

## Predicción fisicomatemática de la dinámica semestral de la malaria en Antioquia, Colombia

Physico-mathematical prediction of the biannual dynamics of malaria in Antioquia, Colombia

Javier Oswaldo Rodríguez Velásquez<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4585-3010>

Sandra Catalina Correa Herrera<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4998-1228>

Jorge Emilio Salazar Flórez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7666-9099>

Cesar Alejandro Valdés Cadena<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8363-6618>

Signed Esperanza Prieto Bohórquez<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7896-231X>

<sup>1</sup>Grupo Insight, Insight Research Group SAS. Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo GEINCRO, Fundación Universitaria San Martín. Sabaneta, Colombia.

\* Autor para la correspondencia: [grupoinsight2025@gmail.com](mailto:grupoinsight2025@gmail.com)

### RESUMEN

**Introducción:** La malaria es una enfermedad endémica en Colombia, cuyas características biológicas, fisiopatológicas y el impacto socioeconómico que genera la han posicionado como una enfermedad de interés en salud pública.

**Objetivo:** Predecir el número de casos notificados de malaria para el segundo semestre del año 2020 en el departamento de Antioquia, a través de la aplicación de la teoría de la probabilidad y la caminata al azar.

**Métodos:** Se realizó un estudio observacional longitudinal retrospectivo. Se analizó la dinámica geométrica del comportamiento semestral de la epidemia de malaria en el departamento de Antioquia durante los años 2008-2020 con los datos del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública, como una caminata al azar probabilística. En relación con los aumentos y disminuciones consecutivas semestrales, se determinó el número de infectados más probable para el segundo semestre del año 2020.

**Resultados:** El valor de la predicción fue de 3433. Al ser comparado con los valores reportados por el Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública, se obtuvo un porcentaje de acierto del 95,4 %.

**Conclusiones:** Al predecir con alta precisión el número de infectados para el segundo semestre del año 2020 en el departamento de Antioquia, se evidencia la potencialidad de la metodología para implementarse como una herramienta de vigilancia en salud pública y como un medio que sirva para apoyar la toma de decisiones en materia de políticas públicas.

**Palabras clave:** probabilidad; malaria; Antioquia; predicción.

## ABSTRACT

**Introduction:** Malaria is an endemic disease in Colombia. Due to its biological and pathophysiological characteristics and socioeconomic impact, it is positioned as a disease of public health interest.

**Objective:** To predict the number of reported cases of malaria for the second semester of 2020 in Antioquia department using the theory of probability and probabilistic random walk.

**Methods:** A retrospective, longitudinal, observational study was conducted. The geometric dynamics of the biannual development of malaria epidemic in Antioquia department from 2008 to 2020 was analyzed using the data from the National Surveillance System in Public Health as a probabilistic random walk. Regarding the consecutive biannual reductions and increments, the most probable number of infected individuals was determined for the second semester of 2020.

**Results:** The predictive value was 3433. When it was compared to the values reported by the National Surveillance System in Public Health, a 95.4% accuracy rate was obtained.

**Conclusions:** By predicting with high accuracy the number of infected individuals for the second semester of 2020 in Antioquia department, it is evident the methodology potential as a public health surveillance tool and as a means to support public policy decision making.

**Keywords:** probability; malaria; Antioquia; prediction.

Recibido: 27/09/2021

Aceptado: 16/11/2021

## Introducción

La malaria es una enfermedad producida por un parásito del género *Plasmodium*, que en la mayoría de los casos se transmite por medio de la picadura de la hembra del mosquito<sup>a</sup> *Anopheles*.<sup>(1)</sup> Los síntomas de la enfermedad aparecen una semana después de adquirir el parásito y consisten en dolor de cabeza, vómito, fiebre, escalofríos, dificultad para respirar y fatiga.<sup>(2)</sup>

En Colombia, entre el 50-60 % de los focos de transmisión de malaria se encuentran en la Región Pacífica (comprendida por Buenaventura y los departamentos Nariño, Cauca y Chocó); entre el 20-30 % se ubican en la región Urabá Córdoba y Antioquia; del 5-10 % en Amazonia, y aproximadamente el 5 % en la región Orinoquia.<sup>(1)</sup>

Varios aspectos influyen en la dinámica de la epidemia. Diversos estudios han demostrado que son principalmente factores climáticos y biológicos.<sup>(3,4)</sup> También se ha identificado que las fluctuaciones en el clima, generadas por el Niño oscilación del sur (ENOS) están relacionadas con los aumentos en la incidencia de enfermedades transmitidas por vectores.<sup>(5)</sup>

En países como India, Venezuela y Colombia, se ha encontrado relación entre el ENOS y el aumento en el número de casos de malaria.<sup>(6,7,8)</sup> Tradicionalmente las múltiples interacciones de la dinámica de la epidemia se representan por modelos con complejas ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales que tienen la impredecibilidad del caos.<sup>(9,10)</sup> Por medio de estos modelos se ha sugerido que diferentes factores, incluyendo el nivel socioeconómico, inciden en la variación del número de infectados de malaria.<sup>(11)</sup> Sin embargo, la utilidad de las correlaciones climáticas de los modelos estadísticos es limitada, pues no permiten realizar predicciones con un porcentaje alto de acierto y son difíciles de aplicar en entornos con diferente población y factores ambientales.<sup>(10)</sup>

Teniendo en cuenta lo anterior, es claro que la predicción de la aparición y evolución de enfermedades como la malaria es compleja, por lo cual es necesario desarrollar formas mucho más específicas para comprender el patrón de aparición de esta epidemia y establecer predicciones de su dinámica.

A la luz de estos resultados, se han realizado nuevas investigaciones fundamentadas en teorías físicas y matemáticas, cuyas metodologías son capaces de predecir el comportamiento de eventos aparentemente indeterministas como las epidemias,<sup>(12,13,14)</sup> a partir de la teoría de la probabilidad y la caminata al azar, *Rodríguez* y otros desarrollaron una metodología que

permite evaluar la dinámica geométrica temporal de las epidemias, para predecir con un enfoque basado en la física y la matemática teórica.<sup>(12,13,14)</sup>

La caminata al azar probabilista fue desarrollada por *Norbert Wiener*,<sup>(14)</sup> como un modelo para asociar un desplazamiento a la probabilidad de ocurrencia de determinado evento, de acuerdo con el fenómeno evaluado; por ejemplo, la asignación del desplazamiento hacia arriba para la probabilidad de cara y hacia abajo para la probabilidad de sello al lanzar una moneda, de esta forma con la secuencia de probabilidades se va elaborando y edificando la caminata y es posible acotar el comportamiento de un evento aparentemente aleatorio.<sup>(15)</sup> Para aplicar la caminata al azar probabilista es necesario determinar el cargamiento de probabilidades dentro del espacio muestral para aumentar el porcentaje de acierto de la predicción.<sup>(12,13,14,15)</sup> De esta manera es posible caracterizar y predecir fenómenos no deterministas como epidemias, que no han podido predecirse con exactitud desde la epidemiología y la estadística.

A partir de la metodología desarrollada por *Rodríguez* y otros se ha logrado predecir la evolución de diferentes variables asociadas a diferentes enfermedades como malaria, dengue y obesidad en diferentes periodos y territorios.<sup>(13,14,16)</sup> Recientemente se logró predecir el número de personas con VIH a nivel mundial, con un porcentaje de acierto del 98,95 % para el año 2010, del 98,82 % para el año 2011 y del 98,99 % para la predicción realizada para el año 2012.<sup>(12)</sup> De acuerdo con lo anterior, el propósito del presente estudio fue aplicar la caminata al azar probabilista para predecir el número de infectados de malaria en Antioquia, Colombia, para el segundo semestre del año 2020.

## Métodos

El presente es un estudio observacional longitudinal retrospectivo. La población evaluada corresponde a los casos notificados de malaria en el departamento de Antioquia. Se evaluó el número de casos de malaria notificados en el departamento de Antioquia, Colombia, en la base de datos del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA),<sup>(17)</sup> para cada semestre entre los periodos primer semestre del 2008 (2008-1) y primer semestre del 2020 (2020-1).

Se incluyó la sumatoria de casos de malaria no complicada que en la base de datos se reportaron como malaria asociada (formas mixtas), malaria por *P. falciparum*, malaria por *P. malariae* y malaria por *P. vivax*, reportados en el periodo descrito, en la base de datos de SIVIGILA,<sup>(17)</sup> en los 125 municipios del departamento de Antioquia. Estos casos corresponden a sujetos de todas las edades.

Se excluyó la información referente a los casos de malaria complicada y los casos de mortalidad por malaria.

Los cálculos se realizaron a partir del *número de casos notificados de malaria* de acuerdo con lo especificado en el apartado anterior, esta es una variable cuantitativa discreta. Durante el estudio se aplicaron las cinco ecuaciones que componen la metodología desarrollada por Rodríguez y otros,<sup>(13,14,16)</sup> mediante las cuales se calcula la *longitud euclidiana* (variable cuantitativa discreta), la *longitud probabilista* (variable cuantitativa continua), la *probabilidad del número de casos* (variable cuantitativa continua), la *desviación media cuadrática* (variable cuantitativa continua) y los valores que establecen el *rango de la predicción* (variable cuantitativa continua); de igual manera se calculó la *probabilidad de aumentos y disminuciones consecutivas del número de casos notificados* por semestre (variable cuantitativa continua).

Para ello se realizó un diagrama de dispersión utilizando el programa de hojas de cálculo Microsoft Excel 2010, relacionando el número de notificaciones de malaria en el departamento de Antioquia para cada semestre entre 2008-1 y 2020-1, con el propósito de comprobar la analogía del evento con una caminata al azar probabilista. Posteriormente se calcularon las longitudes de las variaciones semestrales mediante la ecuación 1, dando a cada variación la definición de evento, para construir el espacio total de probabilidad de la dinámica de la epidemia.

Ecuación 1: La longitud L de una variación anual es definida como:

$$L = \sqrt{(X_0 - X_f)^2 + (Y_0 - Y_f)^2}$$

donde:

$X_0$  y  $Y_0$ : son las coordenadas cartesianas del valor correspondiente al semestre inicial.

$X_f$  y  $Y_f$ : son las coordenadas cartesianas del valor siguiente.

La diferencia entre los valores de las coordenadas en el eje X, según el modelo de caminata al azar probabilista desarrollada por *Rodríguez* y otros,<sup>(13,14,16)</sup> se iguala a cero (0), teniendo en cuenta que los cambios en el número de casos notificados por semestre se reflejan únicamente en el eje y, y al definir una periodicidad de un semestre para realizar el registro del número de casos, la variación para el eje x entre cada semestre siempre es igual a 1. Al igualar a 0 las diferencias entre los valores de las coordenadas en el eje x se simplifican los cálculos.<sup>(13,14,16)</sup> Por esto las coordenadas cartesianas del semestre inicial son  $X_0$  y  $Y_0$  y las coordenadas cartesianas del semestre siguiente corresponden a  $X_0$  y  $Y_f$ .

Luego se calcularon todos los valores de probabilidad para la longitud de cada variación semestral mediante la ecuación 2:

$$P(L) = \frac{\text{Longitud variación semestral}}{\text{Total longitudes}} = \frac{L}{TL}$$

A continuación, se calculó la probabilidad del número semestral de casos notificados para el departamento de Antioquia, mediante la ecuación 3:

$$P(N) = \frac{\text{Número semestral de infectados}}{\text{Total de infectados}}$$

Es importante aclarar que la cuantificación de la probabilidad para las longitudes semestrales cuantifica variaciones geométricas entre cada semestre y la probabilidad para el número de casos cuantifica el número de casos en el periodo evaluado de 6 meses, respecto a la totalidad. La primera fue utilizada para realizar predicciones en el contexto de una ecuación de segundo grado, y la segunda para estudiar el cargamiento de la probabilidad de la dinámica de la epidemia.

Posteriormente se empleó la fórmula de la desviación media cuadrática (ecuación 4) para establecer si hay equiprobabilidad en la caminata al azar. De esta manera se determinó si la dinámica tiene un cargamiento de probabilidades o no; esta medida se estipuló a partir de la definición de *Feynmann* para la caminata al azar probabilística,<sup>(15,18)</sup> con la cual se cuantifica el cargamiento de un espacio muestral, no como una medida de dispersión alrededor de la media. Ecuación 4:

$$P(Rn) = \frac{\text{Número semestral de infectados}}{\text{Total de infectados}} \pm \frac{1}{2\sqrt{N}}$$

donde:

N: es el número de eventos en el espacio muestral, esto es el total de frecuencias en el espacio muestral.

Para realizar la predicción del número de infectados de malaria para el segundo semestre de 2020, se determinó un espacio muestral que cuantificó los últimos tres semestres consecutivos para delimitar la dinámica y saber el futuro valor de su variación. Para esto se reemplazó la expresión de la longitud euclidiana en la ecuación 2 que se desarrolló hasta una ecuación cuadrática en función de  $Y_f$  que se tomó como el año a predecir (ecuación 5):

$$Y_{(f)} = \frac{2Y_{(0)} \pm \sqrt{(-2Y_{(0)})^2 - 4\{Y_{(0)}^2 + (X_0 - X_0)^2 - [(P(L))^2 \times (TL)^2]\}}}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

$P(L)$ : es el promedio aritmético de la probabilidad para los tres últimos semestres.

$TL$ : es la sumatoria de las distancias para estos periodos. La representación de los datos del número de casos como una caminata al azar permite su estudio como un fenómeno probabilista, y una predicción de la longitud del segmento correspondiente al año estudiado.

Posteriormente se definió el promedio aritmético de la probabilidad de las longitudes para los semestres 2019-1, 2019-2 y 2020-1 y se realizó la sumatoria de las longitudes para estos mismos periodos, luego se reemplazaron estos valores en la ecuación 2, para obtener como solución de la ecuación dos valores que delimitaron la predicción para el semestre 2020-2.

A continuación, se analizaron dos nuevos espacios muestrales compuestos por dos eventos: aumento y disminución del número de casos con respecto al semestre anterior; se evaluaron los aumentos y las disminuciones de la dinámica como si fueran las dos caras de una moneda, calculando la frecuencia y probabilidad de presentación de aumentos o disminuciones en semestres consecutivos entre 2008 y 2020. Estos periodos se escogieron para evaluar si hay

diferencias en los aumentos y disminuciones en semestres consecutivos y cuantificar las variaciones con la probabilidad.

Con la predicción de aumentos y disminuciones consecutivos, se seleccionó uno de los dos valores obtenidos para refinar la predicción y determinar el valor correspondiente a la predicción para el semestre 2020-2.

### **Evaluación de la predicción**

Sobre la base de los datos obtenidos se predijo la dinámica para el semestre 2020-2, después se compararon las predicciones con las cifras reales tomadas de fuentes oficiales. Para este propósito se tuvieron en cuenta los valores reportados por el SIVIGILA,<sup>(17)</sup> y se determinó el porcentaje de acierto de la metodología al ser aplicada a una escala departamental.

### **Resultados**

El número de infectados de malaria en el departamento de Antioquia, para el periodo comprendido entre los semestres 2008-1 y 2020-1, varió entre 2313 y 31 634 (Tabla 1 y Fig. 1). Los valores de las longitudes halladas para este periodo variaron entre 73 y 16 611 (Tabla 1). Los valores de la probabilidad de longitudes del número de infectados se encontraron entre 0,001-0,248, y los valores de la proporción de las distancias respecto a la distancia mínima encontrada para este periodo estuvieron entre 1-228 (Tabla 1).

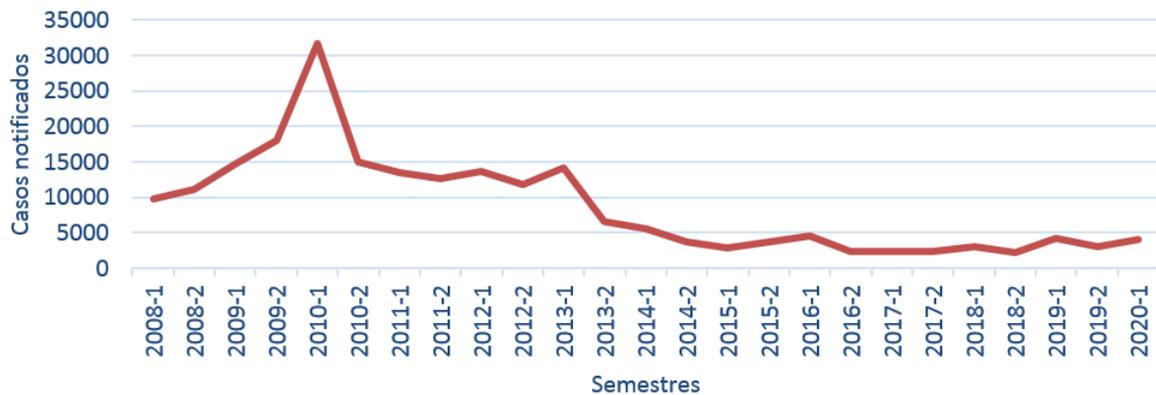
La probabilidad del número de infectados de malaria en el departamento de Antioquia para este mismo periodo varió entre 0,011-0,146. Los valores de la desviación media cuadrática oscilaron entre un rango de 0,010-0,147, y la diferencia entre estos últimos y el valor esperado varía en un rango de -0,001-0,001 (Tabla 2).

Los valores de la desviación media cuadrática para el periodo comprendido entre los semestres 2008-1 y 2020-1, junto con el cálculo de probabilidades halladas para el número de infectados de malaria, para cada semestre, muestran que no son equiprobables, en tanto se presentan probabilidades cargadas que determinan la predicción. Al resolver la ecuación 5 se obtuvo un rango comprendido entre 2720-5570 para el número de casos de malaria en el departamento de Antioquia para el semestre 2020-2. Este rango delimitará la predicción final para el número de casos.

**Tabla 1** - Número de casos de malaria para cada semestre evaluado y cálculos de longitud, valor medio y probabilidad de longitudes

Semestre	Número de casos de malaria	Longitudes	Valor medio	Probabilidad de las longitudes
2008-1	9795	-	-	-
2008-2	11 203	1408	19	0,021
2009-1	14 658	3455	47	0,052
2009-2	18 105	3447	47	0,051
2010-1	31 634	13 529	185	0,202
2010-2	15 023	16 611	228	0,248
2011-1	13 558	1465	20	0,022
2011-2	12 614	944	13	0,014
2012-1	13 634	1020	14	0,015
2012-2	11 894	1740	24	0,026
2013-1	14 097	2203	30	0,033
2013-2	6664	7433	102	0,111
2014-1	5594	1070	15	0,016
2014-2	3710	1884	26	0,028
2015-1	2860	850	12	0,013
2015-2	3650	790	11	0,012
2016-1	4637	987	14	0,015
2016-2	2427	2210	30	0,033
2017-1	2338	89	1	0,001
2017-2	2411	73	1	0,001
2018-1	3132	721	10	0,011
2018-2	2313	819	11	0,012
2019-1	4240	1927	26	0,029
2019-2	3019	1221	17	0,018
2020-1	4145	1126	15	0,017

Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA), Colombia.<sup>(17)</sup>



**Fig. 1** - Número de casos notificados de malaria para cada semestre entre 2008-1 y 2020-1 como una caminata al azar.

**Tabla 2** - Cálculos probabilistas para el número de casos de malaria para cada semestre

Semestre	Probabilidad del número de casos P (N)	Desviación media cuadrática (DMC)			
		DMC+	DMC-	DMC+ P (N)	DMC- P(N)
2008-1	0	0	0,044	0,001	-0,001
2008-2	0,052	0,053	0,050	0,001	-0,001
2009-1	0,067	0,069	0,066	0,001	-0,001
2009-2	0,083	0,084	0,082	0,001	-0,001
2010-1	0,146	0,147	0,144	0,001	-0,001
2010-2	0,069	0,070	0,068	0,001	-0,001
2011-1	0,062	0,063	0,061	0,001	-0,001
2011-2	0,058	0,059	0,057	0,001	-0,001
2012-1	0,063	0,064	0,062	0,001	-0,001
2012-2	0,055	0,056	0,054	0,001	-0,001
2013-1	0,065	0,066	0,064	0,001	-0,001
2013-2	0,031	0,032	0,030	0,001	-0,001
2014-1	0,026	0,027	0,025	0,001	-0,001
2014-2	0,017	0,018	0,016	0,001	-0,001
2015-1	0,013	0,014	0,012	0,001	-0,001
2015-2	0,017	0,018	0,016	0,001	-0,001
2016-1	0,021	0,022	0,020	0,001	-0,001
2016-2	0,011	0,012	0,010	0,001	-0,001
2017-1	0,011	0,012	0,010	0,001	-0,001

2017-2	0,011	0,012	0,010	0,001	-0,001
2018-1	0,014	0,015	0,013	0,001	-0,001
2018-2	0,011	0,012	0,010	0,001	-0,001
2019-1	0,020	0,021	0,018	0,001	-0,001
2019-2	0,014	0,015	0,013	0,001	-0,001
2020-1	0,019	0,020	0,018	0,001	-0,001

Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA), Colombia.<sup>(17)</sup>

A fin de determinar el evento más probable para el semestre 2020-2 en relación con los aumentos o disminuciones de infectados de malaria en Antioquia, se analizó la frecuencia y probabilidad de los valores consecutivos de los aumentos o disminuciones (Tabla 3).

**Tabla 3** - Cálculos probabilistas de acuerdo con los aumentos y disminuciones consecutivas en el tiempo, del número de casos notificados por semestre

Semestres consecutivos 2008-1 a 2020-1		Aumentos		Disminuciones	
		V	P	V	P
1		2	0,154	2	0,154
2		2	0,308	1	0,154
3		0	0	1	0,230
Total	13	6	0,462	7	0,538

V: valor; P: probabilidad.

Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA), Colombia.<sup>(17)</sup>

De acuerdo con la evaluación de aumentos y disminuciones consecutivas en el tiempo se determinó que el evento más probable para el periodo a predecir correspondió a una disminución del número de casos notificados. De acuerdo con lo anterior se refinó la predicción y se determinó un valor de 3433 casos notificados para el semestre 2020-2, que al compararse con los reportes oficiales de SIVIGILA, que correspondieron a 3276 casos notificados, se alcanzó un porcentaje de acierto del 95,4 %.

## Discusión

Este es el primer trabajo en el que se realiza una predicción semestral de nuevos casos de malaria para el departamento de Antioquia con un porcentaje de acierto mayor del 95 %, en el periodo 2020-2. Es importante resaltar que en trabajos anteriores se habían realizado predicciones anuales; sin embargo, en el presente estudio se redujo la escala temporal a trabajar y se predijo el número de notificaciones de un periodo del que ya se tienen registros, con el propósito de comprobar la capacidad predictiva de la metodología y poder calcular el porcentaje de acierto de esta.

Tradicionalmente los cambios en la dinámica de la epidemia de malaria se han atribuido a diferentes factores demográficos, geográficos, ambientales y microbiológicos, tales como el nivel socioeconómico de la población, la accesibilidad a los servicios de salud, el índice de lluvias, uso de mosquiteros, entre otros.<sup>(9,10,11)</sup> Adicionalmente es importante resaltar que si bien los métodos predictivos desarrollados hasta el momento, basados en ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales y aplicaciones estadísticas han probado ser aplicables en las regiones donde se han desarrollado,<sup>(9,10)</sup> requieren el análisis de grandes grupos de variables que pueden no estar disponibles en su totalidad al momento de probar las metodologías en otros territorios.

Teniendo en cuenta lo anterior, se escogió la metodología desarrollada a partir del modelo de caminatas aleatorias y teoría de probabilidad de *Rodríguez* y otros<sup>(12,13,14)</sup> dada su capacidad para generar predicciones con alto porcentaje de acierto y la simplicidad de su aplicación; en contraste con los complejos modelos epidemiológicos y estadísticos.<sup>(9,10,11)</sup> En el presente trabajo únicamente se tuvo en cuenta una variable, que fue el número de casos notificados de malaria no complicada en el departamento de Antioquia en el periodo descrito en el apartado de metodología, y a partir del análisis geométrico temporal y probabilista de su dinámica, se calculó el valor esperado para la variable en el segundo semestre del año 2020.

Debido a que la metodología desarrollada por *Rodríguez* y otros tiene un enfoque acausal, no se tienen en cuenta factores externos de tipo ambiental, socioeconómico, filogenético ni de otro tipo para realizar las predicciones, lo cual implica una simplificación importantísima en materia de análisis y procesamiento de datos, y aún más importante, confiere a la metodología una alta reproducibilidad, superando las dificultades relacionadas con la aplicación del método predictivo en otras poblaciones, identificado en los modelos citados

anteriormente.<sup>(9,10,11)</sup> Las cualidades descritas confieren a la metodología aplicada en el presente trabajo amplias ventajas respecto a los modelos predictivos de corte epidemiológico y estadístico, sin mostrar hasta el momento desventajas para su aplicación.

Esta metodología permite que exista una comprensión más profunda de la dinámica de la epidemia de malaria en Colombia, como un comportamiento análogo al de una caminata al azar probabilista, mediante la cual se pueden establecer predicciones objetivas y reproducibles basadas en teorías físicas y matemáticas que encuentran en el evento una esencia acausal. Teniendo en cuenta el enfoque mencionado, se ha aplicado la caminata al azar probabilista en múltiples contextos, obteniendo altos porcentajes de acierto al realizar predicciones de diferentes epidemias; por ejemplo, se ha empleado esta metodología para predecir la dinámica de obesidad y sobrepeso infantil en diferentes países como Finlandia, Australia, Estados Unidos de América e Inglaterra con porcentajes de acierto mayores al 97,85 %.<sup>(16,19)</sup> También se determinó su aplicabilidad para predecir el número de muertes anuales asociadas a lesiones del tránsito en los Estados Unidos,<sup>(20)</sup> en ese estudio se alcanzó un porcentaje de acierto del 98 % al contrastar el valor predicho respecto al valor reportado para el año 2012.

Como conclusiones del presente trabajo, en primer lugar y en línea con el objetivo planteado, se halló que mediante la metodología desarrollada por *Rodríguez* y otros fue posible predecir el comportamiento de la malaria para el departamento de Antioquia en el segundo semestre del año 2020.

Se encontró que el enfoque novedoso aplicado permite evaluar el proceso salud-enfermedad desde una metodología objetiva y precisa, cuyas predicciones pueden ser aplicadas para dar cuenta del comportamiento de la morbilidad y mortalidad asociada a la malaria en otros territorios de Colombia y el mundo. Esta metodología es fácilmente extrapolable a otros territorios, puesto que se generan predicciones a partir de una variable única evaluada. Además, la presente metodología puede ser optimizada mediante una automatización en un *software*, en futuras investigaciones.

Los resultados del presente trabajo evidencian la posibilidad de realizar seguimientos de los casos de malaria desde el contexto de la física y la matemática teórica, contribuyendo a mejorar los sistemas de vigilancia epidemiológica. Además, brinda la posibilidad de utilizar

este tipo de metodologías como una herramienta para apoyar la toma de decisiones en materia de políticas públicas.

Predecir una disminución en el número de casos reportados en el presente trabajo es un indicio de que los planes propuestos para controlar la transmisión de malaria han sido eficaces. En un trabajo futuro, es posible mediante esta metodología identificar cuál de estos planes de acción es el que tiene mayor efectividad.

La perspectiva fisicomatemática acausal que fundamenta el presente trabajo también se ha empleado para el desarrollo de metodologías diagnósticas y predicciones en otras áreas de la medicina. Continuando esta línea de investigación *Rodríguez* y otros han desarrollado diversas metodologías basadas en la física y las matemáticas para caracterizar y predecir fenómenos que tradicionalmente se han abordado con una perspectiva causal, y fenómenos aparentemente aleatorios como la fluctuación en el conteo de linfocitos TCD4 en pacientes VIH positivo,<sup>(21)</sup> la dinámica cardíaca<sup>(22,23)</sup> y la unión de péptidos al antígeno leucocitario humano-HLA.<sup>(24)</sup> Todos estos estudios revelan el impacto que tienen las metodologías desarrolladas en el contexto de la física y la matemática teórica.

### **Agradecimientos**

Este trabajo hace parte de los productos del proyecto PYI-2021-002 financiado por el Departamento de Investigaciones de la Fundación Universitaria San Martín. Agradecemos a la directiva de dicha institución y su apoyo al mejoramiento de la investigación en Colombia. Extendemos nuestro agradecimiento a Insight Research Group SAS por su respaldo a nuestras investigaciones.

Las instituciones y personas aquí nombradas autorizan ser mencionadas.

### **Referencias bibliográficas**

1. Colombia Minsalud. Malaria. Minsalud.gov.co. 2020 [acceso 15/10/2020]. Disponible en: <https://n9.cl/f281z>
2. Medline plus. Malaria. Medline Plus enciclopedia médica. Medlineplus.gov. 2020 [acceso 16/10/2020]. Disponible en: <https://n9.cl/0ae9s>
3. World Health Organization. World malaria report 2018. Geneva: WHO; 2018 p. 4-57.

4. World Health Organization. El informe mundial sobre el paludismo 2019 de un vistazo. WHO; 2021 [acceso 21/06/2021]. Disponible en: <https://n9.cl/a7320>
5. Anyamba A, Chretien J, Britch S, Soebiyanto R, Small J, Jepsen R, *et al.* Global Disease Outbreaks Associated with the 2015-2016 El Niño Event. Scientific Reports. 2019 [acceso 21/06/2021];9(1):1-11. Disponible en: <https://n9.cl/mzxle>
6. Dhiman R, Sarkar S. El Niño Southern Oscillation as an early warning tool for malaria outbreaks in India. Malaria Journal. 2017 [acceso 21/06/2021];16(1):1-7. Disponible en: <https://n9.cl/fui6f>
7. Grillet M, El Souki M, Laguna F, León J. The periodicity of *Plasmodium vivax* and *Plasmodium falciparum* in Venezuela. Acta Tropica. 2014 [acceso 21/06/2021];129:52-60. Disponible en: <https://n9.cl/1yc04>
8. Mantilla G, Oliveros H, Barnston A. The role of ENSO in understanding changes in Colombia's annual malaria burden by region, 1960-2006. Malaria Journal. 2009 [acceso 21/06/2021];8(1):1-11. Disponible en: <https://n9.cl/54rdh>
9. Awine T, Silal S. Accounting for regional transmission variability and the impact of malaria control interventions in Ghana: A population level mathematical modelling approach. Malaria Journal. 2020 [acceso 21/06/2021];19(1):1-19. Disponible en: <https://n9.cl/edf8g>
10. Le P, Kumar P, Ruiz M. Stochastic lattice-based modelling of malaria dynamics. Malaria Journal. 2018 [acceso 21/06/2021];17(1):1-16. Disponible en: <https://n9.cl/bmerd>
11. Aheto J, Duah H, Agbadi P, Nakua E. A predictive model, and predictors of under-five child malaria prevalence in Ghana: How do LASSO, Ridge and Elastic net regression approaches compare? Preventive Medicine Reports. 2021 [acceso 21/07/2021];23:101475. Disponible en: <https://n9.cl/uxahb>
12. Rodríguez-Velásquez J, Oliveros-Acosta D, Soracipa-Muñoz M, Bernal L, Correa-Herrera S, Abraham-Martínez L, *et al.* Análisis probabilista con caminata al azar del número de personas viviendo con VIH mundialmente. Rev Facultad Nacional de Salud Pública. 2018 [acceso 21/06/2021];36(1):27-33. Disponible en: <https://n9.cl/mol7x>
13. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Arnold Y, Alvarez L, Bernal P, *et al.* Dinámica de la epidemia del dengue en Colombia: predicciones de la trayectoria de la epidemia. Rev Med. 2013 [acceso 20/06/2021];21(1):38-45. Disponible en: <https://n9.cl/z3ov0>

14. Rodríguez J, Prieto-Bohórquez S, Correa-Herrera S, Pérez-Díaz C, Soracipa-Muñoz M. Dinámica de la epidemia de malaria en Colombia: predicción probabilística temporal. Rev Salud Pública. 2017 [acceso 21/06/2021];19(1):52-9. Disponible en: <https://n9.cl/h0kyx>
15. Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Probabilidad. En: Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Física. Vol. 1. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A. México; 1998. p. 6-1, 6-16.
16. Rodríguez J, Prieto S, Fajardo E, Correa C, López F, Castro J, *et al.* Predicción de la dinámica temporal de egresos hospitalarios por obesidad en niños y jóvenes en Estados Unidos. Rev Chil Nutr. 2015 [acceso 21/06/2021];42(4):345-50. Disponible en: <https://n9.cl/nerlx>
17. PortalSivigila. 2019 Estadísticas de Vigilancia Rutinaria. Portalsivigila.ins.gov.co. 2021 [acceso 14/06/2021]. Disponible en: <https://n9.cl/knszi>
18. Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Leyes de la Termodinámica. En: Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Física. Vol. 1. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A. México; 1998. p. 1-44, 19-44.
19. Rodríguez J, Prieto S, Fajardo E, Lopez F, Castro J, Soracipa Y. Caminata al azar predictiva de la dinámica de obesidad y predicciones de obesidad y sobrepeso en la población infantil de Colombia y de variación peso/talla y peso/edad en México. Rev Med. 2013 [acceso 18/06/2021];21(2):26-36. Disponible en: <https://n9.cl/wr1s4>
20. Rodríguez-Velásquez J, González-Bernal M, Ruiz-Gómez A, Guzmán-de la Rosa E, Pallejá-Lopez D, Barrios-Arroyave F, *et al.* Predicción temporal del número de muertes por lesiones causadas por tránsito en Estados Unidos. Bionatura. 2021 [acceso 14/07/2021]. Disponible en: <https://n9.cl/9vp0x>
21. Rodríguez J, Prieto S, Melo M, Pérez C, Domínguez D, Bravo J, *et al.* Predicción de la concentración de linfocitos T CD4, con base en la teoría de conjuntos aplicada al seguimiento de pacientes con VIH. Acta Méd Costarric. 2016 [acceso 16/06/2021];58(2):56-61. Disponible en: <https://n9.cl/9anrc>
22. Rodríguez 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 Fac Med. 2014 [acceso 16/06/2021];62(4):539-46. Disponible en: <https://n9.cl/xwfug>

23. Hoyos N, Rodríguez J, Correa N, Medina E. Adult Heart Dynamics Evaluated from A Chaotic Mathematical Law. Applied Medical Informatics. 2019 [acceso 16/06/2021];41(3):102-10. Disponible en: <https://n9.cl/amrq8>
24. Rodríguez J. Teoría de unión al HLA clase II: teoría de probabilidad, combinatoria y entropía aplicadas a secuencias peptídicas. Inmunología. 2008 [acceso 16/06/2021];27(4):151-66. Disponible en: <https://n9.cl/upirj>

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

### **Financiación**

El presente resultado hace parte de los productos del proyecto PYI-2021-002, financiado por la Fundación Universitaria San Martín.

### **Contribuciones de los autores**

*Conceptualización:* Javier Rodríguez-Velásquez.

*Curación de datos:* César Valdés Cadena.

*Análisis formal:* César Valdés Cadena.

*Adquisición de fondos:* Jorge Salazar Flórez.

*Investigación:* Javier Rodríguez-Velásquez, Jorge Salazar Flórez.

*Metodología:* Javier Rodríguez-Velásquez, Signed Prieto Bohórquez, Sandra Correa Herrera.

*Administración del proyecto:* Sandra Correa Herrera.

*Recursos:* Jorge Salazar Florez.

*Software:* César Valdés Cadena.

*Supervisión:* Javier Rodríguez-Velásquez.

*Validación:* Javier Rodríguez-Velásquez.

*Visualización:* Sandra Correa Herrera.

*Redacción - borrador original:* César Valdés Cadena.

*Redacción - revisión y edición:* Signed Prieto Bohórquez, Sandra Correa Herrera.

<sup>a</sup>En Colombia y otras regiones de América al mosquito se le denomina popularmente “zancudo”.