



## La modelación de propagación de epidemias: un problema complejo

María Elena Lárraga y Luis A. Álvarez Icaza

El acelerado desarrollo de medios de transporte masivos en un mundo globalizado induce una alta movilidad de la población, bienes y servicios. Al mismo tiempo se ha producido una rápida evolución de los agentes patogénicos inducida por el cambio climático. Ambos factores han provocado que en los últimos años, en diversos países alrededor del mundo se enfrenten a la emergencia, reemergencia, persistencia y propagación de diversas enfermedades infecciosas.

Como parte de las medidas de prevención, control y erradicación llevadas a cabo por distintas entidades sanitarias, se están usando modelos matemáticos y técnicas computacionales, dentro del marco de las ciencias de la complejidad, como medio para entender, estudiar, caracterizar y en algunos casos predecir la ocurrencia de una enfermedad infecciosa.

Entre estos modelos, los autómatas celulares (AC) se han distinguido como una alternativa eficiente para simular la propagación de epidemias. Los AC son sistemas dinámicos discretos en espacio, tiempo y variables de estado. Estos modelos incorporan la evolución de la enfermedad en reglas simples y locales que deciden el próximo estado de la enfermedad con base en modelos matemáticos o estadísticos usando técnicas computacionales para analizar la propagación de la misma.

## Modelando dengue

En nuestro grupo nos hemos enfocado al desarrollo de modelos matemáticos-computacionales basados principalmente en AC para entender y emular la dinámica espacio temporal de una de las enfermedades reemergentes, el dengue. Esta es la enfermedad viral transmitida por mosquito de más rápida propagación en el mundo y en los últimos 50 años su incidencia aumentó treinta veces con una creciente expansión geográfica hacia nuevos países, lo que supone un riesgo de infección para prácticamente la mitad de la población mundial. En México, su presencia aumentó en los últimos 14 años en 30 estados de la república, donde afecta a todos los grupos etarios con una transmisión más intensa en los meses de lluvia y en función de la temperatura. Por lo anterior, el dengue es

ya un problema de salud pública. Ante esta situación, el monitoreo, análisis y la predicción del impacto del dengue sobre el bienestar de una sociedad es una piedra angular para identificar las maneras eficaces de prevenir, controlar y manejar los brotes de las enfermedades. Y es precisamente en lo que nos estamos enfocando.



Figura 1. Ciclo de transmisión del dengue

En México, el mosquito *Aedes aegypti* es el principal vector del virus que causa el dengue. Los seres humanos se infectan por picaduras de hembras infectadas, que a su vez se infectan principalmente al succionar la sangre de personas infectadas (ver figura 1). Este ciclo de transmisión es importante para definir la dinámica de los modelos.

Nuestras aportaciones han estado orientadas a proveer un medio que posibilite entender la dispersión del dengue en tiempo y espacio, bajo diferentes escenarios, para poder después evaluar posibles medidas de control. Para este propósito, los espacios geográficos que representan las poblaciones de mosquitos y humanos se discretizan en celdas asociadas con subáreas geográficas. La dinámica global y local de la enfermedad se modela con base en reglas de transición local y la teoría de los modelos matemáticos compartimentales, que clasifican la población existente en el espacio geográfico representado por una celda con base al estado de salud de sus individuos (por ejemplo, susceptibles (S), expuestos (E), Infectados (I), recuperados (R)) y explican la transición entre estos estados de acuerdo al

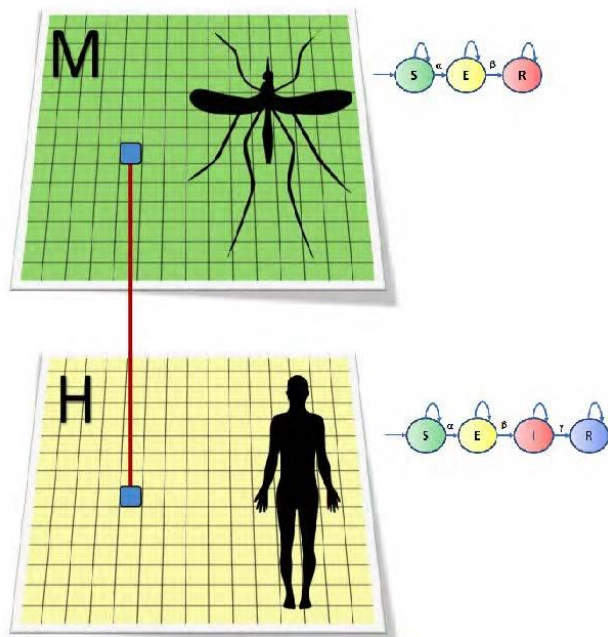
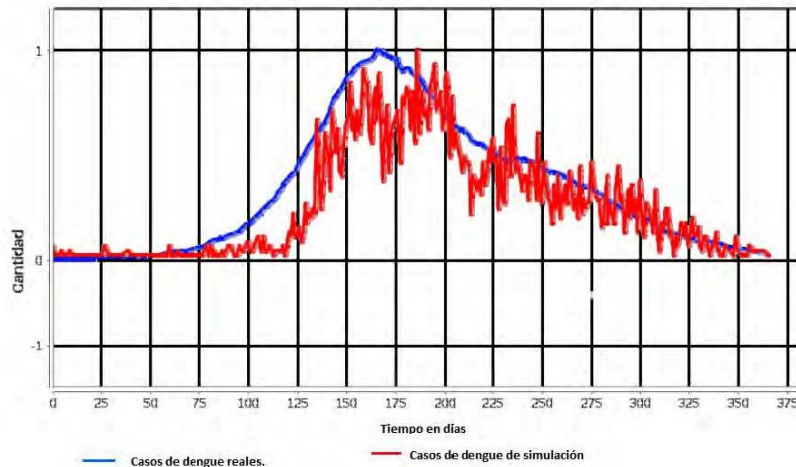


Figura 2. Ejemplo conceptual de un modelo de AC acoplados y la teoría de modelos compartimentales (S: Susceptible, E. Expuestos, I: Infectados, R: Recuperados) para representar la dinámica del dengue entre humanos (H) y mosquitos (M) .

conocimiento existente en la literatura sobre el ciclo de transmisión del dengue (dinámica) y el estado de las celdas vecinas (ver figura 2). Adicionalmente, los modelos que hemos desarrollado a la fecha toman en cuenta las variaciones climáticas para simular la propagación del dengue, ya que es sabido que la temperatura es un factor importante en el desarrollo del virus, pues afecta la reproducción del mosquito vector, por tanto, la prevalencia de la enfermedad. Además de las características geográficas, ambientales y climáticas, el modelo también toma en cuenta los ciclos de actividad económica de la población y movilidad de humanos y moscos como medio importante para explicar la propagación de la enfermedad.

Para validar los modelos desarrollados, hemos considerado datos reales de casos de dengue en México. Particularmente, datos de Cuernavaca, Morelos proporcionados por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y la Dirección General de Epidemiología (DGE) para el año 2008; año en el cual se registró el brote de dengue más importante en la historia de esta ciudad, con una tasa de incidencia de 489 por cada 100,000 habitantes y una tasa de letalidad de 0.7 por cada 100 casos. También se utilizaron datos climatológicos para estimar las precipitaciones y temperaturas diarias reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional de diez años previos a 2008, es decir, 3652 días reportados del 1 de enero de 1998 al 31 de diciembre de 2007.

Los resultados obtenidos de la simulación computacional de los modelos se ajustan muy bien con los casos de dengue reales (ver figura 3). Las medidas de control que tomó la Secretaría de Salud no han sido suficientes para controlar o erradicar estas enfermedades que se mantienen en epidemia todo el año. Por ello, el uso de este tipo de modelos para México ayuda a conocer la compleja dinámica de su propagación, y con ello, a mejorar la toma de decisiones para controlar su propagación y evaluar medidas de control antes de su implementación final.



Los modelos de AC son adecuados para analizar otro tipo de sistemas complejos donde la propagación local es importante, como el tráfico, las plagas o los virus informáticos, aplicaciones en las que también trabaja nuestro grupo.

Figura 3. Casos de dengue en el tiempo de Cuernavaca, Morelos, 2008 (Fuente: INSP, México), con respecto a los casos obtenidos de simulación normalizados al 10 %

Adicionalmente, hemos encontrado que muchos estudiantes de ingeniería, ciencias de la

computación y de ciencias físicas se interesan por el estudio, desarrollo y análisis de comportamiento de estos sistemas complejos, los cuales fomentan el pensamiento multidisciplinario, el trabajo en equipo, y a la vez, los hacen conscientes de la importancia de su estudio para lograr una sociedad mejor.