

DIAGNÓSTICO DE LA DINÁMICA CARDIACA DEL ADULTO EN 14 HORAS MEDIANTE UNA LEY EXPONENCIAL

DIAGNOSIS OF ADULT CARDIAC DYNAMICS IN 14 HOURS USING AN EXPONENTIAL LAW

DIAGNÓSTICO DA DINÂMICA CARDÍACA DO ADULTO EM 14 HORAS USANDO UMA LEI EXPONENCIAL

JAVIER RODRÍGUEZ¹, RUBÉN CAYCEDO², SIGNED PRIETO¹, SANDRA CATALINA CORREA¹, LIGIA VICTORIA RODRÍGUEZ¹, JUAN CARLOS LEAL¹, LAURA MENDEZ³, LAURA VALERO³, ELIANA AVILAN^{1,3}

¹ Centro de investigaciones clínicas del Country, Bogotá, Colombia

² Universidad Nacional de Colombia; hospital universitario nacional de Colombia

³ Universidad militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

RESUMEN

Introducción: se ha caracterizado el comportamiento caótico cardiaco en el marco de la teoría de los sistemas dinámicos y la geometría fractal. **Objetivo:** evaluar la dinámica cardiaca en 14 horas mediante una ley matemática fundamentada en la geometría fractal y los sistemas dinámicos para confirmar su capacidad diagnóstica al disminuir el tiempo de evaluación. **Metodología:** se tomaron 160 registros electrocardiográficos tanto continuos como ambulatorios, 60 normales y 100 patológicos. Fueron tomados en cada hora los valores de frecuencia cardiaca máxima y mínima, así mismo el total de latidos por hora de los distintos registros, con el fin de simular una secuencia en 14 y 21 horas, para posteriormente crear los atractores caóticos cardiacos de las dinámicas. Luego, se calcularon la dimensión fractal y la ocupación espacial de los atractores. Posteriormente, se aplicaron los parámetros diferenciadores entre normalidad y enfermedad inicialmente establecidos para 21 horas, en aras de evaluar la capacidad diagnóstica de la metodología en 14 horas. Se estableció el diagnóstico físico-matemático en 14 horas con su posterior validación estadística mediante el diagnóstico convencional. **Resultados:** la ocupación espacial de los atractores caóticos cardiacos evaluados mediante la ley matemática en 14 horas, presentó valores en la rejilla kp entre 200 y 374 para dinámicas normales y, 45 y 196, para dinámicas con alteraciones. **Conclusión:** la ley matemática exponencial permitió el establecimiento de diagnósticos en 14 horas y la diferenciación entre estados normales y patológicos evidenciando su utilidad clínica al reducir el tiempo de evaluación.

PALABRAS CLAVE: diagnóstico, fractal, ley del caos, sistemas dinámicos.

ABSTRACT

Introduction: chaotic cardiac behavior has been characterized by the framework of the theory of dynamic systems and fractal geometry. **Objective:** evaluate cardiac dynamics in 14 hours using a mathematical law based on fractal geometry and dynamical systems to confirm its diagnostic capacity by reducing the evaluation time. **Method:** 160 continuous and ambulatory electrocardiographic recordings were taken, 60 were normal and 100 pathological. The maximum and minimum heart rate values were taken each hour, as well as the total beats per hour of the different records, to simulate a sequence at 14 and 21 hours, to later create the chaotic cardiac attractors of the dynamics. Later on, the fractal dimension and the spatial occupation of the attractors were calculated. Subsequently, the differentiating parameters were applied between normality and disease initially established for 21, to evaluate the diagnostic capacity of the methodology in 14 hours. The physical-mathematical diagnosis was established in 14 hours with its subsequent statistical validation through conventional diagnosis. **Results:** the spatial occupation of the cardiac chaotic attractors evaluated employing the mathematical law in 14 hours, presented values in the KP grid between 200 and 374 for normal dynamics and 45 and 196 for dynamics with alterations. **Conclusion:** the exponential mathematical law allowed the establishment of diagnoses in 14 hours and the differentiation between normal and pathological states, evidencing its clinical utility by reducing the evaluation time

KEYWORDS: diagnosis, fractal, nonlinear dynamics, dynamics systems.

RESUMO

Introdução: o comportamento caótico do coração tem sido caracterizado no âmbito da teoria dos sistemas dinâmicos e da geometria fractal. **Objetivo:** avaliar a dinâmica cardíaca em 14 horas por meio de uma lei matemática baseada na geometria fractal e sistemas dinâmicos para confirmar sua capacidade diagnóstica reduzindo o tempo de avaliação. **Método:** foram realizados 160 registros eletrocardiográficos contínuos e ambulatoriais, 60 normais e 100 patológicos. Os valores de frequência cardíaca máxima e mínima foram tomados a cada hora, bem como o total de batimentos por hora dos diferentes registros, a fim de simular uma sequência às 14 e 21 horas, para posteriormente criar os atratores cardíacos caóticos da dinâmica. Em seguida, foram calculadas a dimensão fractal e a ocupação espacial dos atratores. Posteriormente, foram aplicados os parâmetros diferenciadores entre normalidade e doença inicialmente estabelecidos para 21 horas, a fim de avaliar a capacidade diagnóstica da metodologia em 14 horas. O diagnóstico físico-matemático foi estabelecido em 14 horas com sua posterior validação estatística por meio do diagnóstico convencional. **Resultados:** a ocupação espacial dos atratores caóticos cardíacos avaliados por meio da lei matemática em 14 horas, apresentou valores na grade de kp entre 200 e 374 para dinâmica normal e 45 e 196, para dinâmica com alterações. **Conclusão:** a lei matemática exponencial permitiu o estabelecimento de diagnósticos em 14 horas e a diferenciação entre os estados normal e patológico, evidenciando sua utilidade clínica pela redução do tempo de avaliação.

PALAVRAS-CHAVE: diagnóstico, fractal, dinâmica não linear, sistemas dinâmicos.

RECIBIDO: 27/12/2016

ACEPTADO: 23/02/2018

CORRESPONDENCIA: grupointsight2025@yahoo.es

DOI: <https://doi.org/10.23878/medicina.v2i2i2.872>

INTRODUCCIÓN

La teoría de los sistemas dinámicos, ampliamente empleada en distintos ámbitos, se dedica al estudio del estado y la evolución de los sistemas mediante la construcción de trayectorias que se evalúan geométricamente en un espacio conocido como espacio de fase. En dicho espacio se observan tres tipos de atractores;¹ los puntuales o cíclicos, son considerados predecibles, mientras que los atractores caóticos son catalogados como impredecibles.¹ La irregularidad de éste último tipo de atractor, es cuantificada a través de la dimensión fractal, cuyo cálculo es realizado mediante el método de Box-Counting.²⁻⁴

En el 2011 fueron reportados en Colombia un elevado número de enfermedades cardiovasculares (ECV), dentro de las cuales es menester resaltar la enfermedad isquémica cardiaca o infarto agudo de miocardio, responsable de un número elevado de desenlaces fatales. El deceso de 29.000 personas obedeció a infarto agudo de miocardio, y en promedio 80 personas murieron por día a causa de ésta condición.⁵

La importancia de las enfermedades cardiovasculares a nivel de salud pública ha conducido al análisis de distintas variables, entre las cuales figura la variabilidad de la frecuencia cardiaca. En la literatura científica se evidencian varios métodos para el análisis de dicha variable. Estos consisten en análisis espectrales y algunos métodos relacionados con el dominio del tiempo; la confiabilidad de dichos métodos depende de técnicas estadísticas, es decir, la variabilidad es evaluada a partir de promedios y desviaciones estándar.⁶ Se ha evidenciado que con la utilización de estos métodos es posible establecer relaciones entre distintas medidas y detectar alteraciones a nivel de la dinámica cardiaca; no obstante, no ha sido posible prever cuáles pacientes se dirigen hacia la muerte cardiaca súbita o infarto.

Investigaciones realizadas en el marco de la teoría de los sistemas dinámicos, permiten entrever que el sistema cardiaco exhibe un comportamiento no lineal.⁷ Ritzenberg y cols.,⁸ demostraron la no linealidad del electrocardiograma. El primer análisis de la Variabilidad de la Frecuencia Cardiaca (VFC) permitió evidenciar que el ritmo cardiaco exhibía un comportamiento no lineal, en el caso específico de pacientes con elevado riesgo de muerte cardíaca súbita, en los cuales fueron observadas variaciones espectrales abruptas y fenómenos oscilatorios de baja fre-

cuencia sostenidos. También, se ha encontrado una relación directa entre la disminución de la complejidad de la variabilidad fisiológica con un descenso en la dinámica del ritmo cardiaco previo a la presentación de muerte súbita.⁹⁻¹¹ También, medidas fractales en sujetos con fracción de eyección ventricular inferior al 35%, luego de presentar infarto agudo de miocardio establecieron parámetros predictores de mortalidad de una mayor precisión que los convencionales.¹² Han sido desarrolladas novedosas metodologías capaces de establecer diagnósticos y evaluar condiciones adversas de los pacientes, ayudando de esta manera a la toma de decisiones. Se ha evidenciado que existen rangos de valores numéricos que permiten caracterizar cuan cercana está determinada dinámica cardiaca de un estado patológico agudo, con lo cual es posible determinar el nivel de gravedad de los estados evidenciados.¹³⁻¹⁵ En ese orden de ideas, fue desarrollada una metodología con capacidad diagnóstica y predictiva que permite la evaluación de la dinámica cardiaca durante 21 horas, con la cual es posible diferenciar de manera cuantitativa normalidad y estados patológicos mediante el cálculo de la ocupación espacial de los atractores cardiacos caóticos en el espacio generalizado de Box Counting.¹⁶

Su aplicabilidad clínica y reproductibilidad, ha sido corroborada mediante una prueba diagnóstica encontrando valores de sensibilidad y especificidad del 100%¹⁷ y un coeficiente Kappa de uno. Es menester resaltar que dada la abstracción de factores causales por tratarse de un método derivado de las matemáticas y fundamentado en el método inductivo de la física teórica que evidencia los órdenes matemáticos subyacentes de manera objetiva, la metodología puede realizar diagnósticos de elevada precisión y realizar distinciones entre dinámicas con el uso de los valores máximos y mínimos de la frecuencia cardiaca (FC) y el número de latidos por hora en registros electrocardiográficos continuos y Holters.

Tomando como sustrato la metodología mencionada, fue realizado un trabajo, en el cual se estableció la capacidad diagnóstica de la misma, mediante la evaluación en 16 horas de la ocupación espacial del atractor caótico cardiaco. Este método diagnóstico representaría una herramienta de utilidad clínica, permitiendo la adecuada realización de diagnósticos y seguimientos, con ulterior disminución de costos en el ámbito clínico.¹⁸

El propósito de la presente investigación no es sólo corroborar los resultados previos, se busca realizar una aplicación clínica de la metodología en un grupo determinado de pacientes con reducción de su tiempo de evaluación a 14 horas.

METODOLOGÍA

La educación, y lavado de manos resultan eficaces. La OMS recomendó a los países como primera medida para proteger la infraestructura sanitaria, vacunar al personal que presta asistencia⁽¹⁰⁾.

DEFINICIONES

MAPA DE RETARDO

Se conoce como mapa de retardo al espacio geométrico abstracto de dos o más dimensiones, en el que se representan pares ordenados de valores de una variable dinámica consecutiva en el tiempo, generando un atractor.

MÉTODO DE BOX-COUNTING:

Cálculo matemático desarrollado para encontrar la dimensión fractal, y que se realiza a partir de la siguiente ecuación:

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

Ecuación 1

D es la dimensión fractal, N es el número de cuadros ocupado por el objeto y k corresponde al grado de partición de la cuadrícula. La ecuación 1 se simplifica, y se deja en términos de dos rejillas: Kp (cuadros pequeños) y Kg (cuadros grandes) como es observado en la siguiente ecuación:

$$D = \text{Log}_2 \frac{k_g}{k_p}$$

Ecuación 2

LEY MATEMÁTICA EXPONENCIAL:

Luego de realizar un despeje de la ecuación 2, y dejarla en términos de Kg se establece la ley matemática con la que se realiza la evaluación de los atractores caóticos cardiacos en 21 y 14 horas:

$$\implies k_p = k_g 2^D \implies k_g = \frac{k_p}{2^D}$$

Ecuación 3

D D es la dimensión fractal.

POBLACIÓN

Se seleccionaron 160 registros electrocardiográficos continuos y Holvers de mínimo 21 horas de sujetos mayores de 21 años, 60 correspondían a pacientes con dinámicas cardiacas normales y 100 correspondían a pacientes que cursaban con

patologías cardiacas, lo cual fue establecido a partir del diagnóstico por un cardiólogo experto. Los registros se seleccionaron de bases de datos del grupo Insight. Al inicio los diagnósticos establecidos por el clínico se enmascararon en aras de prevenir sesgos.

PROCEDIMIENTO

Fueron tomados los valores de frecuencia cardiaca (FC) máxima y mínima, y el total de latidos por hora durante 21 horas para la totalidad de registros electrocardiográficos. Posteriormente, de dichos registros se tomaron para cada hora los valores de la frecuencia cardiaca mínima y máxima, y la totalidad de latidos por hora, en 14 horas.

Los valores de la frecuencia cardiaca fueron introducidos en un programa previamente desarrollado, que genera una secuencia completa de frecuencias cardiacas a partir de un algoritmo equiprobable, con los valores tomados de los registros electrocardiográficos continuos y Holvers¹⁷

De manera ulterior, las secuencias se graficaron en el correspondiente mapa de retardo (ver definiciones), generando los atractores caóticos cardiacos de las diferentes dinámicas cardiacas, tanto en 14, como en 21 horas.

Luego, se aplicó el método de Box-Counting (Ecuación 1), para calcular la dimensión fractal de la totalidad de atractores caóticos de las dinámicas cardiacas, mediante la superposición de las dos rejillas empleadas (de 5 lat. /min-rejilla pequeña y 10 lat. /min-rejilla grande), y se cuantificó la ocupación espacial de los atractores. Los valores de la ocupación espacial encontrados para los diferentes atractores caóticos, en 21 y en 14 horas, se compararon con el fin de establecer si existía consistencia en sus características matemáticas, o si se hacía necesario refinar los límites diferenciadores entre estados. Finalmente, y en aras de dar lugar a el diagnóstico físico-matemático, se aplicaron los límites de normalidad y anormalidad previamente establecidos (Ecuación 3),¹⁷ mediante los cuales espacios de ocupación de los atractores caóticos cardiacos mayores a 200 en la rejilla pequeña se caracterizan como normales, en tanto que valores inferiores a 73 son indicativos de enfermedad aguda; los estados intermedios entre los dos anteriormente mencionados exhiben valores entre 74 y 199.¹⁷ Se compararon los resultados obtenidos para los diagnósticos matemáticos de las

dinámicas cardíacas durante 14 y 21 horas con el diagnóstico convencional con el fin de hallar similitudes entre ellos.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se buscó el establecimiento de concordancias o divergencias a partir de la comparación del diagnóstico mediante la metodología físico-matemática en 14 y 21 horas y el diagnóstico según parámetros médicos convencionales, tomado como patrón de oro para efectos del análisis en el contexto de un estudio ciego. Para la realización de la validación estadística, se desenmascaró la información clínica de los registros electrocardiográficos con el fin de evaluar la aplicabilidad de la metodología.

Las mediciones estadísticas se realizaron a partir de una clasificación binaria, en la que los verdaderos positivos (VP) son los casos diagnosticados tanto convencionalmente como matemáticamente con enfermedad aguda; los falsos positivos (FP) representan los casos diagnosticados por parte del experto clínico como normales y que presentaron valores matemáticos sugestivos de agudización; los falsos negativos (FN) son los casos que fueron diagnosticados matemáticamente como dentro de límites normales, pero que según el experto clínico fueron catalogados como agudos; los verdaderos negativos (VN) son los casos diagnosticados según los parámetros clínicos convencionales y según la metodología físico-matemática como dentro de límites normales. Finalmente, fue evaluada la concordancia entre el diagnóstico establecido según parámetros convencionales y el logrado a partir de la metodología físico-matemática con base en la siguiente ecuación:

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

Co representa el número de concordancias observadas, el número de pacientes con el mismo diagnóstico con la metodología matemática y con el diagnóstico clínico establecido convencionalmente; To es la totalidad de casos; Ca corresponde al número de concordancias atribuibles al azar, cuyo cálculo es realizado mediante la siguiente ecuación:

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

f1 es el número de casos con valores matemáticos que indican normalidad; C1 representa los casos

caracterizados como normales mediante el diagnóstico convencional; f2 representa el número de casos diagnosticados mediante la metodología matemática como enfermos; C2 es el número de casos caracterizados por el clínico como enfermos; To es la totalidad de casos

ASPECTOS ÉTICOS

Este trabajo es una investigación de riesgo mínimo, según lo establecido en la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud colombiano, pues se fundamenta en la realización de cálculos físico-matemáticos con base en reportes de exámenes solicitados previamente de acuerdo con protocolos médicos convencionales, protegiendo la información y la integridad de los sujetos. También cumple con los principios éticos de la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial.

RESULTADOS

El diagnóstico establecido mediante los parámetros clínicos convencionales de los registros electrocardiográficos tanto continuos como Holters puede evidenciarse en la tabla 1.

TABLA 1. DIAGNÓSTICO CLÍNICO INICIAL DE ALGUNOS DE LOS ELECTROCARDIOGRÁFICOS CONTINUOS Y/O HOLTER DEL ESTUDIO.

V	DIAGNÓSTICO
1	Normal
2	Miocardopatía primaria
3	bradicardia, arritmia en estudio
4	Normal
5	Normal
6	Fibrilación y Flutter auricular. Ectopias atriales con dupletas (4) y taquicardia atrial. Bloqueo de rama derecha. Variabilidad RR disminuida
7	síncope
8	Normal
9	Fibrilación auricular, palpitaciones
10	Flutter
11	FA Extrasistolia ventricular infrecuente monomórfica sin fenómenos repetitivos; Extrasistolia Auricular infrecuente y aislada y ocasionalmente bloqueada
12	Normal
13	miocardopatía dilatada isquémica
14	Normal
15	ACV
16	Normal
17	Normal
18	Estenosis subaórtica hipertrófica e idiopática
19	Bradicardia sinusal
20	Control médico
21	Normal
22	Normal
23	Estudio dentro de límites normales.
24	taquicardia sinusal
25	Normal
26	IAM CEST A1 kkl tipo 1

Para los casos de dinámicas cardíacas evaluadas en 21 horas, las dimensiones fractales de los atractores cardíacos normales se encontraron entre 0,881 y 1,988, y las de dinámicas anormales se hallaron entre 0,859 y 1,989. Las dimensiones fractales calculadas para los atractores cardíacos de dinámicas normales en 14 horas presentaron valores que oscilaron entre 0,877 y 2,023, y las dimensiones fractales de los atractores de dinámicas cardíacas anormales tuvieron valores entre 0,796 y 2. Los valores evidenciados se hallan en consonancia con hallazgos previamente encontrados, en los cuales se evidenció que la dimensión fractal no permite diferenciar dinámicas cardíacas con alteraciones de normales, ni para 14 ni para 21 horas, como puede observarse en la Tabla 2.

TABLA 2. ESPACIOS DE OCUPACIÓN Y DIMENSIÓN FRACTAL DE LOS ATRACTORES CARDIACOS CAÓTICOS EN 14 Y 21 HORAS, DE LOS REGISTROS ELECTROCARDIOGRÁFICOS CONTINUOS Y AMBULATORIOS DE LA TABLA 1. KP CORRESPONDE A LOS VALORES DE LA REJILLA DE CUADROS PEQUEÑOS; KG CORRESPONDE A LOS VALORES DE LA REJILLA DE CUADROS GRANDES Y DF ES LA DIMENSIÓN FRACTAL.

HOLTER NO.	21 HORAS			14 HORAS		
	KP	KG	DF	KP	KG	DF
1	201	60	1.7441611	200	58	1.78587519
2	141	45	1.64769826	143	44	1.70043972
3	176	97	0.85951878	172	99	0.79690813
4	369	93	1.98831819	374	92	2.0233325
5	270	78	1.79141338	265	76	1.80192104
6	194	55	1.81855313	196	54	1.85982234
7	128	34	1.91253716	123	35	1.81323149
8	373	146	1.35320726	369	145	1.34756792
9	130	64	1.02236781	132	64	1.04439412
10	144	48	1.5849625	145	50	1.5360529
11	117	36	1.70043972	122	34	1.8432745
12	251	93	1.43238474	256	94	1.44541115
13	106	56	0.92056553	108	55	0.97352779
14	348	99	1.81358688	346	101	1.77641674
15	71	38	0.90181961	72	40	0.84799691
16	304	165	0.8816053	305	166	0.877626
17	344	130	1.40389694	341	130	1.39126012
18	143	36	1.98994634	144	36	2
19	172	66	1.38187064	177	68	1.38014271
20	120	56	1.09953567	122	58	1.07275634
21	221	68	1.70043972	221	67	1.72181337
22	239	65	1.87849899	240	64	1.9068906
23	172	58	1.56828376	170	56	1.60203601
24	160	68	1.23446525	165	70	1.2370392
25	362	106	1.77192543	368	109	1.75537763
26	43	15	1.51937416	45	15	1.5849625

Los espacios de ocupación en la rejilla pequeña de las dinámicas cardíacas normales evaluadas en 21 horas oscilaron entre 201 y 373, en tanto que los espacios de ocupación de las dinámicas anormales se encontraron entre 43 y 194. Así mismo, los espacios de ocupación de las dinámicas normales en 14 horas para la rejilla Kp estuvieron entre 200 y 374, los espacios de ocupación de las dinámicas cardíacas patológicas se encontraron entre 45 y 196 (Tabla 2).

Tras la evaluación de los espacios de ocupación en la rejilla Kg en 21 horas se encontró que las dinámicas cardíacas normales presentaron valores entre 60 y 165 en tanto que las anormales exhibieron valores entre 15 y 97. Los espacios de ocupación de las dinámicas en la rejilla Kg en 14 horas mostraron valores para normalidad que se encontraron entre 58 y 166, mientras que para anormalidad los valores se hallaron entre 15 y 99 (Tabla 2). Los diagnósticos matemáticos en 14 y 21 horas coincidieron para todos los análisis realizados.

Los resultados hallados confirmaron que los límites preestablecidos para normalidad y para estados patológicos agudos mediante la ley matemática exponencial aplicada en 21 horas, permiten diagnosticar de forma acertada y con elevada precisión en 14 horas, mediante la evaluación de los espacios de ocupación de los atractores caóticos cardíacos en la rejilla Kp. Los resultados obtenidos se confirmaron mediante la validación estadística, evidenciando valores de sensibilidad y especificidad del orden del 100%, y un coeficiente Kappa igual a 1. En la figura 1 se muestran los atractores de una dinámica normal y otra anormal; en dicha figura se evidencia la diferencia de tamaño entre estos dos atractores. Se aprecia que las dinámicas normales exhiben un tamaño mucho mayor que las dinámicas agudas.

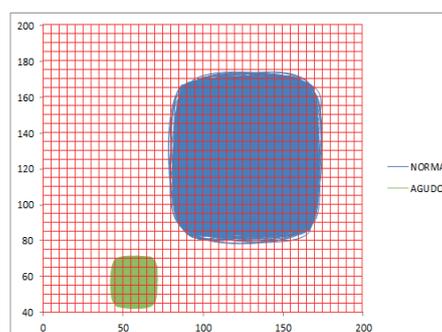


Figura 1. Atractores para una dinámica normal y aguda en 14 horas con la rejilla Kp sobrepuesta, con valores para la rejilla Kp=368 y Kg=109 para la dinámica normal (No. 25 de la tabla 2) y para la dinámica aguda con valores de Kp=45 y Kg=15 (No. 26 de la tabla 2).

DISCUSIÓN

Este es el primer trabajo en el que se corrobora la aplicación clínica de una metodología fundamentada en la teoría de los sistemas dinámicos y la geometría fractal con una reducción del tiempo de evaluación a 14 horas con 160 registros de frecuencias cardíacas. Se evidencia que dicha metodología, cuyo epicentro es una ley matemática exponencial, permite diagnosticar la dinámica cardíaca y establecer diferenciaciones entre estados de normalidad y agudización con información contenida en los registros electrocardiográficos tanto continuos como ambulatorios, y mediante la cuantificación de los espacios de ocupación de atractores caóticos cardíacos en el espacio generalizado de Box Counting. Los resultados encontrados en la presente investigación evidencian que es posible establecer diferencias cuantitativas y reproducibles, entre las distintas dinámicas cardíacas mediante la metodología empleada. Se encontraron valores de sensibilidad y especificidad del 100% y coeficiente Kappa de 1, con lo cual se estableció su validación estadística; no obstante, el método aplicado por obedecer al método inductivo de la física teórica, basa su fundamentación en la perspectiva acausal, donde a partir de abstracciones e inducciones se establecen generalizaciones con pocos casos que posteriormente pueden ser aplicadas a cada caso particular, teniendo en cuenta los órdenes matemáticos subyacentes, al margen de consideraciones de tipo poblacional, factores de riesgo u otros.

Previamente se estableció que mediante los espacios de ocupación de los atractores caóticos cardíacos era posible diferenciar cuantitativamente normalidad de enfermedad aguda, en 21^{16,17} y 16 horas.¹⁸ En trabajos anteriores se estableció que era posible establecer rangos de normalidad con valores de 200 a 478 en la rejilla pequeña, en tanto que los estados agudos presentaban valores inferiores a 73, y los estados intermedios presentaban valores que se hallaban en el rango comprendido entre 74 y 199, aspecto que fue confirmado en el presente trabajo, que es basado en la perspectiva acausal de las matemáticas y la física teórica moderna. Los trabajos desarrollados por Goldberger y col.¹¹ en el contexto de esta perspectiva desafiaron las nociones fisiológicas preestablecidas del principio de homeostasis, al mostrar que la dinámica cardíaca anormal se relaciona con comportamientos con elevada regularidad o aleatoriedad, en tanto que la normalidad exhibe un comportamiento intermedio

los extremos mencionados. En los trabajos de Goldberger, se evidencia una tendencia general de la dinámica cardíaca, en la cual la normalidad es comprendida como un estado intermedio entre estados extremos; no obstante, no se tenían valores específicos que permitieran determinar diagnósticos clínicos.¹¹ El presente trabajo, que sigue los lineamientos de la misma perspectiva y permite corroborar lo planteado por Goldberger, sin embargo establece parámetros numéricos capaces de establecer diferenciaciones entre normalidad y anormalidad.

La validez del presente estudio subyace al tipo de metodología en el cual se fundamenta. Por ser un método basado en el razonamiento inductivo de la física teórica, permite establecer afirmaciones universales, con base en la evidencia de un orden matemático; en éste caso, la variación progresiva de la ocupación espacial de los atractores caóticos cardíacos refleja una auto-organización matemática del sistema dinámico, lo cual permite su aplicación a cualquier caso.

Las señales eléctricas cardíacas son reproducidas gráficamente a través de la electrocardiografía, herramienta utilizada con el fin de detectar alteraciones del ritmo cardíaco, entre otras anomalías.¹⁸ La monitorización puede ser realizada mediante un Holter o monitores que realizan registro electrocardiográfico continuo¹⁸ y que son ampliamente empleados en Unidades de Cuidado Intensivo. No obstante, aún no es posible predecir con base en estas herramientas de ayuda diagnóstica y clínica las dinámicas cardíacas que se dirigen a infarto agudo de miocardio o muerte cardíaca súbita, lo anterior sumado a la subjetividad inherente a la interpretación clínica. Se ha incorporado al estudio de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca la teoría de los sistemas dinámicos y la geometría fractal.¹⁹ Pese a ello, aún la aplicabilidad clínica de metodologías con dicha fundamentación está siendo estudiada.¹⁹ La metodología aplicada en el presente estudio, por su parte, es capaz de realizar diagnósticos en cualquier caso particular con base en la ocupación espacial de los atractores, de gran utilidad para la práctica clínica.

Diversos trabajos han sido desarrollados en aras de realizar evaluaciones objetivas de la dinámica cardíaca del adulto, a la luz de esta perspectiva físico-matemática. Mediante un método matemático, se dedujeron y evaluaron la totalidad de las posibles dinámicas cardíacas.¹⁴ Recien-

temente, dicha metodología permitió evaluar la dinámica cardiaca neonatal, prediciendo alteraciones cardiacas relacionadas con sepsis.²⁰ Así mismo, fue validada en un estudio ciego con 115 registros electrocardiográficos ambulatorios, encontrando valores de sensibilidad y especificidad del orden del 100%;²¹ también fue aplicada a pacientes con diagnóstico de arritmia.²²

Fue desarrollada una metodología basada en la teoría de probabilidad y las proporciones de entropía, capaz de establecer diferencias cuantitativas y objetivas entre normalidad, enfermedad crónica, estados de agudización y en evolución.¹³

Fue confirmada su aplicación clínica en distintas pruebas diagnósticas con 300, 450 y 600, dinámicas cardiacas²³⁻²⁵ evidenciando su utilidad diagnóstica en pacientes de la unidad de cuidados coronarios,^{26,27} luego de la realización de intervenciones, consolidándose como un diagnóstico realizado al margen de los parámetros empleados en la actualidad, y permitiendo la detección de procesos de agudización que han sido subdiagnosticados.²⁸

En concordancia con la perspectiva inherente a la física teórica moderna,^{29,30} ésta metodología permite establecer diferencias cuantitativas, objetivas y reproducibles independiente de consideraciones de tipo epidemiológico o poblacional, a la luz de un razonamiento acausal. Bajo ésta misma perspectiva han sido desarrolladas distintas metodologías en ámbitos como la inmunología,³¹ la salud pública en la predicción de epidemias,^{32,33} la morfometría de diversas estructuras,³⁴⁻³⁸ la infectología, en el caso de pacientes con infección por virus del VIH,³⁹ y la predicción de mortalidad en pacientes de la UCI,⁴⁰ entre otros.

CONCLUSIÓN

La ley matemática exponencial permitió el establecimiento de diagnósticos en 14 horas y la diferenciación entre estados normales y patológicos evidenciando su utilidad clínica al reducir el tiempo de evaluación.

DEDICATORIA

A nuestros hijos.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. p. 3-17.
3. Falconer K. Fractal geometry. Mathematical Foundations and Applications. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2003. p. 41-43.
4. Peitgen H. Strange attractors, the locus of chaos. En: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. New York: Springer-Verlag; 1992. p. 655-768.
5. 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>
6. Gallo J, Farbiarz J, Alvarez D. Análisis espectral de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. *Iatreia*. 1999; 12(2): 61-71.
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. NY Acad. Sci*. 1987; 504: 195-213.
10. Goldberger AL, Rigney DR, Mietus J, Antman EM, Greenwald S. Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*. 1988; 44: 983-87.
11. Goldberger A, Amaral L, Hausdorff J, Ivanov P, Peng C, Stanley H. 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, Goldberger AL, Hintze U, Møller M, 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. Entropía Proporcional de los sistemas dinámicos cardiacos: Predicciones físicas y matemáticas de la dinámica cardiaca.

- ca de aplicación clínica. *Rev Colomb Cardiol.* 2010; 17:115-129.
14. Rodríguez, J. Mathematical law of chaotic cardiac dynamics: Predictions for clinical application. *J Med Med Sci.* 2011; 2(8):1050-59.
 15. Rodríguez J, Correa C, Ortiz L, Prieto S, Bernal P, Ayala J. Evaluación matemática de la dinámica cardiaca con la teoría de la probabilidad. *Rev Mex Cardiol.* 2009; 20(4):183-89.
 16. Rodríguez J, Prieto S, Avilán N, Correa C, Bernal P, Ortiz L, Ayala J. Nueva metodología física y matemática de evaluación del Holter. *Rev Colomb Cardiol.* 2008; 15: 50-4.
 17. Rodríguez J, Prieto S, Bernal P, Soracipa Y, Salazar G, Isaza D, et al. Nueva metodología de ayuda diagnóstica de la dinámica geométrica cardiaca: dinámica cardiaca caótica del Holter. *Rev Acad Colomb Cienc.* 2011; 35(134): 5-12.
 18. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Oliveros H, Soracipa Y, Amaya J, et al. Sistemas dinámicos aplicados a la disminución del tiempo de diagnóstico de la dinámica cardiaca de 24 a 16 horas en holter y registros electrocardiográficos continuos. X Congreso de Medicina Crítica y Cuidado Intensivo. Cartagena, Colombia. 2015
 19. Voss A, Schulz S, Schroeder R, Baumert M, Caminal P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. *Phil Trans R Soc A* 2009; 367, 277-96.
 20. Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, Alarcón C, López R, Aguirre G, et al. Physical-mathematical diagnosis of cardiac dynamic on neonatal sepsis: predictions of clinical application. *J Med Med Sci.* 2014; 5(5): 102-8.
 21. Rodríguez J, Correa C, Melo M, Domínguez, D, Prieto S, Cardona DM, et al. Chaotic cardiac law: Developing predictions of clinical application. *J Med Med Sci* 2013;4(2): 79-84.
 22. Rodríguez J, Narváez R, Prieto S, Correa C, Bernal P, Aguirre G, et al. The mathematical law of chaotic dynamics applied to cardiac arrhythmias. *J Med Med Sci.* 2013; 4(7): 291-300.
 23. Rodriguez J. Proportional Entropy of the cardiac dynamics in CCU patients. 7th International Meeting of Acute Cardiac Care, Tel Aviv-Israel. 2011.
 24. Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, Melo M, Mendoza F, Correa C, et al. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. *J Med Med Sci.* 2013; 4(8): 370-81.
 25. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Soracipa Y, Aguirre G, Méndez L. Proportional entropy applied to the clinical diagnostic of cardiac dynamic: blind study with 600 holter. The 61st Annual Conference of the Israel Heart Society in association with The Israel Society of Cardiothoracic Surgery. 2014.
 26. Rodríguez J, Prieto S, Bernal P, Izasa D, Salazar G, Correa C, Soracipa Y. Entropía proporcional aplicada a la evolución de la dinámica cardiaca. Predicciones de aplicación clínica. En: Rodríguez LG, Coordinador. La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina: desafíos, contribuciones y compromisos para abordar los problemas complejos del siglo XXI. Tomo 1,1a ed. Buenos Aires: Comunidad Editora Latinoamericana; 2015. p. 315-44.
 27. 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. *Journal of Modern Physics* 2015, 6: 1881-1888. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2015.613193>
 28. Rodríguez J. Proportional Entropy applied to the Clinic Prediction of Cardiac Dynamics. Innovations in Cardiovascular Interventions. ICI meeting, Tel Aviv-Israel. 2012.
 29. Feynman R, Leighton R, Sands M. Leyes de Newton de la Dinámica. En R. Feynman, R. Leighton, M. Sands. Física. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A.; 1987. p. 9-1 - 9-14.
 30. Feynman R, Leighton, R, Sands, M. Comportamiento cuántico. En R. Feynman, R. Leighton, M. Sands. Física. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A. 1987. p. 37-1 - 37-16.
 31. Rodríguez J, Bernal P, Álvarez L, Pabón S, Ibáñez S, Chapuel N, et al. Predicción de unión de péptidos de MSP-1 y EBA-140 de plasmodium falciparum al HLA clase II Probabilidad, combinatoria y entropía aplicadas a secuencias peptídicas. *Rev Inmunología.* 2010;29 (3):91-9.
 32. 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.
 33. Rodríguez J, Correa C. Predicción temporal de la epidemia de dengue en Colombia: Dinámica Probabilista de la Epidemia. *Rev. salud pública.* 2009; 11(3): 443-53.

34. Rodríguez J, Prieto S, Ortiz L, Avilán N, Álvarez L, Correa C, et al. Comportamiento fractal del ventrículo izquierdo durante la dinámica cardiaca Rev Colomb Cardiol. 2006; 13: 165-70.
35. Correa C, Rodríguez J, Prieto S, Álvarez L, Ospino B, Munévar A, et al. Geometric diagnosis of erythrocyte morphophysiology. J. Med. Med. Sci. 2012; 3(11): 715-20.
36. 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 Med Phys 2010;10:1-6. <http://www.biomedcentral.com/1756-6649/10/1>
37. 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.
38. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Dominguez 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.
39. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Pérez C, Mora J, Bravo J, et al. Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. BMC Medical Physics. 2013; 13:3.
40. 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.