
MODELACIÓN SISTÉMICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA INTERACCIÓN CLIMA-MALARIA EN COLOMBIA. APLICACIÓN DURANTE EL NIÑO 1997-1998 Y LA NIÑA 1998-2000

DANIEL RUIZ, GERMÁN POVEDA

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

E-mail: cdruiz@cta.org.co .

MARTHA LUCÍA QUIÑÓNEZ, IVÁN DARÍO VÉLEZ, GUILLERMO RÚA

Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales (PECET), Universidad de Antioquia.

E-mail: martqp@yahoo.com .

WILLIAM ROJAS, JUAN SANTIAGO ZULUAGA

Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB).

E-mail: wrojas@epm.net.co

Ruiz, D., G. Poveda, M. Quiñónez, I. Vélez, G. Rúa, W. Rojas & J. Zuluaga. 2002: Modelación sistémica para el diagnóstico de la interacción clima-malaria en Colombia. Aplicación durante El Niño 1997-1998 y La Niña 1998-2000. Meteorol. Colomb. 5:41-48. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo matemático para representar las múltiples interacciones entomológicas, epidemiológicas y climáticas de la transmisión de la malaria. Se orientaron esfuerzos a la detección de las variables entomológicas que son particularmente afectadas por factores ambientales, así como a la representación de la fluctuación estacional de los mosquitos mediante la inclusión de los módulos paralelos de disponibilidad de criaderos e interacciones predador-presa-recursos. El modelo ha sido aplicado en el Municipio de Nuquí, Departamento del Chocó, para el período Nov/1997-Feb/2001 (1200 días de horizonte de simulación) durante el cual los eventos El Niño y La Niña afectaron la hidroclimatología del país. Se ha ejecutado para temperaturas y humedades relativas promedio diarias, así como valores totales diarios de precipitación registrados. En el proceso de experimentación se consideraron diferentes escenarios de temperatura así como análisis de sensibilidad e inestabilidad. Los principales resultados indican que las variables más importantes en la incidencia de la enfermedad son el ciclo de ovoposición (frecuencia de alimentación sanguínea) y el ciclo esporogónico (período de incubación del parásito dentro del vector), ambos fuertemente controlados por la temperatura. El modelo mismo y los resultados obtenidos están pensados dentro de la filosofía de modelación explicativa y de diagnóstico de la relación clima-malaria en las regiones estudiadas. Este modelo puede convertirse en una herramienta para exploración de escenarios de cambio climático y su incidencia en la transmisión de malaria en el país, así como para la toma de decisiones en el sector de salud pública.

Palabras clave: Simulación, interacciones, clima, dinámica, incidencia, malaria.

ABSTRACT

A vector-borne disease model has been developed to represent the entomological, epidemiological and climatic interactions of malaria transmission conducive to disease outbreaks in Nuquí prone-region, Chocó province, along the Pacific Colombian coast. Considering a breeding place availability model and several predator-prey-food models allow us to represent the vectorial densities fluctuations observed during the fields campaigns. The comprehensive model has been applied to represent malaria incidence during the period Nov/1997-Feb/2001 (1200 days simulation period), when both El Niño and La Niña events strongly affected the hydro-climatology of Colom-

bia. The model has been run for observed climatic patterns such as mean daily temperatures, total daily precipitation records, and mean daily relative humidities gathered by a nearby climatological station. Diverse temperature scenarios have been considered to deepen the understanding of the entomological-climatic linkages conducive to malaria outbreaks. Sensitivity analysis and instabilities cases have been also studied during the experimentation-validation processes. Obtained results allow us to conclude that the model constitutes a promising tool to deepen the understanding of the ecological, entomological, and epidemiological linkages conducive to malaria outbreaks.

Key words: Simulation, interactions, climate, dynamic, incidence, malaria.

1. INTRODUCCIÓN

La atención de recientes trabajos de investigación, ha estado orientada al análisis de los posibles impactos en la salud humana de los cambios atmosféricos globales (Bouma & Van Der Kaay (1994); Bouma et al. (1996); Bouma & Dye (1997); Martens et al. (1995a, 1995b, 1997a, 1997c); Martens (1997b, 1998); Patz et al. (1998a, 1998b); Poveda & Rojas (1996, 1997); Poveda et al. (1999, 2001)). Como posibles efectos indirectos mediados ecológicamente se consideran las enfermedades transmitidas por vectores biológicos, las enfermedades generadas por degradación de los cuerpos de agua y las deficiencias asociadas al agotamiento y deterioro de los cultivos de alimentos. La alteración de las incidencias, emergencias y distribuciones de enfermedades transmitidas por vectores biológicos, principales causas de morbilidad y mortalidad en regiones tropicales, parece responder a cambios en la temperatura y la precipitación que influyen el comportamiento (frecuencia de alimentación sanguínea) y la distribución geográfica de vectores (dispersión en áreas que restringían su desarrollo), así como favorecen la incubación de los parásitos dentro de los mismos (en tasas de reproducción y maduración). Las enfermedades infecciosas transmitidas por mosquitos vectores (malaria, dengue, fiebre amarilla y algunos casos de encefalitis), son consideradas las más afectadas debido al cambio climático global.

La malaria, enfermedad infecciosa con mayor prevalencia en regiones tropicales, le quita la vida a 3.000 individuos diariamente, en su gran mayoría niños. Algunos modelos proyectan que para el final del siglo XXI, el calentamiento atmosférico global extenderá la zona de transmisión potencial de la enfermedad de un 45% de la población mundial a un área con un 60% de la misma (Martens, 1997b). Aunque esta expansión se ajusta ciertamente a las predicciones, la causa de tal desarrollo no puede estar estrictamente asociada al cambio climático global. Otros factores pueden estar también relacionados tales como el deterioro del medio ambiente -favorece la proliferación de la población de mosquitos-, la suspensión o disminución de las medidas de control de mosquitos y otros programas de salud pública y el incremento en las resistencias a la droga y el uso de pesticidas. Sin embargo, la hipótesis del cambio climático global y su contribución a la transmisión de las enfermedades infecciosas, ha adquirido aún más fuerza.

Ahora, si se desarrollan los mecanismos necesarios para entender las relaciones clima-enfermedades infecciosas, vía profundización en las interacciones entomológicas-climáticas de la transmisión, es posible diseñar campa-

ñas futuras de control y erradicación soportadas en señales de alerta temprana. Es así como el principal objetivo de este trabajo, es desarrollar un modelo matemático en Dinámica de Sistemas para representar la transmisión de la malaria y tratar de entender las relaciones existentes entre los brotes epidémicos y los patrones climáticos, (haciendo particular énfasis en la ocurrencia de la fase cálida del evento El Niño-Oscilación del Sur).

Los modelos abstractos ya han suscitado interés a nivel mundial, resaltándose los trabajos publicados por Toro & Aracil (1988), Aracil & Toro (1993), Aron & May (1982), Blower et al. (1996, 1998), Blower & Gerberding (1998), Dietz (1988), Dyner (1993), Garrett-Jones (1964), Haile (1989), McKenzie et al. (1998), MacDonald (1957), Martens (1997b). Con base en los anteriores modelos, sus fortalezas y sus debilidades, se han concentrado esfuerzos en las siguientes actividades: (1) profundización en el ciclo de transmisión de la enfermedad, con el fin de definir los estados más relevantes y las variables endógenas que son altamente influenciadas por variables climáticas; (2) profundización en la ecología del vector, sus patrones de comportamiento, hábitos alimenticios y variables entomológicas relevantes, haciendo especial énfasis en sus relaciones con el clima; (3) análisis de viabilidad de hábitats de reproducción para el desarrollo de la población de mosquitos en sus estados preimaginales; (4) representación de interacciones de las larvas del vector con sus predadores naturales; (5) recopilación de información entomológica de campañas de colecta de adultos y bioensayos, e información epidemiológica levantada en el horizonte de tiempo seleccionado; (6) análisis de escenarios alternos que consideren variaciones en densidad vectorial, modelos de interacción, incrementos y disminuciones en las series climáticas observadas, entre otras; (7) análisis de situaciones de inestabilidad generadas, debido a cambios repentinos de algunas variables exógenas del modelo; (8) análisis de sensibilidad para la posterior determinación de los parámetros que provocan variaciones apreciables en los resultados; y (9) detección de las limitaciones del modelo con miras a concentrar futuros esfuerzos.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1. Módulo Principal

Partiendo de la concepción sistémica de la malaria, se conciben tres componentes fundamentales: población de mosquitos (vectores biológicos), población de humanos (hospederos vertebrados) y patrones climáticos. Éstos

últimos controlan únicamente la interacción entre las poblaciones mencionadas (alimentación sanguínea), la ecología del vector y la disponibilidad de nichos larvarios para el desarrollo de la población de mosquitos en sus estados preimaginales.

En la fase asexual endógena (esquizogonía) en el hospedero vertebrado se ignora, en una primera aproximación, la esquizogonía exo-eritrocítica secundaria, hecho que limita la utilización del modelo, para la representación de la transmisión de la malaria por *Plasmodium falciparum*. Un hospedero susceptible pasa al estado infectado porque, se lleva a cabo una alimentación sanguínea por parte de un vector adulto hembra del género *Anopheles* en estado infeccioso que inocula esporozoitos en su torrente sanguíneo. Un hospedero pasa del estado infectado al estado infeccioso en el momento en que culminan las fases intrahepática (sólo la esquizogonía pre-eritrocítica primaria) y sanguínea (esquizogonía eritrocítica) de la infección.

En el estado infeccioso, el ser humano posee formas diferenciadas sexualmente (gametocitos) en su sangre y puede transmitir la enfermedad a otra persona, si se produce una nueva alimentación sanguínea de un vector adulto hembra susceptible. El progresivo incremento de la parasitemia (como resultado de los múltiples ciclos eritrocíticos), genera un control por la respuesta inmune del hospedero. En este momento, el individuo ingresa al estado inmune. Finalmente, la pérdida progresiva de inmunidad hace retornar al hospedero al estado susceptible.

En la fase sexual exógena (esporogonía) en el mosquito hospedero, un vector adulto hembra del género *Anopheles*, pasa del estado susceptible al estado infectado cuando se alimenta de un hospedero humano que se encuentra en estado infeccioso e ingiere los gametocitos viables presentes en su torrente sanguíneo. El vector finalmente ingresa al estado infeccioso, cuando se culmina el ciclo esporogónico (que es controlado fundamentalmente por la temperatura). Como se pretende representar la densidad vectorial en las múltiples interacciones del sistema, se consideran los cuatro estados adicionales de la población de mosquitos: tres estados preimaginales (huevos, larvas y pupas) y un estado imaginal (imago macho).

En la Fig.1, se presenta el esquema general (macro-diagrama de interacciones) del modelo desarrollado. Se utiliza un modelo matemático continuo dinámico, soportado en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, que se resuelven por el método numérico Runge-Kutta IV.

En el proceso de calibración de las variables de interacción, se utilizan la tasa diaria de picadura a seres humanos estimada en campo a partir de campañas de colecta de adultos (intra y peridomiciliaria), la densidad vectorial calculada por el modelo matemático previa representación de la ecología del vector, la densidad crítica necesaria para mantener la transmisión (Dietz, 1988) y densidades constante y variable (previa consideración de fluctuaciones estacionales).

2.2. Módulo de Disponibilidad de Criaderos.

Se construyó, vía lógica difusa, unas funciones tabuladas exógenas al módulo principal, que representaban las fluctuaciones de nivel en criaderos de diferente capacidad (viabilidad de los hábitat de reproducción en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico) y afectaban la tasa de oviposición en la componente población de mosquitos. Se asumieron unos criaderos tipo embalse sometidos a precipitación observada, evaporación calculada por diferentes metodologías e infiltración. Se requirió de la estimación del número de días consecutivos que un criadero de una lámina dada, partiendo de una determinada capacidad inicial, y sometido a las tres variables mencionadas anteriormente, permaneció en un nivel de interés. Como de forma general los *Anopheles* prefieren las aguas frescas libres de materia orgánica (caso analizado *Anopheles albimanus*), se determinó el número de días consecutivos (que requiere una cohorte de huevos para adelantar todos sus estados preimaginales y alcanzar la emergencia), que un determinado criadero permaneció lleno (90-100% de capacidad) cuando se sometió a flujo neto de agua (diferencia entre precipitación observada, evaporación real estimada e infiltración constante). El óptimo de un determinado criadero, se alcanza si permanece entre el 90 y 100% de su capacidad, por lo menos 12-15 días consecutivos (Fig.2). Finalmente, como los huevos de la gran mayoría de *Anopheles* no pueden sobrevivir luego de la desecación, se asumió que el criadero no garantizaba el desarrollo de la especie en sus estados preimaginales, si excedía 2 días consecutivos SECO.

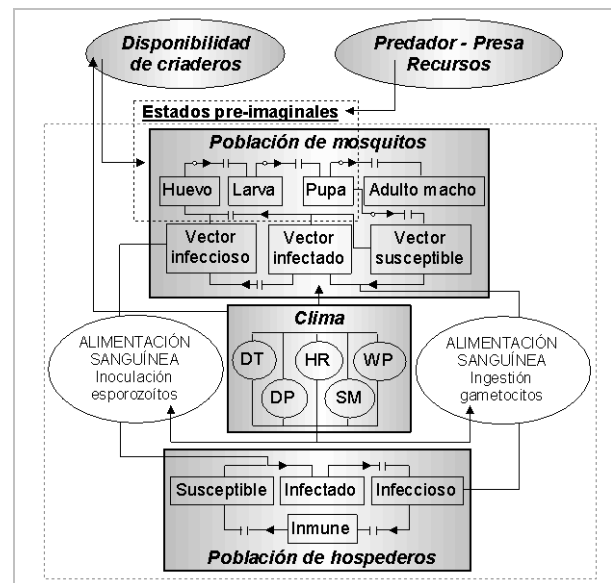


Figura 1. Macro-diagrama de interacción. Las variables DT, HR, WP, DP y SM denotan, respectivamente, los valores medios diarios de temperatura, medios diarios de humedad relativa, patrón de vientos (en velocidad y dirección), valores totales diarios de precipitación y humedad del suelo. En una primera fase se consideran únicamente las variables climáticas DT, HR y DP

2.3. Módulo de Interacciones Predador-Presa-Recursos.

Se representaron las interacciones entre los estados preimaginales de la población de mosquitos (principalmente larvas) y sus predadores naturales.

Se consideró, en una primera aproximación el modelo tipo Lotka-Volterra (Lotka, 1925; Volterra, 1926), integrándolo al sistema de ecuaciones diferenciales principal (Fig.3). Los parámetros de los demás modelos analizados (predador-presa tipo Henize (1971), presa-recursos tipo Kaibab III (Aracil & Toro, 1993), modelo ecológico con forzamiento externo (Aracil & Toro, 1993) y sistema ecológico autónomo (Fig.4) (Aracil & Toro, 1993), están siendo calibrados vía bioensayos en los laboratorios del proyecto.

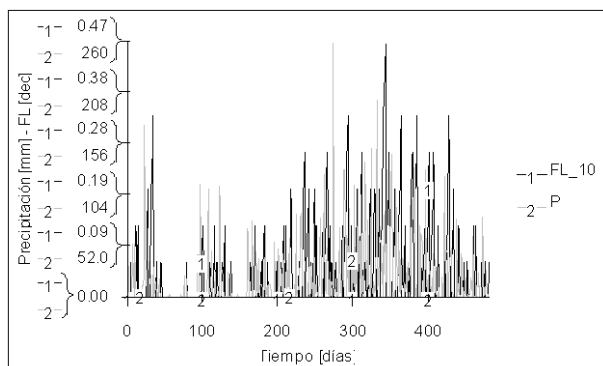


Figura 2. Modelo de disponibilidad de criaderos. Nicho larvario de 10 mm de lámina asumido inicialmente al 30% de capacidad. Si la función FL_10 iguala 0.0, el criadero NO es viable; si la función FL_10 iguala 1.0, el criadero es viable (permanece entre 90 y 100% de capacidad más de 12 días consecutivos)

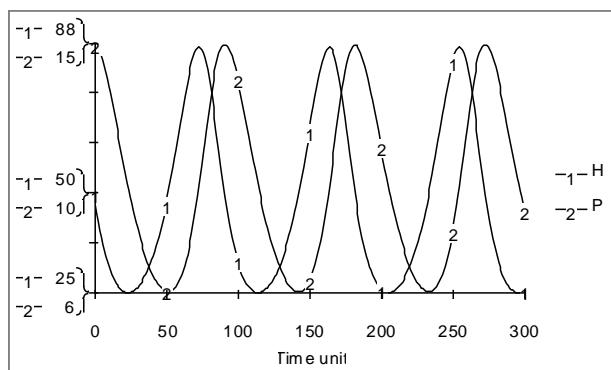


Figura 3. Evolución en el tiempo de las poblaciones presa H y predador P según modelo tipo Lotka-Volterra. Algoritmo de solución: Runge-Kutta IV (fixed step)

2.4. Simulación.

Se representó la incidencia de malaria por *P.falciparum* en el Municipio de Nuquí, Departamento del Chocó, Costa Pacífica colombiana (Fig.5), para el período

01/Nov/1997-28/Feb/1999. Las mediciones entomológicas en campo (tasas de picadura intra y peridomiciliaria, tasas de paridad y número de larvas capturadas en criaderos, fueron adelantadas en conjunto con la Universidad de Antioquia y la Corporación para Investigaciones Biológicas; la información hidrometeorológica (valores medios diarios de temperatura [°C], valores medios diarios de humedad relativa [%] y registros totales diarios de precipitación; figura 6), fue recopilada por la estación climatológica 5601503 Amargal (Arusí, 05°36'N, 77°30'W, 30 msnm), operada por el IDEAM para el período 01/Nov/1997-28/Feb/2001 (40 meses de registros, 1200 días de horizonte); las mediciones epidemiológicas (incidencia mensual de malaria por *P.vivax* y *P.falciparum* para el período Nov/1997-Feb/1999) fueron suministradas por el Servicio Seccional de Salud Departamental.

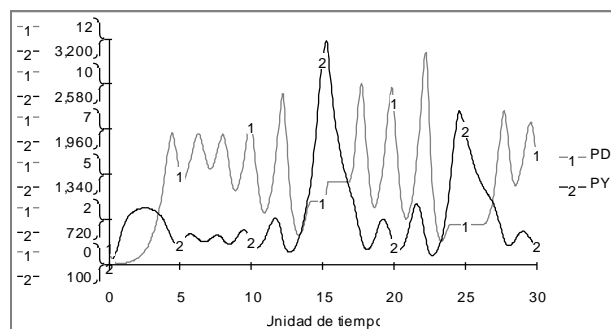


Figura 4. Evoluciones de las poblaciones predador PD y presa PY según sistema ecológico autónomo. Algoritmo: Runge-Kutta IV (fixed step)

Figura 5. Zona de estudio. Mapa de elevación digital con una resolución de 30" de arco. Principales localidades y estaciones climatológicas disponibles en la zona

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de análisis de escenarios, se ejecutó para los primeros 480 días del horizonte de simulación (01/Nov/1997-28/Feb/1999) debido a que la información

epidemiológica sólo estaba disponible para este período. La población total en riesgo, se asumió equivalente a 2.477 individuos que habitaban la zona rural del Municipio de Nuquí a finales del año 1996 (información demográfica del Ministerio de Salud). El número de individuos en estado infeccioso ascendió a 111 pobladores, equivalente al total de casos de malaria por *P.falciparum* registrados en el mes de octubre de 1997. Los resultados de simulación para el escenario base asumido se presentan en la Fig.7.

Se consideraron además dos escenarios alternos de simulación: incrementos en las temperaturas diarias registradas de +1 y +2°C (Fig.8a) y disminuciones de -0.5 y -1°C (Fig.8b), para todo el horizonte de simulación.

En el proceso de evaluación-validación-análisis, se consideraron las posibles situaciones de inestabilidad generadas debido a cambios repentinos de algunas variables exógenas (Fig.9) y se detectaron los parámetros que provocaban variaciones apreciables de los resultados (Fig.10).

dad de reflejar las tendencias crecientes y decrecientes observadas en la incidencia de la enfermedad, como consecuencia de los incrementos y disminuciones, respectivamente, de los valores promedio diarios de temperatura observados. Se logran representar, además, las fluctuaciones en la densidad vectorial (respuesta a los valores totales diarios de precipitación), de acuerdo con las tasas de picadura a seres humanos registradas en las campañas de colecta de adultos.

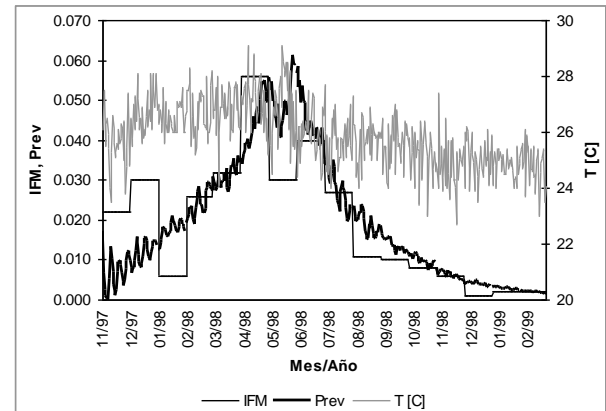


Figura 7. Escenario base de simulación de malaria por *P.falciparum*. IFM denota la incidencia mensual por esta especie del parásito; Prev la prevalencia obtenida por simulación asumiendo modelo de interacción 'Capacidad Vectorial' y densidad vectorial constante; T[C] los valores medios diarios de temperatura registrados. Coeficiente de correlación 0,82, nivel de significancia 0,95

Figura 6. Información hidrometeorológica. Series de valores medios diarios de temperatura [°C] y valores totales diarios de precipitación [mm]. Período de registros 01/Nov/1997-28/Feb/2001 (1200 días de horizonte de simulación). La fase cálida del evento El Niño-Oscilación del Sur (El Niño) se extendió hasta aproximadamente mediados del mes de mayo de 1998 (200 primeros días). A partir de ese momento y hasta prácticamente el mes de febrero de 2001 (1000 días restantes), se presentó la fase fría del ENSO (La Niña). Las series de incidencia mensual por *P.vivax* y *P.falciparum* en el Municipio están disponibles sólo para el período Nov/1997-Feb/1999 (480 primeros días de simulación)

El modelo matemático desarrollado reproduce la incidencia mensual de malaria por *P.falciparum* registrada en el Municipio de Nuquí, Chocó, para el período disponible 01/Noviembre/1997-28/Febrero/1999. Mediante el sistema de ecuaciones diferenciales concebido, se logra representar el brote epidémico de malaria que ocurrió en esta zona endémica del país como respuesta a la ocurrencia de la fase cálida del evento ENSO en los 200 primeros días de simulación. El modelo tiene la capaci-

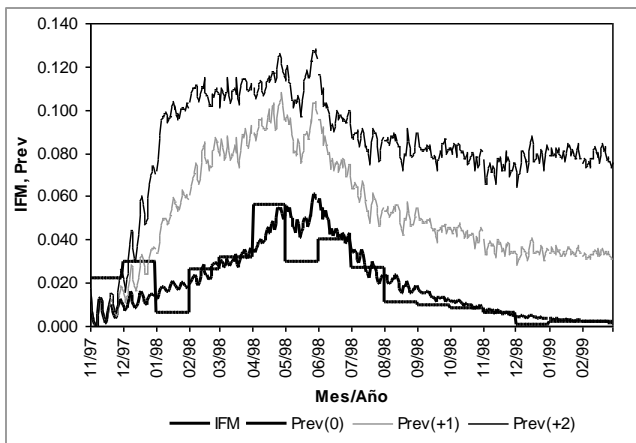
dad de reflejar las tendencias crecientes y decrecientes observadas en la incidencia de la enfermedad, como consecuencia de los incrementos y disminuciones, respectivamente, de los valores promedio diarios de temperatura observados. Se logran representar, además, las fluctuaciones en la densidad vectorial (respuesta a los valores totales diarios de precipitación), de acuerdo con las tasas de picadura a seres humanos registradas en las campañas de colecta de adultos.

La temperatura, es la variable climatológica que controla en mayor grado las variables entomológicas más relevantes de transmisión: ciclo de ovoposición, ciclo esporogónico y longevidad, que finalmente permiten la determinación de las tasas diarias de contacto, potencialmente infeccioso entre las poblaciones de hospederos y vectores. La precipitación, que controla la disponibilidad de criaderos para el desarrollo de la especie en sus estados preimaginales, finalmente permitirá el entendimiento de las fluctuaciones estacionales de la densidad vectorial. En el momento en el cual se desarrolle un modelo de interacción que articule la densidad y la incidencia, se podrá analizar el peso de esta variable climatológica.

Para un incremento de +2°C en las temperaturas promedio diarias observadas, el modelo matemático muestra que el punto máximo de prevalencia de la enfermedad se incrementa del 6% al 12% de la población en riesgo (duplicación de casos por *P.falciparum*). Además, se observa que la malaria deja de evidenciar el brote epidémico registrado para convertirse en una endemia que somete al 8% de la población (agosto/1998 en adelante). Esto responde directamente a que el incremento en la temperatura, genera una evidente disminución en los ciclos esporogónico y de ovoposición de la población vector. Para el caso de las disminuciones en los registros climáticos observados, la modelación sugiere que si las temperaturas promedio diarias del Municipio de Nuquí, no

hubieran experimentado el incremento de $+0.5-1^{\circ}\text{C}$ como respuesta a la ocurrencia de la fase cálida del evento ENSO, es posible que el punto máximo de prevalencia de la enfermedad, por *P.falciparum* en el período considerado tan sólo hubiera ascendido al 2% de la población en

riesgo. Si las temperaturas mostraran el comportamiento hipotético considerado, la enfermedad podría llegar a ser controlada por la misma respuesta del ecosistema (en términos de que se controla el desarrollo de la especie vector y el parásito incubado en la misma).



(a)

(b)

Figura 8. Resultados de simulación, escenarios alternos. Prev(0) representa la ejecución del modelo para el escenario base. (a) Prev(+1) y Prev(+2) para incrementos en las temperaturas de $+1^{\circ}\text{C}$ y $+2^{\circ}\text{C}$, respectivamente. (b) Prev(-1) y Prev(-0.5) para disminuciones de -1°C y -0.5°C , respectivamente

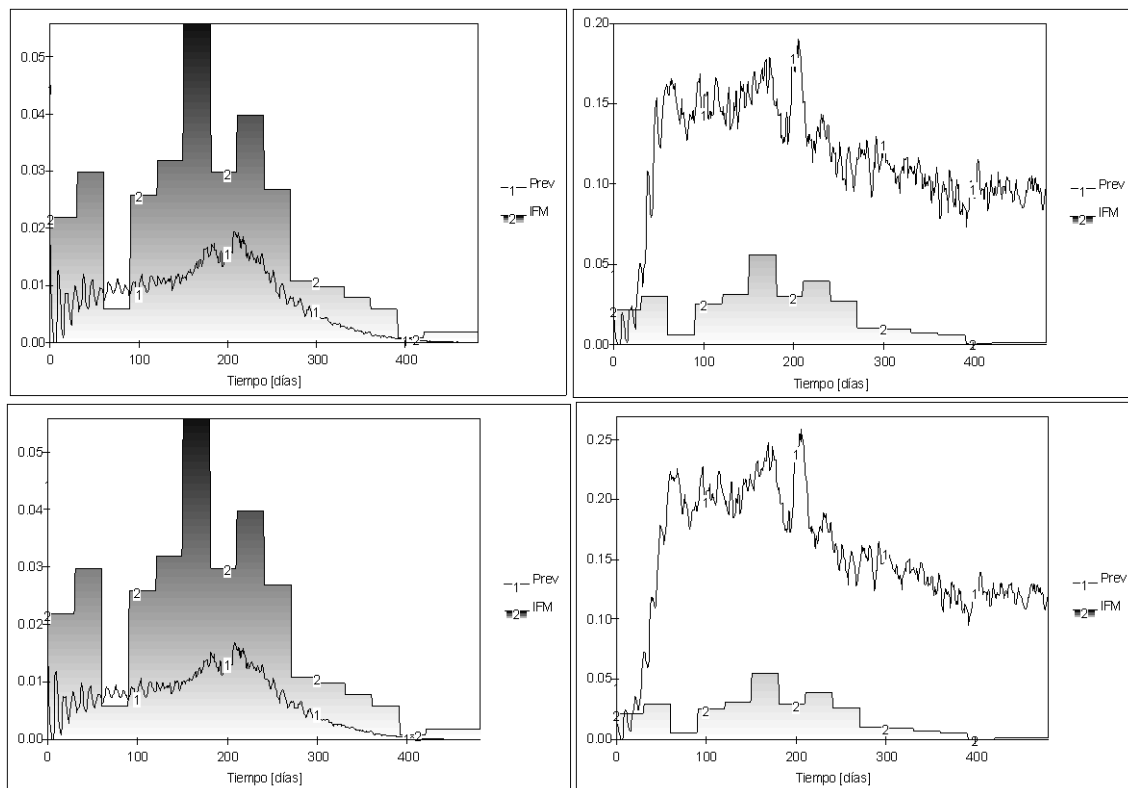


Figura 9. Posibles situaciones de inestabilidad. IFM: incidencia mensual de malaria observada. Superior izquierda: densidad constante disminuida en 1 mosquito/hospedero; superior derecha: índice de sangre humana incrementado de 0.40 a 0.50; inferior izquierda: número de grados-día requeridos para el desarrollo del parásito incrementado de 111 a 120°C-día ; inferior derecha: duración promedio de la infección en el hospedero incrementada de 1 a 1.5 años

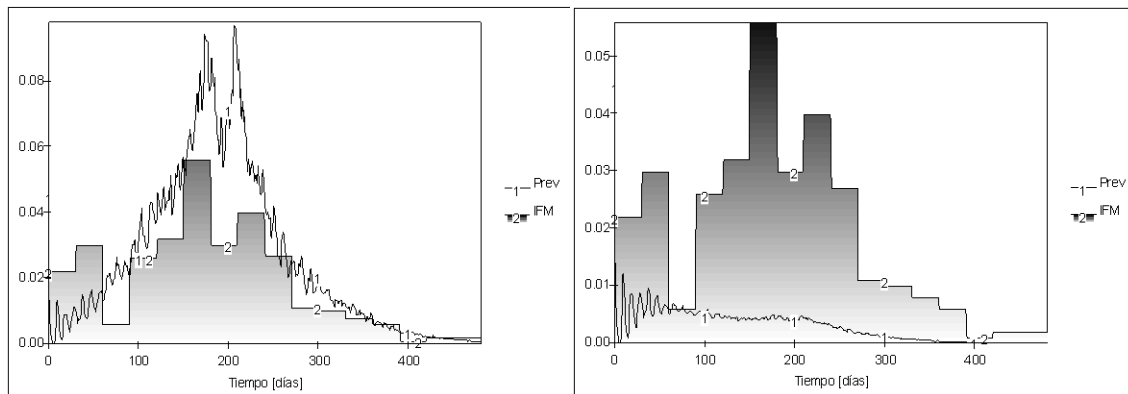


Figura 10. Análisis de sensibilidad. Izquierda: resultados de simulación para probabilidad de supervivencia diaria CONSTANTE (0.899): variación con la temperatura del período de incubación extrínseco y el ciclo de ovoposición. Derecha: período de incubación extrínseco y probabilidad de supervivencia diaria CONSTANTES (12 días y 0.899, respectivamente): variación con temperatura del ciclo de ovoposición

CONCLUSIONES

Aportes. El modelo matemático y el proceso de simulación constituyen, aún a este nivel preliminar, una herramienta fundamental para el entendimiento de las dinámicas de transmisión y las asociaciones clima-malaria. Se destacan las siguientes fortalezas: (1) articulación de gran parte del conocimiento desarrollado en torno a la enfermedad por las disciplinas de entomología, epidemiología, medicina, limnología, hidrología y climatología; (2) representación de la ecología del vector como un primer esfuerzo para simular las fluctuaciones estacionales de la densidad de mosquitos adultos hembra; (3) identificación en el ciclo de transmisión de las variables entomológicas que son altamente influenciadas por los patrones climáticos; (4) inclusión del módulo paralelo de disponibilidad de criaderos con miras a representar el desarrollo de la población de mosquitos en sus estados preimaginales; (5) inclusión del módulo paralelo de interacciones depredador-presa en los estados preimaginales de la población de mosquitos; (6) concepción como una herramienta para el entendimiento, por la profundización en las interacciones entomológicas-climáticas que conducen a los brotes epidémicos de malaria en el país; (7) concepción como una herramienta de apoyo para el diseño de políticas y campañas de control y erradicación de la malaria en el país; y (8) concepción como herramienta de experimentación, en el sentido de que se constituye en un laboratorio que permite realizar experimentos para observar posibles comportamientos del sistema previa consideración de escenarios diversos.

Conclusiones generales. Las variables entomológicas más relevantes para la determinación del grado de interacción entre las poblaciones de mosquitos y hospederos vertebrados, y la posterior estimación de la prevalencia de la enfermedad son: el ciclo de ovoposición y el período de incubación del parásito dentro del vector o esporogonía. Ambas variables son altamente dependientes de factores ambientales, en particular, la temperatura. En torno al control que ejerce el clima sobre estos aspectos entomológicos es que se deben concentrar proyectos futuros de investigación.

Si se acepta la hipótesis, de que la sola disminución en el período de incubación del parásito dentro del vector como respuesta al incremento en la temperatura de una determinada zona endémica, genera los brotes epidémicos de la enfermedad, se está ante una amenaza evidente. En este sentido, se debe generar una estrategia defensiva que considere una o más de las siguientes tres componentes: (a) diseñar sistemas que alerten sobre la emergencia o resurgencia de este tipo de enfermedades infecciosas o de los vectores que las portan. Esto podría generar medidas de control de la proliferación de vectores, sin perjuicio para el medio ambiente, diseñar campañas de educación ambiental para la protección de la población humana de la zona endémica, distribuir vacunas a la población en riesgo, y/o suministrar tratamientos a los casos infecciosos; (b) concentrar esfuerzos en la predicción de condiciones climatológicas y ambientales que se pueden tornar favorables para los brotes epidémicos de la enfermedad, de tal manera que los riesgos sean minimizados; y (c) enfrentar el calentamiento global directamente. Esto es, limitar actividades humanas que contribuyen al calentamiento o que agravan sus efectos.

Implicaciones. Aunque la malaria tiene origen en numerosos factores socio-económicos, demográficos y hereditarios, los factores ambientales y la variabilidad climática también contribuyen a explicar las fluctuaciones en las incidencias de la enfermedad, de tal forma que es posible aprovechar esta porción de la varianza para apoyar medidas de control y mitigación. El evento ENSO se puede considerar como un 'Sistema de Alerta Temprana' (SAT) (Poveda et al., 1999), para prevenir y mitigar la enfermedad en el país. Así, una vez se tengan predicciones con alta confiabilidad y/o se esté presentando un evento del ENSO, se puede comenzar a utilizar insecticidas, a impregnar mosquiteros con piretroides, a tomar medidas de control biológico, y otras medidas no permanentes como planificar inventarios de drogas, implementar campañas de diagnóstico y vacunación, acelerar el entrenamiento de personal, diseminar información a través de los medios de comunicación, entre otras (Poveda et al., 1999).

En general, con este trabajo de investigación, se ha construido una herramienta de análisis tendiente a dar pautas para el establecimiento de sistemas de prevención y control de malaria en Colombia, no sólo durante las anomalías climáticas asociadas con la ocurrencia del El Niño, sino con respecto al ciclo anual normal de la enfermedad y su asociación con la variabilidad climática 'normal'.

Agradecimientos

Yesim Tozan. Woodrow Wilson School of Public and International Affairs. Princeton University. USA.
Paulo Lázaro Ortíz Bultó. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología. Cuba.
InterAmerican Institute for Global Change Research IAI. Collaborative Research Network CRN. USA.
Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, COLCIENCIAS. Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aracil, J. & M. Toro.** 1993: Métodos cualitativos en Dinámica de Sistemas. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Aron, J. & R. May.** 1982: The population dynamics of malaria. In: Anderson, R.M. (ed) (1982). The population dynamics of infectious diseases: theory and applications. Chapman and Hall, London, 139-179.
- Blower, S. et al.** 1996: Control strategies for tuberculosis epidemics: new models for old problems. *Science*. **273**:497-500. 26 July 1996.
- Blower, S. et al.** 1998: Predicting and preventing the emergence of antiviral drug resistance in HSV-2. *Nature Medicine*. **4**(6), June.
- Blower, S. & J. Gerberding.** 1998: Understanding, predicting and controlling the emergence of drug-resistant tuberculosis: a theoretical framework. *Review. J Mol Med*. **76**:624-636.
- Bouma, M. et al.** 1996. Falciparum malaria and climate change in the northwest frontier province of Pakistan. *American Society of Tropical Medicine and Hygiene*. **55**(2):131-137.
- Bouma, M. & Dye, C.** 1997. Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. *Journal of the American Medical Association*. **278**:1772-1774.
- Bouma, M. & H. Van Der Kaay.** 1994. Epidemic malaria in India and El Niño Southern Oscillation. *Lancet*. **344**:1638-1639.
- Dietz, K.** 1988: Mathematical models for transmission and control of malaria. In: Wernsdorfer, W.H. and McGregor, I. (eds.) (1988). *Malaria: principles and practice of malariology* (volume 2). Churchill Livingstone, New York, 1091-1133.
- Dyner, I.** 1993: Dinámica de sistemas y simulación continua en el proceso de planificación. *Publicación Universidad Nacional de Colombia*. Primera edición.
- Garrett-Jones, C.** 1964: Prognosis for interruption of malaria transmission through assessment of the mosquito's vectorial capacity. *Nature*. **204**:1173-1175.
- Haile, D.** 1989: Computer simulation of the effects of changes in weather patterns on vector-borne disease transmission. In: *The potential effects of global climate change in the United States*, ed. J. B. Smith and D.A. Tirpak. Document No. 230-05-89-057, Appendix G. Washington, D.C. U.S. Environmental Protection Agency.
- Henize, J.** 1971: Course materials for principles of Dynamic Systems. M.I.T.
- Lotka, A.** 1925: Elements of physical biology. Baltimore: Williams&Wilkins Co.
- Macdonald, G.** 1957: The epidemiology and control of malaria. Oxford University Press, London, U.K.
- Mckenzie, F. et al.** 1998: Discrete-event simulation models of Plasmodium falciparum malaria. *Simulation...for understanding*. **71**(4). October 1998.
- Martens, W. et al.** 1995a: Climate change and vector borne diseases: a global modelling perspective. *Global Environmental Change*. **5**:195-209.
- Martens, W. et al.** 1995b: Potential impact of global climate change on malaria risk. *Environmental Health Perspectives*. **103**:458-464.
- Martens, W., T. Jetten & D. Focks.** 1997a: Sensitivity of malaria, schistosomiasis and dengue to global warming. *Climatic Change*. **35**:145-156.
- Martens, W.** 1997b: Health impacts of climate change and ozone depletion. An eco-epidemiological modelling approach. *Proefschrift Maastricht*. - Met lit. opg. - Met samenvatting in het Nederlands.
- Martens, W. et al.** 1997c: Climate change, human health, and sustainable development. *Bulletin of the World Health Organization*. **75**(6):583-588.
- Martens, W.** 1998: Health and climate change: modelling the impacts of global warming and ozone depletion. Earthscan Publications Ltd., London.
- Patz, J. et al.** 1998a: Predicting key malaria transmission factors, biting and entomological inoculation rates, using modelled soil moisture in Kenya. In: *Tropical Medicine and International Health*. **3**(10):818-827. October.
- Patz, J. et al.** 1998b: Dengue fever epidemic potential as projected by General Circulation Models of Global Climate Change. *Environmental Health Perspectives*. **106**(3). March 1998.
- Poveda, G. & W. Rojas.** 1996: Impacto del fenómeno El Niño sobre la intensificación de la malaria en Colombia. *Memorias XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá, 647-654.
- Poveda, G. & W. Rojas.** 1997. Evidencias de la asociación entre epidemias de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*. **21**(81):421-429.
- Poveda, G., W. Rojas & M. Quiñónez.** 1999: Relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el Niño-Oscilación del Sur. *COLCIENCIAS*. Medellín.
- Poveda, G. et al.** 2001: Coupling between annual and ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. In: *Environmental Health Perspectives*. **109**(5).
- Toro, M. & J. Aracil.** 1988: Qualitative analysis of system dynamics ecological models. In: *System Dynamics Review* **4**(1-2):56-80.
- Volterra, V.** 1926: Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. Ser. VI*, **2**.

Fecha de recepción: 22 de noviembre de 2001

Fecha de aceptación: 23 de enero de 2002