

Evaluación del comportamiento cardíaco mediante una metodología diagnóstica basada en sistemas dinámicos en 16 horas

Javier Rodríguez¹, Jaime Páez², Jairo Cortes³, Carlos Montenegro⁴, Mario Castro⁵, Fredys Simanca⁶, Catalina Correa⁷, Signed Esperanza Prieto Bohórquez⁷

Pren. Méd. Argent.
Septiembre 2018
Vol. 104 - N° 7
352-360

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de la teoría de sistemas dinámicos, se está haciendo referencia al estudio del estado y evolución de los sistemas, cuyas trayectorias pueden ser vistas gráficamente y evaluadas geométricamente en un espacio denominado espacio de fases. Existen tres tipos de atractores: puntual, cíclico y caótico. En el caso de los dos primeros se dice que son predecibles, mientras que el tercero es categorizado como impredecible¹. Sin embargo, cuando se centra la atención en los atractores caóticos, que son el objeto de interés, dado que permiten la evaluación de la dinámica cardíaca, se evidencia que por su irregularidad es menester calcular la dimensión fractal mediante el método de Box-Counting²⁻⁴.

Según datos de la Organización Panamericana de la Salud en el informe de 2011 de prioridades para la salud cardiovascular de las Américas, los adultos menores de 70 años están propensos a sufrir un evento cardiovascular en los 10 años subsiguientes⁵. En Colombia, la incidencia de las enfermedades isquémicas del corazón ha exhibido un comportamiento in crescendo, pasando de 51,66 muertes por cada 100.000 habitantes en 1998 a 63,59 por cada 100.000 en el año 2013. Adicionalmente, el Ministerio de Protección social de Colombia en el año 2011 reportó un incremento notable de enfermedades cardiovasculares, donde la mayor incidencia y cantidad de decesos fue debida a enfermedad isquémica cardíaca o infarto. El reporte anuncia que 29.000 personas fallecieron debido a esta causa, resultando un promedio de 80 personas muertas por día⁶.

Investigadores a nivel mundial e instituciones han destinado recursos valiosos con el fin de establecer medidas para enfrentar estas afecciones. En el marco de la teoría de sistemas dinámicos, se ha evidenciado que en el sistema cardiovascular prevalece un comportamiento no lineal⁷. En este sentido, Ritzenberg et al.⁸ demostraron la no linealidad en el electrocardiograma. Al analizar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) se encontró la no linealidad del ritmo cardíaco en pacientes con alto riesgo de muerte súbita cardíaca; además, se pudieron observar oscilaciones de baja frecuencia sostenidas y variaciones espectrales abruptas. Así mismo, se ha encontrado una relación entre la disminución de la complejidad de la variabilidad fisiológica y la reducción de la dinámica del RC, previa a la aparición de muerte súbita y envejecimiento⁹⁻¹¹. Igualmente, en estudios adelantados en la Unidad de cuidados intensivos, se hallaron predictores de mortalidad con base en medidas fractales en sujetos con disminución clara de la fracción de eyección que habían presentado infarto agudo de miocardio¹².

En la actualidad, se han adelantado trabajos desde la perspectiva de las teorías físicas y matemáticas con el objetivo de evaluar la dinámica cardíaca con base en la frecuencia cardíaca, que es registrada en trazados electrocardiográficos continuos y ambulatorios. Es así, que se han establecido metodologías diagnósticas de carácter predictivo, capaces de diferenciar estados de normalidad, enfermedad, y transiciones entre ambos¹³⁻¹⁸. Una de estas, consiste en una ley matemática exponencial que logra

¹ MD. Director del Grupo Insight. Centro de Investigaciones de la Clínica del Country. Cra. 79B N° 51-16 Sur. Int. 5. Apto. 102, Barrio Kennedy, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: grupoinight2025@yahoo.es.

² Ing. MSc. Director Grupo de Investigación NEOTIC. Facultad de Ingeniería. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombia.

³ Ing. MSc. Investigador Grupo de Investigación NEOTIC. Facultad de Ingeniería. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombia.

⁴ Ing. PhD. Investigador Grupo NEOTIC Facultad de Ingeniería. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombia.

⁵ Ing. PhD. Investigador Grupo NEOTIC Facultad de Ingeniería. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombia.

⁶ Ing. MSc. Investigador Grupo ANTA. Facultad de Educación. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá, Colombia.

⁷ Investigadora Grupo Insight. Centro de Investigaciones Clínica del Country, Bogotá D.C., Colombia.

evaluar el comportamiento de cualquier dinámica cardíaca caótica en registros de 21 horas, desarrollada y concebida desde la teoría de sistemas dinámicos y la geometría fractal¹³. Se logró observar geométricamente que a medida que las dinámicas cardíacas evolucionan de normalidad a enfermedad, los atractores correspondientes exhiben una disminución de su ocupación espacial en el espacio de Box-Counting¹⁴, aspecto que fue generalizado mediante el establecimiento de la ley matemática exponencial¹³.

En cuanto a sus aplicaciones clínicas, se han evaluado cambios en la dinámica cardíaca de pacientes con diagnóstico clínico de arritmia^{15,16}; particularmente, se ha comprobado su capacidad diagnóstica en este tipo de patologías con estudios con 40 y 70 registros ambulatorios, permitiendo poner de manifiesto de manera cuantitativa la tendencia al desarrollo de procesos agudos y detectar patologías subdiagnosticadas desde los parámetros médicos convencionales, que fueron evaluadas como en evolución por la metodología físico-matemática¹⁶.

El propósito de este trabajo es llevar a cabo una evaluación de la dinámica cardíaca mediante la ley matemática exponencial en 16 horas en aras de confirmar su utilidad clínica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Definiciones:

Mapa de retardo: Espacio de al menos dos dimensiones en el cual se representan geométricamente parejas ordenadas de una variable dinámica consecutiva en el tiempo

Dimensión Fractal de Box-Counting (D): La dimensión fractal de Box-Counting está dada por:

$$D = \frac{\log N(2^{-(k+1)}) - \log N(2^{-k})}{\log 2^{k+1} - \log 2^k} = \log_2 \frac{N(2^{-(k+1)})}{N(2^{-k})}$$

Ecuación 1

Donde D representa la dimensión fractal, N son los cuadros ocupados por el objeto y k corresponde al grado de partición de la cuadrícula.

Ecuación de Box-Counting simplificada: Se obtiene a partir de la Ecuación 1, dejándola en términos de dos rejillas que se superponen, obteniendo así:

$$D = \log_2 \left[\frac{K_p}{K_g} \right]$$

Ecuación 2

En donde es el número de cuadros que ocupa el objeto en la cuadrícula más pequeña y los correspondientes a la cuadrícula grande.

Ley exponencial de la dinámica cardíaca caótica: Al realizar un despeje algebraico de la Ecuación anterior, se obtiene la ley matemática exponencial:

$$\Rightarrow K_p = K_g 2^D \Rightarrow K_g = \frac{K_p}{2^D}$$

Ecuación 3

Siendo D la dimensión fractal.

Población

Se tomaron 200 registros electrocardiográficos continuos y Holters, 70 de ellos eran normales y 130 eran de pacientes con distintas patologías, según el diagnóstico médico establecido por parte de un cardiólogo experto de acuerdo con protocolos convencionales. Se tomaron sólo registros de pacientes de edades mayores a 21 años, con tiempos de evaluación de mínimo 21 horas. Dichos registros eran provenientes de bases de datos previas del grupo Insight.

Procedimiento

El diagnóstico clínico de los registros fue ocultado. Luego, se tomaron el total de latidos por hora, así como los valores máximos y mínimos de las frecuencias cardíacas durante 16 y 21 horas. Con base en esta información, se construyó una secuencia pseudoa-

leatoria de las frecuencias por medio de un algoritmo sin cargas probabilísticas. Con base en la secuencia de valores se seleccionaron las parejas ordenadas, tomando un valor junto con el siguiente, para con ellos construir el atractor caótico asociado a cada dinámica cardíaca en el mapa de retardo correspondiente. A continuación, se procedió a sobrepone dos rejillas y calcular la dimensión fractal del atractor mediante el método de Box-Counting (Ecuación 1). Fueron calculados los espacios ocupados por los atractores construidos en cada rejilla, es decir Kp (rejilla de cuadros pequeños) y Kg (rejilla de cuadros grandes).

Con base en lo anterior, se procedió a realizar el diagnóstico físico-matemático mediante la Ecuación 3 para cada registro, tomando como base la ley exponencial (Ver definiciones), de acuerdo con la cual la enfermedad aguda presenta espacios de ocupación en Kp menores a 73, la normalidad se caracteriza por presentar espacios de ocupación en Kp mayores a 200 y la evolución hacia la agudización se encuentra entre 73 y 200¹³. Se corroboró la concordancia entre el diagnóstico matemático en 21 y 16 horas.

Análisis estadístico

Se desenmascararon los diagnósticos clínicos, en aras de realizar una comparación entre el diagnóstico convencional categorizado como Gold Standard y la metodología físico-matemática en 16 horas, para lo cual se tomaron los casos normales y agudos, previa confirmación de la concordancia entre los diagnósticos establecidos en 21 y 16 horas. Fueron hallados los falsos positivos, falsos negativos, verdaderos positivos y verdaderos negativos, para posteriormente realizar el cálculo de la sensibilidad y especificidad.

Por último, se procedió a evaluar la correspondencia entre el diagnóstico convencional y el matemático por medio de la ecuación del coeficiente Kappa:

$$K = \frac{Co - Ca}{To - Ca}$$

En donde, Co representa el número de correspondencias, es decir los casos igualmente diagnosticados tanto por la metodología matemática como por los parámetros clínicos convencionales; To es el total de casos; Ca corresponde al número de concordancias que pueden atribuirse al azar y que se calculan a través de la siguiente ecuación:

$$Ca = [(f_1 \times C_1) / T_o] + [(f_2 \times C_2) / T_o]$$

Donde f_1 equivale al número de casos con valores matemáticos de normalidad; C_1 representa el número de casos diagnosticados como normales clínicamente; f_2 representa el número de casos evaluados como enfermos desde el diagnóstico matemático; C_2 representa el número de casos diagnosticados como patológicos desde el diagnóstico clínico y T_o representa el número total de casos.

Aspectos éticos

El presente estudio se declara como una investigación con riesgo mínimo, según la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud Colombiano, pues se realizan cálculos físicos y matemáticos sobre reportes de exámenes y paraclínicos no invasivos que han sido prescritos previamente según protocolos médicos convencionales, protegiendo el anonimato e integridad de los participantes. También cumple con los principios éticos consignados en la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial.

RESULTADOS

Algunos diagnósticos clínicos de los registros electrocardiográficos pueden ser observados en la Tabla 1. En los resultados de las dinámicas cardíacas evaluadas durante 21 horas, se encontró que las dimensiones fractales de los atracto-

res normales se encontraban entre 0,985 y 1,929, y entre 0,842 y 1,966 para los atractores asociados a dinámicas enfermas. Mientras tanto, las dimensiones fractales de los atractores normales de los registros de 16 horas estuvieron entre 0.961 y 1.929 y las de los atractores asociados a enfermedad entre 0.878 y 1.991. Con ello, fueron constatados hallazgos anteriores, según los cuales, la dimensión fractal no es un factor decisivo para realizar diagnósticos en 21 o 16 horas. Se evidenció concordancia entre los diagnósticos establecidos en 21 y 16 horas con la metodología matemática en la totalidad de los casos.

Los valores de K_p oscilaron entre 222 y 377 para dinámicas normales y entre 46 y 199 para anormales en las evaluaciones de 21 horas. Mientras que para 16 horas oscilaron entre 221 y 377 para dinámicas normales y entre 44 y 198 para anormales (Tabla 2).

En cuanto a la rejilla K_g , los valores de ocupación oscilaron entre 77 y 161 para las dinámicas normales, y entre 12 y 111 para las anormales, en registros de 21 horas. Por su parte, para los registros de 16 horas oscilaron entre 75 y 160 para dinámicas normales, y entre 14 y 110 para dinámicas anormales (Tabla 2).

Con lo anterior, se observó la capacidad de la ley matemática de diferenciar cuantitativamente las dinámicas cardíacas y de establecer diagnósticos matemáticos en registros de 16 horas, tal como fue evidenciado previamente en un lapso de 21 horas¹³; aspecto que fue corroborado en el análisis estadístico, donde se encontraron valores de sensibilidad y especificidad del 100% y un coeficiente Kappa con un valor de uno.

En la figura 1, 2 y 3 se observan los atractores de una dinámica normal, en evolución hacia la agudización y aguda, respectivamente, en donde es posible evidenciar el decrecimiento del atractor mientras hay un deterioro del estado cardíaco, confirmando así los resultados obtenidos.

Tabla 1. Información del diagnóstico clínico inicial de algunos de los registros electrocardiográficos continuos y Holters seleccionados para el estudio.

No.	Diagnóstico clínico
1	Extrasistolia ventricular frecuente. Disminución de la variabilidad de la FC. Palpitaciones
2	Normal
3	Normal
4	Bradicardia, síncope taquicardia sinusal
5	Mareo, arritmia
6	Normal
7	Normal
8	Normal
9	Normal
10	Taquicardia, Incremento de la FC taquicardia sinusal inapropiada.
11	Taquicardia, debilidad, desvanecimiento
12	Accidente cerebrovascular isquémico
13	Flutter auricular
14	Normal
15	Fibrilación auricular, extrasistolia ventricular frecuente de varias morfologías con bigeminismo
16	Síncope, Ritmo sinusal. Variabilidad RR disminuida
17	Normal
18	Palpitaciones en el pecho, análisis
19	Defecto cardíaco de nacimiento - CIA
20	Miocardopatía - restrictiva
21	Infarto agudo de miocardio, ectopia ventricular frecuente monomorfa sin fenómenos repetitivos. Disminución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Trastorno fijo de la repolarización.
22	Normal
23	Normal
24	Normal
25	Síncope, Taquicardia ventricular
26	Arritmia.
27	Miocardopatía - dilatada
28	Normal
29	Normal
30	Enfermedad coronaria de 3 vasos. HTA crónica. Diabetes Mellitus tipo 2
31	Taquicardia sinusal

Tabla 2. Valores de los espacios ocupados por los atractores cardiacos caóticos evaluados en 16 y 21 horas que corresponden a los registros electrocardiográficos de la Tabla 1. Siendo Kp, los valores de la rejilla de cuadros pequeños; Kg los valores de la rejilla de cuadros grandes y DF la dimensión fractal.

21 horas			16 horas		
Kp	Kg	DF	Kp	Kg	DF
130	61	1,09163048	128	63	1,02272008
250	72	1,79585928	252	72	1,80735492
292	90	1,69797146	288	91	1,66213036
187	55	1,76553475	188	53	1,8266684
188	69	1,44606439	190	67	1,50376642
306	124	1,30319153	304	122	1,31719018
222	91	1,28662123	221	92	1,2643406
335	161	1,05710041	338	160	1,07895134
306	101	1,59917636	308	101	1,60857506
196	52	1,91427013	193	51	1,9200317
168	43	1,96605267	171	43	1,99158776
46	12	1,93859946	44	14	1,6520767
152	49	1,63321767	150	47	1,67422984
262	77	1,76663646	262	75	1,80460431
136	38	1,83953533	132	40	1,72246602
112	34	1,71989208	115	33	1,80109593
299	151	0,98559693	298	153	0,96178068
123	64	0,94251451	122	62	0,97654103
197	59	1,73940877	189	58	1,7042614
124	39	1,66879409	122	39	1,64533512
68	25	1,44360665	63	25	1,33342373
346	145	1,25471914	349	144	1,27715822
352	112	1,6520767	353	112	1,65616945

Figura 1. Atractor de una dinámica normal con espacios de ocupación de Kp=377 y Kg=99

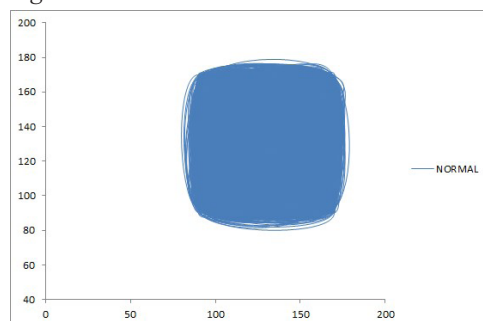


Figura 2. Atractor de una dinámica en evolución hacia enfermedad aguda con espacios de ocupación de Kp=187 y Kg=60

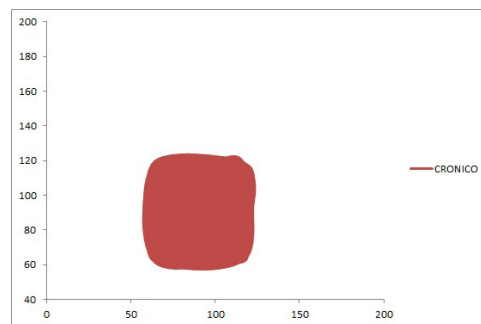
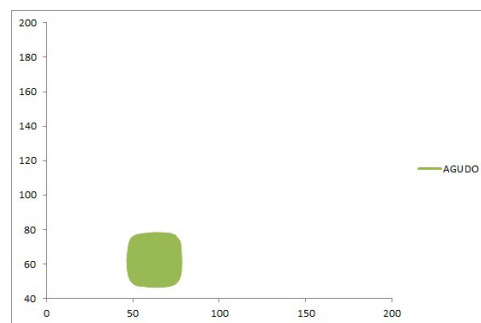


Figura 3. Atractor de una dinámica aguda con espacios de ocupación de Kp=49 y Kg=16.



DISCUSIÓN

Este es el primer trabajo en el cual, a partir de la determinación de los espacios de ocupación de los atractores caóticos cardiacos en el contexto de una ley matemática exponencial, se disminuye el tiempo de evaluación de 21 a 16 horas con 200 casos, al margen del tipo de registro de la frecuencia cardiaca. Se evidenció que es posible evaluar dinámicas normales, agudas y en estados intermedios en 16 horas mediante la metodología matemática expuesta, que se consolida como una herramienta de ayuda diagnóstica útil tanto a nivel ambulatorio como a nivel hospitalario, en la determinación oportuna de la condición del paciente, independiente de factores poblacionales, estadísticos, aspectos inherentes a la patología, al ciclo circadiano u otros, establecien-

do el orden matemático subyacente y superando las barreras intra e interobservador.

Por las características y el origen de la metodología físico-matemática aplicada en el presente estudio, se evidencia su objetividad y reproducibilidad, alcanzando los valores máximos de concordancia diagnóstica y siendo posible su aplicación a cada caso particular.

En trabajos anteriores, fue posible establecer de manera clara y precisa las diferencias existentes entre los estados de normalidad y enfermedad, mediante el método matemático y su aplicación en registros de 21 horas mediante la determinación de los espacios de ocupación de los atractores caóticos cardíacos en el espacio generalizado de Box-Counting^{13,19}. Con base en estos trabajos investigativos, fueron establecidos rangos para los valores de la rejilla K_p que describían estados de normalidad y de enfermedad, cuyos límites se aplicaron en la presente investigación, y permitieron la diferenciación entre normalidad y enfermedad.

El análisis de la dinámica cardíaca desde perspectivas y nociones diferentes a las preestablecidas por la fisiología, ha sido realizado por diferentes grupos de investigación a nivel mundial, entre los que figura el de Goldberger y colaboradores¹¹, quienes plantearon que los estados de anormalidad cardíaca están asociados a comportamientos que se caracterizan por ser altamente caóticos o en extremo regulares, mientras que la normalidad se halla en un estado intermedio entre los dos comportamientos mencionados. Sin embargo, en dicho trabajo no fueron establecidos valores específicos para determinar de manera acertada los estados de normalidad y de anormalidad cardíaca¹¹. La ley matemática exponencial, concebida desde ésta línea de pensamiento⁹⁻¹¹, no sólo corrobora lo planteado por el grupo de Goldberger, también establece diferen-

cias concretas y numerables entre normalidad y enfermedad, constituyéndose como una herramienta de uso clínico.

En el momento en el que se extrapolan los métodos de la física y las matemáticas a entornos en los que usualmente no son implementados, hace su aparición la objetividad. Por ésa razón, la ley que se presenta en este trabajo está solventada por métodos que han sido estudiados desde la antigua Grecia. Es fundamental resaltar que fue desarrollada a la luz del método inductivo de la física teórica, según el cual mediante procesos inductivos de fenómenos observables se da origen a generalizaciones que dan cuenta de los órdenes matemáticos universales.

Se observa que el proceso de transición entre salud y enfermedad de la dinámica cardíaca presenta, al igual que distintos fenómenos de la naturaleza, un orden matemático que en éste caso obedece a la variación del número de espacios ocupados por el atractor caótico cardíaco en el respectivo espacio fractal, que prevalece al margen de factores externos, poblacionales y de otras consideraciones, con lo cual se puede aplicar a cualquier paciente, considerando la mencionada auto-organización matemática del sistema cardíaco.

Desde este punto de vista físico-matemático se han brindado soluciones en distintos campos de la medicina. Ejemplo de ello, es un trabajo realizado recientemente con el fin de predecir la mortalidad en la UCI, tomando en cuenta la teoría de sistemas dinámicos y la teoría de conjuntos²⁰. En este mismo sentido, la dinámica cardíaca neonatal ha sido estudiada para predecir su comportamiento en el curso de la sepsis²¹. En otros ámbitos de la medicina también se han logrado avances importantes como en morfometría arterial y celular^{22, 23}, en hematología con base en la geometría fractal y euclidiana²⁴ y en infectología, en la predicción de linfocitos T CD4 en pacientes con VIH²⁵,

igualmente ha sido útil en la predicción de epidemias²⁶ y en el campo de la inmunología²⁷, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Cooperativa de Colombia, por su apoyo a nuestras investigaciones. El presente resultado hace parte de los productos del proyecto INV 1950 financiado por la Universidad Cooperativa de Colombia.

Extendemos nuestros agradecimientos al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, en especial a la Dra. Adriana Lizbeth Ortiz, epidemióloga, Silvia Ortiz, enfermera jefe, y a los Doctores Tito Tulio Roa, Director de Educación Médica, Jorge Alberto Ospina, Director Médico, y Alfonso Correa, Director del Centro de Investigaciones, por el apoyo constante a nuestro grupo de investigación.

DEDICATORIA

A nuestros hijos

REFERENCIAS

1. Devaney R. A first course in chaotic dynamical systems theory and experiments. Reading Mass: Addison- Wesley; 1992.
2. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. Barcelona: Freeman Tusquets Eds S.A.; 1972; pp 3-17.
3. Falconer K. Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2003; pp 41-43.
4. Peitgen H. Strange attractors, the locus of chaos. En: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. New York: Springer-Verlag; 1992; pp 655-768.
5. Panamerican Health Organization. Regional Consultation Priorities for Cardiovascular Health in the Americas. Key Messages for Policymakers; 2011
6. Ministerio de Salud y Protección Social. Colombia enfrenta epidemia de enfermedades cardiovasculares y diabetes. Boletín de Prensa No 077 de 2014. [Internet] 21 de marzo de 2014 [Consultado: enero 15 de 2015]. Disponible en: <http://www.minsalud.gov.co/Paginas/Colombia-enfrenta-epidemia-de-enfermedades-cardiovasculares-y-diabetes.aspx>
7. Goldberger A, Rigney D, West B. Chaos and fractals in human physiology. *Sci Am.* **1990**; 262: 42-49.
8. Ritzenberg AL, Adam DR, Cohen RJ. Period multupling—evidence for nonlinear behaviour of the canine heart. *Nature.* **1984**; 307: 159-61.
9. Goldberger AL, West BJ. Applications of nonlinear dynamics to clinical cardiology. *Ann. N Y Acad. Sci.* **1987**; 504: 195-213.
10. Goldberger AL, Rigney DR, Mietus J, et al. Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia.* **1988**; 44: 983-87.
11. Goldberger A, Amaral L, Hausdorff J, et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proc Natl Acad Sci USA.* **2002**; 99: 2466-72.
12. Huikuri HV, Mäkikallio TH, Peng CK, et al. Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after and acute myocardial infarction. *Circulation* **2000**; 101: 47-53.
13. Rodríguez J. Mathematical law of chaotic cardiac dynamic: Predictions of clinic application. *J Med. Med. Sci.* **2011**; 2(8):1050-1059.

14. Rodríguez J, Prieto S, Bernal P, et al. Nueva metodología de ayuda diagnóstica de la dinámica geométrica cardíaca dinámica cardíaca caótica del holter. *Rev Acad Colomb Cienc* **2011**; 35 (134):5-12.
15. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, et al. Application of the chaotic power law to cardiac dynamics in patients with arrhythmias. *Rev. Fac. Med.* **2014**; 62(4):539-46.
16. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, et al. Ley matemática para evaluación de la dinámica cardíaca: aplicación en el diagnóstico de arritmias. *Rev. Cienc. Salud.* **2015**; 13(3): 369-381.
17. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, et al. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. *J. Med. Med. Sci.* **2013**; 4(8): 370-381.
18. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, et al. Diagnóstico físico-matemático de la dinámica cardíaca a partir de sistemas dinámicos y geometría fractal: disminución del tiempo de evaluación de la dinámica cardíaca de 21 a 16 horas. **2016**; 16(1): 15-22.
19. Rodríguez J, Prieto S, Avilán N, et al. Nueva metodología física y matemática de evaluación del Holter. *Rev Colomb Cardiol.* **2008**; 15: 50-4.
20. Rodríguez J. Dynamical systems applied to dynamic variables of patients from the intensive care unit (ICU): Physical and mathematical mortality predictions on ICU. *J. Med. Med. Sci.* **2015**; 6(8):209-220.
21. Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, et al. Sistemas dinámicos cardíacos en neonatos normales: Ley caótica cardíaca neonatal. *Salud Uninorte.* **2014**, 30(3):359-368.
22. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Medical Physics.* **2010**; 10:1-6.
23. Velásquez J, Prieto S, Catalina C, et al. Geometrical nuclear diagnosis and total paths of cervical cell evolution from normality to cancer. *Journal of Cancer Research and Therapeutics.* **2015**; 11(Issue 1): 98-104
24. Rodríguez J, Prieto S, Correa S, et al. Simulación de estructuras eritrocitarias con base en la geometría fractal y euclidiana. *Arch Med (Manizales).* **2014**; 14(2): 276-284.
25. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, et al. Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. *BMC Medical Physics.* **2013**; 13:3.
26. Rodríguez J, Correa C. Predicción temporal de la epidemia de dengue en Colombia: dinámica probabilista de la epidemia. *Rev salud pública.* **2009**; 11(3):443-453.
27. Rodríguez J, Bernal P, Prieto P, et al. Predicción de unión de péptidos de Plasmodium falciparum al HLA clase II. Probabilidad, combinatoria y entropía aplicadas a las proteínas MSP-5 y MSP-6. *Archivos de alergia e inmunología clínica.* **2013**; 44(1): 7-14.

RESUMEN

Antecedentes: Con conceptos provenientes de la teoría de sistemas dinámicos y la geometría fractal, se ha logrado caracterizar el comportamiento de la dinámica cardíaca, dando resultados objetivos y estableciendo distinciones entre estados de normalidad y enfermedad

Objetivo: Aplicar una ley matemática exponencial de la dinámica cardíaca, inscrita en el contexto de los sistemas dinámicos y la geometría fractal, para evidenciar su utilidad diagnóstica en 16 horas.

Materiales y métodos: Fueron empleados 200 Holters y registros elec-

trocardiográficos continuos, entre normales y con diferentes alteraciones cardíacas. Se simuló una secuencia de frecuencias cardíacas en 16 y 21 horas, con la cual se construyó el atractor de cada dinámica. También se calculó la dimensión fractal y la ocupación de los atractores en el espacio fractal. Se estableció el diagnóstico físico-matemático en 16 y 21 horas y la subsecuente validación estadística.

Resultados: Fueron obtenidos valores en la rejilla Kp entre 44 y 198 para estados patológicos y entre 221 y 377 para estados de normalidad en 16 horas, la sensibilidad y especificidad fue del 100% y el coeficiente Kappa de 1.

Conclusión: Se logró diferenciar de manera adecuada estados normales de patológicos mediante la ley exponencial aplicada en registros de 16 horas

Palabras clave: Caos, Fractal, Ley Caótica, Dinámica Cardíaca, Diagnóstico.

SUMMARY

Background: With concepts derived from dynamical systems theory and fractal geometry, it has been possible to characterize the behavior of the cardiac dynamics, giving objective results and establishing dis-

tinctions between states of normality and disease

Objective: To apply an exponential mathematical law of cardiac dynamics, inscribed in the context of dynamical systems and fractal geometry, to demonstrate its diagnostic utility in the context of a reduction in the evaluation time, originally of 21 hours.

Materials and methods: There were used 200 Holters and continuous electrocardiographic records, between normal and with different cardiac alterations. A sequence of heart rates was simulated in 16 and 21 hours, with which the attractor of each dynamic was constructed. There were also calculated the fractal dimension and the occupation of the attractors in the fractal space. The physical-mathematical diagnosis was established at 16 and 21 hours, and the statistical validation was performed.

Results: Values obtained in the Kp grid were between 44 y 198 for pathological states, and between 221 and 377 for normal states in 16 hours. The sensitivity and specificity was 100% and the Kappa coefficient was 1.

Conclusion: It was possible to differentiate adequately normal states of pathological by means of the exponential law applied in registers of 16 hours

Keywords: Chaos, Fractal, Chaotic Law, Cardiac Dynamics, Diagnosis.