

ARTÍCULO ORIGINAL

Modelado del efecto de la variabilidad climática local sobre la transmisión de dengue en Medellín (Colombia) mediante análisis de series temporales

Guillermo L. Rúa-Urbe¹, Carolina Suárez-Acosta¹, José Chauca², Palmira Ventosilla², Rita Almanza³

¹ Grupo Entomología Médica, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Instituto de Medicina Tropical Alexander von Humboldt, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú

³ Sección Epidemiología, Secretaría de Salud de Medellín, Medellín, Colombia

Introducción. El dengue es una enfermedad de transmisión vectorial de gran impacto en la salud pública. La transmisión del dengue es afectada por factores entomológicos, socioculturales y económicos. Además, la variabilidad climática juega un importante papel en la dinámica de transmisión. Un amplio consenso científico ha indicado que la fuerte asociación entre la enfermedad y las variables climáticas podría ser empleada para desarrollar modelos que expliquen la incidencia de la enfermedad.

Objetivo. Desarrollar un modelo que permita comprender la dinámica de transmisión del dengue en Medellín y predecir incrementos en la incidencia de la enfermedad.

Materiales y métodos. Se empleó la incidencia de dengue como variable dependiente y como variables independientes, los factores climáticos (temperatura máxima, media y mínima, humedad relativa y precipitación) registrados a escala semanal. Se utilizó el programa *Expert Modeler* para desarrollar un modelo que explique mejor el comportamiento de la enfermedad. Mediante modelos ARIMA, se seleccionaron las variables climáticas que tuvieron una relación significativa con la variable dependiente.

Resultados. El 34 % de la variabilidad observada se explicó por el modelo. La precipitación fue la variable climática que mostró una asociación estadísticamente significativa con la incidencia del dengue, pero con un rezago de 20 semanas.

Conclusiones. La transmisión del dengue en Medellín se vio afectada por la variabilidad climática, en particular, por la precipitación. La fuerte asociación entre el dengue y la precipitación permitió construir un modelo que ayuda a comprender la dinámica de transmisión, información que será de gran utilidad para el desarrollo de adecuadas y oportunas estrategias de control.

Palabras clave: dengue, clima, salud pública, epidemiología, predicción, precipitación atmosférica.

doi: <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v33i0.1444>

Modelling the effect of local climatic variability on dengue transmission in Medellín (Colombia) by means temporary series analysis

Introduction: Dengue fever is a major impact on public health vector-borne disease, and its transmission is influenced by entomological, sociocultural and economic factors. Additionally, climate variability plays an important role in the transmission dynamics. A large scientific consensus has indicated that the strong association between climatic variables and disease could be used to develop models to explain the incidence of the disease.

Objective: To develop a model that provides a better understanding of dengue transmission dynamics in Medellín and predicts increases in the incidence of the disease.

Materials and methods: The incidence of dengue fever was used as dependent variable, and weekly climatic factors (maximum, mean and minimum temperature, relative humidity and precipitation) as independent variables. *Expert Modeler* was used to develop a model to better explain the behavior of the disease. Climatic variables with significant association to the dependent variable were selected through ARIMA models.

Contribución de los autores:

Guillermo L. Rúa-Urbe: concibió la idea, análisis e interpretación de datos.

Carolina Suárez-Acosta: tabulación y análisis de datos.

José Chauca: diseño del análisis y construcción del modelo.

Palmira Ventosilla: análisis e interpretación de datos.

Rita Almanza: análisis de datos y revisión crítica del manuscrito final.

Todos los autores participaron en la elaboración del manuscrito, lo leyeron y aprobaron.

Results: The model explains 34% of observed variability. Precipitation was the climatic variable showing statistically significant association with the incidence of dengue fever, but with a 20 weeks delay.

Conclusions: In Medellín, the transmission of dengue fever was influenced by climate variability, especially precipitation. The strong association dengue fever/precipitation allowed the construction of a model to help understand dengue transmission dynamics. This information will be useful to develop appropriate and timely strategies for dengue control.

Key words: Dengue, climate, public health, epidemiology, forecasting, atmospheric precipitation.

doi: <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v33i0.1444>

El dengue es la principal enfermedad viral de transmisión vectorial (1). Cualquiera de los cuatro serotipos causantes de la enfermedad (DENV 1 a 4) puede ser transmitido a las personas por la picadura de mosquitos hembra del género *Aedes*, de los cuales *Aedes aegypti* es el de mayor relevancia a escala mundial (2).

La transmisión de la enfermedad es multicausal, y en ella intervienen diferentes factores entomológicos, socioeconómicos y climáticos (3,4). En particular, se ha evidenciado que estos últimos juegan un papel importante en la distribución espacial y temporal de la enfermedad (5,6).

En Colombia, la enfermedad se distribuye geográficamente por debajo de los 1.800 msnm (7), afectando algunas de las más importantes ciudades del país, lo que conlleva a que más del 60 % de la población se encuentre en riesgo de enfermar o morir por dengue (8). También se ha documentado que la incidencia temporal de la enfermedad en el país es afectada por el fenómeno climático de El Niño (9) o El Niño más 1 año (10-12). Algunas de las epidemias de dengue más notables en el país se registraron en los años 1983, 1987 y 1992, todas ellas ocurridas durante el evento de El Niño más un año (10,11). No obstante, de todas las epidemias de dengue de las que se ha tenido registro en Colombia, la del 2010 fue la más intensa, con 198.358 casos notificados, de los cuales, hasta el período epidemiológico número 13, se habían confirmado 217 muertes (13). Como podría suponerse, esta epidemia también fue precedida por el evento climático El Niño y ocurrió durante el período de La Niña, la cual presentó una intensidad de moderada a fuerte y se extendió hasta el 2012.

Correspondencia:

Guillermo León Rúa-Urbe, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Carrera 51D N° 62-29, Laboratorio 383, Medellín, Colombia

Teléfono: (574) 219 6061; fax: (574) 219 6051
gl_rua@hotmail.com

Recibido: 09/11/12; aceptado:03/04/13

La asociación evidenciada entre los cambios en las condiciones climáticas y la transmisión del dengue, podría explicarse por el impacto que presenta la variabilidad climática, en particular, cambios en la temperatura ambiental y en el régimen de lluvias, sobre la dinámica de población del vector y del virus que este transmite (6,10,14). Los incrementos en la temperatura ambiental disminuyen la duración del período de incubación extrínseco del virus y aumentan la frecuencia de picadura del vector, mientras que un incremento en la precipitación podría conllevar a la generación de un mayor número de sitios de cría, aumentando la densidad de la población del vector (15).

A pesar de los importantes aportes de los estudios realizados en Colombia y en otros países afectados por la problemática del dengue, se hace necesario ampliar y detallar el conocimiento del efecto de la variabilidad climática sobre la dinámica de transmisión del dengue. Además, ante la ausencia de una vacuna para controlar la enfermedad (16), y considerando que las principales estrategias de prevención se han enfocado en la movilización y participación comunitaria (17-20), sería de gran relevancia poder desarrollar instrumentos que permitan modelar y predecir epidemias de dengue en el país. La información que se desprende de este tipo de elementos podrá ser empleada por las autoridades de salud en estrategias que propendan por el fortalecimiento de los sistemas de vigilancia en salud pública y la planificación de los recursos destinados para su control.

El propósito del presente estudio fue contribuir con la construcción de un modelo que permita comprender la dinámica de transmisión de la enfermedad y predecir incrementos en la incidencia del dengue. Para ello, se hizo un análisis estadístico de la asociación de la variabilidad climática y el número de casos de dengue notificados en Medellín durante el período 2001 a 2011, incluyendo las epidemias de 2003, 2007 y 2010. Este análisis se constituye en una primera aproximación al estudio del efecto de la variabilidad climática local sobre la dinámica

de transmisión del dengue, información útil para el desarrollo de oportunos y adecuados programas de prevención y control de la enfermedad.

Materiales y métodos

Área de estudio

Medellín es una de las principales ciudades de Colombia afectada por el dengue. Las características eco-epidemiológicas de la ciudad hacen que la enfermedad presente un comportamiento endemo-epidémico, poniendo en riesgo a 2,3 millones de habitantes. La ciudad se ubica a los 1.550 msnm; además, la latitud ($6^{\circ}13'55''N$) y longitud ($75^{\circ}34'05''O$) de la ciudad dan como resultado un clima subtropical subhúmedo, con una temperatura ambiental que oscila entre 16 y 28 °C, y un régimen de precipitación medio anual de 1.656 mm (21). Estas características climáticas se alteran durante los eventos climáticos de El Niño o La Niña (9).

Casos de dengue

En Colombia, el dengue y el dengue grave son eventos de notificación obligatoria, y las Unidades Primarias Generadoras de Datos (UPGD), deben informar a las Secretarías Municipales de Salud la presencia de casos de manera rutinaria a través del sistema de vigilancia epidemiológica (Sivigila).

Para el presente análisis, el número de casos empleado fue suministrado por la Secretaría de Salud de Medellín, correspondiente a los casos registrados desde la semana epidemiológica número 1 del año 2001 hasta la 52 del 2011, para un total de 572 semanas. Los casos utilizados procedieron de las 16 comunas y tres corregimientos de la ciudad (San Cristóbal, San Antonio de Prado y Altavista) (figura 1). Los demás corregimientos de la ciudad (Palmitas y Santa Elena) no cuentan con las condiciones eco-epidemiológicas requeridas para la transmisión del dengue (11). La incidencia

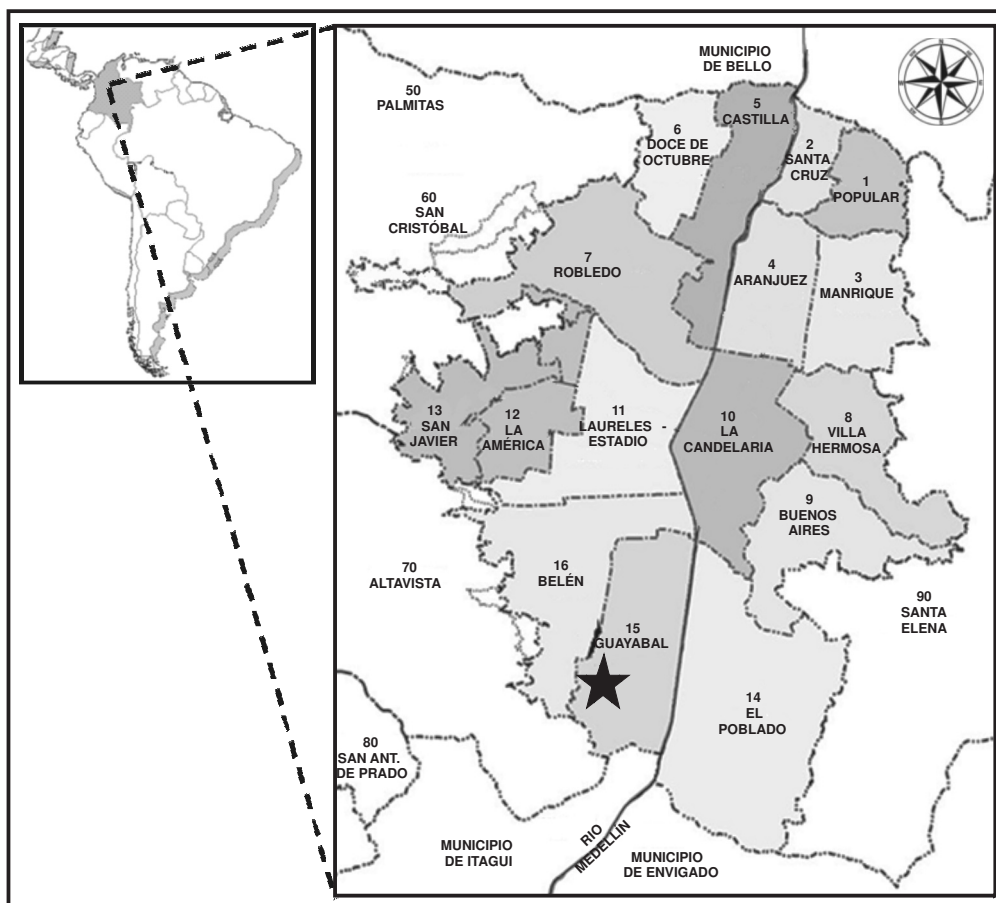


Figura 1. Mapa de Medellín que muestra las 16 comunas y tres corregimientos de donde provinieron los casos de dengue que se incluyeron en el presente análisis.

Se indica con una estrella la ubicación de la estación climática del aeropuerto Enrique Olaya Herrera.

de la enfermedad se calculó empleando los datos y proyecciones del censo de la población que realizó el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (22).

Información climática

Los datos climáticos (precipitación, humedad relativa y temperatura máxima, mínima y media) se obtuvieron de la estación climatológica ordinaria del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) situada en las instalaciones del aeropuerto Enrique Olaya Herrera. El registro de datos climáticos se obtuvo a escala diaria para el período de enero 01 de 2001 a diciembre 31 de 2011.

Análisis de la información

Para establecer la relación entre la incidencia de casos de dengue y los datos meteorológicos, se estimó un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) multivariante. En términos generales, un modelo ARIMA multivariante refleja la influencia de los valores y el ruido aleatorio de las variables (dependiente) en momentos del pasado reciente sobre los valores de la variable dependiente en cada momento, teniendo en cuenta el efecto de las variables independientes y sus respectivos retardos (23).

Los pasos para desarrollar el modelo fueron los siguientes. El número de casos por semana epidemiológica se estandarizó para expresarlo con un indicador epidemiológico de la incidencia acumulada semanal (IAS: casos $\times 10^6$ habitantes). Antes del análisis estadístico y con el propósito de evitar resultados indeterminados, la IAS se transformó en logaritmos (con el fin de ajustar los datos a la distribución normal) para lo cual al número de casos se le sumó 0,5 antes de calcular la incidencia. Similar procedimiento se hizo para las variables climáticas. La secuencia comprendida entre 2001 y 2011 se dividió en un segmento para determinar el modelo que mejor se ajustara a los datos y un segundo segmento se reservó para verificar la capacidad de pronóstico del modelo (ocho últimas semanas del año 2011).

El modelo ARIMA multivariante se estimó usando la opción *Expert Modeler* ubicada en el módulo *Forecasting* del software *IBM SPSS Statistics 19™* (24). Mediante el *Expert Modeler*, un algoritmo de manera automática busca el modelo que mejor se ajuste a los datos observados de la variable dependiente (incidencia de la enfermedad). El *Expert Modeler* muestra un modelo ARIMA univariante si

ninguna de las variables independientes disponibles aportan información; en caso contrario, muestra un modelo ARIMA multivariante que incluye las variables que explican la variabilidad observada en la variable dependiente. Para determinar el nivel de ajuste del modelo ARIMA multivariante a los datos observados, se usó el coeficiente de determinación (R^2) estacionario (valor estadístico usado para datos diferenciados) que determina la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por el modelo; este valor estadístico puede variar entre 0 y 100 %.

Mediante el análisis de los gráficos de la función de autocorrelación y autocorrelación parcial, se verificó que el modelo final no incluyese residuos autocorrelacionados, lo cual se confirmó mediante la prueba estadística Q de Ljung-Box (23). La capacidad de pronóstico del modelo se midió mediante el cálculo de la raíz del error cuadrático de la media (*Root Mean Square Error*, RMSE).

Resultados

Fluctuación temporal de los casos de dengue

Durante el período de análisis, en Medellín se observaron tres episodios de máxima transmisión, los cuales correspondieron a los años epidémicos de 2003, 2007 y 2010 (figura 2). Sin embargo, la intensidad de cada uno de estos períodos epidémicos fue diferente. En las epidemias del 2003 y 2007, el valor máximo mensual en el número de casos fue de 332 y 316, respectivamente (figura 2A); mientras que para la epidemia del 2010, el mayor valor mensual fue de 3.142 casos (figura 2B), lo cual representó más de 900 % de incremento en la transmisión de dengue en la ciudad con respecto a los demás años epidémicos.

Exceptuando los anteriores episodios de máxima transmisión, el dengue en Medellín mostró un comportamiento fluctuante, con registros comprendidos entre 8 y 125 casos por mes (figura 2), valores que representan un comportamiento endémico de la enfermedad en la ciudad.

Fluctuación temporal de las variables climáticas

El comportamiento mensual de la temperatura ambiental y la precipitación para Medellín durante el período de análisis, se presenta en la figura 3. Como puede observarse, fue notable la fluctuación mensual en las condiciones climáticas. Para la temperatura media se registró un cambio de 4 °C, la cual pasó de 25,3 °C en marzo a 21,3 °C en

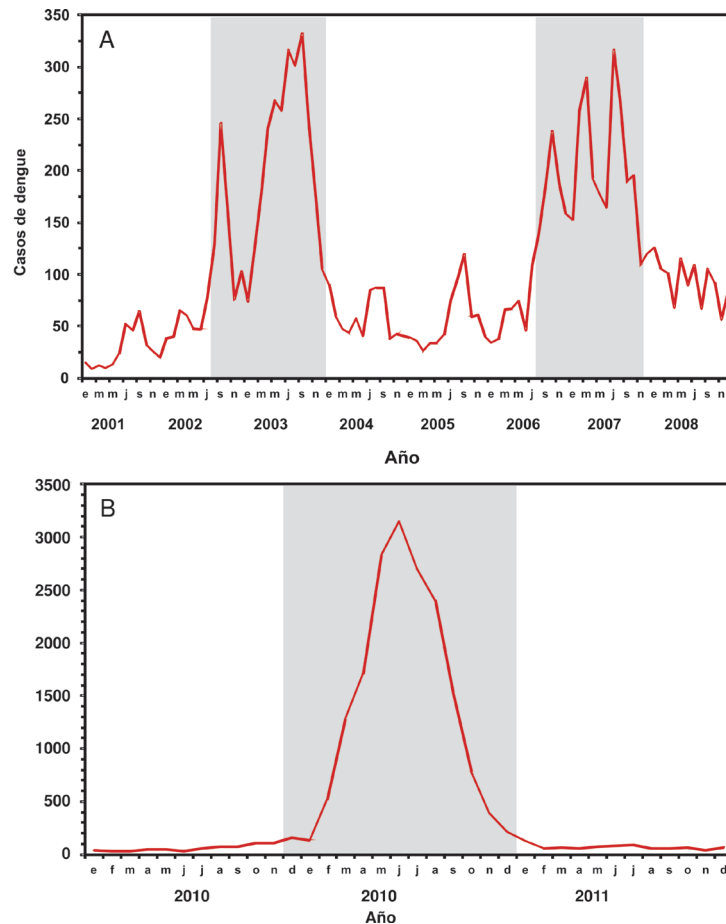


Figura 2. Comportamiento temporal del número de casos de dengue en Medellín, durante el período 2001 a 2011. A. Comportamiento durante el período 2001 a 2008. B. Comportamiento durante el período 2009 a 2011. Las áreas sombreadas corresponden a los años epidémicos 2003, 2007 y 2010.

noviembre del año 2010. Cabe anotar que en ese año se registró la mayor epidemia de dengue en la ciudad. También en la figura 3, pero durante los otros dos años epidémicos (2003 y 2007), se puede observar que la variabilidad en la temperatura no fue tan acentuada como la registrada en el 2010. No se presentan los comportamientos de las demás temperaturas ambientales (máxima y mínima), debido a que mostraron un comportamiento similar al de la temperatura media.

La fluctuación temporal en la precipitación durante el período de análisis también fue significativa. El mes en el cual se registró el menor valor fue enero del 2003 con 4 mm, mientras que en mayo del 2008 se reportó el máximo registro con 410 mm (figura 3).

En la figura 3 también pueden observarse los tres episodios epidémicos registrados en la ciudad durante el período de análisis (frangas grises). Durante estos

episodios de máxima transmisión de la enfermedad, se observó un similar comportamiento fluctuante de las variables climáticas. En particular, esta variación fue mayor para la epidemia del 2007, con una diferencia entre el valor máximo y el mínimo de 340 mm; mientras que para los períodos epidémicos del 2007 y 2010, tal diferencia fue de 240 y 285 mm, respectivamente. Similar comportamiento fluctuante de las condiciones climáticas se registró para los períodos endémicos de la enfermedad.

Modelado de la incidencia del dengue y su relación con las variables climáticas

Los detalles de las variables y sus coeficientes en el modelo ARIMA multivariante sugerido por el algoritmo *Expert Modeler*, se muestran en el cuadro 1. Con el modelo sugerido por el *Expert Modeler* se han estimado coeficientes que le dan un mayor impacto a la carga de pacientes (incidencia) en periodos previos. De acuerdo con dicho algoritmo,

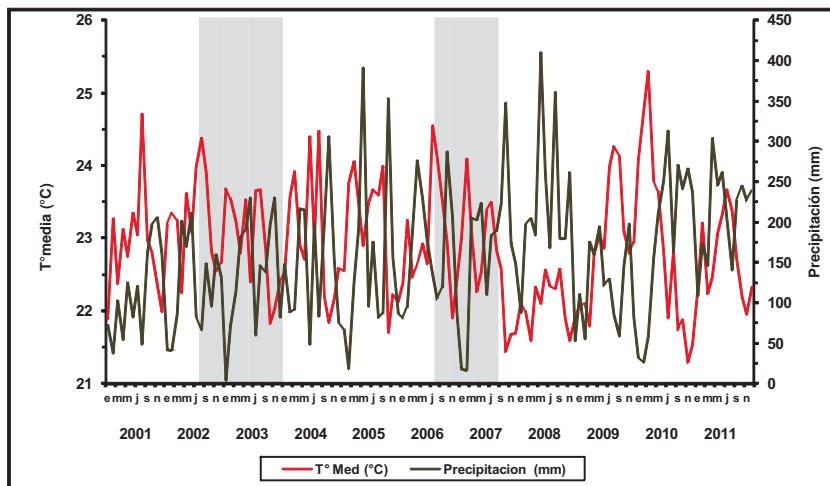


Figura 3. Comportamiento temporal de la temperatura ambiental y la precipitación en Medellín, durante el período 2001 a 2011. Las áreas sombreadas corresponden a los años epidémicos de dengue de 2003, 2007 y 2010.

Cuadro 1. Detalles de los coeficientes del modelo ARIMA multivariante según el algoritmo automatizado *Expert Modeler* (SPSS®) para la incidencia de dengue en Medellín, Colombia

Variable	Transformación	Parámetro ^a	lag	Estimador	ES ^b	t ^c	p
Casos x 10 ⁶ habitantes	Logaritmo natural	AR	1	-0,252	0,080	-3,161	0,002
		Diferencia		1			
		MA	1	0,319	0,078	4,079	< 0,001
Precipitación (mm)	Logaritmo natural	Retardo		20			
		Numerador	0	0,032	0,012	2,730	0,007
		Diferencia		1			

^a AR: autor regresivo; MA: media móvil

^b Error estándar

^c Prueba t de Student

la precipitación fue la única variable meteorológica que influyó en los cambios de la incidencia observada del dengue en Medellín (cuadro 1). Los efectos de la precipitación en la incidencia del dengue en Medellín no serían inmediatos sino que tomarían algún tiempo; de acuerdo con el modelo desarrollado, sus efectos se observarían aproximadamente después de 20 semanas. Según el algoritmo automatizado, este modelo fue el que mejor captó los principales cambios en la tendencia de la incidencia del dengue (figura 4). El análisis de la información permitió establecer que el 34 % de la variabilidad observada puede explicarse por el modelo. La validez del modelo desarrollado fue confirmada mediante la visualización de los residuos, sin detectarse autocorrelación para ningún retardo. Esto fue corroborado con la prueba de Ljung-Box, la cual fue no significativa (Q (18)=15,5, gl 16, p=0,485).

La capacidad de pronóstico del modelo medida mediante la RMSE, mostró un valor de 1.733 empleando un segmento de 8 semanas epidemiológicas. Para verificar la estabilidad del modelo, el mismo fue aplicado nuevamente a las series temporales de incidencia y precipitación, pero eliminando secuencialmente los datos correspondientes a los años 2011 y 2010, sin observarse discrepancia entre los coeficientes calculados y las variables seleccionadas.

Discusión

En el presente estudio, mediante un proceso automatizado incluido en el programa SPSS, se generó un modelo ARIMA que describe los cambios en el comportamiento epidemiológico del dengue en Medellín. Este modelo para predecir la incidencia de dengue en un determinado periodo, toma en cuenta dos aspectos importantes en la

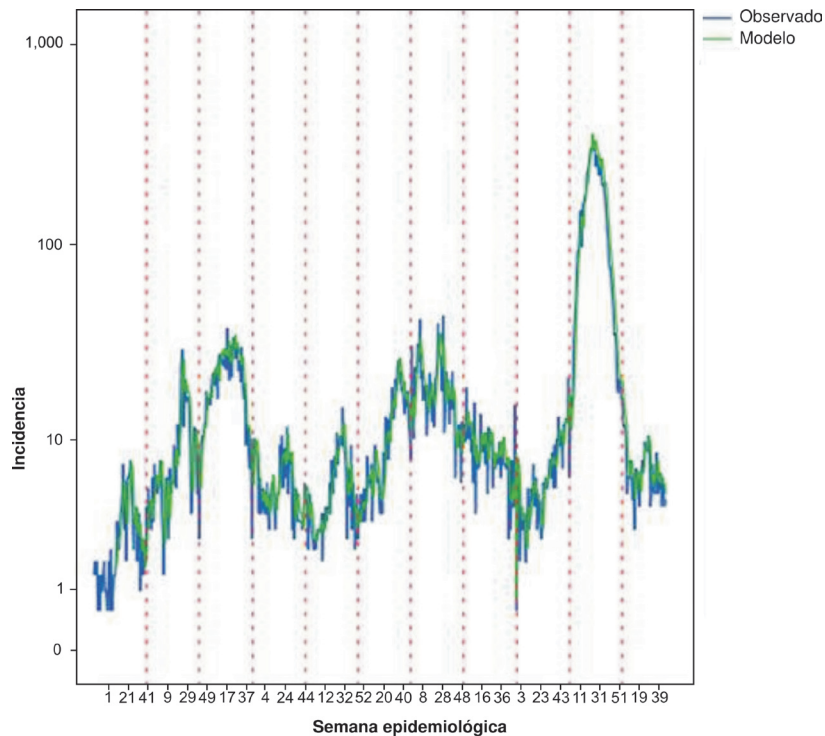


Figura 4. Modelado de la incidencia de dengue en Medellín para el período 2001 a 2011 (572 semanas).

transmisión del dengue: la carga de pacientes en periodos previos y el efecto retardado de la precipitación pluvial.

Dado que la transmisión del dengue depende (entre otros) de dos factores clave: la densidad de la población de mosquitos vectores y el número de casos de dengue en la población en riesgo de un brote epidémico, el modelo ARIMA obtenido muestra que la incidencia de dengue en la semana epidemiológica previa es un elemento clave en la predicción de los cambios del comportamiento de esta enfermedad en Medellín.

En este sentido, se observó que la transmisión del dengue en Medellín se encuentra asociada con la variabilidad en las condiciones climáticas locales, en particular, con un rezago de 20 semanas en la precipitación. Una asociación positiva similar entre el dengue y el régimen de lluvias ha sido evidenciada por Brunkard, *et al.*, (25) en la ciudad de Matamoros en México, pero, a diferencia del presente estudio, en Matamoros el rezago observado en la precipitación fue de dos semanas, mientras que en otro estudio, en Barbados (26), el rezago fue de siete semanas.

En una de las hipótesis que podrían explicar este retardo, se considera que las poblaciones locales del vector se conectarían mediante la dispersión de un pequeño grupo de hembras migrantes que

colonizarían los nuevos hábitats (depósitos de agua) recién establecidos en la época de mayor pluviosidad. Posteriormente, al generarse varias poblaciones del vector, se favorecería el flujo de individuos entre los nuevos hábitats y, por lo tanto, la persistencia de las poblaciones de vectores a largo plazo (27). Esto generaría una densidad crítica de la población del vector que permitiría la eficiente dispersión del virus del dengue entre la población humana.

También, la asociación entre el dengue y la precipitación fue demostrada por Rubio-Palis, *et al.*, (28) en Maracay, Venezuela. En ese estudio se observó una correlación positiva estadísticamente significativa entre el número de casos reportados y la precipitación, pero no con la temperatura ni la humedad relativa. Los investigadores determinaron también que el mayor número de casos de dengue se presenta con un rezago de dos meses del pico de precipitación, diferente al observado en Medellín, el cual fue de 20 semanas.

Otra evidencia de la asociación entre la precipitación y la transmisión de dengue se documenta en el estudio realizado en Libertador, Venezuela, por Saez (29). En ese análisis, el investigador empleó una regresión múltiple, con datos a escala semanal, para determinar la asociación entre el dengue y las variables climáticas, y encontró que, además de la precipitación, la temperatura ambiental también

se asoció en forma directamente proporcional con la presentación de la enfermedad, relación que no fue registrada en el análisis realizado en Medellín.

En otro estudio en Venezuela, también se observó, mediante modelos de regresión lineal, una asociación positiva y estadísticamente significativa entre los casos mensuales de dengue notificados en un hospital de Caracas y los registros en la precipitación y la temperatura máxima, pero no con la temperatura mínima (30).

También en Brasil se ha demostrado la asociación entre casos de dengue y precipitación. En el estado de Goiás, Souza, *et al.*, (31) determinaron que se registraron incrementos en la transmisión de la enfermedad durante los períodos de alta precipitación y que fue menor el número de casos en las estaciones de poca lluvia.

No obstante, en algunos países del continente americano no solo se ha demostrado asociación entre el dengue y la precipitación. Esta relación también se ha documentado en Tailandia (32), Malasia (33,34) y Sri Lanka (35). Sin embargo, no existe un consenso científico que sustente esta asociación. Por ejemplo, en otra ciudad de Colombia (Montería), en un análisis de la relación entre los casos de dengue y factores climáticos como pluviosidad, humedad relativa y la temperatura ambiental, para el periodo 2003 a 2008, no se observó asociación estadística entre la enfermedad y ninguna de las variables climáticas (36). Es posible que la diferencia en los resultados del estudio realizado en Montería con aquellos obtenidos en Medellín, se deba a la extensión de la serie temporal de datos analizados (el análisis en Medellín incluyó más de diez años de información a escala semanal) o, simplemente, a que cada ciudad tiene una ecoepidemiología propia en la dinámica de transmisión de la enfermedad, razón por la cual no sería apropiado establecer asociaciones universales entre la enfermedad y los factores climáticos.

A pesar de los diversos hallazgos sobre la asociación entre la transmisión del dengue y la precipitación, y de que en otros estudios no se ha observado tal relación (incluso se ha descrito como una relación no estacionaria y probablemente espuria) (37), debe destacarse que organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Panel Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel in Climate Change*, IPCC), al igual que un amplio consenso científico, consideran que el clima juega

un importante papel en la distribución espacial y temporal de la incidencia de la enfermedad.

En particular, el IPCC, en el cuarto informe en que evalúa el impacto del cambio climático, adaptación y vulnerabilidad, realizado en 2007, concluyó que el calentamiento global y el cambio climático podrían causar un aumento en la transmisión de dengue (38). Por su parte, la OMS llega a una conclusión similar al considerar que uno de los más importantes macrofactores en el incremento en el número de casos de dengue es el cambio climático, e indica que el calentamiento global y el evento de El Niño, podrían alterar los ecosistemas y generar mejores oportunidades para la supervivencia de patógenos y vectores (39).

En este sentido, los hallazgos biológicos indican que los cambios en la temperatura ambiental influyen de manera proporcional en el desarrollo de las diferentes etapas de crecimiento de los mosquitos y de los agentes patógenos que transmiten (40,41), mientras que los incrementos en el régimen de lluvias pueden conllevar a un mayor número de sitios potenciales de cría del mosquito vector (42,43).

Las demostraciones de la fuerte asociación entre la incidencia de dengue y los factores climáticos, han permitido la construcción de diversos modelos (15,44-46). En particular, considerando las condiciones climáticas locales para un período de 11 años, en el presente estudio se desarrolló un modelo que captó los principales cambios en la tendencia en la incidencia de dengue en Medellín por efecto de la precipitación. Se han propuesto otros modelos que valoran la precipitación como un factor relevante en la transmisión del dengue para Puerto Rico (47) y Tailandia (48). En cada uno de estos modelos, a pesar de que el régimen de lluvias ayudó a explicar la variabilidad en la incidencia de la enfermedad, su contribución fue variable. En este sentido, no podría establecerse una asociación universal que indique la magnitud y la dirección del efecto de la precipitación sobre la incidencia de la enfermedad, la cual podría depender de la preferencia por los sitios de cría del vector, en particular si tales sitios son extradomiciliarios y generados por la lluvia o intradomiciliarios y llenados manualmente (49).

Con base en lo anterior, para la construcción de modelos de la dinámica de transmisión, debe hacerse a nivel local o a la menor escala geográfica posible, lo cual permite considerar las diferencias ecoepidemiológicas regionales, tal como lo han sugerido Vélez, *et al.*, (50). Estos modelos a escalas locales

pueden diferir entre las ciudades, situación que se evidenció en los estudios de Medellín y Montería, los cuales mostraron resultados discrepantes.

El modelo desarrollado en el presente estudio podrá ser de utilidad para las autoridades de salud encargadas de la vigilancia, prevención y control de la enfermedad. Para ello, se podrán emplear los registros de precipitación como un instrumento que permita estimar los cambios futuros en la incidencia de la enfermedad. Además, dado que el dengue es una enfermedad de transmisión multifactorial y de gran complejidad epidemiológica, se espera que el modelo desarrollado sirva de base para futuros modelos que incluyan otros factores tales como las variables entomológicas y los factores socioeconómicos, todos ellos a escala local.

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Secretaría de Salud de Medellín por facilitar los datos epidemiológicos del dengue. Al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), por el apoyo a través de la REDSAT DENGUE (código 209RT0384). A David Calle y Wilber Gómez del Grupo Entomología Médica de la Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, por la revisión crítica del documento final.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe, de manera directa o indirecta, ningún tipo de conflicto de intereses, financieros, académicos ni personales para la publicación de este artículo.

Financiación

El presente artículo se enmarca en el trabajo realizado por la red REDSAT DENGUE (código 209RT0384), la cual es financiada por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Referencias

- Gubler D.** Dengue and dengue hemorrhagic fever. *Clin Microbiol Rev.* 1998;11:480-96.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS).** Dengue y dengue hemorrágico en las Américas: su prevención y control. Washington: OPS; 1995. Fecha de consulta: 9 de marzo de 2012. Disponible en: <http://www.paho.org/spanish/hcp/hct/vbd/arias-dengue.htm>
- Carbajo A, Curto S, Schweigmann N.** Spatial distribution pattern of oviposition in the mosquito *Aedes aegypti* in relation to urbanization in Buenos Aires: Southern fringe bionomics of an introduced vector. *Med Vet Entomol.* 2006;20:209-18. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2915.2006.00625.x>
- Bisset JA, Marquetti MC, Portillo R, Rodríguez MM, Suárez S, Leyva M.** Factores ecológicos asociados con la presencia de larvas de *Aedes aegypti* en zonas de alta infestación del municipio Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. *Rev Panam Salud Pública.* 2006;19:379-84. <http://dx.doi.org/10.1590/S1020-49892006000600003>
- Gubler D, Reiter P, Ebi K, Yap W, Nasci R, Patz JA.** Climate variability and change in the United States: Potential impacts on vector and rodent-borne diseases. *Environ Health Perspect.* 2001;109(Suppl.2):223-33.
- Hales S, Weinstein P, Woodward A.** Dengue fever epidemics in the South Pacific region: Driven by El Niño southern oscillation? *Lancet.* 1996;348:1664-5. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)65737-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(05)65737-6)
- Rodríguez G, De la Hoz F.** Dengue and dengue and vector behaviour in Cárquez, Colombia, 2004. *Rev Salud Pública.* 2005;7:1-15.
- Ministerio de la Protección Social (MPS).** Gestión para la vigilancia entomológica y control de la transmisión de dengue - 2011. Fecha de consulta: 13 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.ins.gov.co/temas-de-interes/Dengue/03%20Vigilancia%20entomo%20dengue.pdf>
- Poveda G, Graham N, Epstein P, Rojas W, Quiñones M, Vélez I, et al.** Climate and ENSO variability associated with vector-borne diseases in Colombia. En: *El Niño and the southern oscillation, Multiscale variability and global and regional impacts.* 1st edition. Cambridge UK: Cambridge University Press; 2000.
- Gagnon S, Bush B, Smoyer-Tomic K.** Dengue epidemics and the El Niño southern oscillation. *Clim Res.* 2001;19:35-43.
- Suárez C, Almanza R, Rúa-Urbe G.** Análisis retrospectivo de la incidencia de dengue en Medellín, Antioquia-Colombia, periodo 2001-2007. *Rev Salud Pública de Medellín.* 2008;3:37-47.
- Rúa-Urbe G, Calle D, Rojo R, Henao E, Sanabria W, Suárez C.** Influencia del evento climático El Niño sobre la dinámica de transmisión de dengue en Medellín, Antioquia-Colombia. *IATREIA.* 2012;25:314-22.
- Instituto Nacional de Salud.** Boletín de Vigilancia Epidemia por Dengue en Colombia. Boletín 40. 2010. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2012. Disponible en: http://www.paho.org/col/index.php?option=com_docman
- Nicholls N.** El Niño-southern oscillation and vector borne disease. *Lancet.* 1993;342:1284-5. [http://dx.doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)92368-4](http://dx.doi.org/10.1016/0140-6736(93)92368-4)
- Hales S, Wet N, Maindonald J, Woodward A.** Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: An empirical model. *Lancet.* 2002;360:830-4. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)09964-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(02)09964-6)
- Organización Panamericana de la Salud (OPS).** Dengue. Guías para el diagnóstico, tratamiento, prevención y control. 2009. Fecha de consulta: 15 de marzo 15 de 2012. Disponible en: <http://new.paho.org/hq/dmdocuments/2011/ndeng31570.pdf>
- Heintze C, Garrido M, Kroeger A.** What do community-based dengue control programmes achieve? A systematic review of published evaluations. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 2007; 101:317-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trstmh.2006.08.007>

18. **Cellule Interregionale d'Epidemiologie Antilles Guyane (CIEAG).** Integrated management strategy for dengue prevention and control in the Caribbean subregion. Bulletin de Veille Sanitaire (BVS). 2009. Fecha de consulta: 15 e junio de 2012. Disponible en: http://www.invs.sante.fr/publications/bvs/antilles_guyane/2009/bvs_ag_2009_08.pdf
19. **Tapia-Conyer R, Betancourt-Cravioto M, Méndez-Galván J.** Dengue: An escalating public health problem in Latin America. Paediatr Int Child Health. 2012;32(Suppl.1):14-7. <http://dx.doi.org/10.1179/2046904712Z.00000000046>
20. **Tapia-Conyer R, Méndez-Galván J, Burciaga-Zúñiga P.** Community participation in the prevention and control of dengue: The patio limpio strategy in Mexico. Paediatr Int Child Health. 2012;32(Suppl.1):10-3. <http://dx.doi.org/10.1179/2046904712Z.00000000047>.
21. **Instituto Geográfico Agustín Codazzi.** Antioquia: características geográficas - 2012. Fecha de consulta: 10 de junio de 2012. Disponible en: http://www.antioquia.gov.co/antioquia-v1/organismos/planeacion/descargas/antioquia_caracteristicas_geograficas.pdf
22. **Departamento Administrativo Nacional de Estadística.** Población en Colombia, censo general - 2005. Fecha de consulta: 8 de junio de 2012. Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=124.
23. **Bowerman B, Connell R, Koehler A.** Forecasting, time series, and regression: An applied approach. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole; 2005.
24. **Loha E, Lindtjørn B.** Model variations in predicting incidence of *Plasmodium falciparum* malaria using 1998-2007 morbidity and meteorological data from south Ethiopia. Malar J. 2010;9:166. <http://dx.doi.org/10.1186/1475-2875-9-166>.
25. **Brunkard J, Cifuentes E, Rothenberg S.** Assessing the roles of temperature, precipitation, and ENSO in dengue re-emergence on the Texas-Mexico border region. Salud Pública Mex. 2008;50:227-34. <http://dx.doi.org/10.1590/S0036-36342008000300006>
26. **Depradine C, Lovell E.** Climatological variables and the incidence of Dengue fever in Barbados. Int J Environ Health Res. 2004;14:429-41. <http://dx.doi.org/10.1080/09603120400012868>
27. **Carvajal J, Moncada L, Rodríguez M, Pérez L, Olano V.** Caracterización preliminar de los sitios de cría de *Aedes (Stegomyia) albopictus* (Skuse, 1894) (Diptera: Culicidae) en el municipio de Leticia, Amazonas, Colombia. Biomédica. 2009;29:413-23.
28. **Rubio-Palis Y, Pérez-Ybarra L, Infante-Ruiz M, Comach G, Urdaneta-Márquez L.** Influencia de las variables climáticas en la casuística de dengue y la abundancia de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) en Maracay, Venezuela. Bol Mal Salud Amb. 2011;51:145-57.
29. **Sáez V.** Estudio correlativo entre dengue, precipitación y temperatura del aire, período 1995 a 2002. Municipio Libertador. Distrito Capital. Venezuela. Terra. 2006; 22: 123-56.
30. **Rifakis P, Gonçalves N, Omaña W, Manso M, Espidel A, Intingaro A, et al.** Asociación entre las variaciones climáticas y los casos de dengue en un hospital de Caracas, Venezuela, 1998-2004. Rev Peru Med Exp Salud Pública. 2005;22:183-90.
31. **Souza S, Silva I, Silva H.** Association between dengue incidence, rainfall and larval density of *Aedes aegypti*, in the State of Goiás. Rev Soc Bras Med Trop. 2010;43:152-5. <http://dx.doi.org/10.1590/S0037-86822010000200009>
32. **Wiwanitkit V.** An observation on correlation between rainfall and the prevalence of clinical cases of dengue in Thailand. J Vect Borne Dis. 2006;43:73-6.
33. **Aiken S, Frost D, Leigh C.** Dengue hemorrhagic fever and rainfall in Peninsular Malaysia: Some suggested relationships. Soc Sci Med Med Geogr. 1980;14:307-16. [http://dx.doi.org/10.1016/0160-8002\(80\)90043-X](http://dx.doi.org/10.1016/0160-8002(80)90043-X)
34. **Li CF, Lim TW, Han LL, Fang R.** Rainfall, abundance of *Aedes aegypti* and dengue infection in Selangor, Malaysia. Southeast Asian J Trop Med Public Health. 1985;16:560-8.
35. **Pathirana S, Kawabata M, Goonatilake R.** Study of potential risk of dengue disease outbreak in Sri Lanka using GIS and statistical modeling. J Rural Trop Public Health. 2009;8:8-17.
36. **Cassab A, Morales V, Mattar S.** Factores climáticos y casos de dengue en Montería, Colombia. 2003-2008. Rev Salud Pública. 2011;13:115-28. <http://dx.doi.org/10.1590/S0124-00642011000100010>
37. **Johansson MA, Cummings DA, Glass GE.** Multiyear climate variability and dengue—El Niño southern oscillation, weather, and dengue incidence in Puerto Rico, Mexico, and Thailand: A longitudinal data analysis. PLoS Med. 2009;6:e1000168. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pmed.1000168>
38. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability. Geneva, (Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) - 2007. Fecha de consulta: 8 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter8.pdf>
39. **World Health Organization (WHO).** The world health report 2002: Reducing risks and promoting healthy life. Geneva - 2002. Fecha de consulta: 17 de abril de 2012. Disponible en: http://www.who.int/whr/2002/en/whr02_en.pdf
40. **Watts D, Burke D, Harrison B, Whitmore R, Nisalak A.** Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for Dengue 2 virus. Am J Trop Med Hyg. 1987;36:143-52.
41. **Reiter P.** Weather, vector biology, and arboviral recrudescence. En: Monath TP, editor. The arboviruses: Epidemiology and ecology. Florida: CRC Press; 1988. p. 245-55.
42. **Kuno G.** Review of the factors modulating Dengue transmission. Epidemiol Rev. 1995;17:321-35.
43. **Ghitheko A, Lindsay S, Confalonieri U, Patz J.** Climate change and vector-borne diseases: A regional analysis. Bull World Health Organ. 2000;78:1136-47.
44. **Patz J, Martens W, Focks D, Jetten T.** Dengue fever epidemic potential as projected by general circulation models of global climate change. Environ Health Perspect. 1998;106:147-53.

45. **Lowe R, Bailey TC, Stephenson DB, Graham RJ, Coelho C, Carvalho MS, *et al.*** Spatio-temporal modelling of climate-sensitive disease risk: Towards an early warning system for dengue in Brazil. *Comp Geosciences*. 2010;37:371-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.008>
46. **Descloux E, Mangeas M, Menkes C, Lengaigne M, Leroy A, Tehei T, *et al.*** Climate-based models for understanding and forecasting dengue epidemics. *PLoS Negl Trop Dis*. 2012;6:470-2. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pntd.0001470>
47. **Johansson M, Dominici F, Glass G.** Local and global effects of climate on dengue transmission in Puerto Rico. *PLoS Negl Trop Dis*. 2009;3:382-4. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pntd.0000382>
48. **Wongkoon S, Jaroensutasinee M, Jaroensutasinee K.** Climatic variability and dengue virus transmission in Chiang Rai, Thailand. *Biomédica*. 2011;27:5-13.
49. **Vélez S, Núñez CP, Ruiz D.** Hacia la construcción de un modelo de simulación de la transmisión del dengue en Colombia. *Revista EIA*. 2006;5:23-43.
50. **Thai KT, Anders KL.** The role of climate variability and change in the transmission dynamics and geographic distribution of dengue. *Exp Biol Med (Maywood)*. 2011;236:944-54. <http://dx.doi.org/10.1258/ebm.2011.010402>