**Análisis de la dinámica cardiaca en población peruana a partir de una metodología fisicomatemática basada en los sistemas dinámicos y la geometría fractal**

Sandra Catalina Correa Herrera1, Agueda Rossangella Muñoz del CarpioToia2, Signed Esperanza Prieto Bohórquez3, Jairo Javier Jattin Balcázar4, Ribká Soracipa Muñoz5, Esmeralda Esther Guzmán de la Rosa6, Joselyn Elizabeth Begazo Paredes7, Bárbara Alejandra García Tejada8, José Alfredo Sulla Torres9, Herwin Alayn Huillcen Baca10.

1 Investigadora Grupo de Investigación Armonía. Centro de Investigación y Atención Psicosocial Hanami. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-4998-1228>

2 Docente investigadora. Vicerrectorado de Investigación, Escuela de Postgrado. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. <https://orcid.org/0000-0003-1739-1725>

3 Investigadora. Grupo Insight. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7896-231X>

4 Investigador Grupo de Investigación Armonía. Centro de Investigación y Atención Psicosocial Hanami. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-1401-2710>

5 Investigadora Grupo de Investigación Armonía. Centro de Investigación y Atención Psicosocial Hanami. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7997-6561>

6 Médica. Universidad Nacional de Colombia. Matemática, Pontificia Universidad Javeriana. https://orcid.org/0000-0001-6570-6352

7 Médica Cardióloga. Hospital III Yanahuara. Arequipa, Perú. <https://orcid.org/0000-0003-1739-1725>

8 Médica Cardióloga. Hospital III Goyeneche. Arequipa, Perú. [https://orcid.org/0009-0002-8288-7540](https://orcid.org/0009-0002-8288-7540/)

9 Docente Investigador. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. <https://orcid.org/0000-0001-5129-430X>

10 Docente. Universidad Nacional José María Arguedas. Andahuaylas, Perú. <https://orcid.org/0000-0001-9385-7940>

Dirección para correspondencia: Sandra Catalina Correa Herrera. Cra. 47 No 22-83 Apto 204, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: investigacion.hanami@gmail.com.

**Resumen**

**Introducción:** Las enfermedades cardiacas en Perú son un grave problema de salud pública, haciendo necesario implementar métodos de detección y estratificación de riesgo. Medidas de la dinámica cardiaca desde los sistemas dinámicos y la geometría fractal han permitido establecer diferencias diagnósticas en otras poblaciones. **Objetivo:** aplicar una metodología de evaluación cardíaca basada en los sistemas dinámicos y la geometría fractal y ajustar sus parámetros diagnósticos a una muestra de población peruana. **Metodología:** Se tomaron los valores de frecuencia cardiaca y latidos/hora, durante 24 horas de 230 casos, 118 normales y 112 on diferentes patologías cardiacas, a partir de estudios Holter. Se construyeron atractores para lograr la evaluación del espacio que ocupa cada atractor y se determinó su dimensión fractal. Con base en estas medidas se establecieron límites de normalidad y anormalidad, así como una estratificación de riesgo que proporciona un subnivel intermedio y un estado crítico para estados patológicos. Los resultados fueron contrastados mediante el coeficiente Kappa de Cohen en el que la evaluación clínica convencional fue considerada como Gold Estándar, realizando una tabla 2x2 para evaluar la capacidad de discriminar normalidad de enfermedad, y una tabla 3x3 para establecer la capacidad de estratificación de los estados patológicos. **Resultados:** La muestra presentó una proporción mayor de hombres (56%); las edades fluctuaron entre 18 y 95 años, con una media de edad de 56,5±38,5 años. Se encontraron valores de sensibilidad de 0,705, especificidad de 0,907, VPP de 0,878 y VPN de 0,764. El coeficiente kappa de Cohen para la tabla 2x2 fue de 0,62 (95% CI, 0.50-0.73) y para la tabla 3x3 fue de 0,45 (95% CI, 0.34-0.55). **Conclusión:** se logró un grado de acuerdo sustancial para la diferenciación entre normalidad y enfermedad, y moderado para la estratificación de estados patológicos, potencialmente extrapolable a muestras mayores de población peruana.

**Palabras clave:** Monitoreo cardíaco; Frecuencia cardiaca; Geometría fractal; Sistemas dinámicos, Holter.

**Funding details:** Proyecto de Investigación Aplicada 2022-02 E041-2022-02. Proyecto "Diagnóstico y seguimiento cardíaco mediante una metodología fisicomatemática basada en la geometría fractal y los sistemas dinámicos incorporadas en tecnologías vestibles". Proyectos de Investigación Aplicada 2022-2, código PE501080050-2022 - PROCIENCIA CONCYTEC. Perú.

**Disclosure statements:** The authors report no conflict of interest.

**Introducción**

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades cardiovasculares son una de las principales causas de muerte a nivel mundial y representan más del 30% de todas las muertes registradas en el mundo (1), también afirma que son prevenibles y que es importante detectarlas lo antes posible. En diferentes regiones del mundo continúa siendo la principal causa de muerte (2–6). Se estima que entre 1990 y 2019 los casos prevalentes de enfermedades cardiovasculares casi se duplicaron pasando de 271 millones a 523 millones, y para este último año el número de casos ascendió a 18,6 millones (7). Más de las tres cuartas partes de las muertes por enfermedades cardiovasculares se producen en países de ingresos bajos y medios, lo que supone una gran carga económica para estos países (1). En Perú, se estima que la pérdida de producto interno bruto (PIB) debido a las ECV son de USD$39.9 billones (8).

De acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud el 20% de las muertes registradas en Perú en 2016 fueron por ECV (9), una tendencia que se había documentado ya desde el 2010, año en el que se registró que, de todas las muertes prematuras registradas para la población entre 30 a 69 años, el 16% estuvo relacionado con enfermedades cardiovasculares para la población masculina, y el 15% para la población femenina (10).

Estimaciones de la prevalencia de la salud cardiovascular ideal en el Perú muestran que esta es baja, como lo muestra un estudio que encontró que ninguno de los participantes logró una medida de salud cardiovascular satisfactoria (11). Además, el estudio encontró que las personas en el tercil más bajo de estado socioeconómico, aquellos en los terciles medio y alto tenían menos posibilidades de tener una salud cardiovascular ideal luego de ajustar los resultados por sexo, edad y educación (11). Teniendo en cuenta que se ha encontrado que en Perú más del 60% de la población tiene sobrepeso (12), es importante señalar que incluso los jóvenes peruanos presentan factores de riesgo elevados para el posterior desarrollo de enfermedades cardiovasculares (13). Esta situación muestra la alta carga y severidad de la enfermedad en el Perú.

Ante esta problemática en la salud, es necesario validar métodos que evalúen la totalidad de la dinámica cardiaca y permitan establecer un diagnóstico general cuantitativo de su estado y gravedad, lo que ayudará a tomar decisiones diagnósticas, distinguir entre gravedad y complejidad. Con esto en mente, el abordaje de la dinámica cardiaca desde matemática no lineal, ha permitido desarrollar metodologías que permiten distinguir normalidad de anormalidad como ha sido el caso en estudios previos de registros Holter (14), donde se ha logrado reafirmar que el sistema cardiovascular presenta un comportamiento no lineal (15), es decir, que no se puede esperar que con el tiempo este tipo de comportamientos obedezca los principios físicos y matemáticos de un movimiento senoidal. Esta no linealidad ha sido demostrada en el electrocardiograma (16), en pacientes con alto riesgo de muerte cardiaca súbita, mediante un análisis hecho a la Variabilidad de la Frecuencia Cardiaca (VFC), más aún, se encuentran estudios que establecen una pérdida de la complejidad de la variabilidad fisiológica con la reducción de la dinámica del ritmo cardíaco antes de la muerte súbita y el envejecimiento (14,17-19). Desde la aplicación de la geometría fractal, se han establecido predictores de mortalidad más precisos que los logrados convencionalmente en pacientes con fracción de eyección menor al 35% después de infarto agudo de miocardio (19).

Estas metodologías desarrolladas en el área de cardiología permiten establecer diagnósticos aplicables a la clínica, que al ser puestos en práctica facilitarían al especialista la toma de decisiones oportunas en situaciones adversas, así como su correcto seguimiento. La precisión de estas metodologías radica en el establecimiento de órdenes matemáticos, cuyos rangos de valores numéricos permiten establecer si la dinámica cardiaca se encuentra cerca o lejos de un estado agudo, indicando así el nivel de gravedad de las alteraciones detectadas (20-21).

A partir de lo anteriormente mencionado, esta investigación tuvo como propósito aplicar la metodología descrita en una muestra de población peruana y ajustar sus parámetros diagnósticos de acuerdo con las características de la una muestra.

**Metodología**

**Definiciones**

**Mapa de retardo:** clase de atractor donde se simboliza gráficamente la dinámica de un sistema, estableciendo pares ordenados de valores de una variable dinámica sucesiva en el tiempo en un espacio de dos o más dimensiones.

**Fractal:** objeto irregular o irregularidad del mismo.

**Dimensión fractal:** medida numérica que evalúa la irregularidad de un objeto. En esta investigación se utilizará la definición de dimensión fractal de Box- Counting.

**Dimensión fractal de Box-Counting:**

Ecuación 1

D: Dimensión fractal.

N1: Número de cuadros que contiene el contorno del objeto con la cuadrícula de partición K.

N2: Número de cuadros que contiene el contorno del objeto con la cuadrícula de partición K+1.

K: Grado de partición de la cuadrícula 1. K+1: Grado de partición de la cuadrícula 2.

**Procedimiento**

Se realizó un muestreo por conveniencia que incluyó en total de 230 registros Holter donde 112 pertenecían a individuos con antecedentes de enfermedad cardiaca y 118 correspondían a individuos normales, pertenecientes a servicios de salud de atención primaria, Clínica Aliviari de la UCSM y de los 2 Hospitales del MINSA de la Región Arequipa. Los diagnósticos de estos registros fueron establecidos por parte de un especialista en cardiología, a quien se le pidió que estableciera un diagnóstico de normalidad o arritmia, y que estableciera para los casos de arritmia dos niveles de gravedad, que fueron denominados estado Intermedio y Agudo, respectivamente.

Inicialmente se sistematizaron los valores de la frecuencia cardiaca máxima y mínima cada hora, y el total de latidos por cada hora de los registros Holter de los individuos normales y registros electrocardiográficos continuos para pacientes con afecciones cardiovasculares, durante 24 horas. Para diseñar en el mapa de retardo de cada uno de los atractores se generó una secuencia de frecuencias cardiacas mediante los valores de la frecuencia cardiaca máxima y mínima para cada hora y el número de latidos por hora, de esta forma se obtuvo una secuencia numérica de frecuencias cardiacas, con la cual se establecieron parejas ordenadas, las cuales fueron graficadas en un atractor. Posteriormente, se calculó la dimensión fractal del atractor y se llevó a cabo el conteo de espacios de ocupación mediante la superposición de dos rejillas de 5 y 10 lat/min, denominadas Kp y Kg respectivamente.

Con base en estas medidas se establecieron diferencias entre normalidad y enfermedad, así como una estratificación de riesgo que proporciona un subnivel intermedio y un estado crítico para estados patológicos. Para establecer el diagnóstico físico-matemático se evaluaron los espacios de ocupación de los atractores en la rejilla Kp. Trabajos previos habían evidenciado que los estados más críticos se asociaban a valores menores a 100, mientras que casos normales o con enfermedades crónicas presentaban valores superiores a 200 y los valores entre 100 y 200 correspondían a un estado intermedio o de evolución entre estos estados (22). Desde esta base se analizaron los valores hallados para la muestra estudiada, y se ajustaron los valores límite para cada estado de acuerdo con sus características, estableciendo el comportamiento matemático característico de cada uno de los estados desde esta metodología.

**Análisis estadístico**

Luego de aplicar el método y de haber obtenido diagnósticos matemáticos de acuerdo con los límites establecidos para la muestra, se realizó un contraste del diagnóstico obtenido con respecto al estándar clínico, tomado en esta investigación como patrón de oro, lo cual permitió validar la sensibilidad, especificidad, Valor Predictivo Positivo (VPP) y Valor Predictivo Negativo (VPN) del método matemático, así como el coeficiente Kappa para evaluar la concordancia diagnóstcica más allá del azar. Teniendo en cuenta que se buscaba no sólo establecer la capacidad del método para diferenciar normalidad de enfermedad, sino su capacidad para estratificar el nivel de gravedad de los estados patológicos, se realizaron dos análisis del coeficiente Kappa. Mediante el primero se estableció la capacidad del método para diferenciar normalidad de enfermedad, para lo cual se estableció una clasificación binaria mediante una tabla de 2x2 donde los verdaderos positivos (VP) son aquellos casos de los Holter diagnosticados con enfermedad aguda y en estado intermedio desde el punto de vista clínico tradicional y matemático; los falsos positivos (FP) son los que fueron matemáticamente diagnosticados con enfermedad aguda o en estado intermedio pero que tuvieron un diagnóstico convencional dentro de límites normales; los falsos negativos (FN) son aquellos casos diagnosticados matemáticamente como normales pero cuyo diagnóstico convencional es de enfermedad aguda o en estado intermedio, y finalmente los verdaderos negativos (VN) son aquellos registros cuyo diagnóstico matemático y convencional se define dentro de límites normales. Para el segundo se aplicó el coeficiente Kappa de Cohen ajustado a una tabla 3x3, con el fin de establecer la capacidad de estratificar los casos patológicos.

**Aspectos éticos**

Siguiendo el artículo 11 de la resolución 008430 de 1993, del Ministerio de salud, se establece que el tipo de riesgo que presenta la investigación es mínimo, clasificándose en la categoría de investigación sin riesgo, pues se hacen cálculos físicos sobre resultados de exámenes no invasivos de la práctica clínica que han sido prescritos médicamente, protegiendo el anonimato y la integridad de los participantes.  Asimismo, se presentó el estudio a los participantes en el proceso de toma de consentimiento informado y se obtuvo su consentimiento libre e informado voluntario.

**Resultados**

La muestra estudiada tuvo una proporción de hombres (56%) ligeramente mayor que de mujeres (44%). Sus edades se encontraron entre los 18 y los 95 años, con una media de edad de 56,5±38,5 años. De acuerdo con la estratificación realizada por la cardióloga experta se hallaron 46 sujetos en estado agudo o crítico, 118 normales y 66 sujetos en estado intermedio o de evolución entre los dos estados anteriores. El diagnóstico clínico de los registros holter se puede observar en la Tabla 1.

La dimensión fractal de los casos normales presentó valores entre 1,524 y 2 y para los casos patológicos los valores se encontraron entre 1,447 y 2. Estos resultados corroboran hallazgos previos que indican que los valores de la dimensión fractal no permiten hacer distinciones entre las dinámicas cardiacas (22).

Los atractores de los casos clínicamente normales evaluados con la rejilla Kp mostraron espacios de ocupación entre 92 y 610, mientras que para las dinámicas anormales el rango estuvo entre 25 y 1572. Por otro lado la ocupación espacial de los atractores en la rejilla Kg osciló entre 32 y 157 para los casos normales y entre 9 y 583 para los anormales (ver Tabla  2).

Luego de analizar las medidas de ocupación espacial en la rejilla Kp se establecieron los siguientes valores límite para el diagnóstico matemático:

* Normalidad: corresponde a valores entre 145 y 399.
* Estado intermedio: corresponde a los intervalos entre 100 y 144 y entre 400 y 699.
* Dinámica crítica o potencialmente inestable: corresponde a valores inferiores a 100 o iguales o superiores a 700.

De acuerdo con estos límites matemáticos se encontraron 140 casos normales, 70 en estado intermedio y 20 en estado crítico. Al contrastar estos límites matemáticos con el diagnóstico convencional, se encontraron valores de sensibilidad de 0,705, especificidad de 0,907, VPP de 0,878 y VPN de 0,764. El coeficiente kappa de Cohen para la tabla 2x2 fue de 0,62 (95% CI, 0.50-0.73) y para la tabla 3x3 fue de 0,45 (95% CI, 0.34-0.55).

**Tabla 1.** Información clínica de 30 de los casos analizados.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **No** | **EDAD**  **/SEXO** | **INDICACION HOLTER** | **CONCLUSIONES** |
| 1 | 88/F | Arritmia cardiaca | Ritmo sinusal de base con variaciones circadianas de la FC conservadas, no alteraciones de QT, ni carga isquémica ESV y supraventricular de baja no pausas significativas y FA paroxística no sintomática. |
| 2 | 21/F | Palpitaciones, cefalea | Ritmo sinusal de base durante todo el estudio episodios de taquicardia sinusal hasta 142 lpm a correlacionar con cuadro clínico CAPS moderada cantidad, no CVP no pausas significativas, no cambios del segmento st variabilidad de FC adecuada. |
| 3 | 76/M | Arritmia cardiaca | Total de 142882 latidos de los que 714 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aisladas, con evidencia de al menos 6 dupletes ventriculares, sin rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular. Hasta 1038 ESV aisladas, 468 dupletes sv, 267 rachas de taquicardia no sostenidas y sostenidas, sugestivas de FA con conducción AV normal y respuesta ventricular rápida, FC con tendencia a taquicardia, ritmo circadiano conservado, no pausas significativas y conducción AV normal. |
| 4 | 25/F | Despolarización ventricular prematura | Ritmo sinusal de base, presencia de ESV de baja carga (100 latido de extrasistolia en 24 horas de origen aparente de ventrículo izquierdo), no pausas, no bloqueos, no episodios de FA, TSV ni TV. |
| 5 | 53/F | Palpitaciones | Ritmo sinusal de base que intercala por momentos con ritmo auricular, episodios de TSV, impresiona de primera mano TA vs FA, ESV monomorfa de baja densidad, por momentos bigeminismo ventricular y no se aprecia bradiarritmias o pausas significativas. |
| 6 | 25/F | Obesidad debido a exceso de calo | No ESSV, ni episodios de TA. No pausas significativas, actividad física durante taquicardia, concordante con sintomatología. |
| 7 | 57/M | Cardiomiopatía no específica | Ritmo sinusal de base, CAPS de baja densidad, episodios de TPSV, no FA, CVP de alta densidad (18%), bigeminismo ventricular frecuente con acoplamiento corto 1, trigeminia ventricular, dupletas ventriculares polimorficas y extrasisoles aisladas frecuentes, no episodios de TV sostenida y no pausas significativas. |
| 8 | 52/M | Cardiomiopatía | Total de 99119 latidos de los que 1 han sido clasificado como latidos ventriculares, siendo ESV aislada, no dupletes, no rachas de taquicardia, no sostenida o sostenida ventricular, 2 ESSV aislados, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 9 | 25/F | Palpitaciones, sincopes en la infancia, dolor torácico | Ritmo sinusal con qrs estrecho, 2 ESSV, episodios registrados como taquicardias son todas sinusales, no pausas, ni bloqueos, ni arritmias complejas, en diario de eventos clínicos se registran dos eventos de dolor torácico y disnea que no se corresponden con hallazgos específicos en el electrocardiograma. |
| 10 | 33/M | Extrasistolia ventricular | Total de 122325 latidos de los que 2138 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aislada, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 1 ESSV aislado, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 11 | 49/F | Taquicardia no especifica | No hay descripción de síntomas, Total de 102276 latidos de los que 2 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aislados, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular,4 ESSV aislados, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 12 | 41/M | Arritmia cardiaca | Total de 88861 latidos de los que 50 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aisladas en su mayoría, con un duplete ventricular, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 11 ESSV aislados, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 13 | 66/M | Arritmia por reentrada ventricular | Ritmo sinusal, no se registraron episodios de FA, no se registraron pausas >2.5 segs., ni episodios de bloqueo AV, no se registraron alteraciones del segmento st, intervalo qtc dentro de rango normal, ESSV mínima y asintomática (se registraron 4 ESSV aisladas),1 episodio corto y asintomático de TSV de 7 latidos a 117lpm., ESV monomórfica de alta densidad, total de 9740 ESV, con 14 dobletes ventriculares, 17 episodios de bigemisnismo ventricular, 454 episodios de trigeminismo ventricular, no se registraron episodios de TV y algunos episodios de apnea/hipopnea en análisis EDR. |
| 14 | 63/M | Bradicardia | No hay descripción de síntomas, total de 80978 latidos de los que 27 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aislados, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 84 ESSV aislados, 1 duplete supraventricular, 1 triplete supraventricular, sin rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, FC en rangos normales, ritmo circadiano conservado, conducción AV normal y pausas no significativas (rr más largo de 2.3 segundos en horario nocturno). |
| 15 | 73/F | Síndrome de pre excitación | Ritmo sinusal de base durante todo el estudio, extrasistolia supraventricular de leve a moderada frecuencia, en bigeminismo por momentos, no se aprecia pausas signficativas mayores de 2.5 segundos y no taquiarritmias. |
| 16 | 41/F | Síncope y colapso | Ritmo sinusal durante todo el estudio. No episodios de FA., ritmo circadiano de la FC levemente atenuado (IC: 1.23). VFC normal con datos de bajo riesgo, predominio parasimpático, no pausas >2.5 segs., no episodios de bloqueo AV., no alteraciones del st-t. ESSV mínima (1), no episodios de TSV, no ESV ni episodios de taquicardia ventricular, algunos episodio sugestivos de apnea/hipopnea del sueño en análisis EDR y no síntomas. |
| 17 | 57/F | Síncope y colapso | Ritmo sinusal de base con QRS estrecho. ESV de baja densidad, no episodios de TPSV, Extrasistoles ventriculares aisladas, no FV ni TV y no pausas. |
| 18 | 38/M | Bradicardia | No episodios de FA., bradicardia sinusal nocturna fisiológica. VFC normal. Predominio parasimpático, no pausas >2.5 segs., ni bloqueos AV, no alteraciones del ST, QTc dentro de rango normal, no arritmias y epidosios de apnea/hipopnea en análisis EDR. |
| 19 | 58/M | Arritmia cardiaca no especifica | Ritmo sinusal, descripción de síntomas sin correspondencia arrítmica, total de 99312 latidos de los que 194 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESVaislados, no dupletes ni rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 26 ESSVaislados, un duplete supraventricular, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular. FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 20 | 55/M | Arritmia | Ritmo sinusal durante todo el estudio. No episodios de FA. , ritmo circadiano de la FC atenuado (IC: 1.18), VFC levemente reducida (sdnn: 72 ms) con datos de riesgo moderado, predominio parasimpático, no se registraron pausas >2.5 segs. o episodios de bloqueo AV. - Tendencia a la taquicardia sinusal. FC promedio de 97 lpm., ritmo circadiano de la FC atenuado, VFC reducida, predominio parasimpático, 1 Episodio de leve descenso del st en C1, correlacionar con FRCV, síntomas y considerar Test de detección de isquemia y ESVde baja densidad. |
| 21 | 39/M | Despolarización ventricular prematura | Extrasistoles supraventriculares de baja densidad , no episodios de TPSV, extrasistoles ventriculares aisladas de baja densidad ( menos de 2%) No FV , no TV y no pausas . |
| 22 | 54/M | HTA d/c ta no controlada dm , dl , ira | Total de 90020 latidos de los que 3506 han sido clasificados como latidos ventriculares, observando ESVaisladas, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 7 ESSVaislados, no dupletes no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, FC en rangos normales, ritmo circadiano aplanado, conducción AV normal y no pausas significativas. |
| 23 | 89/F | Sincope | Estudio realizado bajo tratamiento con Nebivolol 2.5 mg./24h. FC promedio de 63 lpm. ESV poco frecuente (569). 3 Episodios de TPSV prececidos y seguidos de bradicardia sinusal. Probable Sd. Bradicardia-Taquicardia, EV poco frecuente (312) y episodios de apnea del sueño en análisis EDR. |
| 24 | 48/F | Etiología cardiaca de ACV | No correspondencia de síntomas con alteraciones arrítmicas, total de 108744 latidos de los que 0 han sido clasificados como latidos ventriculares, sin extrasistolia supraventricular o ventricular aislada, en dupletes, rachas de taquicardia no sostenida o sostenida tanto de origen supraventricular como ventricular. FC en rangos normales, conducción AV normal, ritmo circadiano conservado y no pausas significativas. |
| 25 | 66/M | Fibrilación y aleteo auricular | Total de 79758 latidos de los que 8 han sido clasificados como latidos ventriculares, siendo ESV aisladas, no dupletes, no rachas de taquicardia no sostenida o sostenida ventricular, 762 ESSV aislados, 6 dupletes supraventriculares, sin rachas de taquicardia no sostenida o sostenida supraventricular, se observa mútiples episodios de pausas no significativas, aparentemente asintomáticas, FC con tendencia a bradicardia, conducción AV normal y ritmo circadiano plano. |
| 26 | 71/M | Disnea | Ritmo sinusal durante todo el estudio, no episodios de FA, no se registraron pausas >2.5 segs. (La pausa más larga fue de 1.9 segs, pausa sinusal leve nocturna no significativa), tendencia a la bradicardia sinusal (FC promedio de 56 lpm.), ESSV poco frecuente (55) y paucisintomática, 5 dobletes y 1 triplete supraventricular asintomáticos, 3 episodios cortos de TSV precedidos y seguidos de bradicardia sinusal, estudio compatible con ENS, múltiples episodios de apnea/hipopnea del sueño (se sugiere polisomnografía). |
| 27 | 73/M | Taquicardia supra ventricular | Ritmo sinusal de base que intercala por momentos con ritmo de la unión, varios episodios de bradicardia sinusal moderada con FC que llegan por momentos hasta 40 lpm, y se aprecia varios episodios de pausas sinusales con tiempo máximo en 2.3 segundos durante las horas del día y no se aprecia taquiarritmias. |
| 28 | 95/M | Arritmia cardiaca no especifica | Ritmo sinusal durante todo el estudio, Estudio realizado bajo tratamiento con Amiodarona, tendencia a la bradicardia sinusal (FC prom 63 lpm.) ESSV, no episodios de TPSV, no ESV, episodios de apnea/hipopnea del sueño (8) y no refirió síntomas durante todo el estudio. |
| 29 | 75/F | Edema | Ritmo circadiano atenuado, VFC ligeramente reducida, predominio simpático, ESSV mínima (9), 1 Episodio corto y asintomátio de 6 latidos de TSV a 110 lpm., ESV con algunos fenómenos de R sobre T, predominio simpático, no pausas >2.5 segs., no bloqueos AV., no alteraciones del ST, intervalo QTc dentro de rangos normales, no síntomas durante el estudio y episodios de apnea/hipopnea en análisis EDR. |
| 30 | 76/F | Fibrilación | Ritmo sinusal de base con tendencia a bradicardia poca variabilidad de la FC durante el estudio (paciente postrada) ESSV y ventricular de muy baja densidad, no alteraciones del qt, rectificación del st no variable ausencia de pausas significativas no episodios de FA durante el estudio. |

AV: Auroventricular ,CAP: conducto arterioso persistente, CVPS: presión venosa central ESV: extrasistolia ventricular, ESSV:extrasistoles supraventriculares, EDR: Estudio de Desaturación de Oxígeno Respiratorio, ENS: Enf. Nodo Sinusal, FA: Fibrilación auricular, FC: Frecuencia cardiaca, HTA: Hipertensión arterial QT: Actividad eléctrica entre las Ondas Q y T, TA: Taquicardia auricular**,** TSV: taquicardia supraventricular, TV: taquicardia ventricular.

**Tabla 2.** Medidas matemáticas y comparación entre el diagnóstico clínico y el diagnóstico matemático. EC: Evaluación Clínica, donde: N: Normal, I: Estado intermedio, A: estado Agudo o Crítico. Kg: Espacios ocupados por el atractor en la rejilla de 10 lat/min. Kp: Espacios ocupados por el atractor en la rejilla de 5 lat/min. DF: Dimensión Fractal. EM: Estratificación Matemática, donde: N: Normal, I: Estado intermedio, A: estado Agudo o Crítico.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **No** | **EC** | **Kg** | **Kp** | **DF** | **EM** | **No** | **EC** | **Kg** | **Kp** | **DF** | **EM** |
| **1** | A | 400 | 1572 | 1,975 | A | **16** | N | 60 | 227 | 1,92 | N |
| **2** | A | 340 | 1263 | 1,893 | A | **17** | N | 62 | 212 | 2 | N |
| **3** | A | 225 | 787 | 1,806 | A | **18** | N | 45 | 176 | 1,968 | N |
| **4** | I | 185 | 679 | 1,876 | I | **19** | N | 43 | 145 | 1,754 | N |
| **5** | A | 180 | 633 | 1,814 | I | **20** | I | 43 | 141 | 1,713 | I |
| **6** | I | 165 | 608 | 1,882 | I | **21** | N | 34 | 132 | 1,957 | I |
| **7** | I | 120 | 458 | 1,932 | I | **22** | I | 34 | 130 | 1,935 | I |
| **8** | I | 113 | 430 | 1,928 | I | **23** | A | 36 | 117 | 1,7 | I |
| **9** | N | 109 | 399 | 1,872 | N | **24** | I | 34 | 113 | 1,733 | I |
| **10** | N | 92 | 333 | 1,856 | N | **25** | I | 35 | 100 | 1,515 | I |
| **11** | N | 77 | 288 | 1,903 | N | **26** | A | 25 | 92 | 1,88 | A |
| **12** | N | 75 | 266 | 1,826 | N | **27** | A | 24 | 75 | 1,644 | A |
| **13** | A | 64 | 252 | 1,977 | N | **28** | A | 24 | 75 | 1,644 | A |
| **14** | **N** | 62 | 245 | 1,982 | N | **29** | A | 22 | 60 | 1,447 | A |
| **15** | I | 71 | 241 | 1,763 | N | **30** | A | 16 | 49 | 1,615 | A |

**Discusión**

El hecho de que las enfermedades cardiovasculares constituyan la primera causa de muertes a nivel mundial hace relevante mantener la mira en el desarrollo continuo de métodos cada vez más precisos para el diagnóstico del estado cardiaco. Esta afirmación es relevante tanto a nivel mundial como en el caso particular de Perú, donde las enfermedades cardiovasculares causan un fuerte impacto social y económico, que tiende a ir en aumento. Por esta razón desde hace ya 40 años se ha desarrollado una amplia línea de investigaciones en las que se busca lograr nuevas interpretaciones de la señal cardiaca, haciendo uso de diferentes métodos matemáticos, que han logrado resultados significativos.

El estudio de la dinámica cardiaca mediante métodos dinámicos no lineales (18,23–26) mostró que la concepción de normalidad y enfermedad debía reevaluarse, junto con varios conceptos que forman esta concepción. El concepto de variabilidad ha sido reevaluado a partir de nuevos conceptos que se separan de conceptos clásicos como el de homeostasis, regularidad o periodicidad como parámetros fisiológicos ideales. Estudios han mostrado que la periodicidad excesiva así como comportamientos altamente variables se asocian a estados anómalos o relacionados con patologías cardiacas, mientras que los estados de normalidad se encuentran en puntos intermedios, es decir, no muy variables ni muy periódicos, contradiciendo así el concepto clásico de homeostasis (27). Así Huikuri y colaboradores (19) elaboraron un índice predictivo de mortalidad basado en la dimensión fractal de la frecuencia cardiaca de individuos con infarto agudo de miocardio con fracción de eyección inferior al 35%. Este índice logró superar a otros predictores de mortalidad más precisos que los establecidos a partir de parámetros estadísticos convencionales. Sin embargo, incluso en la literatura médica no hay información sobre el uso de estos métodos en la clínica.

Siguiendo esta línea de investigación, la metodología aplicada en este estudio evidencia la relevancia de aplicar métodos apropiados al carácter caótico e irregular del ritmo cardiaco, para establecer medidas precisas, objetivas y reproducibles de su dinámica. En este trabajo se evidenció que es posible establecer rangos de normalidad y anormalidad para la dinámica cardiaca a partir de los sistemas dinámicos y la geometría fractal, de potencial ayuda como herramientas de ayuda diagnóstica. De igual modo se evidenció que los rangos de normalidad/anormalidad establecidos en trabajos anteriores con esta metodología resultaban insuficientes para establecer una caracterización adecuada para la muestra de población peruana evaluada. En este sentido resulta de importancia desarrollar trabajos posteriores que permitan establecer la aplicabilidad de los limites establecidos en el presente trabajo para el resto de la población peruana o bien generar ajustes de acuerdo con sus características.

Aunque se han desarrollado diferentes aplicaciones de la geometría fractal en la medicina (26-30) para caracterizar normalidad y enfermedad, la mayoría de estos trabajos se basan en la comparación de medidas fractales aisladas y en la búsqueda de rangos de valores característicos de normalidad o enfermedad que no han mostrado ser definitivas para establecer las diferencias. Lo que se evidenció en este trabajo es que a partir de la comparación de las dimensiones fractales no es posible establecer la diferenciación entre normalidad y enfermedad para la dinámica cardiaca, tal y como se había mostrado en otros estudios (22,28-29), sino que son los espacios de ocupación del atractor, los que permiten establecer una evaluación diferencial para cada caso particular, independientemente de metodologías estadísticas y epidemiológicas que describen comportamientos poblacionales.

Es por esto que se han desarrollado medidas matemáticas que han permitido diferenciar estos estados en diferentes estructuras fractales (30,31), como en este caso, el espacio de ocupación de los atractores. En esta línea investigativa que se fundamenta dentro de la teoría de sistemas dinámicos y la geometría fractal, han sido desarrolladas diferentes metodologías para la evaluación de la dinámica cardiaca, entre ellas, se desarrolló un nuevo método basado en los espacios de ocupación del atractor en el espacio fractal de Box Counting, con la que fue posible diferenciar dinámicas agudas, del grupo de los casos de normalidad y con enfermedad aguda (25). Estas investigaciones demuestran que al desarrollar medidas objetivas que incluyan la auto-organización física y matemática del sistema pueden mejorar la evaluación de la dinámica cardiaca, constituyendo una herramienta de ayuda para los métodos de diagnóstico basados en la variabilidad RR, lo que resulta en una mayor facilidad de adquisición y análisis de datos y menores costos clínicos. La aplicación de teorías físicas y matemáticas como la geometría fractal (30,32–34), la ley de la entropía (21,35,36), o la teoría de los sistemas dinámicos (37) en medicina ha permitido lograr resultados de aplicación clínica.

**Agradecimientos**

Producto derivado del Proyecto de Investigación Aplicada 2022-02 E041-2022-02. Proyecto "Diagnóstico y seguimiento cardíaco mediante una metodología fisicomatemática basada en la geometría fractal y los sistemas dinámicos incorporadas en tecnologías vestibles". Proyectos de Investigación Aplicada 2022-2, código PE501080050-2022 - PROCIENCIA CONCYTEC. Perú.

**Author Contributions statement**

SCCH: Analysis and interpretation of the data, drafting of the paper and the final approval of the version to be published

ARMC: conception and design and the final approval of the version to be published

JAS: conception and design and the final approval of the version to be published

SPB: Analysis of the data and drafting of the paper.

JJJB: conception and design and the final approval of the version to be published

RSM: conception and design and the final approval of the version to be published

EGR: Final approval of the version to be published

HAH: Final approval of the version to be published

JEBP: Data collection and classification and final approval of the version to be published

BAGT: Data collection and classification and final approval of the version to be published

**Referencias**

1. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs) [Internet]. Fact sheets. 2021 [cited 2023 Nov 23]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)
2. Townsend N, Kazakiewicz D, Lucy Wright F, Timmis A, Huculeci R, Torbica A, et al. Epidemiology of cardiovascular disease in Europe. Nat Rev Cardiol [Internet]. 2022;19(2):133–43. Available from: https://doi.org/10.1038/s41569-021-00607-3
3. Zhao D. Epidemiological features of cardiovascular disease in Asia. JACC Asia. 2021;1(1):1–13.
4. Cortesi PA, Fornari C, Madotto F, Conti S, Naghavi M, Bikbov B, et al. Trends in cardiovascular diseases burden and vascular risk factors in Italy: the Global Burden of Disease study 1990–2017. Eur J Prev Cardiol. 2021;28(4):385–96.
5. Liu S, Li Y, Zeng X, Wang H, Yin P, Wang L, et al. Burden of cardiovascular diseases in China, 1990-2016: findings from the 2016 global burden of disease study. JAMA Cardiol. 2019;4(4):342–52.
6. Kumar AS, Sinha N. Cardiovascular disease in India: a 360 degree overview. Vol. 76, medical journal armed forces india. Elsevier; 2020. p. 1–3.
7. Roth GA, Mensah GA, Johnson CO, Addolorato G, Ammirati E, Baddour LM, et al. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: update from the GBD 2019 study. J Am Coll Cardiol. 2020;76(25):2982–3021.
8. Bloom DE, Chen S, McGovern ME. The economic burden of noncommunicable diseases and mental health conditions: results for Costa Rica, Jamaica, and Peru. Rev Panam Salud Pública. 2018;42:e18.
9. Institute for Health Metrics and Evaluation. Country Profile: Peru. [Internet]. 2018 [cited 2021 Jul 29]. Available from: www.healthdata.org/peru
10. Pan American Health Organization. Country Profiles: 2014 [Internet]. 2014 [cited 2023 Dec 20]. Available from: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\_docman&view=list&format=html&layout=default&slug=country-profiles-7285&Itemid=270&lang=es#gsc.tab=0
11. Benziger CP, Zavala-Loayza JA, Bernabe-Ortiz A, Gilman RH, Checkley W, Smeeth L, et al. Low prevalence of ideal cardiovascular health in Peru. Heart. 2018;104(15):1251–6.
12. Pajuelo Ramírez J, Torres Aparcana L, Agüero Zamora R, Bernui Leo I. El sobrepeso, la obesidad y la obesidad abdominal en la población adulta del Perú. In: Anales de la Facultad de Medicina. UNMSM. Facultad de Medicina; 2019. p. 21–7.
13. Abbs ES, Viñoles J, Alarcón JO, Johnson HM, Zunt JR. High prevalence of cardiovascular risk factors in Peruvian adolescents living in a peri-urban shantytown: a cross-sectional study. J Heal Popul Nutr. 2017;36:1–9.
14. Huikuri H V, Stein PK. Clinical application of heart rate variability after acute myocardial infarction. Front Physiol. 2012;3:41.
15. Goldberger AL. Is the normal heartbeat chaotic or homeostatic? Physiology. 1991;6(2):87–91.
16. Bhowmik T, Dey J, Tiwari VN. A novel method for accurate estimation of HRV from smartwatch PPG signals. In: 2017 39th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC). IEEE; 2017. p. 109–12.
17. Perkiömäki JS, Mäkikallio TH, Huikuri H V. Fractal and Complexity Measures of Heart Rate Variability. Clin Exp Hypertens [Internet]. 2005 Jan 1;27(2–3):149–58. Available from: http://dx.doi.org/10.1081/CEH-48742
18. Mahon NG, Hedman AE, Padula M, Gang Y, Savelieva I, Waktare JEP, et al. Fractal correlation properties of R-R interval dynamics in asymptomatic relatives of patients with dilated cardiomyopathy. Eur J Heart Fail. 2002;4(2):151–8.
19. Huikuri H, Makikällo T, Peng C h., Goldberger A, Hintze U, Moller M. Fractal correlation Properties of R-R Interval Dynamics and Mortality in Patients with Depressed Left Ventricular Function After an Acute Miocardial Infarction. Circulation [Internet]. 2000;101(1):47–53. Available from: http://dx.doi.org/10.1161/01.CIR.101.1.47
20. Rodríguez-Velásquez J, Prieto S, Domínguez D, Correa C, Melo M, Pardo J, et al. Application of the chaotic power law to the study of cardiac dynamics in patients with arrhythmias. Rev la Fac Med. 2014;62(4):539–46.
21. Rodríguez J, Prieto S, Laguado E, Pernett F, Villamizar M, Olivella E, et al. Application of a diagnostic methodology of cardiac systems based on the proportions of entropy in normal patients and with different pathologies. Pulse. 2021;8(3–4):114–20.
22. Rodríguez JO, Prieto SE, Correa SC, Soracipa MY, Méndez LR, Bernal HJ, et al. Nueva metodología de evaluación del Holter basada en los sistemas dinámicos y la geometría fractal: confirmación de su aplicabilidad a nivel clínico. Rev la Univ Ind Santander Salud. 2016;48(1).
23. Lombardi F. Chaos theory, heart rate variability, and arrhythmic mortality. Am Heart Assoc; 2000.
24. Wu G-Q, Arzeno NM, Shen L-L, Tang D-K, Zheng D-A, Zhao N-Q, et al. Chaotic signatures of heart rate variability and its power spectrum in health, aging and heart failure. PLoS One. 2009;4(2):e4323.
25. Braun C, Kowallik P, Freking A, Hadeler D, Kniffki K-D, Meesmann M. Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons. Am J Physiol Circ Physiol. 1998;275(5):H1577–84.
26. Peng C, Havlin S, Stanley HE, Goldberger AL. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. Chaos an Interdiscip J nonlinear Sci. 1995;5(1):82–7.
27. Goldberger AL, Rigney DR, West BJ. Chaos and Fractals in Human Physiology. Sci Am [Internet]. 1990;262(2):42–9. Available from: http://www.jstor.org/stable/24996678
28. Rodríguez J, Prieto S, Avilán N, Correa C, Bernal P, Ortiz L, et al. Nueva metodología física y matemática de evaluación del Holter. Rev Colomb Cardiol. 2008;15(2):50–4.
29. 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 [Internet]. 2013;4(2):79–84. Available from: http://www.interesjournals.org/JMMS
30. Rodríguez JO, Prieto SE, Correa C, Bernal PA, Puerta GE, Vitery S, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. BMC Med Phys [Internet]. 2010;10(1):1–6. Available from: http://dx.doi.org/10.1186/1756-6649-10-1
31. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Posso H, Bernal P, Puerta G, et al. Generalización fractal de células preneoplásicas y cancerígenas del epitelio escamoso cervical. Una nueva metodología de aplicación clínica. Rev Med. 2010;18(2):173–81.
32. Rodríguez J, Grisales CE, Barrios FA, Prieto S, Correa C, Ruiz JJ. Fractal geometric characterization of gastric mucosa neoplastic cells. Gastric & Breast Cancer [Internet]. 2020;15(1):16–24. Available from: http://www.gastricbreastcancer.com/abs\_292\_\_Orig\_\_Colombia\_Rodr.asp
33. Rodríguez J, Atencio V, Soracipa R, Madariaga D, Correa C, Prieto S. Caracterización geométrica de los eritrocitos nucleados de tilapia roja (Oreochromis spp). Rev Colomb Biotecnol. 2021;23(1):17–23.
34. Prieto Bohórquez SE, Velásquez JOR, Correa Herrera SC, Soracipa Muñoz MY. Diagnosis of cervical cells based on fractal and Euclidian geometrical measurements: Intrinsic Geometric Cellular Organization. BMC Med Phys [Internet]. 2014;14(1):2. Available from: http://dx.doi.org/10.1186/1756-6649-14-2
35. Correa-Herrera SC, Rivas JC, Balcázar JJJ. Diagnóstico matemático del infarto agudo de miocardio y de la falla cardiaca mediante la entropía proporcional. Rev Cuba Investig Biomédicas. 2021;40(3):1–15.
36. Rodríguez Velásquez J, Prieto Bohórquez S, Ramírez López LJ. Armonía del caos: Fractales, sistemas dinámicos y dinámica cardiaca PP - [Internet]. Editorial Neogranadina; 2021. Available from: https://editorial.unimilitar.edu.co/index.php/editorial/catalog/book/57
37. Prieto-Bohórquez SE, Rodríguez-Velásquez J, Correa-Herrera C, Beltrán LM, Agudelo-Otalora LM, Trejos-Ramírez C, et al. Aplicación de una ley matemática exponencial a la dinámica cardíaca en 16 horas: estudio realizado con 250 pacientes. Rev Colomb Cardiol. 2021;28(3):231–8.