

Rodríguez Velásquez, Javier Oswaldo

Armonía del caos. Fractales, sistemas dinámicos y dinámica cardíaca / Javier Oswaldo Rodríguez Velásquez, Signed Esperanza Prieto Bohórquez, Leonardo Juan Ramírez López. -- 1a. ed. -- Bogotá : Universidad Militar Nueva Granada : Editorial Neogranadina, 2021.

303 páginas

Incluye glosario

ISBN 9789585103177

1. Electrocardiografía 2. Teoría del caos 3. Sistemas dinámicos 4. Teoría del caos I. Prieto Bohórquez, Signed Esperanza II. Ramírez López, Leonardo Juan III. Título

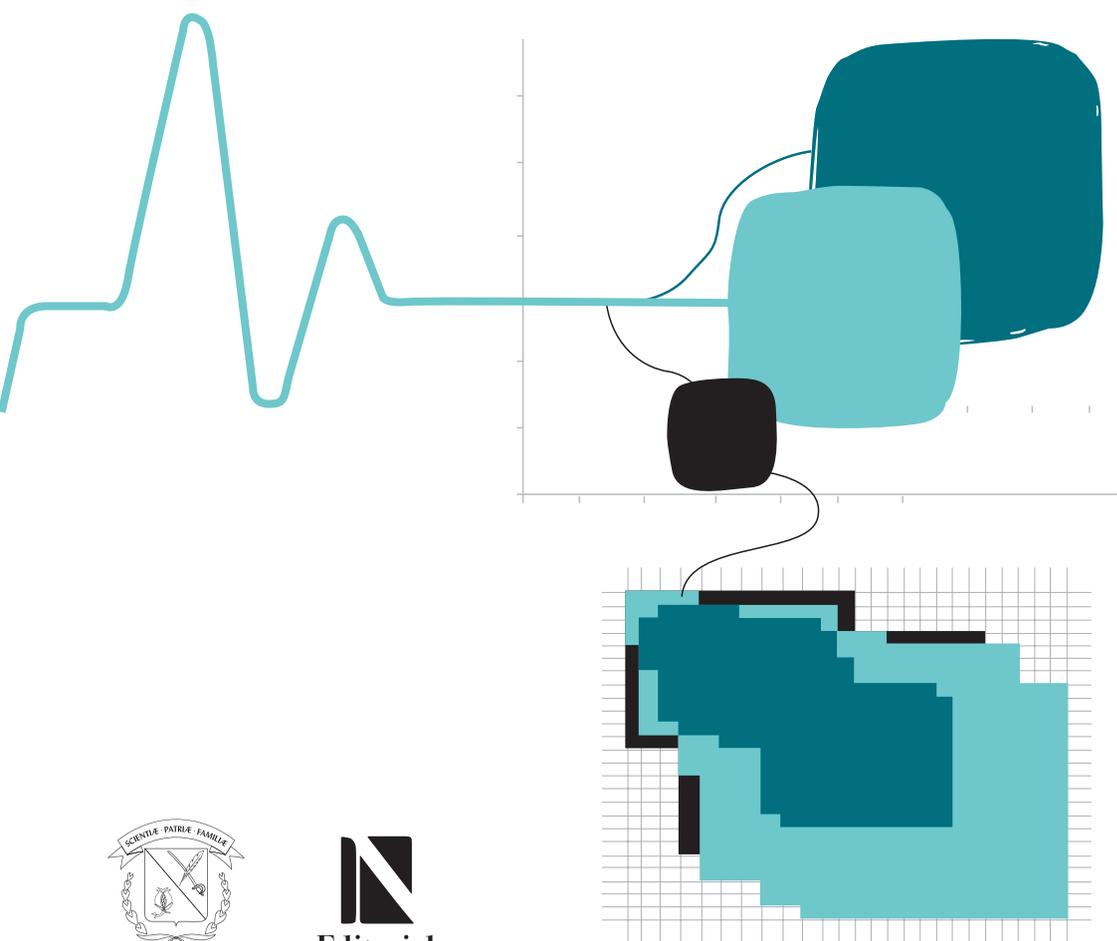
616.1207547 SCDD21

Catalogación en la fuente.
Biblioteca Universidad Militar Nueva Granada.
Mayo de 2021

Javier Oswaldo Rodríguez Velásquez
Signed Esperanza Prieto Bohórquez
Leonardo Juan Ramírez López

ARMONÍA DEL CAOS

Fractales, sistemas dinámicos
y dinámica cardiaca



ARMONÍA DEL CAOS

**FRACTALES, SISTEMAS DINÁMICOS
Y DINÁMICA CARDIACA**

© Javier Rodríguez Velásquez

© Signed Prieto Bohórquez

© Leonardo Juan Ramírez López

ISBN: 978-958-5103-17-7

© Universidad Militar Nueva Granada

© Vicerrectoría de Investigaciones

© Editorial Neogranadina

Bogotá, Colombia

editorial.neogranadina@unimilitar.edu.co

Armonía del caos

Fractales, sistemas dinámicos y
dinámica cardiaca

Javier Rodríguez Velásquez

Signed Prieto Bohórquez

Leonardo Juan Ramírez López



Armonía del caos

Fractales, sistemas dinámicos y dinámica cardiaca*

Javier Rodríguez Velásquez^a

Signed Prieto Bohórquez^b

Leonardo Juan Ramírez López^c

RESUMEN

Esta investigación presenta una metodología diagnóstica de aplicación clínica fundamentada en la teoría de sistemas dinámicos, la probabilidad y la entropía. Se pretende que el lector obtenga todo el contexto físico y matemático, así como los conceptos básicos del área de cardiología. Se inicia con los fundamentos del pensamiento matemático y físico para llegar a nuevas creaciones, así como con conceptos básicos de cardiología, para luego presentar cómo la teoría del caos y los fractales se emplean con

- * Este libro es producto del proyecto "Sistema de monitoreo remoto de la dinámica cardiaca usando la metodología predictiva basada en proporciones de entropía de atractores para pacientes con diferentes patologías cardiacas con aplicación en telemedicina", código IMP-ING-2660 de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá, Colombia.
- a** Médico de la Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: grupoinsight2025@yahoo.es.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8257-6016>
- b** Física de la Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: grupoinsight2025@yahoo.es.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7896-231X>
- c** Doctor en Ingeniería Biomédica de la Universidade de Mogi das Cruzes, San Pablo, Brasil. Magíster en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Electrónico de la Universidad Antonio Nariño de Bogotá, Colombia. Correo electrónico: leonardo.ramirez@unimilitar.edu.co.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6473-5685>

el propósito de estudiar el comportamiento altamente irregular de la dinámica cardiaca. Se presentan diversos métodos diagnósticos desarrollados desde la perspectiva físico-matemática, así como la ruta de pensamiento que permitió su creación, incluyendo un nuevo método de evaluación de reestenosis arterial y nuevos métodos de evaluación de la dinámica cardiaca del adulto desde diversas teorías, como, por ejemplo, la de los sistemas dinámicos o la ley de Zipf/Mandelbrot. Se presenta, además, una nueva ley exponencial de aplicabilidad clínica desarrollada para los atractores cardiacos en el contexto de los sistemas dinámicos y la geometría fractal. También se describen los avances logrados en el diagnóstico de la dinámica cardiaca neonatal. Este recorrido traza la ruta que permite llegar a la descripción de la metodología diagnóstica fundamentada en la teoría de los sistemas dinámicos, la probabilidad y la entropía, así como la ruta de pensamiento que permitió llegar a ese descubrimiento y sus aplicaciones clínicas. Finalmente, se realiza un breve recorrido por otras metodologías diagnósticas y predictivas desarrolladas en otras áreas de la medicina desde el contexto físico-matemático.

PALABRAS CLAVE

Creatividad, frecuencia cardiaca, matemática, física, electrocardiografía ambulatoria

Harmony of Chaos

Fractals, dynamical systems, and cardiac dynamics

ABSTRACT

This research book presents a diagnostic methodology for clinical application based on the theory of dynamic systems, probability, and entropy. It aims for the reader to grasp all the physical and mathematical context, as well as the basic concepts in the area of cardiology. It begins with the fundamentals of mathematical and physical thought and goes on with the new creations, as well as with the basic concepts of cardiology, and then it presents how the chaos theory and fractals are used to study the highly irregular behavior of cardiac dynamics. Various diagnostic methods developed from the physical-mathematical perspective are presented, as well as the path of thought that allowed its creation, including a new method for evaluating arterial restenosis and new methods for evaluating adult cardiac dynamics from various theories, such as the dynamical systems or Zipf-Mandelbrot law. Additionally, a new exponential law with clinical applicability developed for cardiac attractors in the context of dynamic systems and fractal geometry is presented. Advances in the diagnosis of neonatal cardiac dynamics are also described. This path sets a roadmap in order to reach the description of the diagnostic methodology based on the theory of dynamic systems, probability and entropy, as well as the thought pattern that allowed us to reach this discovery and its clinical applications. Finally, a brief overview of other diagnostic and predictive methodologies developed in other areas of medicine is presented from the physical-mathematical context.

KEYWORDS:

creativity, heart rate, mathematics, physics, ambulatory electrocardiography

ÍNDICES



26	DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS
29	INTRODUCCIÓN
100	PRIMERA PARTE. LA DINÁMICA CARDIACA
35	Capítulo 1. Pensamiento y creatividad
36	Cómo piensa la física teórica
39	Teorema de Tales
41	Teorema de los ángulos consecutivos
42	Metodología kepleriana para determinar la trayectoria de la órbita de la Tierra
54	Experimentos mentales en la física
54	La paradoja de Aquiles y la tortuga
55	Paradoja del hotel infinito
57	La paradoja de los dos gemelos
58	La paradoja del gato de Schrödinger
58	Experimentos mentales y creatividad
59	<i>Insight</i> : los hallazgos de Bernard Lonergan
59	El acto de intelección
60	El acto de intelección en las matemáticas
61	Pensamiento lateral: Edward de Bono
67	Las ruedas de la creatividad
68	Estilos de pensamiento
70	Plan creativo
70	La imaginación: llave que hace girar la cuarta rueda de la creatividad
71	Libro <i>Técnicas de éxito</i>
73	Referencias

77 Capítulo 2. Principios básicos del sistema cardiaco

- 77 El aparato cardiovascular
- 80 El corazón como sistema de propulsión
- 81 Características de la fisiología del tejido muscular cardiaco
- 81 Mecanismo de la contracción rítmica cardiaca
- 83 Conducción del impulso por el corazón
- 84 Corazón lesionado: bloqueo de la conducción de impulso
- 84 Final de cada latido cardíaco: período refractario y terminación del impulso
- 85 Movimiento circular y su efecto sobre la acción propulsora
- 86 Registros clínicos de la dinámica cardiaca y su evaluación convencional
- 86 El electrocardiograma
- 86 Señal y procesamiento
- 89 Derivaciones estándar
- 91 Clasificación electrocardiográfica de los síndromes coronarios agudos
- 93 Holter: electrocardiografía ambulatoria
- 94 Aspectos técnicos
- 94 Requisitos de los registros
- 94 Técnicas de los registros
- 96 Indicaciones
- 96 Valoración clínica de las arritmias cardíacas
- 96 Valoración de la isquemia miocárdica (cardiopatía isquémica)
- 97 Valoración del intervalo QT mediante electrocardiografía ambulatoria
- 97 Análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca mediante electrocardiografía
- 97 Valoración de los síntomas que pueden deberse a trastornos del ritmo
- 98 Valoración del riesgo en pacientes con o sin síntomas de arritmias
- 98 Valoración de la eficacia del tratamiento antiarrítmico
- 98 Valoración de la función de marcapasos

99	Valoración de la isquemia miocárdica
99	Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca
99	Patrones de medida, interpretación fisiopatológica y uso clínico
100	Medidas de la variabilidad de la frecuencia cardíaca
100	En el dominio el tiempo
100	En el dominio de la frecuencia cardíaca
101	Correlaciones fisiológicas con la variabilidad de la frecuencia cardíaca
101	Cambios de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en diversas enfermedades
102	Uso clínico de la variabilidad de la frecuencia cardíaca
102	Elaboración de un informe
103	Conclusión
103	Referencias

105 Capítulo 3. Caos, fractales y medicina

106	Costas y <i>dimensión fractal</i>
106	Mandelbrot y la geometría fractal
109	<i>Insight</i> de Mandelbrot
112	Autosimilitud y dimensión en la geometría fractal
113	Caos y fractales en la medicina
117	Conclusión
117	Referencias

121 Capítulo 4. Morfología arterial y análisis de la dinámica cardíaca

122	Método y espacio generalizado de <i>box counting</i> : arterias coronarias
123	Función y morfología arteriales
123	Enfermedad de la arteria coronaria
124	La geometría fractal
125	Paradoja en la medida de la costa británica
126	Analogía entre la costa británica y la arteria coronaria
127	El espacio y el método de <i>box counting</i>
128	El método de <i>box counting</i>
132	Evaluación de los registros Holter a partir de la teoría probabilística

132	Pasos previos para aplicar la teoría de la probabilidad en el contexto de la cardiología
133	La teoría de la probabilidad y el espacio de probabilidades
134	Pasos cruciales para crear la metodología para evaluar la dinámica cardiaca desde la teoría probabilística
140	La ley de Zipf-Mandelbrot aplicada a la dinámica cardiaca fetal y del adulto
140	Aplicación de la ley de Zipf-Mandelbrot a la dinámica cardiaca
145	Otras aplicaciones médicas de la ley de Zipf-Mandelbrot
147	Conclusión
147	Referencias

153 SEGUNDA PARTE. EVALUACIÓN MATEMÁTICA DE LA DINÁMICA CARDIACA

155 Capítulo 5. *Insight* de atractores cardiacos

156	Provocar el <i>insight</i> : nueva metodología
159	Prototipos representativos: registro Holter normal y con infarto agudo de miocardio
161	Atractores cardiacos – mapa de retardo
165	Medición los espacios ocupados
169	Comparación de espacios de ocupación
171	Otros trabajos en los que se aplicó la misma metodología
173	Conclusión
173	Referencias

177 Capítulo 6. Evaluación matemática de la dinámica cardiaca neonatal

178	Evaluación de la dinámica cardiaca neonatal a partir de la ley del caos
183	Evaluación diagnóstica basada en la teoría de la probabilidad
184	Conclusión
185	Referencias

187 Capítulo 7. *Insight* de la ley exponencial de los sistemas dinámicos cardiacos

- 188 Fundamentos
- 188 Orden matemático
- 188 La acausalidad física
- 188 El espacio fractal generalizado de *box counting*
- 189 Simplificación de la ecuación de *box counting*
- 190 Deducción de la ley de potencias de la dinámica caótica cardiaca
- 192 Experimento mental e inducción para determinar del diagnóstico clínico
- 195 Conclusión
- 196 Referencias

199 TERCERA PARTE. EL CAMINO PARA LLEGAR AL *INSIGHT* DE LA ENTROPÍA PROPORCIONAL

201 Capítulo 8. Cómo llegar al *insight*

- 202 Teoría de la tortuga: introducción a la solución de la paradoja Aquiles y la tortuga
- 203 Paso del lenguaje filosófico al lenguaje matemático
- 204 Teorema de Pitágoras
- 205 La teoría de gravitación universal y su impacto en la labor del doctor Rodríguez
- 206 Bacon y el empirismo frente a la universalidad matemática pitagórico-platónica de Galileo, Kepler y Newton
- 207 El método empírico
- 207 El método racionalista
- 208 Teoría del caos en cardiología
- 210 Problemas del diagnóstico de la monitoría cardiaca fetal
- 211 Trabajos en inmunología y biología molecular
- 211 Trabajos con la ley de Zipf y caracterización fractal del repertorio T específico contra el alérgeno Poa p9
- 213 Aplicaciones en angiología
- 215 El papel de la física teórica en el desarrollo metodológico

217	Generalización en el espacio fractal
218	Conocimiento ascendente y convergente
218	Mecánica estadística frente a caos
219	Inclusión del concepto de azar
220	Consolidación de la nueva metodología
221	Probabilidad y diagnóstico de la dinámica cardiaca
221	Conclusión
222	Referencias

225 Capítulo 9. Metodología diagnóstica fisicomatemática de la entropía proporcional

226	El <i>insight</i> asociado a la comprensión de la dinámica cardiaca
232	Reinterpretación del concepto de entropía
233	Proceso de creación: la ruta de pensar correctamente
236	Conclusión
237	Bibliografía

239 Capítulo 10. Predicciones y caracterizaciones en otras áreas

240	Dinámica cardiaca
240	Trazado de monitoría fetal
240	Dinámica cardiaca de las ballenas
240	Morfología
241	Cáncer de cuello uterino
242	Ventriculografía
243	Ramificación coronaria izquierda
243	Hematología y radiología
244	Ecocardiograma pediátrico
244	Neurología
244	Inmunología
246	Infectología
247	Sistemas dinámicos aplicados a otras variables
247	Predicciones de mortalidad en la unidad de cuidados intensivos
249	Psicología

249	Epidemiología
251	Física y matemáticas
252	Conclusión
252	Referencias
261	Conclusiones
263	Glosario
266	Palabras clave (MeSH Heading)
271	Anexo 1. Demostración de la ley exponencial de la dinámica cardiaca
287	Anexo 2. Demostraciones y conceptos matemáticos

ÍNDICE DE FIGURAS

- 37 **Figura 1.** Abstracción de la estructura de una vaca
- 40 **Figura 2.** Triángulos para la demostración del teorema de Tales
- 42 **Figura 3.** Ángulos consecutivos al lado de una línea recta
- 44 **Figura 4.** Linterna, una analogía que utilizó Einstein para explicar el método de Kepler
- 45 **Figura 5.** Posiciones de la Tierra, Marte y el Sol, con respecto a las estrellas fijas para el primer paso
- 47 **Figura 6.** Alineación entre Marte, la Tierra y el Sol
- 48 **Figura 7.** Triangulación a partir de los datos de Marte y el Sol del 28 de julio de 1999

- 49 **Figura 8.** Triangulación a partir de los datos de Marte y el Sol del 9 de septiembre de 1997
- 53 **Figura 9.** Esquema de los pasos seguidos para el desarrollo de la metodología de Kepler para hallar la órbita de la Tierra
- xx **Figura 10.** Representación de la paradoja de Aquiles y la tortuga
- 55 **Figura 11.** Esquema del hotel infinito de Hilbert
- 62 **Figura 12.** Esquema de la forma en que las pautas de la percepción
- 64 **Figura 13.** Ejemplo de una burbuja lógica
- 64 **Figura 14.** Imagen de burbuja lógica vista desde una distancia mayor
- 65 **Figura 15.** Ejemplo de chiste para analizar el proceso de vía lateral
- 66 **Figura 16.** Forma gráfica de nueva ruta de pensamiento lateral
- 67 **Figura 17.** Círculos concéntricos que representan las generalidades de las ruedas de la creatividad.
- 68 **Figura 18.** Círculo de estilos de pensamiento
- 69 **Figura 19.** Círculo de los sentidos
- 71 **Figura 20.** Círculo de los 36 estereotipos
- 80 **Figura 21.** Estructura del corazón
- 87 **Figura 22.** Fotografía del resultado de un electrocardiograma
- 89 **Figura 23.** Esquema de los principales parámetros del electrocardiograma estándar
- 107 **Figura 24.** Ejemplo de homotecia

- 108 **Figura 25.** Primeras seis iteraciones de la curva de Hilbert
- 110 **Figura 26.** Contorno de una parte de la costa centroamericana con diferentes longitudes de recta
- 111 **Figura 27.** Primeras iteraciones de la isla de Koch
- 112 **Figura 28.** Divisiones de los lados del cubo
- 116 **Figura 29.** Elipse ajustada a la forma del diagrama de Poincaré y sus descriptores estándar SD1 y SD2.
- 124 **Figura 30.** Superposición de rectas sobre la costa de Gran Bretaña
- 125 **Figura 31.** Superposición de un dodecágono (polígono regular de 12 lados) circunscrito en la circunferencia.
- 126 **Figura 32.** Corte transversal de una arteria coronaria normal y una con restenosis.
- 127 **Figura 33.** Corte transversal de una arteria normal, en analogía con tres círculos concéntricos.
- 129 **Figura 34.** Simulación de una arteria anormal partes de la arteria normal
- 130 **Figura 35.** Partes de un número decimal.
- 131 **Figura 36.** Simulación de una arteria anormal y partes de la arteria normal a la que se superpuso una rejilla en el espacio de box counting.
- 133 **Figura 37.** Principio del dado cargado.
- 139 **Figura 38.** Esquema de los parámetros evaluados en el diagnóstico fisicomatemático de la dinámica cardiaca, con base en la teoría de la probabilidad.
- 141 **Figura 39.** Linealización de los rangos de dos registros Holter.

- 143 **Figura 40.** Mapas de retardo o atractores de las dinámicas cardíacas
- 144 **Figura 41.** Mapeo de las dos primeras parejas de la secuencia de ejemplo
- 159 **Figura 42.** Mapeo de las tres primeras parejas de la secuencia de ejemplo
- 161 **Figura 43.** Mapeo de las seis primeras parejas de la secuencia de ejemplo
- 162 **Figura 44.** Mapeo de las nueve primeras parejas de la secuencia de ejemplo
- 162 **Figura 45.** Mapeo de las nueve primeras parejas de la secuencia de ejemplo
- 163 **Figura 46.** Mapa de retardo de las primeras once parejas ordenadas del ejemplo
- 163 **Figura 47.** Mapa de retardo cardíaco terminado
- 163 **Figura 48.** Atractor con una rejilla superpuesta
- 164 **Figura 49.** Mapa de retardo de las primeras once parejas ordenadas del ejemplo.
- 164 **Figura 50.** Mapa de retardo cardíaco terminado.
- 165 **Figura 51.** Atractor con una rejilla superpuesta, para ejemplificar cómo se cuentan los cuadros ocupados por el atractor.
- 166 **Figura 52.** Atractor del registro Holter normal con la superposición de la rejilla C1.
- 166 **Figura 53.** Atractor del registro Holter normal con la superposición de la rejilla C2.
- 167 **Figura 54.** Atractor del registro Holter con IAM con la superposición de la rejilla C1.

- 167 **Figura 55.** Atractor del holter con IAM
con la superposición de la rejilla C2.
- 170 **Figura 56.** Ejemplo de atractores de la dinámica
cardíaca evaluados en el artículo de Rodríguez
et al. (17).
- 180 **Figura 57.** Trazados de la dinámica cardíaca para
3 simulaciones realizadas para cada uno
de los momentos tomados.
- 181 **Figura 58.** Atractores de algunas de las dinámicas
simuladas en el estudio mencionado.
- 183 **Figura 59.** Atractores de dinámicas cardíacas neonatales.
- 191 **Figura 60.** Ley de potencias de la dinámica caótica
cardíaca.
- 204 **Figura 61.** Construcción auxiliar para esta demostración
del teorema de Pitágoras
- 212 **Figura 62.** Gráfica hiperbólica. Frecuencia de clones de
linfocitos T en ausencia del interferón α es
inversamente proporcional al rango.
- 213 **Figura 63.** Ley de Zipf–Mandelbrot aplicada al repertorio
T contra el alérgeno Poa p9 en ausencia de
interferón α
- 229 **Figura 64.** Ejemplo de un atractor graficado normalmente
y un atractor numérico
- 233 **Figura 65.** Bocetos iniciales de *Guernica*, de Picasso
(1937)
- 234 **Figura 66.** Evolución de las figuras del toro y el caballo
que Picasso pintó en *Guernica*
- 235 **Figura 67.** Boceto más perfeccionado de *Guernica*
- 236 **Figura 68.** Cuadro finalizado de *Guernica*

ÍNDICE DE TABLAS

- 137 **Tabla 1.** Distribución de las probabilidades de la frecuencia de cada registro Holter
- 138 **Tabla 2.** Valores de la probabilidad calculados para los registros Holter 1-3
- 160 **Tabla 3.** Valores de las frecuencias cardiacas mínima y máxima y número de latidos del registro Holter
- 169 **Tabla 4.** Espacios de ocupación de 10 registros Holter
- 172 **Tabla 5.** Registros Holter con las dimensiones fractales y el diagnóstico matemático
- 193 **Tabla 6.** Medidas de ocupación espacial K_p , K_g y de *dimensión fractal* de registros Holter

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS



Dedicado a nuestros hijos y nuestros padres.

Agradecemos a nuestros padres, a nuestros hijos y a todas las personas que han aportado a la formación de cada uno de los autores.

Agradecemos al Grupo *Insight*, en especial, a Catalina Correa, Ribká Soracipa y Jairo Jattin.

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por su apoyo al proyecto IMP-ING-2660, en especial, a la doctora Martha Jeaneth Patiño Barraquán, vicerrectora de investigaciones, y a la doctora Claudia Helena Forero Forero, vicerrectora académica.

Igualmente, agradecemos la Facultad de Ingeniería, en especial, al ingeniero Robinson Jiménez Moreno, director de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, y a la ingeniera Carol Arévalo Daza, decana de la Facultad de Ingeniería.

Nuestra gratitud también es para la Facultad de Medicina, por su apoyo a la Línea de Profundización e Internado Especial "Teorías físicas y matemáticas aplicadas a la medicina"; en especial, a la doctora Eliana Patricia Ramírez, decana de la facultad; al doctor Iván Alberto Méndez, vicedecano; a la Doctora Luisa Fernanda Benítez, Coordinadora de Líneas de Profundización, y a la doctora Nydia Alexandra Rojas, directora de pregrado.

Extendemos nuestro agradecimiento al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country; especialmente, a los doctores Tito Tulio Roa; Natalia Malaver; Jorge Alberto Ospina, director médico; Alfonso Correa, subdirector de educación e investigación; Briegel de las Salas, coordinador administrativo de investigación; Magda Castro, coordinadora de Educación; y a la doctora Carolina Gómez, coordinadora de educación médica, por el apoyo al Grupo *Insight*.

Agradecemos a la Asociación Colombiana de Neurocirugía, especialmente al Dr. Marco Fonseca, presidente, y al Dr. Germán Forero, Director de Investigaciones, por su apoyo al Grupo *Insight*.

Por último, también agradecemos a Adriana Lizbeth Ortiz, por su apoyo al Grupo *Insight*.