

Dinámica de la epidemia de malaria en Colombia: Predicción probabilística temporal

Dynamics of the malaria epidemic in Colombia: temporal probabilistic prediction

Javier O. Rodríguez-Velásquez, Signed E. Prieto-Bohórquez, Sandra C. Correa-Herrera, Carlos E. Pérez-Díaz y María Y. Soracipa-Muñoz

Recibido 13 enero 2015/Enviado para Modificación 4 septiembre 2015/Aceptado 16 diciembre 2016

RESUMEN

JR: MD. Grupo Insight, Facultad de Medicina Universidad Militar Nueva Granada, Centro de Investigaciones Clínica del Country, Bogotá, Colombia. grupoinsight2025@yahoo.es; sitaroch@gmail.com

SP: Investigadora Grupo Insight. Universidad Militar Nueva Granada, Centro de Investigaciones Clínica del Country. Bogotá, Colombia. grupoinsight2025@gmail.com

SC: Psc. Investigadora Grupo Insight, Universidad Militar Nueva Granada, Centro de Investigaciones Clínica del Country. Bogotá, Colombia. scatalina-correah@hotmail.com

CP: MD. Infectólogo. Universidad Militar Nueva Granada. Hospital Militar Central. Bogotá, Colombia. cperez-diaz90@gmail.com

MS: Lic. Física. Investigadora Grupo Insight, Universidad Militar Nueva Granada, Centro de Investigaciones Clínica del Country. Bogotá, Colombia. sitaroch@gmail.com

Objetivo Realizar una predicción de la dinámica de la epidemia de malaria para el 2007 en Colombia con base en el análisis de la dinámica geométrica de 1960-2006 como una caminata al azar probabilista.

Materiales y Métodos Basados en la caminata al azar probabilística se estudió la dinámica geométrica del número de casos anuales de malaria registrados en Colombia durante los años 1960-2006, analizando el comportamiento probabilístico de aumentos y disminuciones consecutivos, y el comportamiento probabilístico de casos durante rangos de años consecutivos, para así realizar una predicción temporal de los casos.

Resultados Se desarrolló una metodología sencilla y acausal que predice los valores extremos 81 003 y 104 098 para el número de infectados en el año 2007, predicción que fue refinada con el análisis de las variaciones anuales obteniendo un valor de 104 098 para el número de infectados en el año 2007. Esta predicción fue posteriormente corroborada con los datos del Instituto Nacional de Salud de Colombia, correspondiendo al 95,6 % respecto al número de casos reportados.

Conclusión La comprensión del fenómeno acausal a partir de la caminata al azar probabilística permite realizar predicciones temporales, simples y prácticas, directamente comprobables y aplicables, economizando tiempo y recursos.

Palabras Clave: Probabilidad, *Plasmodium falciparum*, epidemias, malaria, predicción (*fuentes: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Objective To predict the dynamics of the malaria epidemic of 2007 in Colombia.

Materials and Methods Based on a random walk, the geometric dynamics of the number of annual cases of malaria registered in Colombia during the period 1960-2006 was studied by analyzing the probabilistic behavior of consecutive increases and decreases, as well as the probabilistic behavior of cases during consecutive year ranges, in order to make a temporary prediction of the cases.

Results A simple and acausal methodology that predicts the extreme values for the number of infected people in 2007 was developed; the prediction was refined by the analysis of the annual variations, obtaining a value of 104098 corresponding to the number of infected population in 2007. This prediction was corroborated later against the information of Instituto Nacional de Salud de Colombia (National Institute of Health), finding a 95.6 % correspondence with the number of reported cases.

Conclusion Understanding the acausal phenomenon based on a probabilistic random walk allows making temporal, simple and practical predictions that are directly verifiable and applicable, economizing time and sources.

Key Words: Probability, *Plasmodium falciparum*, epidemics, malaria, forecasting (*source: MeSH, NLM*).

La malaria es una causa importante de morbi-mortalidad en países tropicales. De acuerdo con la OMS, hubo más de 23 826 496 casos de malaria en el 2011 a nivel mundial (1). La mortalidad, actualmente estimada alrededor de 1000 000 de personas por año, ha aumentado en los años recientes (2). Por su ubicación y características climáticas, en Colombia la población está expuesta a la malaria, transmitida prevalentemente por *Plasmodium falciparum* y *P. vivax*, por lo que requiere control y vigilancia epidemiológica. Actualmente 25 millones de colombianos, presentan riesgo de infección, notificándose 79 909 casos en el año 2009 (3). El índice anual de incidencia parasitaria (IPA), ha presentado una tendencia variable, pasando de 5,90 en el 2000 a 4,93 en el 2005 y 7,9 en el 2009. Las tendencias son preocupantes en Guaviare, Antioquia y Amazonas, Departamentos con el mayor IPA en el 2009 (3). Pese a las estrategias implementadas para el control de la malaria, esta sigue siendo un problema de salud pública.

Estudios han evidenciado factores climáticos y biológicos que inciden en la dinámica de la epidemia (4,5), y se sugiere una relación entre los picos de las enfermedades de origen acuático con anomalías climáticas producidas por *el Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Se han asociado picos de Malaria al ENSO en Pakistán (6), Venezuela (7), y Colombia (8). Las correlaciones climáticas de los modelos estadísticos tienen utilidad limitada, son difíciles de extrapolar en espacio y tiempo, y tienen dificultad en la predicción; los modelos que representan las múltiples interacciones de la dinámica de la epidemia (8,9), son complejos con ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales y tienen la impredecibilidad del caos. Algunos modelos han probado que la educación comunitaria incide en la variación del número de infectados de malaria (10).

En el estudio de las epidemias, se han desarrollado metodologías físico-matemáticas con base en la probabilidad, la entropía o el uso de ecuaciones diferenciales de segundo orden, que han realizado predicciones anuales y semanales de la malaria, con exactitud superior al 90 % (11-13), y del dengue con efectividad superior al 91,82 % (14,15).

La probabilidad es una medida matemática adimensional que cuantifica la posible ocurrencia futura de un evento (16,17). En este trabajo se tomó el modelo probabilístico desarrollado por el creador de la cibernética (18) y representaciones de caminatas al azar a partir de este modelo, que representan una analogía con la representación del número de infectados de malaria anualmente, mediante la unión de rectas.

La caminata al azar probabilística definida por Norbert Wiener caracteriza un movimiento probabilístico acotando su dinámica y encontrando valores que predicen dentro de cier-

tos rangos la evolución de su dinámica (19); en este trabajo, la caminata al azar caracteriza la evolución de la dinámica anual del número de infectados por malaria en Colombia.

La desviación media cuadrática cuantifica la mecánica de la caminata y determina si hay equiprobabilidad de los eventos de un espacio muestral o un cargamiento de la probabilidad para eventos específicos, al ser comparada con el valor esperado (17).

El objetivo de este trabajo es predecir la dinámica de la malaria en Colombia, mediante el estudio acausal del fenómeno y desde cuantificaciones probabilísticas de su representación geométrica. Con rectas, medidas de longitud y la ecuación de la longitud probabilística, se predecirá temporalmente el número de casos para 2007.

MÉTODOS

Definiciones

Longitud: hace referencia a la longitud de una variación anual, definida como L , así:

$$L = \sqrt{(X_0 - X_1)^2 + (Y_0 - Y_1)^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Las coordenadas cartesianas del valor del año inicial son X_0 y Y_0 , mientras que X_1 y Y_1 son las coordenadas cartesianas del año siguiente. De acuerdo con el modelo de caminata al azar, las coordenadas en X son siempre las mismas, pues el movimiento es estudiado en el eje Y . Esto significa que no hay variación en el eje X , por lo cual su valor es siempre igual a cero, mientras que el número de infectados reportados para cada año es representado en el eje Y .

Probabilidad de la longitud L : corresponde a la división de la longitud de una variación anual entre el total de longitudes, esto es, la suma de todas las longitudes de variación anual del espacio muestral en rangos de tiempo acotados y consecutivos:

$$P(L) = \frac{\text{Longitud variación anual}}{\text{Total longitudes}} = \frac{L}{TL} \quad \text{Ecuación 2}$$

Probabilidad de casos infectados: es el número de casos para cada año estudiado dividido entre el total de casos, que corresponde a la suma total del número de infectados de malaria que conforman el espacio muestral:

$$P(N) = \frac{\text{Numero caso anual}}{\text{Total casos}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Aclaración: La cuantificación de la probabilidad para las longitudes anuales cuantifica variaciones geométricas año a año y la probabilidad para el número de casos cuantifica el número de casos anuales respecto a la totalidad. La primera fue usada para predecir en el contexto de las ecuaciones de

segundo grado, y la segunda para estudiar el cargamiento de la probabilidad de la dinámica de la epidemia.

Desviación media cuadrática del número de casos: se utiliza la fórmula de la desviación equiprobable de la caminata al azar para establecer si la dinámica del número de casos es equiprobable o no; esta medida se empleó a partir de la definición de Feynmann para la caminata al azar probabilística, usada para cuantificar el cargamiento de un espacio muestral y no como una medida de dispersión alrededor de la media (17):

$$P(Rn) = \frac{\text{Numero casos anual}}{\text{Total casos}} \pm \frac{1}{2\sqrt{N}} \quad \text{Ecuación 4}$$

N es el número de eventos del espacio muestral o el total de casos.

Procedimiento

Cálculo de probabilidades de las distancias anuales

Se construyó una gráfica del número de casos de infectados de malaria en Colombia (Figura 1), con los datos del Instituto Nacional de Salud de Colombia (INS) del Sistema de Vigilancia –SIVIGILA– y se calcularon las distancias de las variaciones anuales (ecuación 1), para construir el espacio muestral total de la dinámica de la malaria, donde cada variación anual es definida como un evento. Se calcularon los valores de probabilidad para cada longitud correspondiente a cada variación anual (ecuación 2) y la proporción de cada variación anual respecto a la distancia mínima encontrada para la variación anual en la gráfica, estudiando las variaciones a partir de estos cálculos para todos los años.

Cálculo de probabilidades del número de infectados anuales y desviación media cuadrática

Se determinó el espacio muestral que cuantifica el número de infectados anuales durante el período 1960-2006, calculando los valores de probabilidad de infección anual, (ecuación 3), para determinar los valores de la desviación media cuadrática para cada probabilidad, (ecuación 4), y finalmente calcular las diferencias entre los valores de probabilidad (valor esperado) y su desviación, con el fin de estudiar si las probabilidades son equiprobables o no en este rango.

Posteriormente, se determinaron tres espacios muestrales que cuantifican el número de infectados anuales para los períodos 1960-1972, 1973-1990 y 1991-2006, calculando los valores de probabilidad de infección anual, (ecuación 3), la desviación media cuadrática para cada probabilidad, (ecuación 4), y las diferencias entre los valores de probabilidad y su desviación. Estos rangos temporales fueron escogidos porque presentan valores en el número de infectados bien diferenciados en la dinámica de la epidemia.

Cálculo de la probabilidad de aumentos y disminuciones anuales

Se determinaron dos nuevos espacios muestrales compuestos por dos eventos: aumento y disminución del número de casos con respecto al año 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 años consecutivos para los períodos 1960-1986 y 1987-2006 respectivamente. Estos períodos se escogieron para evaluar si hay diferencias en los aumentos y disminuciones en años consecutivos y cuantificar las variaciones con la probabilidad.

Predicción del número de casos de malaria para el 2007

Se determinó un espacio muestral que cuantifica los últimos tres años consecutivos, para delimitar la dinámica y saber el futuro valor cuantitativo de su variación; para esto, se definió el promedio aritmético de estos tres años como el valor de la probabilidad para la longitud del año 2007, y se reemplazó este valor en la ecuación 2, que se desarrolló hasta una ecuación cuadrática en función de Y_1 , (ecuación 5), para obtener como solución de la ecuación dos valores que corresponden a la predicción para el año 2007.

Ecuación 5

$$Y_{2007} = \frac{2Y_{2006} \pm \sqrt{(-2Y_{2006})^2 - 4\{Y_{2006}^2 + (X_0 - X_0)^2 - [(P_{(L)})^2 \times (TL)^2]\}}}{2}$$

$P_{(L)}$ es el promedio aritmético de la probabilidad para los tres últimos años, y TL la sumatoria de las distancias para estos años. 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.

Con la predicción de aumentos y disminuciones consecutivos, se seleccionó uno de los dos valores obtenidos para determinar un valor de predicción para el 2007.

Evaluación de la predicción

Para evaluar la objetividad de la predicción, se comparó porcentualmente el valor específico, escogido a partir de la predicción de aumentos y disminuciones con el número total de casos registrados en el Instituto Nacional de Salud de Colombia para el 2007, considerando válida la predicción si esta se encuentra primero, encima del 90 % y luego del 95 %; si se encuentra arriba del 95% se considera más acertada.

Consideraciones éticas

Este proyecto cumple con las normas éticas de la Declaración de Helsinki de 1975 y las normas de la resolución No. 008430 de 1993 de Colombia. Se clasifica como

investigación de mínimo riesgo, pues se hacen cálculos matemáticos sobre una base de datos.

RESULTADOS

Las distancias de las variaciones anuales calculadas para los casos anuales de infectados, variaron en rangos de 0–83000, siendo el valor mínimo diferente de cero de este rango, correspondiente al patrón de comparación para la gráfica (Tabla 1). La probabilidad de la longitud de la variación anual para los casos anuales de infectados, varió en rangos de 0-0,095. Los valores de probabilidad de las longitudes no fueron equiprobables en todo el período.

Tabla 1. Cálculo de probabilidades de las distancias anuales

Año	D	D/M	P	Año	D	D/M	P	Año	D	D/M	P
1961	8000	8	0,009	1976	7000	7	0,008	1992	0	0	0,000
1962	0	0	0,000	1977	24000	24	0,027	1993	55000	55	0,063
1963	1000	1	0,001	1978	11000	11	0,013	1994	2000	2	0,002
1964	3000	3	0,003	1979	9000	9	0,010	1995	60000	60	0,068
1965	3000	3	0,003	1980	5000	5	0,006	1996	53000	53	0,060
1966	4000	4	0,005	1981	5000	5	0,006	1997	47000	47	0,054
1967	4000	4	0,005	1982	17000	17	0,019	1998	8000	8	0,009
1968	1000	1	0,001	1983	27000	27	0,031	1999	21000	21	0,024
1969	11000	11	0,013	1984	51000	51	0,058	2000	60000	60	0,068
1970	5000	5	0,006	1985	1000	1	0,001	2001	69000	69	0,079
1971	11000	11	0,013	1986	33000	33	0,038	2002	27000	27	0,031
1972	9000	9	0,010	1987	1000	1	0,001	2003	24968	25	0,028
1973	25000	25	0,029	1988	12000	12	0,014	2004	1081	1	0,001
1974	33000	33	0,038	1989	0	0	0,000	2005	14558	15	0,017
1975	10000	10	0,011	1990	1000	1	0,001	2006	19004	19	0,022
				1991	83000	83	0,095				

D: Valores de Distancia, D/M: Proporción respecto al patrón de comparación, P: Probabilidad para cada longitud correspondiente a cada variación anual del número total de infectados en Colombia, 1960-2006

La probabilidad para el número de casos anuales reportados para 1960-2006 varió en un rango de 0,002–0,049, la desviación media cuadrática para estos valores varió en un rango de 0,018–0,13; las diferencias entre estos últimos y el valor de probabilidad (valor esperado) variaron en un rango de 0,013 a 0,12 (Tabla 2).

La probabilidad para el número de casos anuales cuantificados en tres períodos diferentes 1960-1972, 1973- 1990 y 1991-2006 variaron en un rango de 0,019-0,13, la desviación media cuadrática de estos valores varió en un rango de 0,018–0,131; las diferencias entre estos últimos y el valor de probabilidad variaron en un rango de -0,0009 a 0,0009 (Tabla 3).

Las diferencias entre los valores de probabilidad y la desviación media cuadrática muestran que el comportamiento de la malaria tiende más a la equiprobabilidad en los rangos de tiempo seleccionados con respecto al período total (1960-2006) y que la menor diferencia entre el valor esperado y la desviación, es decir la zona con mayor cargamiento en la probabilidad, se encuentra en el período 1991–2006, pues el factor $\pm \frac{1}{2\sqrt{N}}$ de la ecuación 4 con el que se calcula la desviación respecto al valor esperado, se hace más pequeño en este rango de tiempo y es inversamente proporcional a la suma del número total de infectados (N), que es mayor para ése período.

Respecto a los aumentos y disminuciones, para el período de 1960 a 1986, 18 de estos años presentaron comportamiento de aumento respecto al año anterior, 7 de disminución y 1 año a un valor igual; para este período, el número de aumentos consecutivos varió entre uno y cinco años y el número de disminuciones conse-

Tabla 2. Cálculo de Probabilidades del Número de Infectados Anuales y Desviación Media Cuadrática

Año	P	+Dmc	-Dmc	+Dmc-P	-Dmc-P	Año	P	+Dmc	-Dmc	+Dmc-P	-Dmc-P
1960	0,002	0,031	0,030	0,029	0,028	1984	0,014	0,045	0,044	0,031	0,030
1961	0,004	0,058	0,057	0,054	0,053	1985	0,014	0,046	0,045	0,031	0,031
1962	0,004	0,058	0,057	0,054	0,053	1986	0,023	0,073	0,072	0,050	0,049
1963	0,005	0,062	0,061	0,057	0,056	1987	0,023	0,073	0,073	0,050	0,050
1964	0,004	0,051	0,051	0,048	0,047	1988	0,026	0,083	0,082	0,057	0,056
1965	0,005	0,062	0,061	0,057	0,056	1989	0,026	0,083	0,082	0,057	0,056
1966	0,006	0,075	0,075	0,070	0,069	1990	0,026	0,082	0,082	0,056	0,056
1967	0,007	0,089	0,088	0,082	0,082	1991	0,047	0,075	0,074	0,027	0,026
1968	0,007	0,092	0,092	0,085	0,085	1992	0,047	0,075	0,074	0,027	0,026
1969	0,010	0,130	0,129	0,120	0,119	1993	0,033	0,052	0,052	0,019	0,018
1970	0,008	0,113	0,112	0,104	0,104	1994	0,033	0,051	0,051	0,019	0,018
1971	0,006	0,075	0,075	0,070	0,069	1995	0,048	0,076	0,075	0,028	0,027
1972	0,008	0,106	0,105	0,098	0,097	1996	0,034	0,054	0,054	0,020	0,019
1973	0,014	0,046	0,045	0,031	0,031	1997	0,046	0,073	0,072	0,027	0,026
1974	0,006	0,019	0,018	0,013	0,012	1998	0,049	0,077	0,076	0,028	0,027
1975	0,008	0,027	0,026	0,019	0,018	1999	0,043	0,068	0,067	0,025	0,024
1976	0,010	0,033	0,032	0,023	0,022	2000	0,028	0,044	0,043	0,016	0,015
1977	0,016	0,052	0,051	0,036	0,035	2001	0,045	0,072	0,071	0,026	0,025
1978	0,014	0,043	0,043	0,030	0,029	2002	0,038	0,061	0,060	0,022	0,021
1979	0,016	0,051	0,050	0,035	0,034	2003	0,032	0,051	0,050	0,019	0,018
1980	0,015	0,047	0,046	0,032	0,031	2004	0,032	0,051	0,050	0,019	0,018
1981	0,016	0,051	0,050	0,035	0,034	2005	0,029	0,045	0,044	0,017	0,016
1982	0,020	0,064	0,064	0,044	0,043	2006	0,024	0,038	0,037	0,014	0,013
1983	0,027	0,086	0,086	0,059	0,058						

P: Valores de probabilidad del Número de Infectados Anuales. (+D_{mc}), (-D_{mc}): Desviación media cuadrática. (+D_{mc}-P), (-D_{mc}-P): Diferencia entre estos, para 1960-2006

cutivas entre uno y dos años; para los rangos de años consecutivos las probabilidades variaron entre 0–0,23, y variaciones mayores a cinco años consecutivos tenían un valor de cero (Tabla 4). Para el período de 1987 a 2006, 8 de estos años presentaron comportamiento de aumento respecto al año anterior, 10 de disminución y 2 años a un valor igual; para este período el número de aumentos y disminuciones consecutivas variaron entre uno y dos años; para los rangos de años consecutivos las probabilidades variaron entre 0–0,40, y variaciones mayores a dos años consecutivos tanto en aumentos como en disminuciones tenían un valor de probabilidad igual a cero (Tabla 5).

El valor promedio de la probabilidad de la variación anual para 2004-2006 es 0,33, encontrándose que los dos valores predichos del número de casos para el 2007 fueron 81 003 y 104 098 (Tabla 1).

Las variaciones para los años 2005 y 2006 presentan disminución respecto al año anterior, lo que predice partiendo de los resultados anteriores que el valor para el año 2007 aumentará respecto al año anterior, pues la probabilidad de tres variaciones consecutivas iguales es cero, por lo tanto el valor predicho para el año 2007 fue 104 098 infectados (Tabla 2), valor corroborado con los datos del INS, donde en la semana epidemiológica 51, correspondiente a la semana del 16 al 22 de diciembre del año 2007 se habían reportado 108 886 infectados, encontrando que el valor predicho corresponde al 95,60 % respecto al valor real. Este corresponde al acumulado para la fecha mencionada.

Tabla 4. Frecuencia y probabilidad de aumentos y disminuciones consecutivas en el período 1960-1986

Número años Consecutivos (1960-1986)	Aumentos		Disminuciones		Valor constante	
	Frecuencia	Probabilidad	Frecuencia	Probabilidad	Frecuencia	Probabilidad
1	3	0,12	5	0,19	1	0,04
2	2	0,15	1	0,08	0	0
3	2	0,23	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	1	0,19	0	0	0	0
Total	18	0,69	7	0,27	1	0,04

Tabla 5. Frecuencia y Probabilidad de aumentos y disminuciones consecutivas en el período 1987-2006

Número años Consecutivos (1987-2006)	Aumentos		Disminuciones		Valor constante	
	Frecuencia	Probabilidad	Frecuencia	Probabilidad	Frecuencia	Probabilidad
1	4	0,20	2	0,10	2	0,10
2	2	0,20	4	0,40	0	0
3	0	0	0	0	0	0
Total	8	0,40	10	0,50	2	0,10

DISCUSIÓN

Este es el primer trabajo en el cual, con base en la caminata al azar probabilística, se predice el número total de casos de infectados de malaria en Colombia, al margen de relaciones causales, evidenciando una auto-organización del fenómeno, lo que contribuye a su estudio desde una perspectiva sencilla, a partir de la longitud probabilística y de su desarrollo algebraico en una ecuación de segundo grado, que cuantifica la posibilidad futura del número de infectados para el 2007, aplicable a sistemas de vigilancia epidemiológica, que permitiría tomar decisiones en salud pública.

Tabla 3. Valores de la probabilidad de número de infectados anuales y desviación media cuadrática para los tres espacios muestrales correspondientes a los períodos 1960-1972, 1973-1990 y 1991-2006

1960-1972						1973-1990						1991-2006					
Año	P	+Dmc	-Dmc	+Dmc-P	-Dmc-P	Año	P	+Dmc	-Dmc	+Dmc-P	-Dmc-P	Año	P	+Dmc	-Dmc	+Dmc-P	-Dmc-P
1960	0,031	0,032	0,030	0,0009	-0,0009	1973	0,046	0,046	0,045	0,0005	-0,0005	1991	0,078	0,078	0,077	0,0003	-0,0003
1961	0,058	0,059	0,057	0,0009	-0,0009	1974	0,019	0,019	0,018	0,0005	-0,0005	1992	0,078	0,078	0,077	0,0003	-0,0003
1962	0,058	0,059	0,057	0,0009	-0,0009	1975	0,027	0,027	0,026	0,0005	-0,0005	1993	0,054	0,055	0,054	0,0003	-0,0003
1963	0,061	0,062	0,061	0,0009	-0,0009	1976	0,033	0,033	0,032	0,0005	-0,0005	1994	0,054	0,054	0,053	0,0003	-0,0003
1964	0,051	0,052	0,050	0,0009	-0,0009	1977	0,052	0,052	0,052	0,0005	-0,0005	1995	0,079	0,079	0,078	0,0003	-0,0003
1965	0,061	0,062	0,061	0,0009	-0,0009	1978	0,043	0,044	0,043	0,0005	-0,0005	1996	0,056	0,057	0,056	0,0003	-0,0003
1966	0,075	0,076	0,074	0,0009	-0,0009	1979	0,050	0,051	0,050	0,0005	-0,0005	1997	0,076	0,077	0,076	0,0003	-0,0003
1967	0,089	0,090	0,088	0,0009	-0,0009	1980	0,046	0,047	0,046	0,0005	-0,0005	1998	0,080	0,080	0,079	0,0003	-0,0003
1968	0,092	0,093	0,091	0,0009	-0,0009	1981	0,050	0,051	0,050	0,0005	-0,0005	1999	0,071	0,071	0,070	0,0003	-0,0003
1969	0,130	0,131	0,129	0,0009	-0,0009	1982	0,064	0,065	0,064	0,0005	-0,0005	2000	0,046	0,046	0,045	0,0003	-0,0003
1970	0,113	0,114	0,112	0,0009	-0,0009	1983	0,086	0,087	0,086	0,0005	-0,0005	2001	0,075	0,075	0,074	0,0003	-0,0003
1971	0,075	0,076	0,074	0,0009	-0,0009	1984	0,045	0,045	0,044	0,0005	-0,0005	2002	0,063	0,064	0,063	0,0003	-0,0003
1972	0,106	0,107	0,105	0,0009	-0,0009	1985	0,046	0,046	0,045	0,0005	-0,0005	2003	0,053	0,053	0,052	0,0003	-0,0003
						1986	0,072	0,073	0,072	0,0005	-0,0005	2004	0,053	0,053	0,053	0,0003	-0,0003
						1987	0,073	0,074	0,073	0,0005	-0,0005	2005	0,047	0,047	0,047	0,0003	-0,0003
						1988	0,083	0,083	0,082	0,0005	-0,0005	2006	0,039	0,039	0,039	0,0003	-0,0003
						1989	0,083	0,083	0,082	0,0005	-0,0005						
						1990	0,082	0,083	0,082	0,0005	-0,0005						

P: Valores de probabilidad respecto a los tres espacios muestrales definidos. (+Dmc), (-Dmc): Desviación media cuadrática (+Dmc-P), (-Dmc-P): Diferencia entre estos.

Se han desarrollado varios modelos matemáticos que tienen en cuenta múltiples factores, y presentan limitaciones, impidiendo una generalización metodológica (5-9). En contraposición, se han desarrollado investigaciones que predicen la dinámica de las epidemias desde una perspectiva acausal; tal es el caso de una metodología que emplea medidas de probabilidad, entropía y relaciones S/k y predice espacio temporalmente la aparición de brotes de malaria en 820 municipios colombianos en tres semanas; con esta metodología se superan las predicciones temporales basadas en canales epidemiológicos, que requieren información previa de 5 a 7 años, logrando un nivel de predicción del 99,86% (11). También, se desarrollaron dos predicciones de la dinámica anual de malaria en Colombia, una con base en el análisis probabilista de rangos de infectados con una exactitud para el año 2007 del 100 % (12) y otra basada en la ecuación diferencial de segundo orden para la aceleración, aplicada a la trayectoria de la epidemia establecida para rangos de infectados, prediciendo que la totalidad de trayectorias posibles de la epidemia se confinan en atractores circulares concéntricos, prediciendo los rangos de valores de las trayectorias para 2005, 2006 y 2007 (13). El presente trabajo plantea una metodología probabilística acausal de predicción simple, buscando órdenes matemáticos y físicos subyacentes a la epidemia, lo que permite realizar una predicción acausal simple en un rango que posteriormente es igualado a un punto dentro del mismo y que corresponde a un número específico de infectados, que se comparó con el valor real.

Se desarrollaron medidas análogas a las realizadas en el presente trabajo, para la predicción de dengue en Colombia, logrando un porcentaje de efectividad del 90,4 % (20), también, para la predicción del índice de obesidad en Estados Unidos, Finlandia, Australia e Inglaterra para 1997, logrando porcentajes de efectividad iguales o superiores al 97,85 % (21). Se establecieron simulaciones predictivas de la obesidad infantil y juvenil en México y Colombia para el 2015 (21). Los resultados obtenidos en dichas investigaciones y el alto porcentaje de predicción de este trabajo, evidencian que estas metodologías son útiles en epidemias, tanto infecciosas como no infecciosas.

La evaluación de los incrementos y disminuciones comparados consecutivamente cada año y divididos en dos períodos evidenciaron el comportamiento probabilístico y “determinista” de la malaria, pues para 1987-2006 no se encuentra un rango de tres o más años consecutivos con el mismo comportamiento; la probabilidad de que la epidemia aumente o disminuya durante tres años consecutivos es cero, lo que sustenta las relaciones predictivas consecutivas, y predice que para el año 2007 el número de casos aumentará pues para el 2005 y el 2006 disminuyó (Figura 1 y 2)

Figura 1. Valores de predicción correspondientes al número de casos para el 2007.

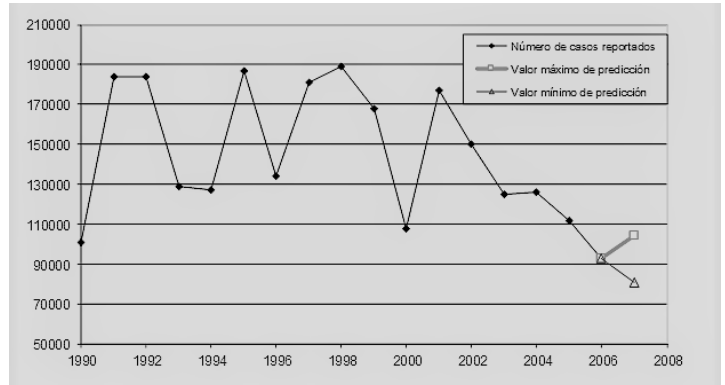
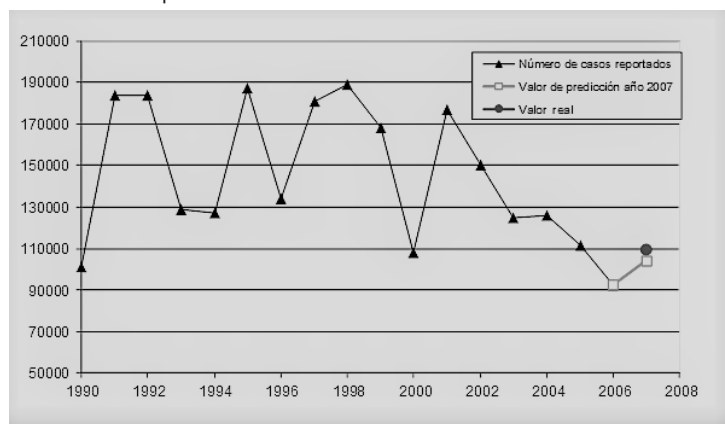


Figura 2. Valor predicho para el número de casos para el año 2007, y valor real del acumulado reportado por el INS correspondiente al 22 de diciembre de 2007



Así mismo, el cálculo de la desviación media cuadrática evidenció que la dinámica de la epidemia posee una “inercia probabilística” o que existe un cargamiento de las probabilidades, es decir, que el número de infectados anuales se mantiene más o menos constante durante períodos de tiempo consecutivos, lo que sustenta la evaluación de la malaria a partir de los últimos años, pues estos valores se encuentran en un rango acotado y ninguno se desvía considerablemente de su valor esperado.

Una caminata al azar, tendría una trayectoria impredecible; pero este estudio, en un tema tan aparentemente complejo, encontró dinámicas simples y predecibles en rangos acotados. Desde el punto de vista teórico, cabe resaltar que se obvió el tiempo, igualándolo a cero y estudiando solamente las variaciones en el eje Y, pues la longitud probabilística realiza la predicción temporal.

Inicialmente, se predice un rango, obtenido al desarrollar la ecuación de la longitud probabilística como una función del número de infectados que corresponde a la predicción; las probabilidades de aumentos y disminuciones consecutivas son evaluadas para predecir sistemáticamente y sin establecer hipótesis de trabajo (22), un

valor específico de este rango. Así, el rango de predicción no es un intervalo de confianza estadístico, pues no existe un parámetro poblacional desconocido (22), sino una distribución de probabilidad en el contexto de una demostración algebraica, donde está contenido el punto que determina la predicción para el año 2007.

Se han aplicado metodologías físico-matemáticas en la cardiología (23-27), la inmunología, la biología molecular (28, 29), el comportamiento neoplásico de células de cérvix (30) y el número de linfocitos TCD4 en pacientes con VIH/SIDA (31), que permiten hallar soluciones a nivel clínico, experimental y en salud pública •

Agradecimientos: Agradecemos a la Universidad Militar Nueva Granada, especialmente a su Vicerrectoría de Investigaciones, al Fondo de Investigaciones y a la Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, por el apoyo brindado. Agradecemos especialmente a los doctores Fernando Cantor, Vicerrector de Investigaciones, Martha Bahamón, Vicerrectora Académica, Alejandro Castro, Jefe de la División de Investigación Científica Howard Junca, Director Centro de Investigaciones Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Ericsson Coy, Vicedecano de Ciencias Básicas y Aplicadas, José Filgueira, Decano de la Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas. Agradecemos también al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, a los Doctores Tito Tulio Roa, Director de Educación Médica, Jorge Ospina, Director Médico, Alfonso Correa, Director del Centro de Investigaciones, a la Doctora Adriana Lizbeth y a la enfermera Silvia Ortiz.

Financiación: Trabajo derivado del proyecto CIAS-1455 financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada - Vigencia 2014.

Conflictos de intereses: Ninguno.

REFERENCIAS

- Organización Mundial de la Salud. Estadísticas sanitarias mundiales- 2013. [Internet] Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/82218/1/9789243564586_spa.pdf. Consultado abril de 2014.
- World Health Organization. Guidelines for the treatment of malaria-2010. [Internet]. Disponible en: <http://www.who.int/malaria/publications/atoz/9789241547925/en/index.html>. Consultado enero de 2012.
- Instituto nacional de salud. Subdirección de vigilancia y control. Protocolo de vigilancia de malaria 2010. [Internet]. Disponible en: <http://www.minsalud.gov.co/comunicadosPrensa/Documents/MALARIA.pdf>. Consultado enero de 2012.
- Biodiversity. Lancet. [Internet]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)92069-6](http://dx.doi.org/10.1016/0140-6736(93)92069-6). Consultado enero de 2012.
- Unninaray S, Sprigg W. Climate and the emergence and spread of infectious diseases. EOS. 1995; 76:478.
- Bouma MJ, van der Kaay HJ. Epidemic malaria in India and el Niño Southern Oscillation. Lancet. 1994; 344: 1638-1639.
- Bouma MJ, Dye C. Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. JAMA. 1997; 278: 1772-1774.
- Poveda G, Rojas W. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno el niño—oscilación del Sur. Rev Acad Col Cienc. 1997; 21(81): 421-429.
- Malaria Journal. Climate prediction of el Niño malaria epidemics in north-west Tanzania. [Internet]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1186/1475-2875-6-162>. Consultado en marzo de 2014.
- Cad. Saúde Pública. Un programa de control integrado de malaria con participación comunitaria en la Costa Pacífica de Colombia. [Internet]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2001000700019>. Consultado en febrero de 2014.
- Rodríguez J. Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. Rev Panam Salud Pública. 2010; 27(3):211-218.
- Rodríguez J. Dinámica probabilista temporal de la epidemia de malaria en Colombia. Rev Fac Med. 2009; 17(2):214-221.
- Rodríguez J, Prieto S. Dinámica de la epidemia de Malaria. Predicciones de su Trayectoria. Rev Fac Med. 2010; 18(2):12-20.
- 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 Fac Med. 2013; 21(1): 38-45.
- Rodríguez J, Vitery S, Puerta G, Muñoz D, Rojas I, Pinilla L, et al. Dinámica probabilista temporal de la epidemia de dengue en Colombia. Rev Cubana Hig Epidemiol. 2011; 49(1): 74-83.
- Laplace P. Ensayo filosófico sobre las probabilidades. Barcelona: Altaya; 1995.
- Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Probabilidad. En: Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Física Vol. 1. 1ª ed. México, D.F; Iberoamericana S. A; 1964, p. 6-16.
- Lavenda B. El Movimiento Browniano. En: Fernández-Rañada A. Orden y Caos. Scientific American: Barcelona. Prensa Científica S.A; 1990. 28 – 37.
- Wiener N. Nonlinear problems in random theory. Cambridge: Technology Press; 1958.
- Rodríguez J, Correa C. Predicción temporal de la epidemia de dengue en Colombia: dinámica probabilista de la epidemia. Rev Salud pública. (Bogotá) 2009; 11 (3): 443-453.
- Rodríguez J, Prieto S, Fajardo E, Correa C, López F, Castro J, et al. Caminata al azar predictiva de la dinámica de obesidad: predicciones de obesidad y sobrepeso en la población infantil de Colombia y de variación peso/talla y peso/edad en México. Rev Fac Med. 2013; 21(2):18-29.
- Clark M. Los valores P y los intervalos de confianza: ¿en quien confiar? Rev Panam Salud Pública. 2004; 15:293-296.
- Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Puerta G, Vitery S, et al. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. BMC Med Phys. 2010; 10:1-6.
- Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Bernal P, Álvarez L, Foreiro G, et al. Diagnóstico fractal del ventriculograma cardiaco izquierdo. Geometría fractal del ventriculograma durante la dinámica cardiaca. Rev Colomb Cardiol. 2012; 19(1):18-24.
- Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, Alarcón C, López R, Aguirre G, et al. Physical-mathematical diagnosis of cardiac dynamic on neonatal sepsis: predictions of clinical application. J. Med. Sci. 2014; 5(5): 102-108.
- Rodríguez J, Correa C, Melo M, Domínguez, D, Prieto S, Cardona DM, et al. Chaotic cardiac law: Developing predictions of clinical application. J. Med Med Sci. 2013; 4(2): 79-84.
- Rodríguez J, Prieto S, Domínguez D, Melo M, Mendoza F, Correa C, et al. Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. J. Med Med Sci. 2013; 4(8): 370-381.
- Rodríguez J, Bernal P, Prieto P, Correa C, Álvarez L, Pinilla L,

- et al. Predicción de unión de péptidos de *Plasmodium falciparum* al HLA clase II. Probabilidad, combinatoria y entropía aplicadas a las proteínas MSP-5 y MSP-6. *Archivos de alergia e inmunología clínica*. 2013; 44(1): 7-14.
29. Rodríguez J, Bernal P, Prieto S, Correa C. Teoría de péptidos de alta unión de malaria al glóbulo rojo. Predicciones teóricas de nuevos péptidos de unión y mutaciones teóricas predictivas de aminoácidos críticos. *Inmunología*. 2010; 29(1):7-19.
30. Prieto S, Rodríguez J, Correa C, Soracipa Y. Diagnosis of cervical cells based on fractal and Euclidian geometrical measurements: Intrinsic Geometric Cellular Organization. *BMC Medical Physics*. 2014, 14(2):1-9.
31. Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Mora J, Bravo J, Soracipa Y, et al. Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. *BMC Medical Physics*. *BMC Medical Physics*. 2013; 13:3.