digestión enzimática y absorción de nutrientes en el intestino delgado³⁰.

Otros ejemplos de fractales son las redes vasculares^{31,32} y la vía respiratoria³³⁻³⁵. Ellos además son ejemplos de optimización caracterizada por una mínima resistencia hidrodinámica y mínima producción de entropía³⁶. También la superficie alveolar ha sido descrita como un fractal de dimensión 2.1³⁷⁻⁴⁰ que presenta avanzados aspectos de optimización a nivel de la barrera alveolo-capilar³⁶.

Así, la superficie interna de la vía respiratoria y del tubo digestivo obedecería a un principio general de optimización, que conduce a una morfología fractal. Ambas superficies necesitan maximizar la adquisición de energía y materiales y ambas se despliegan en volúmenes restringidos.

La dinámica de las formas (caos, dinámica no lineal y ruido 1/f) y el nacimiento de una hipótesis.

Dinámica de enfermedades infecciosas (nivel de comunidades biológicas). La dinámica de enfermedades infecciosas es la resultante de la interacción entre las fluctuaciones estacionales de la transmisibilidad y las fluctuaciones no-lineales entre los casos susceptibles. Aunque existen muchas causas exógenas que pueden introducir variabilidad en la dinámica, el sistema agente-hospedero es en sí no-lineal y capaz de tener dinámicas caóticas. Por ejemplo, en la dinámica del sarampión, de la parotiditis y de la rubéola en Dinamarca, se ha reportado caos de baja dimensión¹⁵, al igual que para el sarampión en Nueva York y Baltimore¹⁶. En Chile, se han reportado dinámicas caóticas en las series de casos de meningitis meningocócica, sarampión, escarlatina, tifoidea, poliomiélitis y difteria¹⁷. En el estudio de Canals y Labra¹⁷ (1999) se detectó además una gran similitud en la geometría de los atractores de estas enfermedades, lo que apoya una estabilidad estructural de la dinámica.

Dinámica cardiovascular (nivel de sistemas de órganos). Goldberger, en la década de 1980-89,

observó que el patrón dinámico normal de la frecuencia cardíaca presentaba una irregularidad característica, que contravenía en cierta medida el concepto de homeostasis. Además, demostró que en sujetos normales, la dinámica tiene características caóticas, y sorprendentemente en sujetos patológicos, la dinámica se vuelve menos compleja, más lineal, regular y predecible, apareciendo ciclos y puntos fijos. En otras palabras, en primer lugar habría que entender la homeostasis como una homeostasis irregular (o caótica) y en segundo lugar, la irregularidad caracterizaría la normalidad, siendo la regularidad y los ciclos, lo patológico. Esta proposición que la homeostasis fisiológica es esencialmente irregular y no una «constancia» del medio interno, permite preguntarse si el uso de terapias cíclicas o lineales en algunas patologías, buscando esta constancia del medio interno o de la conducta, por ejemplo en psiquiatría, podría ser equivocado.

Posteriormente, Yamamoto y Hughson⁴¹ (1995) mostraron que la frecuencia cardíaca tiene ruido 1/f y es insensible a bloqueo β -adrenérgico y Butler et al⁴² (1993) reportaron una pérdida en la complejidad de la dinámica de la frecuencia cardíaca en pacientes sometidos a presión negativa y a cambios ortostáticos, indicando que reducciones en la complejidad podrían no ser compatibles con la homeostasis cardiovascular. Goldberger et al⁵ (2002), utilizando análisis espectral y dos métodos complementarios, refuerzan que la dinámica de la frecuencia cardíaca, fluctúa de una manera compleja en los sujetos normales, con sistemas reguladores no-lineales lejos del equilibrio y que esta irregularidad disminuye con las patologías y el avance de la edad.

Desde una perspectiva práctica, estos hallazgos permiten ver que es posible caracterizar la complejidad de cualquier serie analítica, como frecuencia cardíaca, glicemia, respiratoria, hematocrito, proteína C reactiva etc, mediante análisis espectral, específicamente mediante la pendiente de decaimiento de la potencia espectral en el gráfico logarítmico (β) y que sería potencialmente posible monitorear series de parámetros de laboratorio o conductuales para detectar caídas de complejidad que sugieran patologías, lo que podría ser muy útil en pacientes siquiátricos o en UCI.

Dinámica del comportamiento (nivel individual). La dimensión fractal de secuencias locomotoras

toras en cabras estresadas (parasitadas y preñadas), es menor que la observada en animales normales⁴³. Un resultado similar mostraron chimpancés mediante análisis de fluctuaciones de las conductas sociales y no sociales⁴⁴. En cambio, al someter gallinas a condiciones agudas de estrés moderado, se produce un incremento en la complejidad del repertorio conductual^{18,45}, pudiendo diferenciar entre estrés agudo y crónico.

En la mosca *Drosophila melanogaster* episodios de aparente actividad continua contienen episodios más cortos de inactividad, que aparecen similares independientemente de la escala de medida⁴⁶. Es decir, la contribución general de episodios de actividad e inactividad tiene una estructura fractal. La complejidad del patrón de actividad locomotora en las moscas más viejas es más regular que en las moscas jóvenes⁴⁷⁻⁴⁹.

Otro aspecto develado a través del análisis de la actividad locomotora en el pez *Carassius auratus*, es su especificidad e individualidad. Así, existe una probabilidad menor que 1% de que dos trayectorias generadas por diferentes peces sean equivalentes⁵⁰.

Se ha propuesto que la actividad locomotora puede representar un biomarcador relevante para estudiar varios modelos de enfermedades, tales como: adicción, Parkinson, Alzheimer, Huntington y diabetes⁵¹. En este contexto, recientemente se ha desarrollado un sistema portátil para analizar la complejidad (dimensión fractal) durante el caminar de pacientes con enfermedad de Parkinson⁵². Los pacientes con enfermedad de Parkinson presentaron una dimensión fractal alrededor de 1,48, en tanto que los sujetos ancianos sanos, un valor alrededor de 1,3. Este resultado provee un medio cuantitativo para medir la severidad de los síntomas al caminar estimados a través de dimensión fractal⁵³.

Se ha desarrollado un marco teórico para explicar las diferentes rutas que pueden conducir a una red neuronal a cambiar su modo de actividad normal a uno de crisis/ataque epiléptica⁵⁴⁻⁵⁷. Ha sido posible detectar un estado «precrisis/ataque» epiléptico de varios minutos, que anticipa el comienzo electroclínico de una crisis/ataque, abriendo nuevas perspectivas para el estudio de los mecanismos básicos en epilepsia como también para posibles intervenciones terapéuticas.

En pacientes esquizofrénicos, se ha podido determinar que durante el sueño REM, la dinámica es menos predecible comparados con sujetos control⁵⁸⁻⁶⁰. En base a un modelo de conducta animal propuesto por Shimada et al⁶¹, se realizó un análisis temporal de los movimientos oculares de pacientes esquizofrénicos. El tiempo de fijación ocular durante la lectura mostró una clara distribución que sigue una ley de potencia, en tanto que, los controles normales mostraron una distribución de naturaleza no fractal⁶². La expresión formal del modelo plantea que $\Phi(T) = T^{-\frac{\beta_0}{\beta}}$, donde β_0 es un parámetro de procesamiento de información desde el ambiente al estado interno y β su equivalente desde el estado interno a la conducta (Figura 6). Dado que en este estudio β_0 fue el mismo para los pacientes normales y esquizofrénicos, el valor de β de los pacientes normales debe ser mucho menor que el observado en los sujetos esquizofrénicos, sugiriendo un sobreflujo de transferencia

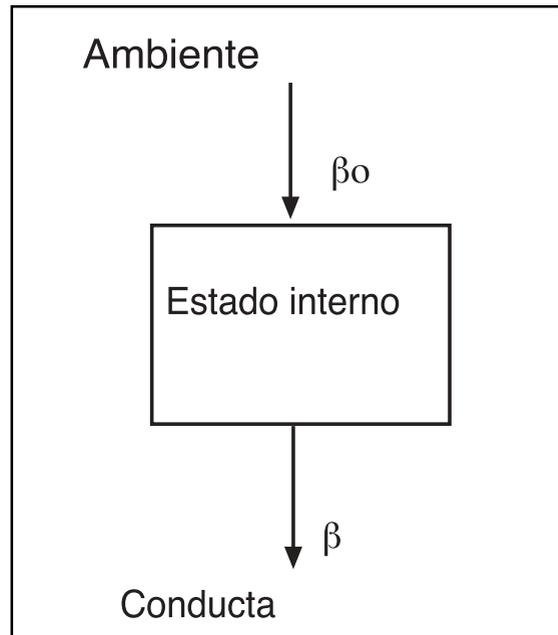


Figura 6. Modelo de conducta animal propuesto por Shimada et al (1993), aplicado por Yokoyama et al (1996) al análisis temporal de los movimientos oculares de pacientes esquizofrénicos y sujetos normales. (Modificado de Yokoyama et al (1996)).

informativa desde el estado interno en estos últimos, pero no un defecto de transferencia (Yokoyama et al, 1996).

b) Criticalidad y universalidad. Subyacente a la diversidad de los sistemas vivos y la complejidad de su conducta, origen o función, es posible encontrar un orden o geometría que refleja la operación de procesos físicos o biológicos fundamentales. La universalidad de las leyes de potencia y la universalidad de las características dinámicas parecen revelar un principio aún no comprendido, común a todo sistema vivo. Por ejemplo, las leyes de potencia que develan la ausencia de una escala característica, son comunes en la fisiología y la ecología. En particular, como hemos mencionado, las leyes de potencia $1/4$, cuyo exponente es múltiplo de 0,25, son habituales a nivel de la fisiología^{23,63} y en la ecología⁴. Además, en las dinámicas de un gran número de procesos biológicos es posible detectar las dinámicas complejas, evidenciadas por un ruido $1/f$ en el análisis espectral. Por ejemplo,

entre otras, en las necesidades de insulina en diabéticos⁶⁴, la frecuencia cardiaca en sujetos normales^{27,65}, el brote de semillas⁶⁶, conducta en ratas⁶⁷, dinámica de poblaciones de insectos y parasitoides⁶⁸, extinciones de especies⁶⁹, fluctuaciones de modulación en emisiones de radio tan disímiles como una conversación y un concierto clásico⁷⁰ y reproducción de intervalos espaciales en el aprendizaje⁷¹.

Uno de los ejemplos clásicos de universalidad y criticalidad de sistemas es la percolación⁷². Este fenómeno se encuentra habitualmente en biología en la propagación de epidemias (geometría del contagio) y en la propagación de incendios forestales⁷². Otras evidencias de sistemas críticos en biología se encuentran en los cambios de fase en la conducta de forrajeo en hormigas⁷³, en la diversidad de paisajes boscosos⁷⁴, dinámica metapoblacional⁷⁵, epidemias en poblaciones de insectos⁷⁶, distribución de espacios abiertos en bosques⁷⁷ y la extinción de especies de aves en las islas hawaianas⁷⁸.

REFERENCIAS

1. GISIGER T. Scale invariante in biology: coincidence or footprint of a universal mechanism? *Biol Rev* 2001; 76: 161-209.
2. SOLE RV, MANRUBIA SC, LUQUE B, DELGADO J, BASCOMPTÉ J. Phase transitions and complex systems. *Complexity* 1996; 4: 13-4.
3. MILNE BT. Spatial aggregation and neutral models in fractal landscapes. *Amer Natur* 1992; 139: 32-57.
4. MARQUET P. Invariants, scaling laws and ecological complexity. *Science* 2000; 295: 2229-30.
5. GOLDBERGER AL, AMARAL LAN, HAUSSDORF JM, IVANOV PCH, PENG CK, STANLEY HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *PNAS* 2002; 99: 2466-72.
6. IVANOV PCH, ROSENBLUM MG, PENG CK, MIETUS J, HAWLIN S, STANLEY HE ET AL. Scaling behavior of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time series analysis. *Nature* 1996; 383: 323-7.
7. MANDELBROT BB. *Les objets fractals: forme, hazard et dimension*. 1975. Flammarion. Paris.
8. MANDELBROT BB. Fractal geometry: what is it, and what does it do? En: *Fractals in the natural sciences* (Fleishmann M, Tildesley DJ, Ball RC., eds) 1990. Princeton University Press, Princeton.
9. PEITGEN HO, JURGENS H, SAUPE D. *Fractals for the classroom. Part one. Introduction to fractals and chaos*. 1992. Springer Verlag, New York.
10. MAY R. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature* 1976; 261: 459-67.
11. HIRSCH MW, SMALE S. *Ecuaciones diferenciales, sistemas dinámicos y álgebra lineal*. 1983. Alianza Editorial, Madrid.
- 12.- SIMO C. Cómo entender el caos determinista. *La Recherche* 1991; 115: 698-708.
13. HENTSCHEL HGE, PROCACCIA I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica* 1983; 8D: 435-44.
14. CHABERT JL, DALMEDICO AD. Henri Poincare, el precursor. *La Recherche* 1991; 716-22.
15. OLSEN LF, TRUTY GL, SCHAFFER WM. Oscillations and chaos in epidemics: a non linear dynamic study of six childhood diseases in Copenhagen, Denmark. *Theor Pop Biol* 1988; 33: 344-70.
16. SCHAFFER WM, KOTT M. Nearly one dimensional

- dynamics in an epidemic. *J Theor Biol* 1985; 112: 403-27.
17. CANALS M, LABRA F. Análisis no-lineal de la dinámica de enfermedades infecciosas en Chile. *Rev Méd Chile* 1999; 127: 1086-92.
 18. MARIA GA, ESCOS J, ALADOS CL. Complexity of behavioural sequences and their relation to stress conditions in chickens (*Gallus gallus domesticus*): a non-invasive technique to evaluate animal welfare. *Appl An Behav Sci* 2004; 86: 93-104.
 19. PRIGOGINE I. *Las leyes del caos*. 1997. Crítica, Grijalbo, Barcelona.
 20. MATURANA HR, VARELA FG. *El árbol del conocimiento*. 1984. Editorial Universitaria, Santiago.
 21. THOM R. *Stabilité structurelle et morphogénèse*. 1977. Inter Editions, Paris.
 22. SERNETZ M, GELLIERI B, HOFMANN J. The organism as a bioreactor. Interpretation of the reduction law of the metabolism in terms of heterogeneous catalysis and fractal structure. *J Theor Biol* 1985; 117: 209-30.
 23. WEST GB, BROWN JH, ENQUIST BJ. A general model for the origin of allometrical scaling laws in biology. *Science* 1997; 276: 122-6.
 24. WEST GB, BROWN JH, ENQUIST BJ. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* 1999; 400: 664-7.
 25. MANDELBROT BB. *The fractal geometry of nature*. 1982. WH Freeman and Company, New York.
 26. BARNESLEY MF. *Fractals everywhere*. 1988. Academic Press, Boston.
 27. GOLDBERGER AL, RIGNEY DR, WEST BJ. Chaos and fractals in human physiology. *Scie Amer* 1990; 34-5.
 28. ALEXANDER RCM. A model of bipedal locomotion on compliant legs. *Phyl Trans Roy Acad Scie London* 1992; 333: 249-55.
 29. ALEXANDER RCM. The relative merits of foregut and hindgut fermentation. *J Zool* 1993; 231: 27-40.
 30. HUME ID. Optimization in design of digestive system. En: *Principles of animal design. The optimization and symmorphosis debate*. (Weibel ER, Taylor CR, Bolis L, eds): 212-219. Cambridge University Press, Cambridge.
 31. ZAMIR M. Optimality principles in arterial branching. *J Theor Biol* 1976; 62: 227-51.
 32. ZAMIR M, BIGELOW DC. Cost of departure from optimality in arterial branching. *J Theor Biol* 1984; 109: 401-9.
 33. NELSON TR, WEST BJ, GOLDBERGER AL. The fractal lung: universal and species-related scaling patterns. *Experientia* 1990; 46: 251-4.
 34. CANALS M, OLIVARES R, LABRA F, CAPUTO L, RIVERA A, NOVOA FF. Caracterización de la geometría fractal del árbol bronquial en pequeños mamíferos. *Rev Chile Anat* 1998; 16: 237-44.
 35. CANALS M, OLIVARES R, LABRA F, NOVOA FF. Ontogenetic changes in the fractal geometry of the bronchial tree in *Rattus norvegicus*. *Biol Res* 2000; 33: 31-5.
 36. WEIBEL ER. Symmorphosis and optimization of biological design: introduction and questions. En: *Principles of animal design. The optimization and symmorphosis debate*. (Weibel ER, Taylor CR, Bolis L, eds): 1-11. Cambridge University Press, Cambridge.
 37. RIGAUT JP. An empirical formulation relating boundary lengths to resolution in specimens showing non ideally fractal dimensions. *J Microscop* 1984; 133: 41-54.
 38. CANALS M, ATALA C, OLIVARES R, NOVOA FF, ROSENMAN M. La asimetría y el grado de optimización del árbol bronquial en *Rattus norvegicus* y *Oryctolagus cuniculus*. *Rev Chil Hist Nat* 2002; 75: 271-82.
 39. CANALS M, ATALA C, OLIVARES R, NOVOA FF, ROSENMAN M. Departures from the physical optimality in the bronchial tree of rats (*Rattus norvegicus*). *Biol Res* 2002; 35: 411-9.
 40. CANALS M, NOVOA FF, ROSENMAN M. A simple geometrical pattern for the branching distribution of the bronchial tree, useful to estimate optimality departures. *Acta Biotheor* 2004; 52: 1-16.
 41. YAMAMOTO Y, HUGHSON R. On the fractal nature of heart rate variability in humans: affects of data length and β -adrenergic blockade. *Amer J Physiol* 1994; 266: 40-9.
 42. BUTLER GC, YAMAMOTO Y, XING HC, NORTHEY DR, HUGHSON RL. Heart rate variability and fractal dimension during orthostatic challenges. *J Appl Physiol* 1993; 75: 2602-12.
 43. ALADOS CL, ESCÓS JM, EMLEN JM. Fractal structure of sequential behaviour patterns: an indicator of stress. *Anim Behav* 1996; 51: 437-43.
 44. ALADOS CL, HUFFMAN MA. Fractal long-range correlations in behavioural sequences of wild chimpanzees: a non-invasive analytical tool for the evaluation of health. *Ethology* 2000; 106: 105-16.
 45. RUTHERFORD MD, HASKELL MJ, GLASBEY C, JONES RB, LAWRENCE AB. Detrended fluctuation analysis of behavioural responses to mild acute stressors in domestic hens. *Appl An Behav Sci* 2003; 83: 125-39.
 46. COLE BJ. Fractal time in animal behavior: the movement activity of *Drosophila*. *Anim Behav* 1995; 50: 1317-24.

47. MARTIN JE, ERNTS R, HEISENBERG M. Temporal pattern of locomotor activity in *Drosophila melanogaster*. *J Comp Physiol A* 1999; 184: 73-84.
48. MARTIN JE. Locomotor activity: a complex behavioural trait to unravel. *Behav Proc* 2003; 64: 145-60.
49. MARTIN JE. A portrait of locomotor activity in *Drosophila* determined by a video-tracking paradigm. *Behav Proc* (in press).
50. NEUMEISTER H, CELLUCCI CJ, RAPP PE, KORN H, FABER DS. Dynamical analysis reveals individuality of locomotion in goldfish. *J Exp Biol* 2004; 207: 697-708.
51. MARTIN JE. Locomotor activity: a complex behavioural trait to unravel. *Behav Proc* 2003; 64: 145-60.
52. SEKINE M, AKAY M, TAMURA T, HIGASHI Y. Fractal dynamics of body motion in patients with Parkinson's disease. *J Neur Eng* 2004; 1: 8-15.
53. *Health & Medicine Week*. 2004. Febrero. 679.
54. WOYSHVILLE MJ, LACKAMP JM, EISENGART JA, GILLILAND JAM. On the meaning and measurement of affective instability: clues from chaos theory. *Biol Psychiatry* 1999; 45: 261-9.
55. SKAR P. Chaos and self-organization: emergent patterns at critical life transitions. *J Anal Psychol* 2004; 49: 243-62.
56. LOPES DA SILVA F, BLANES W, KALITZIN SN, PARRA J, SUFFCZYNSKI P, VELIS D. Epilepsies as dynamical disease of brain systems: basic models of the transition between normal and epileptic activity. *Epilepsia* 2003; 44: 72-83.
57. LE VAN QUYEN M, NAVARRO V, MARTINERIE J, BAULAC M, VARELA F. Toward a neurodynamical understanding of ictiogenesis. *Epilepsia* 2003; 44: 30-43.
58. RÖSCHKE J, FELL J, BECKMANN P. Nonlinear analysis of sleep EEG data in schizophrenia: calculation of the principal Lyapunov exponent. *Psych Res* 1995; 56: 257-69.
59. FITCH WT, NEUBAUER J, HERZEL H. Calls out chaos: the adaptive significance of nonlinear phenomena in mammalian vocal production. *Anim Behav* 2002; 63: 407-18.
60. SEIDMAN LJ, CASSENS G, KREMEN WS, PEPPE JR. The neuropsychology of schizophrenia. En White RF (eds). *Clinical syndromes in adult neuropsychology: the practitioner's handbook*. 1992. Elsevier, Amsterdam: 381-450.
61. SHIMADA I, KAWAZOE Y, HARA H. A temporal model of animal behavior based on a fractality in the feeding of *Drosophila melanogaster*. *Biol Cyber* 1991; 68: 477-81.
62. YOKOYAMA H, NIWA S, ITOH K, MAZUKA R. Fractal property of eyes movements in schizophrenia. *Biol Cyber* 1996; 75: 137-40.
63. BROWN JH, WEST GB, ENQUIST BJ. Scaling in biology: patterns and processes, causes and consequences. En *Scaling in Biology* (Brown JH, West GB eds). Oxford University Press, Oxford.
64. CAMPBELL MJ, JONES BW. Cyclic changes in insulin needs of an unstable diabetic. *Science* 1972; 177: 889-91.
65. PILGRAM B, KAPLAN DT. Nonstationarity and 1/f noise characteristics in heart rate. *Amer J Physiol* 1999; 45: R1-9.
66. COGGIN SJ, PAZUN JL. Dynamic complexity in *Physarum polycephalum* shuttle streaming. *Protoplasma* 1996; 194: 243-9.
67. KAFETZOPOULOS E, GOUSKOS S, EVANGELOU SN. 1/f noise and multifractal fluctuation in rat behavior. *Non linear analysis, theory, methods and applications* 1997; 30: 2007-13.
68. MIRAMONTES O, ROHANI P. Intrinsically generated coloured noise in laboratory insect populations. *Proc Roy Soc London* 1998; B265: 785-92.
69. SOLE RV, MANRUBIA SC, BENTON M, BAK P. Self-similarity of extinction statistics in the fossil record. *Nature* 1997; 388: 764-7.
70. VOSS RF, CLARKE J. 1/f noise in music and speech. *Nature* 1975; 258: 317-8.
71. GILDEN DL, THORTON T, MALLON MW. 1/f noise in human cognition. *Science* 1995; 267: 1837-9.
72. GRASSBERGER P. La percolación o la geometría del contagio. *La Recherche* 1991; 115: 764-72.
73. BEEKMAN M, SUMPTER DJT, RATNIEKS FLW. Phase transition between disordered and ordered foraging in Pharaoh's ants. *PNAS* 2001; 98: 9703-6.
74. SPROTT JC, BOLLIGER J, MLADENOFF DJ. Self organized critically in forest landscape evolution. *Phys letters A* 2002; 1-14.
75. HERNÁNDEZ-SUÁREZ CM, MARQUET PA, VELASCO-HERNÁNDEZ JX. Threshold parameters and metapopulation persistence. *Bull Math Biol* 1999; 60: 1-14.
76. LOCKWOOD DR, LOCKWOOD JA. Evidence of self-organized critically in insect populations. *Complexity* 1997; 2: 49-58.
77. MANRUBIA SC, SOLE RV. On forest spatial dynamics with gap formation. *J Theor Biol* 1997; 187: 159-64.
78. KEITH TH, MARQUET PA. Extinction cascades in introduced Hawaiian birds suggest self-organized critically. *J Theor Biol* 1996; 182: 161-7.