

Evaluación de la dinámica cardíaca durante 16 horas mediante una ley matemática exponencial

Javier Rodríguez Velásquez¹, Signed Esperanza Prieto Bohorquez², Nidia García³,
Ciro Rodríguez⁴, Jorge E. Gaitán⁵, Catalina Correa Herrera⁶

Resumen

Marco teórico. Con base en la teoría de los sistemas dinámicos, fue establecida una ley matemática exponencial que al ser aplicada a los sistemas cardíacos caóticos, permitió cuantificar estados de normalidad y enfermedad, siendo también posible encontrar el número total de dinámicas cardíacas a partir de esta comprensión matemática del fenómeno. En este estudio se evaluó la aplicabilidad clínica y utilidad diagnóstica de la ley exponencial en 300 registros electrocardiográficos continuos y estudios Holter, en 16 horas.

Material y métodos. A partir de 300 registros electrocardiográficos continuos y estudios Holter, dentro de los cuales 50 presentaban diagnóstico convencional de normalidad y los restantes 250 algún tipo de patología, se construyeron los mapas de retardo para cada dinámica cardíaca. Seguidamente, se calculó la dimensión fractal y los espacios de ocupación de los atractores. Se realizó la evaluación matemática en 16 y 21 horas, mediante la ley exponencial, y se llevó a cabo la validación estadística.

Resultados. Se obtuvo que los valores para la rejilla K_p entre 203 y 346 correspondían a normalidad, mientras que valores entre 35 y 197 correspondían a enfermedad, en 16 horas. El valor encontrado para el coeficiente Kappa fue de 1, la sensibilidad y especificidad fueron de 100%.

Conclusiones. Se logró establecer que la metodología matemática permite realizar diagnósticos certeros en 16 horas, comprobándose su aplicabilidad en 300 registros electrocardiográficos.

Insuf Card 2020;15(3):70-75

Palabras clave: Diagnóstico - Fractales - Dinámicas no lineales - Frecuencia cardíaca

Abreviaturas

ECV: enfermedad cardiovascular.

UCI: unidad de cuidados intensivos.

DF: dimensión fractal.

N: número de cuadros ocupados por el objeto.

K: grado de partición de la cuadrícula.

K_p : rejillas de cuadros pequeños.

K_g : rejillas de cuadros grandes.

Summary

Evaluation of the cardiac dynamics for 16 hours through an exponential mathematical law

Background. Based on the theory of dynamic systems, an exponential mathematical law was established that, when applied to chaotic cardiac systems, allowed to quantify states of normality and disease, being also possible to find the total number of cardiac dynamics from This mathematical understanding of the phenomenon, in this study, evaluated the clinical applicability and diagnostic utility of the exponential law in 300 continuous electrocardiographic records and Holter tests, in 16 hours.

Methods. With 300 continuous electrocardiographic registers and Holter tests, of which 50 presented conventional diagnosis of normality and the remaining 250 some type of pathology, the delay maps were constructed for each cardiac dynamics. Next, the fractal dimension and the spaces of occupation of the attractors were calculated. It was made the

¹ Médico. Director del Grupo Insight. Centro de Investigaciones de la Clínica del Country. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

² Médica. Investigadora Grupo Insight. Centro de Investigaciones Clínica del Country. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

³ Ingeniera. Docente Universidad Agustiniana. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

⁴ Ingeniero. Universidad Agustiniana. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

⁵ Máster. Economista. Universidad Agustiniana. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

⁶ Psicóloga. Investigadora Grupo Insight. Centro de Investigaciones Clínica del Country. Bogotá. Bogotá D.C. Colombia.

Correspondencia: Dr. Javier Rodríguez Velásquez.

Cra. 79B N° 51-16 Sur. Int. 5. Apto. 102, Barrio Kennedy, Bogotá D.C., Colombia.

Teléfono: (57)(1)3118852278;

E-mail: grupoinsight2025@gmail.com

Recibido: 17/07/2019

Aceptado: 24/11/2019

mathematical evaluation in 16 and 21 hours, using the exponential law and the statistical validation was performed. **Results.** It was obtained that the values for the grid Kp between 203 and 346 corresponded to normality, whereas values between 35 and 197 corresponded to disease, in 16 hours. The value found for the Kappa coefficient was 1; the sensitivity and specificity were 100%.

Conclusion. It was possible to establish that the mathematical methodology allows to make accurate diagnoses in 16 hours, being proved its applicability in 300 electrocardiographic registers.

Keywords: Diagnosis - Fractals - Nonlinear systems - Heart rate

Resumo

Avaliação da dinâmica cardíaca por 16 horas por meio de uma lei matemática exponencial

Introdução. Com base na teoria de sistemas dinâmicos, foi criada uma lei matemática exponencial que quando aplicada a sistemas cardíacos caóticos permitidos estados Quantificar de normalidade e doença, também é possível encontrar o número total de dinâmica cardíaca de Essa compreensão matemática do fenômeno, neste estudo, avaliou a aplicabilidade clínica e a utilidade diagnóstica da lei exponencial em 300 registros eletrocardiográficos contínuos e estudos Holter, em 16 horas.

Material e métodos. A partir de 300 registros eletrocardiográficos contínuos e estudos Holter, dentre os quais 50 apresentaram diagnóstico normal de normalidade e os demais 250 algum tipo de patologia, os mapas de atraso para cada dinâmica cardíaca foram construídos. Em seguida, calculou-se a dimensão fractal e os espaços de ocupação dos atratores. A avaliação matemática foi realizada às 16 e 21 horas, por meio da lei exponencial, e a validação estatística foi realizada.

Resultados. Obteve-se que os valores da malha do Kp entre 203 e 346 correspondiam à normalidade, enquanto os valores entre 35 e 197 correspondiam à doença, em 16 horas. O valor encontrado para o coeficiente Kappa foi de 1, a sensibilidade e especificidade foram de 100%.

Conclusões. Estabeleceu-se que a metodologia matemática permite realizar diagnósticos precisos em 16 horas, verificando sua aplicabilidade em 300 registros eletrocardiográficos.

Palavras-chave: Diagnóstico - Fractais - Dinâmica não linear - Frequência cardíaca

Introducción

La teoría de los sistemas dinámicos fue desarrollada con el fin de establecer el comportamiento dinámico de los sistemas^{1,2}, es decir, como varían con respecto al tiempo. Para ello, se emplea el espacio de fases, entendido como un espacio geométrico en el cual se representan las variables dinámicas del sistema³. La evolución suele ser evidenciada mediante atractores, entre ellos se encuentran los que representan sistemas predecibles, como los puntuales o cíclicos y los caóticos que representan sistemas impredecibles. Estos últimos pueden ser analizados mediante la geometría fractal⁴.

En cuanto a la geometría fractal, es un tipo de geometría que permite caracterizar las formas irregulares que aparecen en la naturaleza^{5,6}, entre sus mediciones se encuentra la denominada dimensión fractal, que determina el grado de irregularidad de un objeto. Para realizar este cálculo, existen varios métodos⁷ que dependen del tipo de fractal que se esté estudiando; cuando son evaluados los fractales salvajes suele utilizarse el método de *Box-Counting*⁸.

Del total de muertes que se presentan en todo el planeta un gran porcentaje está asociado a enfermedades cardiovasculares (ECV), que abarcan el 30% de dichos decesos, configurándose como una condición que afecta los individuos, los sistemas de salud y las unidades de cuidados intensivos (UCI) en todo el mundo. En el año 2009 en América, aproximadamente 2150 personas⁹ murieron a causa de ECV cada día, estableciéndose como una cifra alarmante, pues una persona falleció cada 40 segundos. La Organización Mundial de la Salud estableció como causas principales de mortalidad dentro de las ECV, la cardiopatía coronaria y los accidentes cerebrovasculares¹⁰. Actualmente, uno de los exámenes que se utilizan para diagnosticar

ECV es el registro electrocardiográfico ambulatorio o estudio Holter, cuyo tiempo de evaluación puede variar de 24 a 48 horas y mediante el cual, se pueden identificar cambios del ritmo cardíaco y evidenciar las variaciones de los intervalos RR, entre otros.

La cardiología se ha enfocado en analizar la frecuencia cardíaca desde los cambios RR en el tiempo, constituyendo un campo de estudio prolífico; sin embargo, desde las teorías de los sistemas dinámicos, la ley del caos y los sistemas no lineales¹¹⁻¹³ aplicadas en la evaluación de las dinámicas cardíacas, se ha evidenciado que el análisis clásico puede ser reevaluado como parámetro diagnóstico y predictor de la dinámica cardíaca. En ese orden de ideas, se ha observado que la dinámica cardíaca como sistema dinámico exhibe un comportamiento irregular o caótico^{14,16}, con lo cual se ha abierto un nuevo campo de observación y de interpretación de la relación salud-enfermedad¹⁷, pues trazados electrocardiográficos completamente planos, altamente aleatorios o en extremo regulares están asociados a dinámicas cardíacas con algún tipo de enfermedad, mientras que en un punto medio entre los extremos de aleatoriedad y regularidad, se encuentran las dinámicas cardíacas asociadas a normalidad. Tomando como base estas teorías, se han desarrollado distintas metodologías que permiten la evaluación del sistema dinámico cardíaco a partir de la frecuencia cardíaca¹⁸⁻²², las cuales a pesar de sus resultados aún son discutidas, pues su aplicabilidad clínica aún no está totalmente establecida^{23,24}.

En este sentido, se ha desarrollado una nueva metodología diagnóstica de la dinámica cardíaca, basada en una ley exponencial caótica desarrollada en el marco de los sistemas dinámicos y la geometría fractal²⁵, cuya aplicabilidad clínica ha sido comprobada^{26,27}. Con esta ley, fue posible deducir todos los posibles atractores cardíacos

caóticos, evidenciando diferencias cuantificables entre los diferentes estados; es decir, entre aquellas dinámicas normales y aquellas con enfermedad aguda. Así mismo, fue posible diferenciar los estados de evolución hacia la enfermedad²⁵. De esta manera, la metodología propuesta fue aplicada de forma exitosa al estudio de 115 *tests* Holter²⁶; también, fue aplicada a pacientes con algún tipo de arritmia diagnosticada clínicamente²⁷. En ambos estudios, se evidenciaron concordancias favorables en un alto grado con respecto a los diagnósticos convencionales, tomados como *gold standard*.

El objetivo de este trabajo es establecer una evaluación de la dinámica cardíaca mediante registros electrocardiográficos en 16 horas, a partir de la ley matemática exponencial comprobando así la capacidad diagnóstica y aplicabilidad clínica de la misma.

Materiales y métodos

Definiciones

Mapa de retardo: espacio geométrico n-dimensional en el cual se grafican pares ordenados de una misma variable dinámica consecutiva en el tiempo.

Método de Box-Counting: método de cálculo matemático por medio del cual se establece la dimensión fractal; medición que determina el grado de irregularidad de un objeto y que es obtenida de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$D = \frac{\text{Log}N(2^{-(k+1)}) - \text{Log}N(2^{-k})}{\text{Log}2^{k+1} - \text{Log}2^k} = \text{Log}_2 \frac{N(2^{-(k+1)})}{N(2^{-k})}$$

Donde D representa la dimensión fractal, N es el número de cuadros ocupados por el objeto y k representa el grado de partición de la cuadrícula.

Al simplificar la ecuación 1 y dejarla en términos de las rejillas de cuadros pequeños (Kp) y cuadros grandes (Kg), se obtiene:

$$D = \text{Log} \frac{K_p}{K_g} \quad \text{Ecuación 2}$$

Ley matemática exponencial: al realizar un despeje de la Ecuación 2, se da lugar a la ley matemática exponencial:

$$\Rightarrow K_p = K_g 2^D \Rightarrow K_g = \frac{K_p}{2^D} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde D es la dimensión fractal.

Población

Se tomaron 300 registros electrocardiográficos continuos y ambulatorios de bases de datos de investigaciones previas del grupo *Insight*, de al menos 21 horas de sujetos mayores de 21 años, entre los cuales 50 eran de pacientes normales y 250 de pacientes con algún tipo de patología cardíaca, según el diagnóstico determinado por un cardiólogo experto según parámetros clínicos convencionales.

Procedimiento

Se enmascararon los diagnósticos emitidos por el cardiólogo experto. Para cada uno de los registros, fueron tomados los valores máximos y mínimos de las frecuencias cardíacas,

y el número total de latidos por hora. Con estos datos se generó una secuencia pseudoaleatoria de frecuencias cardíacas mediante un algoritmo sin cargas probabilísticas y posteriormente, se procedió a graficar el atractor de cada dinámica en el mapa de retardo, tanto para 21 como para 16 horas (Ver definiciones).

A partir del atractor de cada dinámica, se calculó la dimensión fractal, utilizando el método de *Box-Counting* (Ecuación 1). Se cuantificaron los cuadros ocupados por el atractor utilizando para ello las dos rejillas, Kp y Kg. Posteriormente, se realizó la evaluación físico-matemática de cada dinámica cardíaca, empleando la Ecuación 3 y en concordancia con la metodología desarrollada previamente y los límites preestablecidos²⁵, de acuerdo con los cuales, la enfermedad aguda presenta espacios de ocupación en Kp menores a 73, la normalidad exhibe espacios de ocupación en dicha rejilla mayores a 200 y por último, en caso que los valores de ocupación estén entre 73 y 200 se establece el estado de evolución de normalidad a enfermedad.

Análisis estadístico

Se desenmascararon los diagnósticos emitidos por el cardiólogo experto, en aras de comparar el diagnóstico convencional, asumido como *gold standard*, con el físico-matemático en 16 horas, tomando los casos de normalidad y enfermedad aguda. Previo a ello, fue confirmada la concordancia entre el diagnóstico físico-matemático en 21 y 16 horas.

Para realizar los cálculos, se tomó como base una tabla de contingencia de 2x2, en la cual se compararon los resultados de ambos diagnósticos, discriminando falsos positivos, verdaderos positivos, falsos negativos y verdaderos negativos, dando lugar al establecimiento de la sensibilidad y especificidad.

Se evaluó el coeficiente Kappa, el cual establece la concordancia entre ambos diagnósticos, de la siguiente manera:

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

En donde Co es el número de registros que tienen el mismo diagnóstico desde el método físico-matemático y el convencional. To es la totalidad de casos y Ca es el número de concordancias debidas al azar, calculadas así:

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

En donde f_1 es el número de casos con valores matemáticos dentro de la normalidad, C_1 es número de casos diagnosticados como normales desde el diagnóstico convencional, f_2 es el número de casos con valores matemáticos de enfermedad, C_2 es el número de casos patológicos desde los parámetros clínicos convencionales y To es el total de casos.

Aspectos éticos

Esta investigación se somete a los principios éticos de la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial. El tipo de riesgo de esta investigación es mínimo, según la resolución 08430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia, pues se hacen cálculos físicos y matemáticos en reportes y exámenes no invasivos que han sido previamente prescritos, protegiendo la integridad y anonimato de los participantes.

Resultados

En la Tabla 1 se observan algunos de los diagnósticos clínicos de los registros electrográficos continuos y *tests* Holter del estudio. Para las dinámicas cardíacas evaluadas en 21 horas se observó que en las normales se encontraron dimensiones fractales de los atractores entre 0,836 y 1,832; mientras que en las dinámicas cardíacas patológicas, estos valores estuvieron entre 0,950 y 1,898. Mientras tanto, en las dinámicas evaluadas en 16 horas se obtuvieron valores entre 0,812 y 1,820 para las dinámicas normales y entre 0,966 y 2,017 para las dinámicas patológicas. Con lo anterior se confirma que la dimensión fractal no es parámetro suficiente para establecer diferencias entre las distintas dinámicas cardíacas (Tabla 2).

Las dinámicas normales evaluadas en 21 horas para la rejilla Kp presentaron espacios de ocupación entre 200 y 341, y las anormales entre 33 y 197. Las dinámicas normales evaluadas en 16 horas para la rejilla Kp presentaron

Tabla 1. Información del diagnóstico clínico inicial de algunos registros electrocardiográficos continuos y estudios Holter utilizados para la realización del estudio

No.	Indicaciones
1	Normal.
2	Fibrilación auricular, marcapasos bicameral normofuncionante.
3	Normal.
4	Incremento de la FC taquicardia sinusal inapropiada. Correlacionar con historia clínica.
5	Extrasistolia auricular conducida frecuente. Episodios de taquicardia auricular conducida sostenida y no sostenida.
6	Comunicación interauricular, disnea.
7	Normal.
8	Normal.
9	Arritmias. FA paroxística, prótesis mecánica mitral, dilatación severa, extrasistolia ventricular frecuente con episodio de taquicardia auricular de 4 minutos de duración (inicio y fin paroxístico).
10	Normal.
11	Normal.
12	Bradicardia. Bradicardia sinusal moderada con ocasionales períodos de bradicardia severa, extrasístoles supraventriculares.
13	Normal.
14	Miocardiopatía obstructiva hipertrófica.
15	Arritmia, medicamentos: warfarina.
16	Normal.
17	Normal.
18	Fatiga y palpitaciones frecuentes. Extrasistolia ventricular ocasional monomórfica con trigeminismo escaso.
19	Ectopias ventriculares frecuentes.
20	Bradicardia sinusal, EV ocasionales, EA no conducida sin fenómenos repetitivos, sugiere disfunción sinusal.
21	enfermedad coronaria, taquicardia.
22	Taquicardia, extrasistolia auricular.
23	Control de la arritmia, disminución de la variabilidad de la FC.
24	Fibrilación auricular con respuesta ventricular media elevada.
25	Normal.
26	Síncope en estudio.
27	Normal.
28	Normal.
29	Normal.
30	IAM CEST inferior KKI tipo 1 no trombolizado.

FC: frecuencia cardíaca. FA: fibrilación auricular. EV: extrasístoles ventriculares. EA: extrasístoles auriculares. IAM CEST: infarto agudo de miocardio con elevación del ST. KKI: Clasificación de Killip-Kimball.

Tabla 2. Valores de los espacios ocupados por los atractores cardíacos caóticos en Kp, Kg y su dimensión fractal DF, evaluados en 16 y 21 horas que corresponden a los registros electrocardiográficos de la Tabla 1.

No.	21 horas			16 horas		
	Kp	Kg	DF	Kp	Kg	DF
1	341	158	1,10984718	346	158	1,13084748
2	121	59	1,03622019	119	57	1,06192775
3	281	105	1,4201808	277	107	1,37227518
4	97	33	1,55551872	98	34	1,527247
5	172	89	0,95053132	172	88	0,96683314
6	47	16	1,55458885	50	16	1,64385619
7	300	141	1,08926734	304	142	1,09818039
8	212	96	1,14295795	215	94	1,193604
9	114	34	1,74542717	111	36	1,62449086
10	291	163	0,83614719	288	164	0,812373
11	227	83	1,45150906	229	82	1,48165178
12	90	40	1,169925	92	39	1,23815974
13	200	95	1,07400058	203	93	1,12617711
14	157	54	1,53973325	156	55	1,50404251
15	197	59	1,73940877	197	61	1,69131448
16	318	143	1,15301162	317	144	1,13841403
17	228	64	1,83289001	226	64	1,82017896
18	160	44	1,86249648	158	43	1,87751599
19	128	47	1,44541115	131	45	1,54156991
20	163	83	0,97368872	168	84	1
21	192	93	1,04580369	196	93	1,07555103
22	181	65	1,47747807	185	64	1,53138146
23	82	22	1,89812039	85	21	2,01707351
24	150	44	1,76938707	149	43	1,79290377
25	336	118	1,50967437	341	120	1,50673733
26	154	57	1,43389653	150	57	1,39592868
27	302	85	1,8290138	297	87	1,77137562
28	220	71	1,63161259	219	73	1,5849625
29	319	96	1,73245011	311	95	1,71091516
30	33	12	1,45943162	35	14	1,32192809

espacios de ocupación entre 203 y 346, mientras que las anormales entre 35 y 197 (Tabla 2).

Las dinámicas normales evaluadas en 21 horas para la rejilla Kg, presentaron espacios de ocupación entre 64 y 163, y las anormales entre 12 y 93. Las dinámicas normales evaluadas en 16 horas para la rejilla Kg, presentaron espacios de ocupación entre 64 y 163, mientras que las anormales entre 12 y 93 (Tabla 2). Se evidenció concordancia en el diagnóstico matemático en 21 y 16 horas en la totalidad de casos.

Estos resultados fueron confirmados con el análisis estadístico, en el cual se obtuvieron valores de sensibilidad y especificidad del 100% y un coeficiente Kappa igual a 1. En las Figuras 1 y 2 se observan los atractores de una dinámica normal y aguda, respectivamente, donde se evidencia que el tamaño de la dinámica aguda es mucho menor al tamaño de la dinámica normal, corroborando los hallazgos numéricos encontrados.

Discusión

Este es el primer trabajo en el cual partiendo de la aplicación de una ley matemática exponencial en 300 registros electrocardiográficos continuos y estudios Holter, se

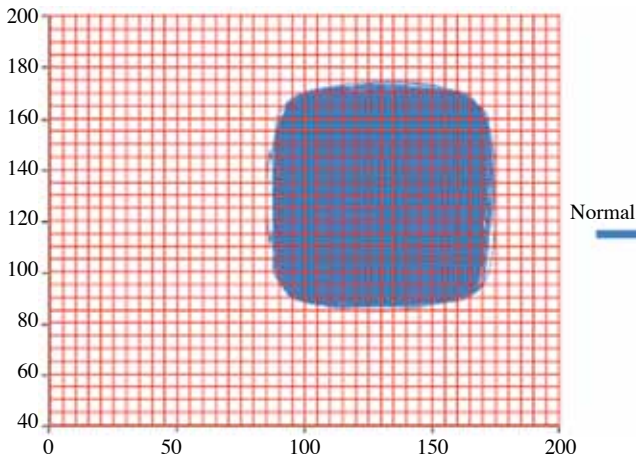


Figura 1. Atractor de una dinámica normal con la rejilla K_p sobrepuesta, con espacios de ocupación de $K_p=311$ y $K_g=95$ en 16 horas. (No. 29 de la Tabla 2).

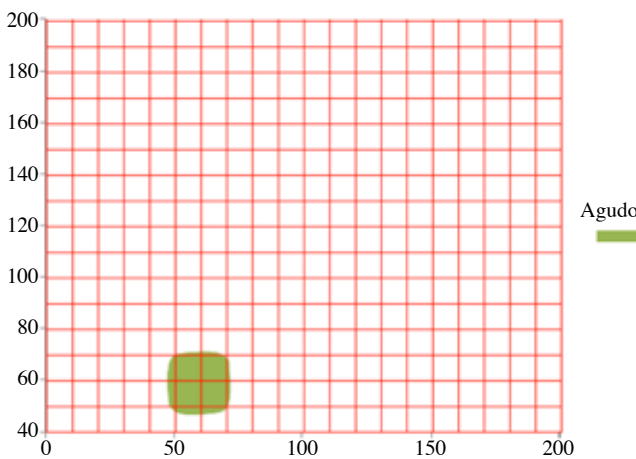


Figura 2. Atractor de una dinámica aguda con la rejilla K_g sobrepuesta, con espacios de ocupación de $K_p=35$ y $K_g=14$ en 16 horas. (No. 30 de la Tabla 2).

evalúa la dinámica cardíaca en 16 horas y se logran establecer diferencias cuantitativas, objetivas y reproducibles entre normalidad y enfermedad, por medio de la ocupación espacial de los atractores caóticos cardíacos, mostrando que la metodología tiene utilidad diagnóstica, predictiva y que podría ser una herramienta importante en el ámbito médico dada su aplicabilidad clínica, exhibiendo los más altos niveles de concordancia diagnóstica frente al *gold standard* diagnóstico, con la diferencia que el método físico-matemático supera las dificultades ligadas a la subjetividad de interpretación de los trazados, por basarse en la auto-organización matemática intrínseca del sistema.

La reducción del tiempo de evaluación de la ley matemática exponencial adquiere un papel preponderante en el presente trabajo, pues su aplicación a gran escala en la clínica permitiría en el futuro, la disminución de los tiempos de respuesta por el establecimiento de diagnósticos con mayor oportunidad, que conduciría a la prevención de desenlaces desfavorables asociados a las enfermedades cardiovasculares.

En el estudio de la dinámica cardíaca por medio de métodos no lineales^{11-13,28,29} se mostró que la concepción establecida de normalidad y enfermedad debía ser analizada y cuestionada. En ese sentido, han sido desarrollados distintos métodos de evaluación de la dinámica cardíaca; no obstante, se debe determinar su aplicación clínica a partir de diversos

estudios²⁴, que permitan definir los métodos que deben ser utilizados²³ y estandarizar su posible aplicación.

En este trabajo se puso de relieve que la dimensión fractal no es parámetro suficiente para establecer diferencias significativas entre estados de normalidad y enfermedad de la dinámica cardíaca, tal como se había mostrado en estudios anteriores²⁵⁻²⁷. Sin embargo, cuando se centra la atención en los espacios de ocupación de los atractores y son empleados en el contexto de la ley matemática exponencial, se pueden establecer diagnósticos para cada caso particular, independiente de modelos estadísticos o poblacionales.

Se han desarrollado trabajos desde la geometría fractal en medicina³⁰⁻³⁴, en aras de evidenciar de manera objetiva diferencias entre normalidad y enfermedad. Estos están basados en medidas fractales aisladas y búsquedas incansables de valores de normalidad o enfermedad que hasta ahora no habían mostrado su capacidad de establecer distinciones objetivas. Por lo tanto, fueron desarrolladas medidas matemáticas que permiten determinar las diferencias entre normalidad y enfermedad a nivel arterial y celular^{35, 36}, aspecto que también es evidente en el presente caso, en el cual el epicentro del diagnóstico es el espacio de ocupación de los atractores.

La ley matemática exponencial aplicada en el presente trabajo investigativo, fue concebida bajo el fundamento de la física teórica, en la cual se buscan órdenes matemáticos para analizar los fenómenos a partir de teorías físicas y matemáticas con el objetivo de implementar leyes universales^{37,38}; por lo cual, la evaluación que se hace, se abstrae de variables estadísticas o epidemiológicas que se enfocan en dar características poblacionales, y se revelan ordenes matemáticos universales diferenciadores de cada dinámica cardíaca por particular que ésta sea.

A partir de este enfoque físico-matemático, se han establecido parámetros y metodologías de carácter objetivo en distintos campos de la medicina. En cuanto a la dinámica cardíaca, ha sido posible establecer diagnósticos de manera precisa y determinar la aplicabilidad clínica de una metodología basada en la probabilidad y las proporciones de la entropía^{39,40}. Por otro lado, se han realizado diagnósticos del sistema cardíaco neonatal⁴¹. En el campo de la morfometría arterial fue posible determinar el número total de prototipos arteriales³⁵; así mismo, se han realizado diagnósticos de morfometría celular³⁶. Este orden de pensamiento también ha sido utilizado en predicción de epidemias⁴² y en áreas como la infectología⁴³ y la oncología^{36,44}. Se han desarrollado metodologías diagnósticas del sistema cardíaco del adulto^{27,45} y ha sido posible predecir la mortalidad en la UCI⁴⁶.

Conclusiones

Se logró establecer que una reducción de la aplicación de esta metodología matemática al estudio de la dinámica cardíaca permite realizar diagnósticos certeros en 16 horas, comprobándose su aplicabilidad en 300 registros electrocardiográficos, evidenciando su utilidad como herramienta para el diagnóstico y evolución de patologías.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Agustiniiana, especialmente al Dr. Rafael Guillermo García Cáceres, Vicerrector de

Investigaciones, por su apoyo a nuestro grupo de investigación.

Extendemos también nuestro agradecimiento al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, a la Doctora Adriana Lizbeth Ortiz, epidemióloga, y Silvia Ortiz, enfermera jefe, 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 nuestras investigaciones.

Recursos financieros

Los autores no recibieron ningún apoyo económico para la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. Devaney R. A first course in chaotic dynamical systems theory and experiments. ReadingMass: Addison- Wesley 1992.
2. Peitgen H, Jürgens H, Saupe D. Encoding images by simple transformations. En: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. Springer-Verlag. N.Y. 1992.
3. Tolman R. Principles of statistical mechanics. Primera edición New York: Dover Publications. 1979.
4. Mandelbrot B. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science* 1967; 156: 636-38.
5. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. NY: WH Freeman and Co; 1983, p. 344-347.
6. Peitgen H, Jürgens H, Saupe D. Length, Area and Dimension. En: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. Springer-Verlag. N.Y. 1992.
7. Falconer K. Fractal geometry, mathematical foundations and applications. Wiley, New York 1990.
8. Edgar G. Measures, Topology and Fractal geometry. Springer - Verlag, NY, 1990
9. Heart Disease and Stroke Statistics-2013 Update A Report From the American Heart Association. *Circulation* 2013;127:e6-e245.
10. Centro de prensa. Enfermedades Cardiovasculares. Nota informativa Enero de 2011. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/es/index.html>.
11. Lombardi F. Chaos theory, heart rate variability, and arrhythmic mortality. *Circulation* 2000;101:8-10.
12. Peng CK, Havlin S, Stanley HE, Goldberger AL. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos* 1995;5: 82-87.
13. Mäkikallio TH, Hoiber S, Kober L, Torp-Pedersen C, Peng C K, Goldberger AL, Huikuri HV, TRACE investigators. Fractal analysis of heart rate dynamics as a predictor of mortality in patients with depressed left ventricular function after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1999;83: 836-839.
14. Garfinkel A, Spano M, Ditto W, Weiss J. Controlling Cardiac Chaos. (Research Articles) *Science* 1992;257 (28): 1230- 1235.
15. Gough N. Fractals, chaos, and fetal heart rate. *Lancet* 1992; 339: 182-3.
16. Goldberger AL. Is the normal heartbeat chaotic or homeostatic? *News in Physiological Science* 1991;6:87-91.
17. Goldberger A, Amaral L, Hausdorff JM, Ivanov P, Peng Ch, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *PNAS* 2002; 99: 2466- 2472.
18. Baumert M, Baier V, Voss A. Estimating the complexity of heart rate fluctuations-an approach based on compression entropy. *Noise Lett* 2005;4: L557-L563.
19. Beckers F, Verheyden B, Aubert AE. Aging and nonlinear heart rate control in a healthy population. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2006; 290:H2560-H2570.
20. Bär KJ, Boettger MK, Koschke M, Schulz S, Chokka P, Yeragani VK, Voss A. Non-linear complexity measures of heart rate variability in acute schizophrenia. *Clin Neurophysiol* 2007;118: 2009-2015.
21. Khoo MC. Modeling of autonomic control in sleep-disordered breathing. *Cardiovasc Eng* 2008;8: 30-41.
22. Huikuri HV, Mäkikallio TH, Peng CK, Goldberger AL, Hintze U, Møller M. Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after an acute myocardial infarction. *Circulation* 2000;101: 47-53.
23. Voss A, Schulz S, Schroeder R, Baumert M, Caminal P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. *Phil Trans R Soc* 2009;367A: 277-296.
24. Perkiömäki J, Mäkikallio TH, Huikuri HV. Fractal and Complexity Measures of Heart Rate Variability. *Clin Exp Hypertens* 2005;2,3:149-158
25. Rodríguez J. Mathematical law of chaotic cardiac dynamic: Predictions of clinic application. *J Med Sci* 2011; 2(8):1050-1059.
26. Rodríguez J, Correa C, Melo M, Domínguez, D, Prieto S, Cardona DM, Soracipa Y, Mora J. Chaotic cardiac law: Developing predictions of clinical application. *J Med Med Sci* 2013;4(2): 79-84.
27. Rodríguez J, Narváez R, Prieto S, Correa C, Bernal P, Aguirre G, Soracipa Y, Mora J. The mathematical law of chaotic dynamics applied to cardiac arrhythmias. *J Med Med Sci* 2013; 4(7): 291-300.
28. Wu GQ, Arzeno NM, Shen LL, Tang DK, Zheng DA, Zhao NQ, Eckberg DL, Poon CS. Chaotic Signatures of Heart Rate Variability and Its Power Spectrum in Health, Aging and Heart Failure. *PLoS ONE*2009;2 (4):e4323.
29. Braun C, Kowallik P, Freking A, Haderler D, Kniffki K, Meesmann M. Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons. *Am J Physiol* 1998; 275, H1577-H1584.
30. Luzzi P, Bianciardi G, Miracco C, De Santi MM, Del Vecchio MT, Alia L, Tosi P. Fractal Analysis in Human Pathology. *Ann NY Acad Sci* 1999; 879: 255-7.
31. Gazit Y, Berk DA, Lunig M, Baxter LT, Jain RK. Scale - invariant behavior and vascular network formation in normal and tumor tissue. *Phys Rev Lett* 1995; 75: 2428-31.
32. Dey P, Rajesh L. Fractal dimesion in endometrial carcinoma. *Anal Quant Cytol Histol* 2004;26(2):113-6.
33. Kikuchi A, Kozuma S, Yasugi T, Taketani Y. Fractal analysis of the surface growth patterns in endometrioid endometrial adenocarcinoma. *Gynecol Obstet Invest* 2004;58(2):61-7.
34. Kiselev VG, Hahn KR, Auer DP. Is the brain cortex a fractal? *Neuroimage* 2003;20(3):1765-74.
35. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Puerta G, Vitery S, Soracipa Y, Muñoz D. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Medical Physics* 2010;10:1.
36. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Domínguez D, Cardona DM, Melo M. Geometrical nuclear diagnosis and total paths of cervix cell evolution from normality to cancer. *J Can Res Ther* 2015; 11(1): 98-104.
37. Einstein A. Sobre la teoría de la relatividad y otras aportaciones científicas. Sarpe, Madrid, ed. 3, 1983, pp. 23-32.
38. Einstein A. Sobre la teoría de la relatividad y otras aportaciones científicas. Sarpe, Madrid, ed. 3, 1983, pp. 78-84.
39. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, Melo M, Mendoza F, Correa C, Soracipa Y, Pinilla L, Pardo J, Ramírez N. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. *J Med Med Sci* 2013; 4(8): 370-381.
40. Rodríguez J. Proportional Entropy applied to the Clinic Prediction of Cardiac Dynamics. Innovations in Cardiovascular Interventions, ICI meeting 2012.
41. Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, Alarcón C, López R, Aguirre G, Morales L, Lima L, Méndez L. Physical-mathematical diagnosis of cardiac dynamic on neonatal sepsis: predictions of clinical application. *J Med Med Sci* 2014; 5(5): 102-108.
42. Rodríguez J. Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. *Rev Panam Salud Pública* 2010; 27(3):211-8.
43. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Perez C, Mora J, Bravo J, Soracipa Y, Álvarez L. Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. *BMC Medical Physics*. *BMC Medical Physics* 2013; 13:3
44. Prieto S, Rodríguez J, Correa C, Soracipa Y. Diagnosis of cervical cells based on fractal and Euclidian geometrical measurements: Intrinsic Geometric Cellular Organization. *BMC Medical Physics* 2014, 14(2):1-9.
45. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Mendoza F, Weiz G, Soracipa Y, Velásquez N, Pardo J, Martínez M, Barrios F. Physical mathematical evaluation of the cardiac dynamic applying the Zipf - Mandelbrot law. *J Mod Phys* 2015, 6: 1881-1888. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2015.613193>
46. 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): 102-108.