



POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

Time-specific Ecological Niche Modeling Predicts
Spatial Dynamics of Vector Insects and Human
Cases of Dengue in Mexico.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
M A E S T R A E N C I E N C I A S
(B I O L O G Í A A N I M A L)
P R E S E N T A

BIOL. CARMEN MARTINEZ CAMPOS

DIRECTOR DE TESIS: DR. RODOLFO NOVELO GUTIÉRREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

You are a child of the universe, no less than the trees and the stars: you
have a right to be here

Lab as Guru In:101 uses for a Lab 1998

A la memoria de mis padres, Carmen y Amado, gracias por su amor,
guía y enseñanzas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a los miembros del sínodo:

Al Dr. Rodolfo Novelo Gutiérrez por su paciencia, su amistad y por creer en mí después de tanto tiempo. Al Dr. Enrique Martínez Meyer, por apoyarme en esta empresa y en otros proyectos similares. Al M. en C. Enrique González Soriano por su apoyo, su amistad y sus chistes que me hacen sonreír cada mañana. Al Dr. Víctor Sánchez Cordero, por su apoyo y por introducirme en el campo de los sensores remotos. Y al Dr. Gerardo Rivas Lechuga por su amistad, por informarme de esta oportunidad, apoyarme, gracias de no ser por ti seguiría sin intentarlo.

A mis amigos de la pequeña comunidad del InDRE que han sido mi familia en los últimos años:

A la Dra. Ana Flisser por confiaren mi y enseñarme que mi límite es el que yo me ponga, por su amistad en todo momento y por no dejarme en paz hasta ver terminado este trabajo. A la QBP. Irma Hernández que más que amiga ha sido como una hermana siempre presente con una palabra de apoyo o simplemente con un afectuoso abrazo en el momento más indicado. A los Drs. Clementina Magos y Alejandro Escobar por su amistad, por ser mi apoyo y refugio en momentos difíciles, por el consejo constante y la también por ser mis críticos. A Lupita González y la QFB. Adrian Wong por su amistad, por su presencia, paciencia y consejo.

A la QBP. Rosario García Suárez por su amistad, apoyo, por compartir sus sueños con los míos y crecer juntas día a día.

Finalmente a la Nana Chenta por ser mis ojos, mis manos... una extensión de mi por su cariño y compañía y por los cuidados al Mozart Team.

CONTENIDO

I. Introducción	1
La enfermedad, el vector y el ciclo de transmisión.	2
Figura 1. El ciclo de transmisión del dengue	3
La vigilancia entomológica de dengue.	4
Concepto de espacio en epidemiología.	5
Sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica.	6
II. Traducción del Artículo.	
1. Introducción.	9
2. Material y Métodos.	10
3. Resultados.	12
4. Discusión.	13
Referencias.	14
Figura 1 Valores mensuales de NDVI del satélite AVHRR para junio a noviembre de 1995.	18
Figura 2. Puntos de muestreo (X) en los que se encontró <i>Aedes aegypti</i> , superpuestos en un área de predicción de la distribución potencial de la especie a lo largo del año, con base en la información de las medias anuales obtenidas con sensores remotos.	19
Figura 3 Comparación de los modelos de nicho ecológico en tiempo específico y tiempo promedio en el centro y el sur de México.	20
Cuadro 1. Resultados de predicciones de la presencia de mosquitos y casos de dengue para cada mes en 1995 basado en promedios de los dos meses previos de modelos de predicciones de nicho ecológico.	21
Figura 4. Análisis de las contribuciones relativas de cada variable ambiental en los modelos de nicho.	22
III. Discusión.	23
IV. Conclusiones.	30
V. Referencias citadas	33
APÉNDICE I. GLOSARIO	39
APÉNDICE II. ARTÍCULO ORIGINAL	47

RESUMEN

Numerosas enfermedades humanas como la malaria, el dengue, la fiebre amarilla y la leishmaniasis, para nombrar algunas, son transmitidas por vectores con ciclos de vida cortos y hematófagos, que varían en espacio y el tiempo. Al mismo tiempo, las distribuciones geográficas generales de estas especies importantes epidemiológicamente son conocidas, la variación espacio-temporal en su aparición y actividad sigue siendo poco comprendida. Se utilizó el modelado de nicho ecológico a través de un algoritmo genético para producir modelos mensuales de distribución predictivos mensuales de *Aedes aegypti* en México durante 1995. Predicciones significativas mensuales de la actividad y distribuciones del mosquito indican que la predicción de la dinámica espacio-temporal de las especies de vectores de enfermedades es factible; la coincidencia significativa con casos humanos de dengue indica que probablemente estas dinámicas se trasladan directamente a la transmisión del virus del dengue a los seres humanos. Este enfoque proporciona tiene potencial para optimizar el uso de los recursos para la prevención de enfermedades y la rehabilitación a través de de predicción automatizados del riesgo de transmisión de la enfermedad.

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

I. Introducción

El dengue es un problema creciente de salud pública en el mundo. Aproximadamente dos quintas partes de la población mundial está en riesgo y más de 100 países han sufrido brotes de dengue clásico (DC) o de fiebre hemorrágica del dengue (dengue hemorrágico; DH). La incidencia anual del dengue alcanza hasta 50 millones de casos por año, de los cuales 500,000 personas son hospitalizadas y 20,000 mueren. Noventa y cinco por ciento de todos los casos de dengue hemorrágico ocurre en niños menores de 15 años de edad (OPS 1/Jun/1999). El dengue clásico (DC) y el dengue hemorrágico (DH) constituyen un problema cada vez más grave para los países de América, que se han visto afectados en los últimos años por epidemias extensas y explosivas. Aún resulta más alarmante la emergencia observada del dengue hemorrágico a partir de la epidemia de Cuba en 1981 y su extensión gradual a otros países de la región. La incidencia del dengue y de la fiebre hemorrágica de dengue ha crecido en América, siguiendo lo ocurrido en Asia, en un lapso de 30 años.

De acuerdo con La Organización Panamericana de la Salud/ Organización Mundial de la Salud (OPS/ OMS), el dengue clásico pasó de 66,011 casos en 1980 a **1'019,196 casos en 2002. Lo mismo ocurre para el DH, ya que entre 1968 y 1980** se notificaron 60 casos de DH en cinco países, pero de 1981 a 2002 se notificaron más de 100 mil casos en 28 países. En México, a partir de 1994, se presentan brotes epidémicos por DH con 48,450 casos acumulados sólo de 2003 a 2007 (CENAVECE, 2008). La letalidad inicial fue de 23.3% y 5.6% en los primeros dos años, disminuyendo hasta 3% entre 1996 y 1999, posteriormente se redujo a menos de 1% en los tres últimos años.

Entre 1999 y 2002 la proporción de casos de DC y DH tuvo una variación importante. En el primer año, sólo 1.4% de todos los casos de dengue correspondió a DH, pero en los siguientes años la proporción de casos de DH se incrementó a 4% en 2000, 6.7% en 2001 y 17.6% en 2002, lo que significa que muchas de las infecciones secundarias ya se manifiestan como DH. Para el 2000, se confirmaron 67 casos con 0% de letalidad y en el 2002 se confirmaron 2,159 casos y 8 muertes. Al cierre del 2007 fue de aproximadamente 135,000 casos probables, confirmando 40,559 casos de DC y 7,897 DH (la cifra real oscila entre 66,000 y 95,000 casos) (CENAVECE, 2008).

En 2005, el dengue fue la enfermedad viral transmitida por vector más importante que afectó a los humanos; se estimó que 2.5 mil millones de personas viven en áreas de riesgo de transmisión epidémica. Su distribución global es comparable a la malaria. Cada año se informa de diez millones de casos de DH y, dependiendo del

año, hasta centenares de millares de casos. El índice de mortalidad de DH en la mayoría de los países es de cerca de 5%, pero esto se puede reducir a menos de 1% con el tratamiento apropiado. La mayoría de los casos fatales está en niños y adultos jóvenes.

Las razones del dramático aumento global de DC/DH como problema de salud pública son complejas y poco entendidas. Sin embargo, varios factores importantes pueden ser identificados, como: cambios demográficos descontrolados y, consecuentemente, insuficiencia de servicios de drenaje y alcantarillado y recolección de basura, lo cual lleva al almacenaje de agua y proliferación del vector. El detrimento generalizado en diferentes países latinoamericanos en la infraestructura de salud pública; los recursos financieros y humanos limitados y las prioridades, que cambian con las administraciones (por lo menos en nuestro país) y cuya tendencia más reciente se inclina a las enfermedades no transmisibles sobre las transmisibles (PRONASA 2007-2012), ha dado lugar a la ejecución de métodos de control para emergencias en respuesta a epidemias más que a programas preventivos para evitar la transmisión epidémica. En general, los esfuerzos internacionales para prevenir estas epidemias giran en torno a la vigilancia epidemiológica, virológica y el control del vector ([HYPERLINK "http://www.paho.org" http://www.paho.org](http://www.paho.org)).

La enfermedad, el vector y el ciclo de transmisión.

El dengue es una enfermedad causada por un virus en sus cuatro serotipos: DEN-1, DEN-2, DEN-3 y DEN-4, que se encuentra a lo largo de las áreas tropicales del mundo en asociación con uno o más de sus mosquitos vectores. Los denguevirus son transmitidos por varias especies del género *Aedes* subgénero (*Stegomyia*). En especial son importantes *Aedes (Stegomyia) aegypti*, (Linneo, 1762), *Aedes (Stegomyia) albopictus* (Skuse, 1894) y las que se incluyen en el grupo *Aedes scutellaris* (CDC, 1980). Con excepción de algunas áreas en Asia en donde se encuentran y funcionan como vectores secundarios, *Aedes aegypti* es el principal responsable de la transmisión en el mundo. *Aedes albopictus* fue introducido al Continente Americano primero en el estado de Texas, Estados Unidos de América en **1985 y poco después en el estado de São Paulo, Brasil** (CDC/MMWR, 1986a; CDC/MMWR, 1986b; Moore *et al*, 1988). *Aedes albopictus* ha ampliado su distribución geográfica alcanzando la frontera norte de algunos estados mexicanos (Ibañez-Bernal & Martínez-Campos, 1994), incluso desde hace 10 años ha penetrado más al territorio nacional hasta el norte del estado de Veracruz (Martínez-Campos *et al*, 1998; Flisser *et al*, 2002). Mientras que desde 2002 se encuentra en Chiapas, procedente de Centroamérica (Casas-Martínez & Torres-Estrada, 2003).

Los mecanismos de transmisión de patógenos por los artrópodos se pueden clasificar en tres tipos generales, de acuerdo con la forma en que el patógeno es transferido en una población de hospederos. Se considera como transmisión

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

horizontal cuando el patógeno es transferido de un individuo a otro pero no directamente entre padres e hijos, pudiendo ocurrir entre generaciones, pero nunca de manera congénita. Este tipo de transmisión es la más común observada en la naturaleza, lo que no implica que sea necesariamente la más frecuente. En cambio, la transmisión vertical es la transferencia congénita o directa del patógeno de los padres a su progenie; se ha observado que esta es la vía más frecuente de transmisión de patógenos en la naturaleza. Finalmente, se considera transmisión transestadial a la capacidad de conservar un patógeno a pesar de los cambios sufridos por el artrópodo durante las mudas en su desarrollo; al ser holometábolo el desarrollo postembrionario de los mosquitos se puede presentar la transmisión horizontal y vertical.

El ciclo de transmisión del dengue es de tipo biológico propagativo y se explica en la figura 1 a continuación:

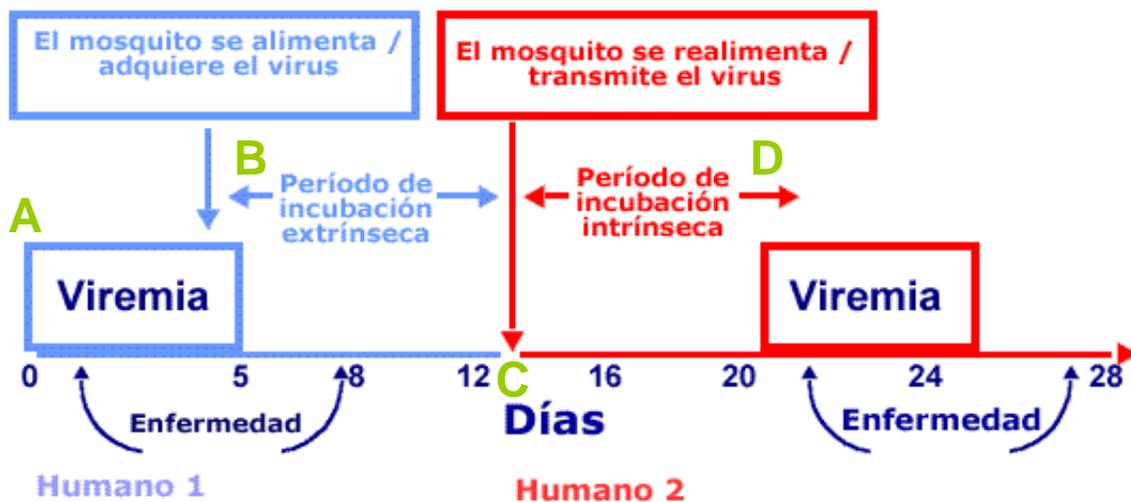


Figura 1.

A. El ciclo de transmisión del virus del dengue por el mosquito *Aedes aegypti* comienza con una persona infectada con el dengue. El mosquito puede adquirir el virus desde un día antes de iniciar la fiebre y hasta el final del periodo febril, es decir, que la persona tendrá el virus circulando en la sangre o una viremia que dura aproximadamente cinco días en promedio.

B. En seguida, el virus se replica durante un período de incubación **extrínseca dentro del mosquito**, de **ocho a 12 días** de duración. Es decir, que el mosquito se vuelve infectante después de este periodo. Al mismo tiempo, el mosquito no vuelve a alimentarse por **tres a cinco días** después de ingerir la sangre; una vez digerida vuelve a ovipositar. Este período varía dependiendo de la temperatura, en condiciones óptimas (22-24 ° C) es de 3 días y, a veces, la hembra puede volver a alimentarse el mismo día de la oviposición.

C. A continuación, cuando se lleva a cabo la segunda o tercera alimentación (de ocho a 12 días) el mosquito pica a una persona susceptible y le transmite el virus, así como a cualquier otra persona susceptible que el mosquito pique durante el resto de su vida. Otra cosa importante que hay que tomar en cuenta es que, para obtener una alimentación completa de sangre, *Aedes aegypti* generalmente lo hace a través de varias alimentaciones parciales que no siempre son sobre la misma persona, sino sobre un grupo de personas, por lo cual aumenta la probabilidad de transmitir la infección.

D. El virus se replica en la segunda persona y produce síntomas. Los síntomas comienzan a aparecer en un promedio de cuatro a siete días después de la picadura del mosquito — éste es el **período de incubación intrínseca dentro de los seres humanos**. Si bien el promedio de duración de este periodo es de cuatro a siete días, puede durar de tres a 14 días. La viremia comienza algo antes de la aparición de los síntomas. Los síntomas causados por la infección por dengue pueden durar de tres a 10 días, con un promedio de cinco días, después de la aparición de los síntomas —de modo que la enfermedad persiste durante varios días después de haber concluido la viremia.

Hay dos factores importantes a considerar: 1) Las hembras del mosquito viven en la naturaleza alrededor de 14 días, lo que significa que pueden ovipositar entre 3 y 4 veces dependiendo del tiempo de digestión de la sangre, es decir, que pueden alimentarse el mismo número de veces y así infectar a más personas. 2) Las generaciones de mosquitos emergen en forma escalonada, es decir, que no todos los huevos eclosionan al mismo tiempo, por ello la estructura de edades en juveniles y adultos es muy variable y generalmente en los brotes o epidemias se encuentran poblaciones muy viejas, es decir con varias alimentaciones. La proporción de sexos es de 1:1 en la oviposición. (cfr: <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/slideset/set1/i/slide04.htm>)

La vigilancia entomológica de dengue

Los sistemas de vigilancia epidemiológicos para enfermedades infecciosas se basan en el monitoreo de la incidencia de enfermedades e indicadores de las poblaciones de vectores. El muestreo de vectores es importante para determinar la dinámica espacio-temporal de sus poblaciones, con la meta de diseñar estrategias de prevención y control más efectivas. Sin embargo, es primordial tener un sistema de vigilancia entomológica que permita conocer el comportamiento de las poblaciones del vector para llevar a cabo las intervenciones con anticipación.

Tradicionalmente, la vigilancia entomológica se basa en el muestreo de las larvas que se desarrollan en ambientes domésticos y peridomésticos. Sin embargo, esta información generalmente está limitada en su cobertura geográfica y temporal debido a que su determinación directa tiene alto costo. Esto adquiere mayor importancia ante la ocurrencia de desastres naturales en donde se presentan

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

diversas alteraciones ecológicas y daños a la salud en la población afectada, favoreciéndose la ocurrencia de brotes o epidemias de diversas enfermedades.

Cada vez resulta más evidente que es impostergable pasar de los modelos organizacionales verticales a los horizontales, en donde un punto crucial -aunque complejo- es educar a la población para que participe en las acciones de apoyo comunitario. Continuar con el modelo actual, es decir, en donde la responsabilidad sobre el mantenimiento de los sistemas de prevención y sobre todo de control recae exclusivamente en los gobiernos, trae consigo la falta de una adecuada cobertura espacial y temporal debido a sus altos costos, que incluyen la contratación de personal especializado para llevar a cabo las encuestas entomológicas y la aplicación de las medidas de control. Además de que el tiempo de ejecución debe ser sostenido para mantener controladas las poblaciones del vector.

El dengue como problema de salud pública adquiere cada vez mayor relevancia por su rápido establecimiento y diseminación, aunado a la escasez de recursos financieros y humanos para controlarlo, como ya se ha mencionado anteriormente. Las perspectivas de invertir la tendencia creciente en la actividad epidémica y extensión geográfica del dengue no son prometedoras. Esto ha condicionado el análisis y el diseño de estrategias cada vez mejores para identificar las áreas donde el riesgo de introducción y transmisión es mayor considerando los factores bióticos y abióticos del entorno.

Concepto de espacio en epidemiología.

Un primer acercamiento fue el desarrollo de la teoría de Pavlovsky (1966), de focos naturales de enfermedad, para explicar las enfermedades transmisibles; en particular las transmitidas por vector, cuyos requisitos fueron: considerar una enfermedad endémica, la conexión de la enfermedad con un paisaje geográfico definido y la aparición de brotes estacionales. El concepto de *foco natural de enfermedad* es, por tanto, aplicado a ambientes que presentan condiciones favorables de circulación de agentes independientemente de la presencia y las acciones humanas. Puede suceder en paisajes geográficos variados desde que haya una interacción entre biotopos específicos. La epidemiología del paisaje implica la identificación de las áreas geográficas (biogeocenosis) donde se transmite la enfermedad. A partir del conocimiento de la vegetación y de las condiciones atmosféricas necesarias para el mantenimiento de un patógeno específico en la naturaleza, se puede utilizar el paisaje para identificar la distribución espacial y temporal del riesgo de la enfermedad. Los elementos ambientales claves incluyen la elevación, la temperatura, la precipitación y la humedad, que influyen en la presencia, el desarrollo, la actividad, y la longevidad del patógeno, de vectores, de reservorios y de sus interacciones con los seres humanos. De ésta forma, dicho concepto expresa una apreciación espacial que

integra el conocimiento de las enfermedades transmisibles con la geografía y la ecología (Czeresnia & Ribeiro, 2000).

El concepto de espacio en epidemiología ha evolucionado desde entonces, pasando por el concepto de foco antropúrgico, también desarrollado por Pavlovsky, introduciendo la idea de transformación del espacio de circulación de agentes de enfermedad por la acción humana, o acoplando aspectos económicos y sociales como en la propuesta de Sinnecker (1971) de territorio nosogénico. Éste autor resalta que una gran concentración de personas en las ciudades genera nuevas condiciones ecológicas y sociales, propiciando la emergencia de enfermedades vinculadas a los procesos de urbanización. En cualquier caso, ha habido una convergencia en el concepto de espacio tanto epidemiológico como geográficamente; de tal suerte que actualmente el tipo y la distribución de la vegetación también son influenciados por las variables ambientales mencionadas arriba y pueden ser expresados como elementos del paisaje que son factibles de detectarse remotamente, pudiendo ser modeladas espacialmente aquellas relaciones.

Sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica

Anteriormente, algunas investigaciones que involucraban datos de sensores remotos (SR) para el estudio de enfermedades transmisibles se han centrado en identificar y mapear el hábitat del vector, o en la determinación de los factores ambientales relacionados con la calidad del hábitat del vector (Barnes & Cibula, 1979; Wagner *et al.*, 1979; Hayes *et al.*, 1985; Linthicum *et al.*, 1987, 1999; Welch *et al.*, 1989; Rogers y Randolph, 1991; Hugh-Jones *et al.*, 1992; Pope *et al.*, 1992). Estudios recientes han comenzado a investigar el uso de SR y de las técnicas de análisis espaciales para identificar y mapear los elementos del paisaje que definen colectivamente la dinámica de las poblaciones del vector y humana relacionadas con el riesgo de transmisión de enfermedades (Daniel & Kolar, 1990; Wood *et al.*, 1991; Glass *et al.*, 1992; Wood *et al.*, 1992a, 1992b; Dister *et al.*, 1997; Beck *et al.*, 1994, 1997, 2000). La tendencia actual es utilizar otras herramientas para predecir con anticipación las características que determinan un brote o una epidemia

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología -particularmente de los sistemas de bases de datos y sistemas de información geográfica (SIG)- ofrece una alternativa promisoriosa en el estudio para la prevención y control de enfermedades infecciosas. El análisis de los patrones geográficos de las enfermedades en la práctica de la salud pública, y especialmente en la epidemiología, es de gran importancia, ya que permite establecer un panorama espacial de la distribución de la enfermedad y de los probables factores que la determinan. De esta manera, el fenómeno salud-enfermedad dispuesto en mapas ofrece ventajas sustanciales, ya

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

que evidencia claramente la relación entre diferentes variables y la magnitud del riesgo o daño. Ejemplo de ello es el proyecto sobre Sistemas de Información Geográfica en Salud (SIG-Epi), el cual tiene por objetivo contribuir al fortalecimiento de la capacidad de análisis epidemiológico de los trabajadores de la salud, proveyendo herramientas eficientes que faciliten dichas tareas de análisis. Estas herramientas computarizadas permitirán el análisis de situación de salud, el monitoreo y la evaluación de la efectividad de intervenciones que son requeridas para la toma de decisiones y la planeación en salud. Continuando con esta línea, en Argentina se ha puesto en marcha un proyecto sobre vigilancia de factores de riesgo para el dengue basado en el reconocimiento de grupos o áreas de riesgo, lo cual presupone la selección de intervenciones sociales y sanitarias *ad-hoc* que tiendan a disminuir o eliminar factores específicos. En resumen, se han utilizado los sistemas de información geográfica para la determinación de la cartografía de riesgos, la cual implica identificar, localizar y caracterizar espacialmente tres componentes: vector, área de influencia y población susceptible. Con estas herramientas se han diseñado los posibles escenarios de riesgo (Bottinelli, 2001)

Debido a que la situación actual generalizada de recursos económicos es limitada, es importante que los programas de salud sean cada vez más efectivos y eficientes en su toma de decisiones; y estas herramientas abren la posibilidad de establecer métodos preventivos o de respuesta a emergencias de manera más organizada y con una mayor optimización de los recursos.

II. Traducción del Artículo

El modelado del nicho ecológico en tiempo específico para predecir la dinámica espacial de los vectores y casos humanos de dengue.

A. Townsend Peterson, Carmen Martínez-Campos, Yoshinori Nakazawa, Enrique Martínez-Meyer. Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* (2005) 99, 647—655.

1. Introducción

Si bien la distribución geográfica general de las especies de insectos vectores de enfermedades es el objetivo de monitoreos y esfuerzos de mapeo extensivos (Cooper *et al.*, 2002; Shillu *et al.*, 2003), los detalles finos pueden ser poco claros, aun en regiones tan bien estudiadas, como Norteamérica (Levine *et al.*, 2004). Sin embargo, es aún mayor el reto de anticipar cuándo y dónde emergerán brotes epidémicos en las áreas conocidas de distribución geográfica de especies particulares. Este trabajo utiliza una serie de herramientas novedosas basadas en el modelado del nicho ecológico al desafío de conocer la variación espacio-temporal en la actividad y distribución geográfica del principal vector del dengue en México, el mosquito *Aedes aegypti*.

Usando este enfoque se producen modelos sobre los requerimientos ecológicos de las especies, relacionando la presencia de éstas a las condiciones ambientales del paisaje. Cuando se han usado estos modelos para identificar áreas potencialmente habitables por las especies, el resultado ha sido una excelente predicción de la distribución geográfica de especies en áreas desconocidas (Peterson and Kluza, 2003; Peterson and Shaw, 2003); en áreas de invasión de especies exóticas (Peterson, 2003; Skov, 2000); en el efecto de cambio climático sobre la distribución de especies (Bakkenes *et al.*, 2002; Midgley *et al.*, 2003); y en interacciones entre especies en ciclos de transmisión de enfermedades (Peterson *et al.*, 2002b, 2003). Sin embargo, los modelos de nicho generalmente usan variables ambientales que representan condiciones promedio sobre periodos de tiempo amplio (décadas), siendo prácticamente insensibles a las dinámicas espacio-temporales finas. En este artículo, exploramos y probamos la hipótesis de que los detalles de la dinámica espacial y temporal de las poblaciones del mosquito *Aedes aegypti* y, consecuentemente, de los brotes del dengue, se pueden predecir mediante el modelado del nicho ecológico del vector. En esencia, esta aproximación sigue el concepto de Pavlosky sobre focos naturales de transmisión de enfermedades infecciosas ('natural nidity') (Pavlosky, 1966), excepto que se enfoca en un objetivo móvil: las poblaciones de mosquitos que varían en espacio y tiempo.

2. Material y Métodos.

El análisis general en este artículo comprende censos de la distribución de larvas del mosquito usados para predecir distribuciones específicas mensuales de este vector. También examinamos si se correlacionan las distribuciones pronosticadas de los vectores y la distribución geográfica de los casos humanos de dengue. Los modelos que desarrollamos, en todos los casos, están probados con base en series de datos independientes, de tal manera que la generalidad y habilidad predictiva de los modelos se evalúa desde series externas.

Los modelos de nicho ecológico se basaron en información de puntos de presencia para *Aedes aegypti* (Peterson *et al.*, 2002c) tomados de los exámenes larvarios realizados a lo largo de México por el laboratorio de Entomología del Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos (InDRE), Secretaría de Salud, México. Las muestras se tomaron mensualmente en puntos dispersos a lo largo del este y sur de México. Los datos de humanos se tomaron de casos diagnosticados por el InDRE en el período correspondiente a las muestras larvales; las fechas de exposición fueron calculadas basadas en la suposición de un promedio de 18 días del inicio de síntomas (incluyendo tiempo de la viremia en un humano infectado, período de incubación extrínseco en un mosquito, una segunda alimentación en un humano, período de incubación intrínseco en un segundo humano, y tiempo de la viremia en un segundo humano [ver <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/slideset/set1/i/slide04.htm>]) y siete días entre el inicio de síntomas y la toma del suero para diagnóstico. Específicamente, se utilizaron 181 registros de mosquitos y 1994 de casos de dengue, de abril a diciembre de 1995 que se georreferenciaron usando un gacetero de los poblados de México con una precisión aproximada de **0.1' de** latitud y longitud (figura 1).

Para caracterizar las condiciones ambientales usamos siete coberturas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que representan diversos aspectos del paisaje ecológico en México (figura 1). Estas coberturas incluyeron: elevación, pendiente, orientación de la pendiente y un índice topográfico que representa la tendencia del terreno de acumular agua, obtenidas de la base de datos Hydro-1K del USGS (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30.html>); así como imágenes del índice de vegetación normalizada (NDVI) de 1995, obtenidos del sensor radiométrico avanzado de muy alta resolución (AVHRR). Los datos del NDVI se incluyeron en el proceso de modelado como compuestos mensuales, tan bien como las diferencias entre un mes dado y los dos meses previos para las capas de datos obtenidos por percepción remota en un total de tres meses específicos. Para este análisis no se incluyó información de precipitación y temperatura porque son temporalmente burdos y no permitirían obtener las predicciones finas desarrolladas en este artículo; aunque los índices de vegetación de las imágenes de satélite de alguna manera reflejan la dinámica hídrica con la respuesta de la vegetación y el incremento o decremento de la masa fotosintética.

Los modelos de nicho ecológico se desarrollaron usando el algoritmo genético para la producción de conjuntos de reglas (GARP, por sus siglas en inglés) (Stockwell

& Noble, 1992), que es un algoritmo heurístico de cómputo que ha sido exitosamente usado para producir predicciones de la distribución geográfica de especies (Anderson *et al.*, 2003; Egbert *et al.*, 2002; Peterson & Cohoon, 1999; Peterson & Shaw, 2003; Peterson *et al.*, 2004b; Stockwell & Peterson, 2002a, 2002b, 2003). GARP se enfoca en el modelado del nicho ecológico de las especies (i.e., el conjunto de condiciones ecológicas dentro de las cuales una especie puede mantener poblaciones sin inmigración), relacionando las características ecológicas de la región con los puntos de presencia de la especie y con puntos muestreados al azar en el resto de la región en estudio (pseudos-ausencias), para desarrollar una serie de reglas de decisión que resuman mejor los factores asociados con su presencia.

Los puntos de presencia se dividen por igual en conjuntos de datos de entrenamiento y de validación. GARP lleva a cabo esencialmente el mismo análisis general que la regresión logística multivariada, pero su base cómputo-evolutiva permite el análisis de conjuntos de datos muy complejos que probablemente podrían ser prohibitivos para aproximaciones más convencionales. GARP trabaja en un proceso repetitivo de selección de reglas, evaluación e incorporación o rechazo: se selecciona un método a partir de un conjunto de posibilidades (regresión logística, y 3 reglas bioclimáticas) y se aplica a los datos de entrenamiento para desarrollar o modificar una regla. La robustez de la predicción se evalúa con base en los datos de validación. Las reglas pueden desarrollarse de manera similar a como el ADN mimetiza la evolución (*e.g.*, mutaciones puntuales, deleciones). Los cambios en la agudeza de la predicción entre repeticiones se usan para definir si se deben incorporar reglas particulares al modelo o no; los algoritmos se someten a 1000 repeticiones o hasta su convergencia.

Debido a que existen diversos elementos de aleatorización en el desarrollo de un modelo con GARP, se desarrollan varios modelos para capturar esa variabilidad y posteriormente, es necesario seleccionar los modelos óptimos con base en sus errores estadísticos (Anderson *et al.*, 2003). El procedimiento desarrollado por esos autores se basó en comparaciones detalladas de opiniones de expertos y en el análisis de los errores de omisión y comisión de varios modelos replicados. Para este análisis, desarrollamos 100 réplicas de modelos de nicho ecológicos para cada mes basado en diferentes submuestras al azar de los datos de presencia. Seleccionamos el mejor subconjunto (**'best subset'**) de **10 modelos de los 100 originales** con base en las distribuciones del error estadístico (Anderson *et al.*, 2003), a saber: se definió el umbral del error de omisión (falta de predicción de presencias conocidas) en 5%, por encima del cual se descartaron los modelos; de los modelos restantes se calculó la mediana del área de predicción y se seleccionaron los 10 modelos más cercanos a ésta, descartando los modelos restantes. Las predicciones geográficas (predicciones binarias, 0=ausencia, 1=presencia) de los 10 modelos que se conservaron se sumaron para obtener las distribuciones geográficas potenciales finales.

Los modelos de un mes dado se proyectaron en las condiciones ambientales de todos los meses siguientes, produciendo mapas de distribución potencial para cada uno, para así detectar las áreas que se ajustan con los requerimientos ecológicos de la especie en cada mes futuro según el modelo de un mes en

particular. Para obtener la predicción para un mes dado, promediamos las predicciones de los modelos de los dos meses previos. Los modelos de predicción se evaluaron superponiendo las presencias de vectores o casos humanos del mes en cuestión a las predicciones de los modelos de los dos meses anteriores. Se utilizaron pruebas de Ji cuadrada para comparar el porcentaje de los puntos de validación predichos con aquellos esperados bajo un modelo al azar (obteniendo el número de puntos esperados al azar a partir de la proporción de área predicha). Como únicamente estuvo disponible un sólo caso georeferenciado de dengue humano en diciembre de 1995, no se realizaron validaciones de la presencia de la enfermedad en este mes.

Para establecer cuáles factores ambientales contribuyen mayormente en la distribución de *Aedes aegypti* en espacio y tiempo, usamos la aproximación utilizada por Peterson and Cohoon (1999). Aquí, para evaluar todas las combinaciones posibles de las variables ambientales, corrimos GARP sobre presencias conocidas para cada mes y medimos el error de omisión basado en submuestras independientes de la mitad de puntos disponibles para ese mes. Después calculamos una correlación de Pearson entre la inclusión/exclusión de una variable particular (codificada como variable binaria) y la medición independiente del error de omisión. Las variables con correlaciones fuertemente negativas son las que contribuyen más en el éxito predictivo de los modelos (Peterson & Cohoon 1999).

3. Resultados.

Un modelo tradicional de nicho ecológico basado en las condiciones ambientales promedio anuales y todos los puntos de presencia disponibles indicó una amplia distribución potencial para *Aedes aegypti* a lo largo de México (figura 2). Sin embargo, este modelo no refleja los cambios estacionales, bastante drásticos, de la presencia del mosquito: durante el verano la presencia fue principalmente en el sureste y tierras bajas del sur, mientras que durante el otoño y en los primeros meses del invierno las presencias más extrema estuvieron al norte y en el interior del país. Los modelos en tiempo específico, en contraste, predicen áreas mucho más restringidas en cualquier mes (*p. ej.* figura 3). Las áreas pequeñas predichas en meses particulares coincidieron con la presencia del vector mucho mejor que en los modelos al azar ($P < 0.05$) para todos los meses excepto octubre de 1995 ($> > 0.05$) y noviembre de 1995 ($0.05 < P < 0.10$; Tabla 1). Por lo tanto, al menos para la mayor parte del año, es posible predecir la distribución espacial y temporal de *Aedes aegypti* con alta confianza estadística.

La relación espacial entre la presencia predicha del vector y los casos de dengue muestra una alta coincidencia en los modelos en tiempo específico (figura 3). Extrapolando las fechas de pruebas serológicas de casos humanos a fechas aproximadas de exposición (restando 18 días por infección del mosquito, incubación, infección del ser humano e incubación y 7 días hasta la toma del suero después de los primeros síntomas) y, al sobreponer estas presencias sobre predicciones del

mosquito para esos periodos, los modelos tiempo-especifico predijeron 34% menos áreas que los modelos tiempo-promedio, y sin embargo acertaron en anticipar 62% de los casos de dengue; el cálculo se podría mejorar considerablemente si el radio actual de movimientos humanos y posibles sitios de exposición fueran tomados en cuenta (ver ejemplos de coincidencia cercana en la figura 3). Aun sin tomar en cuenta las pérdidas, la coincidencia entre casos de dengue y las predicciones fueron significativamente mejores que los modelos al azar para todos los seis meses en los que fue posible probarlos (*i.e.*, junio a noviembre de 1995).

El análisis de la contribución relativa de las variables ambientales (Peterson & Cohoon 1999) indicó que el NVDI en el mes de la predicción fue la variable más importante en la capacidad predictiva de modelos, seguida por la elevación, NDVI dos meses antes y NDVI un mes antes; las pendientes, el índice topográfico y la orientación de las pendientes no fueron estadísticamente importantes en la capacidad predictiva de los modelos. Es claro que el buen resultado de nuestros modelos tiempo-especificos depende de forma clara y directa de las variables tiempo-especificas incluidas en los modelos.

4. Discusión.

El enfoque metodológico explorado en este artículo representa la primera aplicación del modelado de nicho ecológico a través de espacio y tiempo (Soberón y Peterson, 2004). El uso del sistema GARP en este estudio se basa en la amplia experiencia con estas aproximaciones para diversos retos (Anderson *et al.*, 2003; Peterson, 2003; Peterson *et al.*, 2002a, 2004a). Actualmente están en proceso comparaciones del funcionamiento de GARP y otras con métodos estadísticos (p. *ej.* regresión logística multivariada) o de cómputo evolutivo (Centro Nacional para Análisis Ecológico y **síntesis de trabajo de grupo "Metodologías alternativas probadas para modelado de nicho ecológico de especies y distribuciones geográficas predictivas"**); pero GARP, en general, produce buenos resultados para el análisis de espacios ambientales complejos, tales como el implicado en este proyecto.

El modelo nulo al azar que utilizamos como base para la validación estadística de nuestros modelos no es particularmente robusto. Sin embargo, lo que ofrece esta aproximación es la confirmación de que la coincidencia entre nuestros modelos de predicción y los puntos de presencia no es simple coincidencia al azar. Nuestros modelos promedian 80% de predicción de la presencia del mosquito para dos meses consecutivos al siguiente, lo cual es muy alto dadas las distribuciones complejas del mosquito y la naturaleza dispersa de los datos de presencia sobre los cuales se basaron los modelos.

Estos resultados abren un nuevo campo de posibles aplicaciones de la información de sensores remotos en la epidemiología, con la ventaja de la excelente predicción ofrecida por el modelado de nicho ecológico. Los esfuerzos previos tenían como meta pronosticar brotes de enfermedades transmitidas por mosquito, basando tales predicciones en patrones de epidemias pasadas (Abeku *et al.*, 2002), anomalías

climáticas (Thompson and Connor, 2001) o la observación de actividad de picadura del vector (Lindbalde *et al.*, 2000). Más recientemente, los intentos se han hecho para utilizar la información de sensores remotos (Hay *et al.*, 2001, 2003; Rogers *et al.*, 2002), pero buscando una asociación directa entre la imagen y las epidemias de enfermedad humana.

Nuestro trabajo es intermedio de estas dos posturas: la información de presencia de especies, que son la clave para el ciclo de transmisión de la enfermedad, se relaciona con datos de sensores remotos para producir modelos específicos del vector; estos modelos se ensamblan en un ambiente de SIG para reconstruir los ciclos de transmisión de la enfermedad (Peterson *et al.*, 2002b, 2003). Si bien todavía no hemos podido modelar todo el ciclo de transmisión del dengue en México, la naturaleza predictiva de las distribuciones del vector es clara y sugiere la posibilidad de conexión con la transmisión de enfermedad en humanos.

El modelado de nichos ecológicos en tiempo específico tiene el potencial para desarrollar en tiempo real sistemas de pronóstico para fenómenos geográficos relacionados con la biodiversidad. Se podrían relacionar de manera eficiente y a bajo costo las **“bibliotecas” de modelos de nicho ecológico para vectores y reservorios de especies** en ciclos de transmisión, plagas agrícolas (Sánchez-Cordero y Martínez-Meyer, 2000) y especies agrícolas (Báez-González *et al.*, 2002), con la información de sensores remotos obtenida en tiempo real para predecir las principales zonas de riesgo de brotes de enfermedades o de infestación de cultivos.

Se podrían realizar exploraciones fructíferas de estas técnicas basadas en colecciones ricas y más sistemáticas de datos de presencia de las especies, series de datos de sensores remotos con resolución más fina en tiempo específico (*e.g.* MODIS, SPOT) para diversas regiones y taxa.

Referencias.

- Abeku, T.A., de Vlas, S.J., Borsboom, G., Teklehaimanot, A., Kebede, A., Olana, D., van Oortmarsen, G.J., Habbema, J.D., 2002. Forecasting malaria incidence from historical morbidity patterns in epidemic-prone areas of Ethiopia: a simple seasonal adjustment method performs best. *Trop. Med. Int. Health* 7, 851—857.
- Anderson, R.P., **Lew, D., Peterson, A.T., 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models.** *Ecol. Mod.* 162, 211—232.
- Báez-González, A.D., Chen, P., Tiscareño-López, M., Srinivasan, R., 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Sci.* 42, 1943—1949.
- Bakkenes, M., Alkemade, J.R.M., Ihle, F., Leemansand, R., Latour, J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Glob. Change Biol.* 8, 390—407.

- Cooper, R.D., Waterson, D.G.E., Frances, S.P., Beebe, N.W., Sweeney, A.W., 2002. Speciation and distribution of the members of the *Anopheles punctulatus* (Diptera: Culicidae) group in Papua New Guinea. *J. Med. Entomol.* 39, 16—27.
- Egbert, S.L., Martinez-Meyer, E., Ortega-Herta, M.A., Peterson, A.T., 2002. Use of datasets derived from time-series AVHRR imagery as surrogates for land cover maps in predicting **species' distributions**. *Proc. IEEE 2002 Int. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS) 4*, 2337—2339.
- Hay, S.I., Rogers, D.J., Shanks, G.D., Myers, M.F., Snow, R.W., 2001. Malaria early warning in Kenya. *Trends Parasitol.* 17, 95—99.
- Hay, S.I., Were, E.C., Renshaw, M., Noor, A.M., Ochola, S.A., Olusanmi, I., Alipui, N., Snow, R.W., 2003. Forecasting, warning, and detection of malaria epidemics: a case study. *Lancet* 362, 580.
- Levine, R.S., Benedict, M.Q., Peterson, A.T., 2004. Distribution of *Anopheles quadrimaculatus* Say s.l. and implications for its role in malaria transmission in the US. *J. Med. Entomol.* 41, 607—613.
- Lindblade, K.A., Walker, E.D., Wilson, M.L., 2000. Early warning of malaria epidemics in African highlands using *Anopheles* (Diptera: Culicidae) indoor resting density. *J. Med. Entomol.* 37, 664—674.
- Midgley, G.F., Hannah, L., Millar, D., Thuiller, W., Booth, A., 2003. Developing regional and species-level assessments of climate change impacts on biodiversity in the Cape Floristic Region. *Biol. Conserv.* 112, 87—97.
- Pavlovsky, E.N., 1966. *Natural Nidality of Transmissible Diseases*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Peterson, A.T., 2003. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling.** *Q. Rev. Biol.* 78, 419—433.
- Peterson, A.T., Cohoon, K.C., 1999. Sensitivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. *Ecol. Mod.* 117, 159—164.
- Peterson, A.T., Kluza, D.A., 2003. New distributional modeling approaches for Gap Analysis. *Anim. Conserv.* 6, 47—54. Peterson, A.T., Shaw, J.J., 2003. *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.* 33, 919—931.

- Peterson, A.T., Shaw, J.J., 2003. *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.* 33, 919—931.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberon, J., Buddemeier, R.H., Stockwell, D.R.B., 2002a. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416, 626— 629.
- Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Beard, C.B., Ramsey, J.M., 2002b. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease. Mexico. *Emerg. Infect. Dis.* 8, 662—667.
- Peterson, A.T., Stockwell, D.R.B., Kluza, D.A., 2002c. Distributional prediction based on ecological niche modeling of primary occurrence data. In: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L. (Eds.), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C, pp. 617—623.
- Peterson, A.T., Vieglais, D.A., Andreasen, J., 2003. Migratory birds as critical transport vectors for West Nile Virus in North America. *Vector Borne Zoon. Dis.* 3, 39—50.
- Peterson, A.T., Bauer, J.T., Mills, J.N., 2004a. Ecological and geographic distribution of .lovirus disease. *Emerg. Infect. Dis.* 10, 40—47.
- Peterson, A.T., Pereira, R.S., Fonseca de Camargo-Neves, V.L., 2004b. Using epidemiological survey data to infer geographic distributions of leishmania vector species. *Rev. Soc. Bras. Med. Trop.* 37, 10—14.
- Rogers, D.J., Randolph, S.E., Snow, R.W., Hay, S.I., 2002. Satellite imagery in the study and forecast of malaria. *Nature* 415, 710—715.
- Sánchez-Cordero, V., Martínez-Meyer, E., 2000. Museum specimen data predict crop damage by tropical rodents. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 97, 7074—7077.
- Shililu, J., Ghebremeskel, T., Mengistu, S., Fekadu, H., Zerom, M., Mbogo, C., Githure, J., Gu, W.D., Novak, R., Beier, J.C., 2003. Distribution of anopheline mosquitoes in Eritrea. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 69, 295—302.
- Skov, F., 2000. Potential plant distribution mapping based on climatic similarity. *Taxon.* 49, 503—515.
- Soberón, J., Peterson, A.T., 2004. Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B, Biol. Sci.* 359, 689—698.

- Stockwell, D.R.B., Noble, I.R., 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of analysis. *Math. Comp. Simul.* 33, 385—390.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2002a. Controlling bias in biodiversity data. In: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L. (Eds.), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C, pp. 537—546.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2002b. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecol. Mod.* 148, 1—13.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2003. Comparison of resolution of methods used in mapping biodiversity patterns from point occurrence data. *Ecol. Ind.* 3, 213—221.
- Thompson, M.C., Connor, S.J., 2001. The development of malaria early warning systems for Africa. *Trends Parasitol.* 17, 438—445.

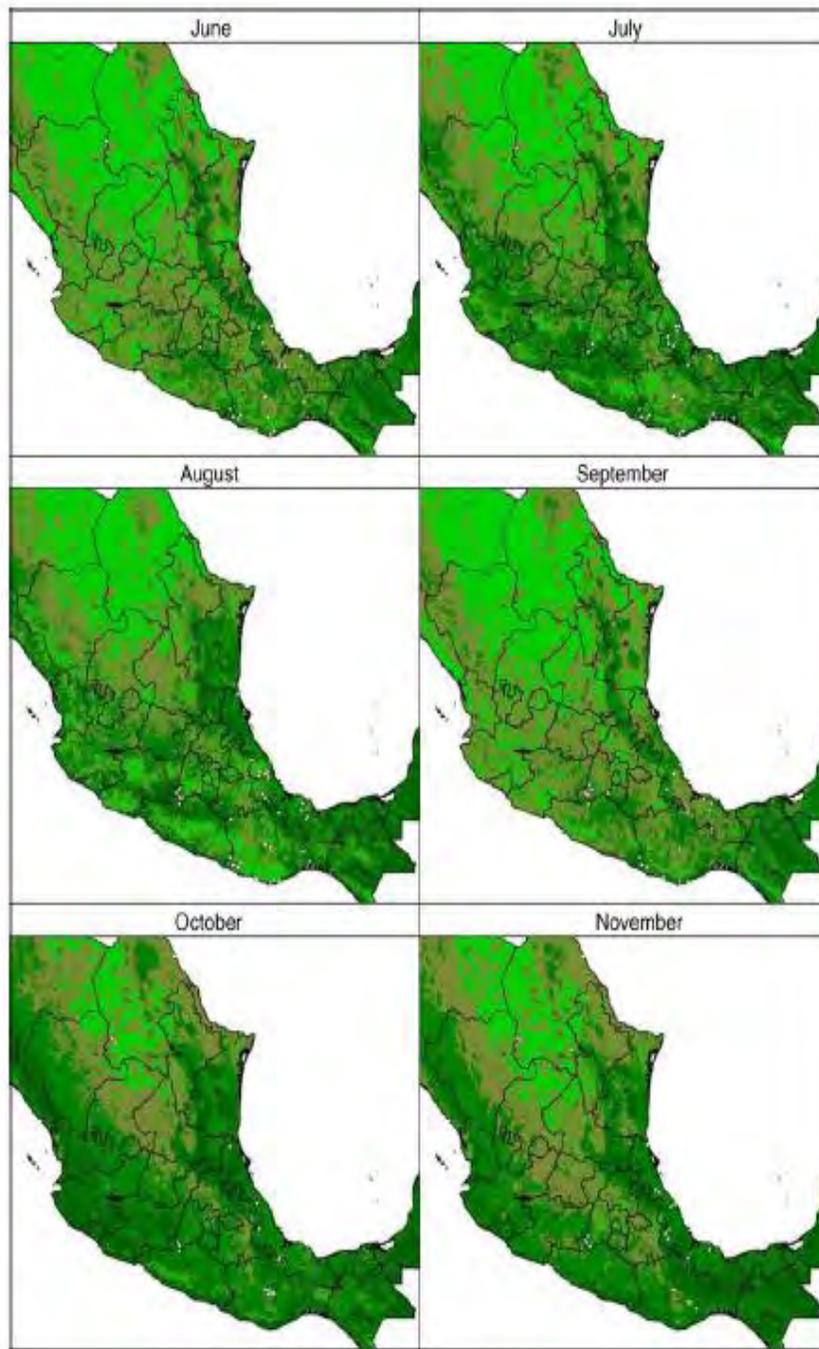


Figura 1 Valores mensuales de NDVI del satélite AVHRR para junio a noviembre de 1995. Las áreas de color café representan valores bajos NDVI, mientras que las áreas de color verde representan valores altos de NDVI. Las comparaciones entre los meses ilustran la variación mensual de las condiciones en todo México. Los datos de presencia de *Aedes aegypti* se muestran como cuadros blancos en cada mes.

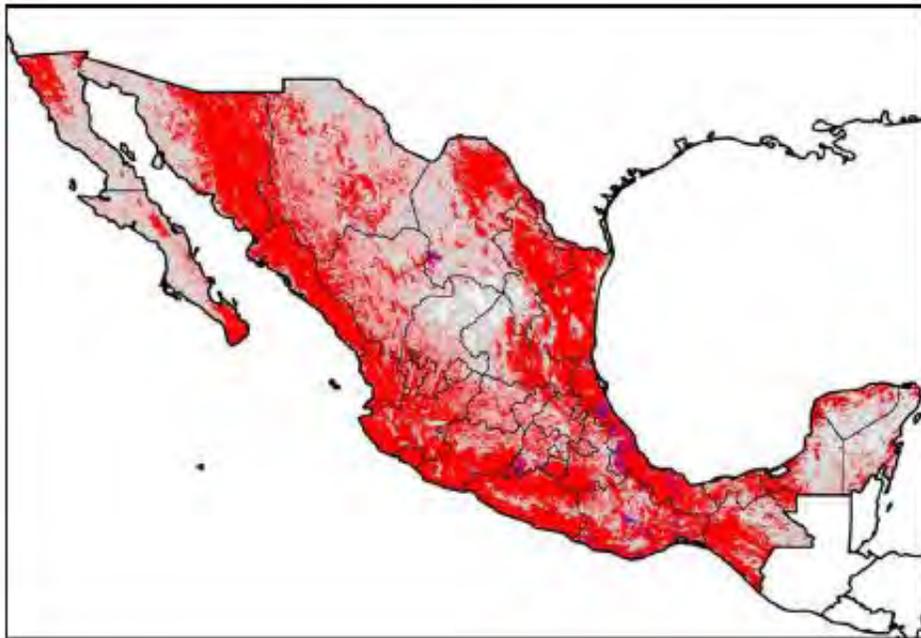


Figura 2. Puntos de muestreo (X) en los que se encontró *Aedes aegypti*, superpuestos en un área de predicción de la distribución potencial de la especie a lo largo del año, con base en la información de las medias anuales obtenidas con sensores remotos. Blanco = predicción como ausente por todos los modelos; gris = predicción como presente para 1-49% de los modelos; rosa = predicción como presente para 50-79% de los modelos y, rojo = predicción como presente para >80% de los modelos. Se pueden observar amplias áreas que fueron predichas en las condiciones presentes dentro del nicho ecológico de la especie durante todo el año.

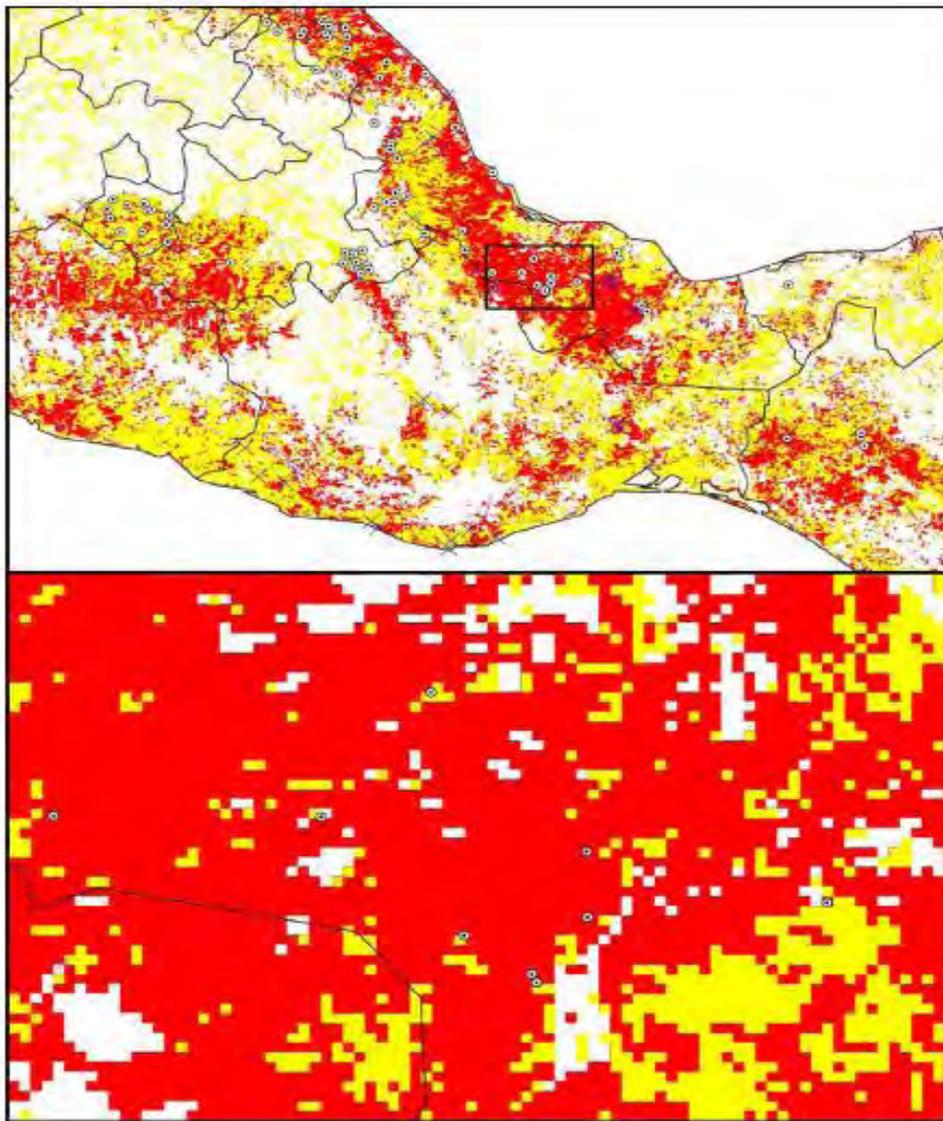


Figura 3 Comparación de los modelos de nicho ecológico en tiempo específico y tiempo promedio en el centro y el sur de México, con un modelo de agosto de 1995, en amarillo (basado sobre áreas predichas por la mayoría de los modelos en el promedio de las predicciones para el mes de agosto a partir de junio y julio de 1995), cubierto con el modelo promedio anual mostrado en la figura 1 (zonas en rojo predichas por todos los modelos). También se muestran la presencia de la especie del vector en agosto (X azul) y los casos de dengue (círculos punteados). El panel superior muestra el centro y sur de México; la parte inferior del panel muestra el detalle de una zona (ver recuadro en la parte superior del panel), el modelo de aparente fracaso, que visto con cuidado, puede ser visto como reflejo a fina escala de la coincidencia entre la presencia de enfermedad y predicciones tiempo-específicas.

Cuadro 1. Resultados de predicciones de la presencia de mosquitos y casos de dengue para cada mes en 1995 basado en promedios de los dos meses previos de modelos de predicciones de nicho ecológico

Tiempo	Distribución de mosquitos				Casos de dengue			
	N (Puntos probados)	% correcto	% de área actual predicha (50 km de amortiguador)	P	N (Puntos probados)	% correcto	% de {area actual predicha (50 km de amortiguador)	P
Año completo (modelo tiempo promedio)	181	95.0	78.5	*	1994	86.6	71.5	*
Junio	22	72.7	49.6	*	92	70.7	55.0	*
Julio	28	82.1	59.2	*	195	74.4	55.7	*
Agosto	40	75.0	44.7	*	714	61.5	38.9	*
Septiembre	25	80.0	44.6	*	599	78.0	36.7	*
Octubre	19	78.9	66.6	*	356	60.1	49.0	*
Noviembre	25	76.0	66.1	+	30	26.7	49.1	*
Diciembre	22	95.5	78.6	*	-	-	-	*

* Significancia estadística positiva comparada con un modelo al azar ($P < 0.05$, en muchos casos $<< 0.05$).

+ Significancia estadística marginal comparada con un modelo al azar ($0.05 < P \leq .10$).

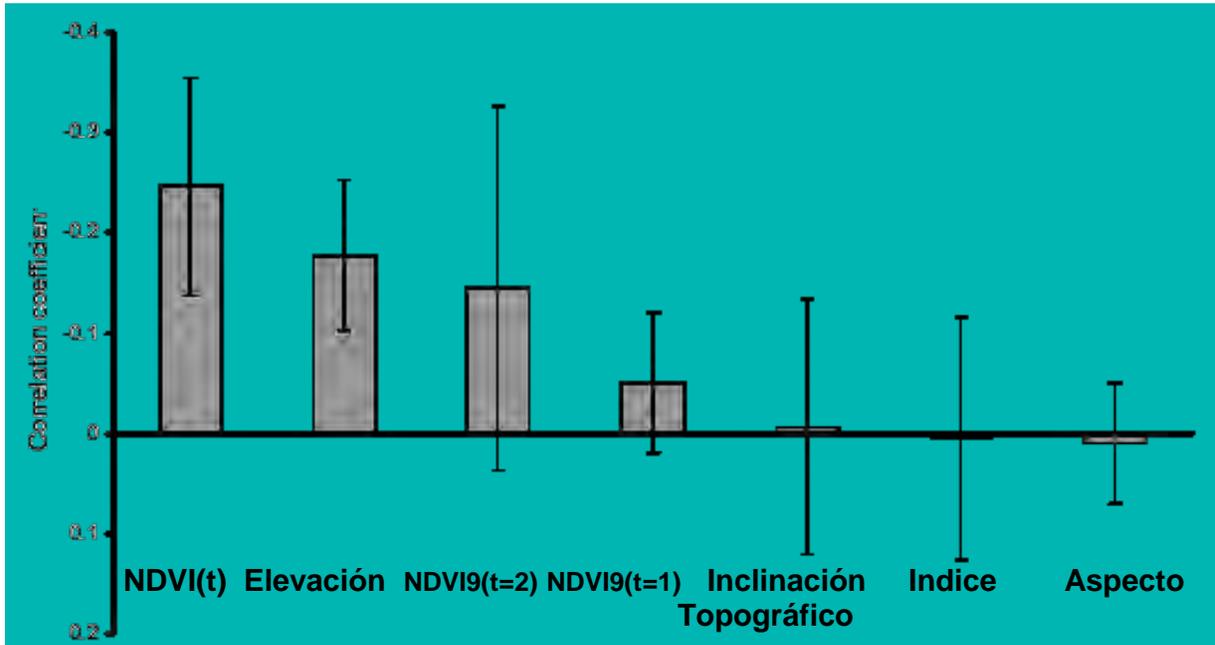


Figura 4. Análisis de las contribuciones relativas de cada variable ambiental en los modelos de nicho. Las correlaciones fuertemente negativas (el eje se muestra invertido) indican las variables más informativas para los modelos producidos; las barras de error indican la desviación estándar en coeficientes de correlación a través de los meses. NDVI (t) es el valor NDVI en el mes en cuestión; NDVI (t-1) y NDVI (t-2) son la diferencia entre el mes en cuestión y uno o dos meses anteriores, respectivamente.

III. Discusión.

En la introducción se expuso parte de las dificultades económicas y metodológicas sobre la vigilancia entomológica del dengue en México, sin embargo el problema es mucho mayor al hacerlo extensivo a todas las partes involucradas en un programa nacional de control de vectores, y en particular a un programa de dengue.

Al hacer un análisis FODA¹ [fortalezas-debilidades (internas), amenazas-oportunidades (externas)] de los logros y fracasos en el control de las poblaciones del *Aedes aegypti* del programa de vigilancia y control del dengue, desde sus inicios hasta 2006, se identificaron como *debilidades* aquellas de tipo social-humano: crecimiento poblacional y la apatía de la población (no se ha establecido el cambio del comportamiento del individuo en la participación comunitaria de la prevención y control del dengue); programa preventivo ineficiente; económico (el alto costo de materiales, equipo, sueldos y beneficios del trabajador); control del mosquito vector (basado casi en su totalidad en el uso de insecticidas); deterioro o falta de servicios básicos (alcantarillado y drenaje). Como *fortalezas* se distinguieron el diagnóstico clínico (utilización de un formato único; aplicación de definiciones operacionales de caso, establecimiento de un Comité de Vigilancia Epidemiológica), diagnóstico de laboratorio (estandarización de toma y envío de muestras; identificación de serotipo circulante), sistema de vigilancia epidemiológico (SINAVE [Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica]). Boletín de Epidemiología con número de casos por entidad federativa: incluye enfermedades transmisibles por vector; SUAVE (Sistema Automatizado de Vigilancia Epidemiológica) conformado por 17,000 unidades del sector salud; notificación semanal de 110 padecimientos sujetos de vigilancia epidemiológica; tipo de información: incidencia, edad, unidad e institución, y entomológico (aunque insuficiente) y potencialmente el apoyo comunitario (participación en campañas de descacharrización; aplicación de estrategias: "Patio limpio" y "Cuidado del agua almacenada". Mientras, las *oportunidades* y *amenazas* del entorno se reconocieron considerando cuatro subsistemas: el normativo, la estructura administrativa, la tecnología y el social-humano. Las dos primeras incluyen todas las iniciativas y programas propuestos por OPS/OMS no solo en el aspecto normativo internacional, sino de estructura administrativa y económica. Aunado a ello, el desarrollo relativamente reciente de nuevas tecnologías diagnósticas para hacer más eficiente la vigilancia entomológica. En lo correspondiente a las *amenazas*, se identificaron causas tan diversas como el fracaso del programa hemisférico de erradicación del *Ae. aegypti*, iniciado en los años cincuentas y coordinado por la

¹ el proceso de análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas es una de las herramientas esenciales que provee de los medios necesarios al proceso de planeación estratégica, proporcionando la información necesaria para la implantación de acciones y medidas correctivas y la generación de nuevos o más adecuados proyectos de mejora.

Organización Panamericana de la Salud OPS (Schliesman & Calhecross, 1974), el cual culminó a principio de los setentas, con la consecuente reinfestación del *Ae. aegypti*; la hiperendemicidad; la reintroducción del serotipo DEN-3 más virulento; la expansión del tráfico de llantas usadas; la imposibilidad de mantener una vigilancia permanente como se hacía en los programas verticales, y el aumento del número de casos de dengue hemorrágico. Aunado a esto, el efecto del cambio climático que se ha visto reflejado en la extensión de la temporada de huracanes así como en la intensidad de estos fenómenos, con consecuencias catastróficas.

Analizando cada componente del FODA encontramos áreas de oportunidad que deberán ser abordadas para un manejo integral del control de dengue:

Qué hemos logrado (Fortalezas). En el diagnóstico clínico, la utilización de un formato único; aplicación de definiciones operacionales de caso y la formación de un Comité de Vigilancia Epidemiológica. Esto ha permitido hacer un diagnóstico clínico presuntivo más real, unificar el concepto de caso y, a su vez, dar mayor capacitación a los médicos clínicos que atienden de primera mano al paciente, hacer la toma de muestras serológicas en tiempo y forma de tal manera que puedan aislarse los serotipos y que esta información sirva de base para la vigilancia epidemiológica. Además, recientemente se ha implementado un nuevo algoritmo para el diagnóstico que disminuye notablemente el tiempo del mismo haciéndolo más oportuno (Nuevo algoritmo de diagnóstico de dengue, Departamento de Virología Diagnóstica, InDRE, 2008).

Acciones (Debilidades). La participación comunitaria en la prevención y control del dengue se limita a las demandas oficiales y no se ha conseguido que forme parte de las actividades de las comunidades. Con la descentralización (administrativa y presupuestal) de los servicios de salud, los estados tienen la responsabilidad de los programas de prevención y control y no están suficientemente establecidos. Las estrategias de cambio de comportamiento individual y de las comunidades aún no se ven reflejadas en los programas. Con el crecimiento poblacional exponencial y su establecimiento irregular, el suministro de agua potable y manejo de residuos está limitado en áreas de alto riesgo; por lo mismo, la sustentabilidad y continuidad de los programas de control están constantemente comprometidos, además de competir con otras demandas de salud políticamente importantes. No se ha establecido una coordinación intersectorial real; la investigación operativa, aunque existe, ha sido insuficiente.

Obstáculos (Amenazas). La campaña de erradicación tuvo éxito en los diferentes países por contar con financiamiento interno y externo, además de personal, insecticidas y equipo; su principal objetivo fue reducir el hábitat del vector; se contaba con un insecticida residual eficiente; la organización de los programas era

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

centralizada, vertical, con organización militarizada, disciplina y supervisión estricta. El fracaso de la erradicación se debió a múltiples factores, como la falta de interés de algunos países de la región; los programas perdieron importancia política en la mayoría de los países; el alto costo de los materiales, equipo y sueldos del personal hizo que se descuidara el sistema de vigilancia y vino la reinfestación del vector. El problema creció y los recursos fueron insuficientes; apareció la resistencia a los programas verticales y al uso de insecticidas. En los años ochentas se realizaron estudios en algunas ciudades latinoamericanas y se demostró que el uso del ultra bajo volumen (ULV) estuvo limitado para reducir la densidad de hembras vectoras, además, el empleo de insecticidas ha desarrollado una mayor resistencia de la especie (Clark, 1995). La persistencia e incremento de llantas y contenedores plásticos aumenta la disponibilidad de hábitat favorable al mosquito. La ocurrencia de fenómenos naturales más violentos, particularmente los huracanes, con mayor frecuencia y abarcando varios países en América, complicaron el panorama epidemiológico de la región.

Qué hemos dejado de hacer; hacia donde vamos, desarrollos tecnológicos (Oportunidades). A partir de las resoluciones del consejo directivo de la OPS en 2001 CD43.R4 y la Resolución CD 44.R9 en el 2003, se planteó la aplicación en los países latinoamericanos de la Estrategia de Gestión Integrada (EGI-dengue), la cual promueve esfuerzos para un trabajo sistemático y continuo de comunicación social y participación comunitaria en los programas y para un aporte intersectorial en educación (formal), ambiente (agua y basura) y ONG (Ecoclubes), estableciendo un marco de referencia para la nueva generación de programas de prevención y control del dengue. De tal forma que el objetivo final sea fortalecer los programas nacionales, reducir los factores de transmisión y desarrollar un sistema de vigilancia integral, mediante la (EGI-Dengue) y el brazo operativo de la EGI: Grupo Técnico en Dengue (GT-Dengue). Ambos instrumentos pretenden construir coordinadamente una ruta de acción con base en cinco áreas estratégicas: comunicación social, entomología, epidemiología, laboratorio y atención al paciente, para fomentar el cambio de conducta, tanto individual como colectivo, en lo relacionado a las condicionantes de riesgo de dengue, dentro y fuera del sector salud y actuar de manera horizontal, intersectorial, interprogramático e intrasectorial en la PLANIFICACION y EJECUCION de planes nacionales (<http://www.paho.org>). No obstante los esfuerzos hemisféricos y de las agencias internacionales, poco se ha logrado implementar de forma generalizada en el Continente Americano, y México no es la excepción.

Actualmente, el programa nacional de control de vectores tiene como objetivos: 1) Reducir exposición al riesgo de transmisión del dengue; 2) Activar la participación comunitaria y social sustentable, para reducción de riesgos de transmisión del dengue; 3) Obtener mayor participación municipal y de otros sectores en las

acciones de prevención y control del dengue; 4) Evitar el incremento en la incidencia de dengue posterior a desastres naturales; 5) Fortalecer la participación de las instituciones del sector salud y de otros sectores que, en su ámbito, inciden para la prevención y control del dengue.

Y como estrategias a largo plazo (2007 a 2012):

1) Manejo integrado del dengue; 2) Consolidación de la Red Nacional de Laboratorios para el diagnóstico del dengue y fortalecimiento e innovación de la vigilancia epidemiológica; 3) Promoción de la participación social y de grupos organizados en la prevención y control del dengue en localidades prioritarias; 4) Reforzamiento de la comunicación social; 5) Regionalización operativa y definición de áreas con alto potencial de riesgo de impacto estatal, regional e internacional; 6) Gestión de la participación de ayuntamientos mediante acuerdos y programas de trabajo; 7) Atención a fenómenos naturales en áreas de riesgo; 8) Coordinación intra e intersectorial y respuesta estatal oportuna; 9) Sistematización de los mecanismos de control e indicadores para el seguimiento de proceso e impacto de las acciones de vigilancia, promoción y control por niveles de responsabilidad.; 10) Formalizar la Red Clínica Nacional de Atención Médica (CENAVECE, 2008).

Se reconoce que el programa de dengue en México no está diseñado para prevenir brotes de la enfermedad, sino que está trabajando para fomentar acciones anticipatorias. Focalizar recursos y acciones estatales y federales en 82 localidades de 14 estados prioritarios (regionalización de recursos), pretendiendo que el eje del programa sea la promoción a la salud, para promover las estrategias de: 1) patio limpio y cuidado del agua almacenada; 2) aceptación de las campañas antilarvarias y nebulización desde las calles (CENAVECE, 2008). Como puede apreciarse, le siguen apostando al uso de insecticidas, con lo cual se demuestra el desconocimiento de otras alternativas.

Por otra parte, el uso de sensores remotos ha jugado un importante papel en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y sus superficies, planificación territorial y estudios urbanos. La tendencia actual es hacia el incremento de su utilización dado el avance tecnológico, el desarrollo de la computación y bajos costos de obtención de imágenes. Hoy en día, podemos encontrar diversas experiencias a nivel mundial en el uso de esta tecnología, tanto en el ámbito privado como público, y no cabe duda que será una herramienta para traspasar el umbral del desarrollo que nuestro país requiere. Algunas de las aplicaciones realizadas y que son más conocidas hacen referencia a:

- Planificación territorial
- Planificación y gestión urbana
- Catastro de recursos renovables y no renovables
- Gestión de instalaciones

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

- Geodemografía y mercadeo
- Planificación de obras
- Cartografía digital
- Predicción y modelado de fenómenos
- Estudios de investigación

Esto ha permitido la búsqueda de nuevas técnicas que se muestran prometedoras y fructíferas en la obtención de un mejor conocimiento, administración y predicción de ciertos fenómenos naturales que pueden ocurrir con o sin intervención antrópica.

A pesar de ello, la comunidad de salud pública ha sido lenta para adoptar la tecnología de los sensores remotos para la investigación, la vigilancia o actividades de control. Algunos obstáculos incluyen la falta de conocimiento, la cual ha tenido que ser superada a través de la divulgación, así como la carencia de espacio para la formación adecuada en materia de sensores remotos. Desde 1972, cuando el primer recurso satelital de la Tierra se puso en marcha, la tecnología de los sensores remotos fue adoptada y utilizada operativamente por una serie de aplicaciones para las diversas comunidades, incluida la agricultura, la exploración de minerales, la silvicultura, la oceanografía y la climatología. La comunidad de salud pública, como ya se mencionó, ha tardado en adoptar esta tecnología a pesar de que se demostró, desde 1970, el potencial de los datos obtenidos por sensores remotos para el estudio de los hábitat de vectores de enfermedades, tarea que desarrolló la Oficina de Aplicaciones de Salud (HAO, por sus siglas en inglés), establecida por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y el Centro Espacial Johnson en los Estados Unidos de América.

Se han mencionado dos razones para el fracaso en la adopción del uso de sensores remotos por la comunidad de usuarios en la década **de los 70's**. En primer lugar, los altos funcionarios dentro de las agencias de salud no estaban familiarizados con los sensores remotos y se mantuvieron escépticos de su potencial (Bos, 1990; Barnes, 1991). En segundo lugar, y quizás más fundamentalmente, la educación y la finalización de la participación de la HAO, NASA en la aplicación de los sensores remotos en cuestiones relacionadas con la salud, que terminó hace más de una década.

En general, hay una serie de obstáculos que han impedido la transferencia de la tecnología de sensores remotos a cualquier comunidad de usuarios. Estos incluyen un bajo conocimiento general, los costos de apoyo técnico de datos y sistemas, y la falta de experiencia. Tal vez el mayor obstáculo sea el hecho de que las aplicaciones en salud son únicas, a diferencia de la agricultura, la exploración de

minerales, la silvicultura y otros campos; la "ecología de la salud" es sumamente compleja ya que incluye componentes de sistemas bióticos y abióticos en una diversidad de escalas. Es más complicado por la incertidumbre del factor humano. Por ejemplo, un sensor remoto del medio ambiente basado en el modelo de riesgo de dengue podría requerir información acerca del hábitat del vector (por ejemplo, la vegetación, sitios de descanso y oviposición), la supervivencia del vector (temperatura, precipitaciones, humedad) y los sitios de reproducción (por ejemplo, agua, tipo y condición de la vegetación), así como información acerca de las actividades humanas (por ejemplo, patrones de asentamiento, la migración, actividades del uso de la tierra, la proximidad de los hábitat del vector). Para aumentar la complejidad del problema, estos factores pueden ser muy dinámicos, tanto temporal como espacialmente.

Un problema adicional es el ajuste del tiempo y el espacio utilizados, la disponibilidad ambiental, epidemiológica, entomológica y el conjunto de datos de sensores remotos necesarios para estudiar la enfermedad específica en cuestión. Una complicación más es que la propia comunidad de salud pública es extremadamente diversa en la medida en que está compuesta de una serie de disciplinas. Continuando con el ejemplo anterior, el desarrollo de un modelo de riesgo de transmisión de dengue basado en sensores remotos podría requerir el aporte de cuatro grandes áreas: humana, ambiental, epidemiológica y entomológica. Cada área incluye especialistas en diferentes campos, incluyendo la epidemiología, la ecología del paisaje, la ecología del vector y la entomología médica, por nombrar unas cuantas. Si uno desea incluir parámetros relacionados con la seroprevalencia de los denguevirus, entonces también sería requerido el aporte de la virología. Evidentemente, las escalas en que operan estos campos son muy diversas y difíciles de integrar en un único estudio.

El desarrollo relativamente reciente de los sistemas de sensores remotos y la exploración de la utilidad de los datos obtenidos por ellos para las aplicaciones en salud, inicialmente dio lugar a una "reconversión" de los modelos epidemiológicos convencionales con datos obtenidos por sensores remotos, que fue la sustitución de los parámetros de un modelo clásico con las aproximaciones de esos parámetros pero de sensores remotos. Existen problemas al utilizar este enfoque, como se dijo anteriormente, los datos (por ejemplo, los datos de vectores, datos de caso, características del hábitat) rara vez son recogidos al mismo tiempo y pocas veces en escalas espaciales apropiadas para su uso con los datos de sensores remotos. Del mismo modo, los datos de sensores remotos rara vez se adquieren en escalas espaciales que coincidan con los datos de campo.

Desde la publicación del informe de Fuller, en 1972, se han producido documentos similares (Jovanović, 1987a; Hugh-Jones, 1989; Washino and Wood, 1994; Hay *et*

al., 1996; Thompson *et al.*, 1996; Connor *et al.*, 1997) sobre la revisión de la posible aplicación de los sensores remotos a los problemas de salud pública. Desde entonces, también se ha visto un aumento constante en el número y la sofisticación de los sistemas de sensores remotos (Hay, 2002; Rogers 2002; Randolph, 2002; Brooker and Michel, 2002). Así como un gradual pero constante aumento en los proyectos de investigación que han explorado la utilidad de los datos obtenidos por sensores remotos para hacer frente a una variedad de cuestiones relacionadas con la salud. Lamentablemente, poco de este trabajo se ha centrado en las cuestiones de transferencia de tecnología y sus usos operacionales. Un elemento clave para lograr el éxito de la aceptación de tecnologías de sensores remotos y SIG en la comunidad de salud pública está centrado en la capacitación y divulgación. Otros obstáculos, tales como el costo de la recopilación de datos e inadecuada resolución de espacio, espectral y temporal, también han sido identificadas como obstáculos para la transferencia de tecnología de los sensores remotos a la comunidad de salud. La tecnología de los sensores remotos ha desempeñado un papel importante en las ciencias biológicas y de la Tierra, permitiendo a los investigadores estudiar los componentes bióticos y abióticos de una forma que no se podía hacer con anterioridad.

Algunas de las consideraciones que deben abordarse para que se produzca mayormente la transferencia de conocimientos serían: incluir la selección de la persona adecuada para la formación en el conocimiento e interpretación de los datos de sensores remotos y SIG. Otros obstáculos, tales como el costo de los datos y la falta de resolución espacial, espectral y temporal, también han limitado el uso de los sensores remotos dentro de la comunidad de salud. Sin embargo creo que actualmente se ha superado en algo este problema con la formación de equipos multidisciplinarios que permite la optimización de recursos (humanos, infraestructura, equipo e información) con un objetivo común, como en este caso de la prevención, vigilancia y el control del dengue.

En la actualidad existen una amplia variedad de algoritmos de modelado de nichos ecológicos que se dividen en dos grandes grupos: los determinísticos y los heurísticos. Los primeros utilizan técnicas estadísticas (tanto paramétricas como no paramétricas) para buscar las relaciones entre puntos de ocurrencia y los valores de las variables ambientales. Los métodos heurísticos se basan en sistemas de entrenamiento de las computadoras para buscar la mejor solución a un problema entre un universo de soluciones posibles. Los nichos ecológicos se generan en el espacio ecológico, estas condiciones ambientales que caracterizan el nicho de una especie se pueden proyectar a escenarios ambientales modificados, o incluso a otras regiones geográficas. Esto permite hacer análisis de la distribución geográfica de una especie en circunstancias distintas a las condiciones bajo las que fue creado el modelo (futuro, pasado u otra región, p. *ej.* *Aedes albopictus*, a partir de

los datos de distribución en Así y usando GARP se lo gro predecir la distribución de esta especie en Estados Unidos de América).

IV. Conclusiones.

Si bien se demuestra que el modelado de nichos ecológicos puede ser muy valioso por las aplicaciones prácticas que tiene, deben afinarse algunos puntos metodológicos, como la obtención de más y mejores datos de la presencia del vector, por separado y en asociación con casos de dengue; y éstos a su vez deben tener datos más precisos del tiempo exacto de la toma de muestra para mejorar los pronósticos anticipados de la coincidencia en espacio y tiempo con el vector, para así interrumpir el ciclo de transmisión del dengue. También deben introducirse otras variables como pronósticos de clima más precisos, sobre todo si se toma en cuenta que la temporada de huracanes actualmente inicia en mayo y termina en noviembre y sus efectos (brotes o epidemias) se prolongan hasta inicios del siguiente año, siendo estos fenómenos meteorológicos cada vez más agresivos y prolongados, causando mayores daños en las comunidades con población más desprotegida.

El paso del uso de modelado tiempo promedio al de tiempo específico, muestra las bondades de un trabajo a más alta resolución temporal, con lo cual se obtienen mejores resultados, aunque todavía no son los deseados. El modelado temporalmente específico puede mejorarse al usar los datos de sensores remotos a una resolución espectral, espacial y temporal más detallada. Si comparamos, por ejemplo, la información proporcionada del satélite NDVI/AVHRR con el MODIS, existe la ventaja de que la información radiométrica obtenida se mejora, porque la resolución espectral pasa del uso de dos bandas (visible e infrarrojo cercano) al uso potencial de 1 a 36 bandas, respectivamente. La resolución espacial del primero es de 1.1 x 1.1 km, mientras que en el segundo caso, aumenta a 250, 500, 1000 m. En cuanto a la periodicidad y siguiendo el mismo orden, la cobertura de un país en imágenes con valores máximos de NDVI son de 30 días y disminuye a 2 días. MODIS es uno de los sistemas de sensores remotos actuales que tiene mejor resolución espectral, espacial y temporal entre otros (Wood, *et. al.*, 2002).

Superando todos estos obstáculos y afinando las metodologías, podríamos contar con una herramienta útil para en verdad establecer un sistema de vigilancia entomológica y epidemiológica que permita desarrollar un programa de prevención, vigilancia y control efectivo del dengue. Asimismo, que brinde una respuesta eficiente y oportuna ante la posible presencia de un brote, limitar su expansión a epidemia y que se puedan implementar medidas preventivas en caso de desastre, para salvaguardar la salud de la población mexicana de todo el país, y no sólo de aquellas zonas que se han identificado con transmisión activa (21 estados), en especial las que actualmente adquirieron la categoría de estados prioritarios (14) por presentar, de forma continua, casos de dengue clásico y dengue hemorrágico.

V. Referencias citadas

- Barnes, C.M. 1991. An historical perspective on the applications of remote sensing to public health. *Preventive Veterinary Medicine*. 11:163-166.
- Barnes, C. and W. Cibula. 1979. Some implications of remote sensing technology in insect control programs including mosquitoes. *Mosq. News*. 39:271-282.
- Beck, L.R., M.H. Rodríguez, S.W. Dister, A.D. Rodríguez, E. Rejmankova, A. Ulloa, R.A. Meza, D.R. Roberts, J.F. Paris, M.A. Spanner, R.K. Washino, C. Hacker, and L.J. Legters. 1994. Remote sensing as a landscape epidemiological tool to identify villages at high risk for malaria transmission. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 51(3):271-280.
- Beck, L.R., M.H. Rodríguez, S.W. Dister, A.D. Rodríguez, R.K. Washino, D.R. Roberts, and M.A. Spanner. 1997. Assessment of a remote sensing based model for predicting malaria transmission risk in villages of Chiapas, Mexico. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 56(1):99-106.
- Beck L. R., B.M. Lobitz and B.L. Wood. 2000. Remote Sensing and Human Health: New Sensors and New Opportunities. *Emerging Infectious Diseases*. 6(3): 217-226.
- Bos, R. 1990. Applications of remote- sensing. *Parasitology Today*. 6: 39.
- Bottinelli, O.R., G. Marder, S.N. Ulon, H.R. Sario y L. Ramírez. 2001. Proyecto Vigilancia de los factores de riesgo-dengue en 8 municipios de Corrientes mediante el uso de sistemas de Información Geográfica (SIG). Cátedra de Patología Comparada y Salud Pública. Fac de Ciencias Veterinarias. Corrientes, Argentina.
- Brooker, S. and E. Michel. 2002. The Potential of Geographical Information Systems and Remote Sensing in the Epidemiology and Control of Human Helminth infections. Pp 246-288. In: Hay S.I., S.E. Randolph, D.J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. *Advances in Parasitology*. 47. Academic Press.
- Casas-Martínez M., & J. L. Torres-Estrada. 2003. First Evidence of *Aedes albopictus* (Skuse) in Southern Chiapas, Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 9(5): 606-607.
- CENAVECE, Secretaría de Salud, Programa de Vectores/ Programa Dengue 2008. <http://www.cenave.gob.mx/dengue/default.asp>
- Center for Disease Control and Prevention. Control del dengue. Vector Topics.1980 (2): 1-34.

- Center for Disease Control and Prevention *Aedes albopictus* Introduction-Texas. MMWR, 1986a (35): 141-142.
- Center for Disease Control and Prevention *Aedes albopictus* Infestation-United States, Brazil. MMWR, 1986b (35): 493-495.
- Clark, G. 1995. Situación epidemiológica del dengue en América. Desafíos para su vigilancia y control. *Salud Pública de México Suppl.* 37: 5-11.
- Connor, S.J., S.P. Flasse, A.H. Perryman, and M.C. Thomson.1997. The Contribution of Satellite Derived Information to Malaria Stratification, Monitoring and Early Warning. Geneva: World Health Organization, WHO/MAL/ 97.1079.
- Czeresnia, D. & A. M. Ribeiro. 2000. O conceito de epaço emepidemiologia: uma interpretação histórica e epistemológica. *Cad. Saúde Pública.* 16(3):595-617.
- Daniel, M. and J. Kolar. 1990. Using satellite data to forecast occurrence of the common tick *Ixodes ricinus* (L.). *J. Hygiene Epidem Microbiol. Immun.* 34:243-252.
- Dister, S.W., D. Fisher, S. Bros, D.H. Frank, and B.L. Wood.1997. Landscape characterization of peridomestic risk for Lyme disease using satellite imagery. *American Journal of Triopical Medicine and Hygiene.*57: 687-692.
- Flisser A, Velasco-Villa A, Martínez-Campos C, González-Domínguez F, Briceño-García B, García-Suárez R, et. al. Archives of Medical Reasearch 2002; 33: 343-350.
- Fuller, C. E. 1972. Public Health Implications of Remote Sensing. Final Report, NASA contract NAS-9-11522. Houston, Tx: University of Texas, School Public Health. (*cit pos.* Wood et. al., 2002)
- Glass, G.E., J.M. Morgan III, D.T. Johnson, P.M. Noy, E. Israel, and B.S. Schwartz. 1992. Infectious disease epidemiology and GIS: a case study of Lyme disease. *Geo Info Systems.* 2:65-69.
- Hay, S.I., C.J. Tucker, D.J. Rogers and M.J. Packer.1996. Remotely sensed surrogates of meteorological data for the study of the distribution and abundance of arthropod vectors disease. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology.* 90:1-19.
- Hay, S.I. 2002. An Overview of Remote Sensing and Geodesy for Epidemiology and Public Health Application. pp. 2-35 *In:* Hay S.I., S.E. Randolph, D.J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. *Advances in Parasitology.* 47. Academic Press.

Dinamica temporal de mosquitos de dengue

- Hayes, R.O., E.L. Maxwell, C.J. Mitchell and T.L. Woodzick. 1985. Detection, identification and classification of mosquito larval habitats using remote sensing scanners in earth-orbit satellites. *Bull. World Health Org.* 63: 361-374.
- Hugh-Jones, M. 1989. Applications of remote sensing to the identification of the habitats of parasite and disease vectors. *Parasitology Today.* 5:244-251.
- Hugh-Jones, M.E., N. Barre, G. Nelson, K. Wehnes, J. Warner, J. Garvin, and G. Garris. 1992. Landsat-TM identification of *Amblyomma variegatum* (Acari: Ixodidae) habitats in Guadeloupe. *Remot. Sens. Environ.* 40:43-55.
- Ibañez-Bernal, S and C. Martínez-Campos. 1994. *Aedes albopictus* in Mexico. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.* 10 (2):231-232.
- InDRE, 2008. Nuevo algoritmo de diagnóstico de dengue, Departamento de Virología Diagnóstica.
- Jovanović, P. 1987b. Satellite remote sensing imagery in public health. *Acta Astronautic.* 15: 951-953.
- Linthicum, K.J., C.L. Bailey, F.G. Davies, and C. J. Tucker. 1987. Detection of Rift Valley fever viral activity in Kenya by satellite remote sensing imagery. *Science* 235: 1656-1659.
- Linthicum K.J., A. Anyamba, C.J. Tucker, P.W. Kelly, M.F. Myers and C.J. Peters. 1999. Climate and satellite indicators to forecast Rift Valley fever epidemics in Kenya. *Science* 285:3397-400.
- Martínez-Campos C. 1998. Entomological surveillance of dengue and dengue hemorrhagic fever in Mexico. 98 Tropical Medicine Second European Congreso on Tropical Medicine and 4th Residential Meeting. Liverpool, United Kingdom.
- Moore C.G., D.B. Francly, D.A. Eliasson and T.P. Monath. 1988. *Aedes albopictus* in the United States Rapid spread of a potential disease vector. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.* 4 (3): 356-361.
- OPS, 1999. Boletín de OPS. 1/Jun/ <http://www.paho.org>).
- OPS, 2001. Resolución CD43.R4 (<http://www.paho.org>)
- OPS, 2003. Resolución CD 44.R9 (<http://www.paho.org>)
- Pope, K.O., E.J. Sheffner, K.J. Linthicum, C.L. Bailey, T.M. Logan, E.S. Kasischke, K. Birney, A.R. Njogu, and C.R. Roberts. 1992. Identification of central Kenyan Rift

Valley fever virus vector habitats with Landsat TM and evaluation of their flooding status with airborne imaging radar. *Remote Sens. Environ.* 40:185-196.

Pavlovsky, E. N., 1966 *Natural Nidality of Transmissible Diseases*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois

Programa Nacional de Salud 2007-2012. <http://www.Presidenciadelarepublica.com.mx> y <http://www.cenave.gob.mx/>

Randolph, S. E. 2002. Tick and Tick-borne Disease Systems in Space and from Space. Pp. 217-243. *In: Hay S. I., S. E. Randolph, D. J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. Advances in Parasitology.* 47. Academic Press.

Rogers, D.J., and S.E. Randolph. 1991. Mortality rates and population density of tsetse flies correlated with satellite imagery. *Nature* 351:739-741.

Rogers, D. J. 2002. Satellites, Space, Time and the African Trypanosomiases. Pp. 130-171. *In: Hay S. I., S. E. Randolph, D. J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. Advances in Parasitology.* 47. Academic Press.

Schliesman D.J. and L.B. Calhecross. 1974. A review of the status of yellow fever and *Aedes aegypti* eradication program in the Americas. *Mosq. News.*34: 1-9.

Sinnecker, H. 1971. *General epidemiology*. London: John Wiley & Sons.

Stockwell, D.R.B., Noble, I.R., 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative of *Anopheles quadrimaculatus* Say s.l. and implications for method of analysis. *Math. Comp. Simul.* 33: 385-390.

Thompson, M.C., S.J. Connor, P.J.M. Milligan, and S.P. Flasse. 1996. The ecology of malaria as seen from Earth-observation satellites. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology.* 90:243-264.

Wagner, V.E., R. Hill-Rowley, S.A. Narlock, and H.D. Newson. 1979. Remote sensing: A rapid and accurate method of data acquisition for a newly formed mosquito control district. *Mosq. News.* 39:282-287.

Washino, R. K. and B.L. Wood. 1994. Application of remote sensing to vector arthropod surveillance and control. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene.* 50:134-144.

Dinamica temporal de mosquitos de dengue

- Welch, J. B., J.K. Olson, W.G. Hart, S.G. Ingle, and M.R. Davis. 1989. Use of aerial color-infrared photography as a survey technique for *Psorophora columbiae* oviposition habitats in Texas ricelands. *J. Am. Mosq. Control. Assoc.* 5:147-160.
- Wood, B.L., L.R. Beck, R.K. Washino, S. Palchick, and P. Sebesta. 1991. Spectral and spatial characterization of rice field mosquito habitat. *Int. J. Remote Sens.* 12:621-626.
- Wood, B.L., L.R. Beck, R.K. Washino, K. Hibbard, and J.S. Salute. 1992a. Estimating high mosquito-producing rice fields using spectral and spatial data. *Int. J. Remote Sens.* 13:2813-2826.
- Wood, B.L., R.K. Washino, L.R. Beck, K. Hibbard, M. Pitcairn, D. Roberts, E. Rejmankova, J. Paris, C. Hacker, J.S. Salute, P. Sebesta, and L. Legters. 1992b. Distinguishing high and low anopheline-producing rice fields using remote sensing and GIS technologies. *Prev. Vet. Med.* 11:277-288.
- Wood, B.L., L.R. Beck, B.M. Lobitz and M.R. Bobo. 2002. Education, Outreach and the Future of Remote Sensing in Human Health. *In: Hay S. I., S. E. Randolph, D. J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. Advances in Parasitology.* 47. Academic Press.

APÉNDICE I. GLOSARIO.

AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)⁷: Escáner multiespectral en un satélite de órbita polar NOAA que tiene cinco bandas espectrales de datos (0.55 a 12.50m), con una resolución por celda equivalente a 1.1 por 1.1 km en terreno.

Algoritmo genético¹⁷: Se llama así porque se inspira en la evolución biológica y su base genético-molecular. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una Selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados que sobreviven y cuáles los menos aptos que son descartados. También es denominado algoritmo evolutivo, e incluye las estrategias de evolución, la programación evolutiva y la programación genética. Un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Bajo una condición muy débil (que el algoritmo mantenga elitismo, es decir, guarde siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio) se puede demostrar que el algoritmo converge en probabilidad al óptimo. En otras palabras, al aumentar el número de iteraciones, la probabilidad de tener el óptimo en la población tiende a 1.

Antropogénico⁴: De origen humano, antrópico

Biocenosis²: Comunidad biológica pluriespecífica, es decir, forma una asociación de diversas especies. En este sentido, la fitocenosis es la biocenosis vegetal, mientras que la zoocenosis agrupa al mundo animal y la edafocenosis a los suelos. Términos relacionados: ecosistema.

Biotopo²: Es el medio ambiente, el lugar donde se desenvuelve una población o una biocenosis. Términos relacionados: ecosistema.

Cartografía⁴: Técnica geográfica que estudia la secuencia de etapas y procesos ejecutados para la visualización de un espacio geográfico mediante la producción de mapas, cartas, planos o croquis

Cobertura⁴: Área horizontal sobre la Tierra ocupada por algún tipo de hábitat natural, seminatural, cultural, industrial, terrestre, acuático o indefinido (p. ej. nubes y sombra). También: ámbito geográfico, espacio, superficie en la que pueden recibirse las señales cuyo medio físico es el espectro radioeléctrico. // Alcance de una emisión radioeléctrica.

Cobertura aérea⁴: Cobertura relativa (expresada en porcentaje) de los elementos fisonómicos de la vegetación (árboles, arbustos e hierbas) en un polígono definido durante el proceso de fotointerpretación

Convergencia⁵: Capacidad de diferentes plataformas de red de transportar tipos de servicios similares o aproximación de dispositivos de consumo tales como el teléfono, televisión y ordenador personal. La convergencia se manifiesta en diversos niveles: el de las redes de telecomunicaciones o canales de distribución, el de terminales (ordenador, televisor, Internet y videojuegos), el de contenidos (sonido, video y datos), el de servicios y el de las empresas.

Coordenadas geográficas⁴: Arcos o ángulos que fijan con precisión la posición que un punto ocupa sobre la superficie de la Tierra, en valores de latitud y longitud.

Delección¹⁷: En genética, delección es un tipo especial de mutación que consiste en la pérdida de un fragmento de ADN de un cromosoma. La delección de un gen o de parte de un gen puede ocasionar una enfermedad o una anomalía. La delección de material genético puede afectar desde un solo nucleótido (delección puntual) a grandes regiones visibles citogenéticamente.

Dengue clásico¹⁸: (DF por sus siglas en inglés) se caracteriza por el comienzo agudo de fiebre alta, dolor de cabeza frontal, dolor retro-orbitario, mialgias, artralgias, náusea, vómitos, y a menudo erupción maculopapular. Además, muchos pacientes pueden notar alteraciones en el gusto. Los síntomas tienden a ser más leves en los niños que en los adultos, y la enfermedad puede confundirse clínicamente con la influenza, el sarampión o la rubéola (sarampión alemán). Las manifestaciones de la enfermedad pueden variar en intensidad, desde pasar desapercibidas hasta los síntomas descritos anteriormente. La fase aguda, que dura hasta una semana, es seguida por un período de convalecencia de 1 a 2 semanas, caracterizado por debilidad, malestar y anorexia. El tratamiento hace énfasis en el alivio de los síntomas.

Dengue Hemorrágico¹⁸: (DHF por sus siglas en inglés) /Síndrome de Choque por Dengue (DSC por sus siglas en inglés)

Durante los primeros días de la enfermedad, el dengue hemorrágico (DH), una forma severa y a veces fatal del dengue, puede parecerse al dengue clásico o a otros síndromes virales. Los pacientes con DH pueden tener fiebre que dura de 2 a 7 días y una variedad de síntomas no específicos. Desarrollan manifestaciones hemorrágicas como hemorragias en la piel (petequias o cardenales), pero puede incluir epístaxis, sangrado de encías, hematemesis y melena. Cuando comienza a bajar la fiebre, el paciente puede mostrar intranquilidad o letargo, y señas de fallo

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

circulatorio. Los pacientes de DH desarrollan trombocitopenia y también hemoconcentración, hipoalbuminemia o derrames pleurales, estos últimos como resultado de la extravasación del plasma. La condición de estos pacientes puede evolucionar rápidamente en síndrome de choque por dengue (SCD), el cual, si no se corrige inmediatamente, puede llevar a un choque profundo y muerte. Los signos de alerta precoz del SCD incluyen dolor abdominal severo, vómito prolongado, cambio drástico en la temperatura (desde fiebre hasta hipotermia), o cambio en el estado de conciencia (intranquilidad o letargo). Los signos tempranos del SCD son intranquilidad, piel fría y húmeda, pulso débil y rápido, reducción en la tensión diferencial o hipotensión. La tasa de letalidad en pacientes con SCD puede ser tan alta como 44%. El DH/SCD puede ocurrir en niños o en adultos.

Distribución²: Es el conjunto de localizaciones concretas de un hecho geográfico en un área determinada. La población española, por ejemplo, se distribuye de forma heterogénea en la Península Ibérica: mayor concentración en el litoral y en el entorno de Madrid.

Elevación (=Altitud)¹⁷: Altura de un sitio relativo al nivel medio del mar

Espacio geográfico¹²: Es una porción de la superficie terrestre sobre la que existen elementos como los suelos o las áreas urbanas.

Georreferenciación⁴: Es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datos determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica. La georreferenciación, en primer lugar, posee una definición tecno-científica aplicada a la existencia de las cosas en un espacio físico, mediante el establecimiento de relaciones entre las imágenes de ráster o vector sobre una proyección geográfica o sistema de coordenadas. Por ello la georreferenciación se convierte en eje central para los modelados de datos realizados por los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Holometábolo¹¹: Insecto que tiene un desarrollo postembrionario con transformación completa, pasando por las etapas de huevo, larva, pupa y adulto, en las cuales las características morfológicas y de hábitat de los juveniles son completamente diferentes al adulto. Presentan el desarrollo de las alas interno.

Inclinación: Inclinación orbital¹⁷ : Es el ángulo (generalmente medido en grados) que el plano de la órbita (plano orbital) de un astro forma con un plano de referencia (para los planetas, eso es la eclíptica). La inclinación orbital es uno de los parámetros (dentro de seis) empleados para determinar una órbita en general.

Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)⁷: La mayoría de los índices de vegetación espectral (SVIs) explotan el hecho de que la clorofila y los pigmentos carotenoides en los tejidos de las plantas absorben la luz en las longitudes de onda visible de color rojo (que corresponde a AVHRR canal 1), mientras que el tejido mesófilo refleja la luz en las longitudes de onda cercanas al infrarrojo (lo que corresponde a AVHRR canal 2). Por lo tanto, una planta sana y activamente fotosintetizadora, se verá oscura en la parte visible y más brillante en la región cercana al infrarrojo, que una planta enferma o senil. El NDVI, en común con los índices rojo al infrarrojo cercano, es una medida específica de clorofila y la abundancia de absorción de luz, pero se ha utilizado ampliamente para cuantificar la biomasa de vegetación herbácea, la productividad de la vegetación primaria, la cobertura de la vegetación y la fenología en una serie de ecosistemas.

Latitud¹: Distancia angular desde cualquier punto de la Tierra al Ecuador, medido en grados, minutos y segundos. Siempre será Norte o Sur y puede tener como máximo 90°.

Longitud¹: Distancia angular de cualquier punto de la Tierra al meridiano de Greenwich, medido en grados, minutos y segundos. Puede ser Este u Oeste y puede tener como máximo 180°.

Mapa²: Es un documento cartográfico mediante el que se consigue una representación a escala de la realidad. La escala de los mapas suele ser superior al 1:5.000. Generalmente los mapas apuestan por una escala grande para representar vastas extensiones de territorio: un país, una región, el mapamundi

Modelo²: Representación estructurada de la realidad, en Geografía la realidad territorial, para facilitar su comprensión y análisis.

Mutación puntual¹⁴: Un cambio en un segmento muy pequeño de ADN; se considera que en general involucra a un solo nucleótido o a un par de nucleótidos

Nicho ecológico^{6,8}: Se define como las condiciones ambientales bajo las cuales una especie puede mantener poblaciones indefinidamente sin necesidad de inmigración.

Orientación de la Pendiente³: Dirección que presenta una superficie. Astronómicamente, es la distancia angular, vista desde La Tierra, entre dos puntos planetarios medida sobre la Eclíptica, expresada en grados, minutos y segundos.

Dinámica temporal de mosquitos de dengue

Paisaje¹²: Es una parte en un lugar específico del espacio geográfico; se conforma con elementos naturales (pendientes, cubierta vegetal), humanos (ciudades, caminos) y su interrelación. Cada uno de estos elementos del paisaje y su interrelación forman una capa de información. El conjunto de capas de información constituyen el paisaje. Según la intervención del hombre se distinguen dos tipos de paisajes: naturales y culturales.

Paisaje natural²: Espacio o territorio que apenas ha experimentado la intervención antrópica, en el que los seres humanos apenas han introducido transformaciones. Son una excepción en la actualidad, ya que hasta en los rincones más recónditos podemos encontrar huellas de la presencia humana.

Período de incubación intrínseco⁹: Período de incubación de un patógeno en el hospedero vertebrado.

Período de incubación extrínseco⁹: El período de multiplicación o de desarrollo en el vector hasta que el patógeno se hace infeccioso.

"Query"¹⁷: cadena de consulta, este término generalmente se utiliza para hacer referencias a una interacción con una base de datos. Es la parte de una URL que contiene los datos que deben pasar a aplicaciones en la red como los programas CGI.

Resolución¹⁶: La cantidad de detalle encontrada en un píxel de la imagen. Por ejemplo una imagen con un metro de resolución significa que cada píxel de la imagen representa un metro cuadrado sobre el terreno.

Sensor radiométrico⁰: Un instrumento que mide cuantitativamente la radiación electromagnética. Los satélites meteorológicos llevan radiómetros para medir la radiación procedente de la nieve, el hielo, nubes, cuerpos de agua de la superficie terrestre y el sol.

Sensores remotos¹: Es un grupo de instrumentos capaces de obtener información sobre las características físicas de un cuerpo sin estar en contacto directo con él, o que detecta a distancia alguna propiedad de un objeto, midiendo algún tipo de radiación o emanación proveniente de él.

Sistema de Información Geográfica (SIG)^{12, 13}: Se define como una colección organizada de equipo computacional, paquetería, datos geográficos y personal. Diseñado para capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y desplegar eficientemente todas las formas de datos geográficamente referenciados, para la solución de problemas complejos de planificación, administración y gestión¹³.

Conjunto de programas y/o rutinas automatizadas, equipos de computo, periféricos e información relacionada con el espacio, con la capacidad para almacenar, desplegar, manipular, analizar y consultar información referente al espacio en un tiempo determinado, que ofrece al usuario los elementos necesarios para la planeación y la toma de decisiones en torno a problemas relacionados con el espacio ¹²(Navarro y Legorreta, 1998).

Transmisión biológica¹¹: Se considera así cuando el parásito se multiplica o cambia a otro estado de desarrollo pasando parte de su vida en el vector que en este caso funciona como hospedero necesario y después lo transmite al hospedero definitivo.

Transmisión propagativa¹¹: Los parásitos se multiplican dentro del vector, sin cambiar de fase de desarrollo para después ser transmitido al hospedero definitivo.

Vertiente¹: Declive, pendiente, parte inclinada de un relieve.

Referencias

0. ALONSO, Paco. Universidad de Murcia. Conceptos de Percepción Remota Fotointerpretación y Teledetección. (01-12-2003)
<http://www.um.es/%7Egeograf/sig/teledet/>
1. DICCIONARIO DE VOCABLOS GEOGRÁFICOS Y CARTOGRÁFICOS. Instituto de desarrollo rural. Programa ecoatlas. Mendoza Argentina. Info@ecoatlas.org.ar
2. GLOSARIO DE TÉRMINOS GEOGRÁFICOS (GTG). *Universitat Jaume I. España.*
3. GLOSARIO, de terminos SIG:
<http://www.mappinginteractivo.com/glosario.asp?orden=v>
4. GLOSARIO DEL INBIO:
<http://www.inbio.ac.cr/ecomapas/glosario03.htm>
5. Glosario sobre Televisión Digital Terrestre (ABC)
<http://www.domoticaviva.com/noticias/TDT/news01.htm>
6. Grinnell, J. 1917. Field test of theories concerning distributional control. American Naturalist 51: 115-128.

Dinamica temporal de mosquitos de dengue

7. Hay, S.I. 2002. An Overview of Remote Sensing and Geodesy for Epidemiology and Public Health Application. pp. 2-35 /n: Hay S.I., S.E. Randolph, D.J. Rogers eds. Remote sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. *Advances in Parasitology*. 47. Academic Press.
8. Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22: 415-427.
9. <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/slideset/set1/i/slide04.htm>
10. <http://gislounge.com/category/glossary/?snap=R>
11. Ibáñez-Bernal, S. y C. Martínez-Campos. 1994. *Artrópodos con importancia en Salud Pública. Vol. 1: Generalidades*. Secretaría de Salud, INDRE, México. 234 pags.
12. Navarro Parraud, M C y G Legorreta Paulín. 1998. Sistemas de Información Geográfica. Teoría introductoria y ejercicios con AutoCAD e IDRISI. Publicaciones Docentes del Museo de Zoología "**Alfonso L. Herrera**". 163p.
13. Programa Especial de capacitación para personal y estudiantes en Sistemas de Información Geográfica (SIG). CENSIG. Facultad de Ciencias Forestales, Colombia.
14. Stansfield, W. D. Genética: 500 problemas resueltos. 1985? McGraw Hill
15. Universidad de Nebraska. <http://www.casde.unl.edu/glossary/r.php>
16. Vocabulario. Curso de Cartografía Digital (GEOM-3606-35), <http://portafoliogeom-3606-35.blogspot.com/2008/11/asignacin-1-vocabulario.html>
17. Wikipedia, la enciclopedia libre
18. <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/spanish/dengue-hcp-spa.htm>

APÉNDICE II. ARTÍCULO ORIGINAL



Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases

A. Townsend Peterson^{a,*}, Carmen Martínez-Campos^b,
Yoshinori Nakazawa^c, Enrique Martínez-Meyer^d

^a Natural History Museum and Biodiversity Research Center, University of Kansas, Lawrence, Kansas 66045, USA

^b Laboratorio de Entomología, Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos (InDRE) Secretaría de Salud, México, D.F., México

^c Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 04510 México

^d Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 04510 México

Received 10 June 2004; received in revised form 2 December 2004; accepted 7 February 2005

KEYWORDS

Dengue;
Aedes aegypti;
Ecological niche modeling;
Spatiotemporal variation;
Remote sensing;
Mexico

Summary Numerous human diseases—malaria, dengue, yellow fever and leishmaniasis, to name a few—are transmitted by insect vectors with brief life cycles and biting activity that varies in both space and time. Although the general geographic distributions of these epidemiologically important species are known, the spatiotemporal variation in their emergence and activity remains poorly understood. We used ecological niche modeling via a genetic algorithm to produce time-specific predictive models of monthly distributions of *Aedes aegypti* in Mexico in 1995. Significant predictions of monthly mosquito activity and distributions indicate that predicting spatiotemporal dynamics of disease vector species is feasible; significant coincidence with human cases of dengue indicate that these dynamics probably translate directly into transmission of dengue virus to humans. This approach provides new potential for optimizing use of resources for disease prevention and remediation via automated forecasting of disease transmission risk.

© 2005 Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Although the general geographic distributions of insect disease vector species are the subject of extensive monitoring and mapping efforts (Cooper et al., 2002; Shililu et al., 2003), the fine details

* Corresponding author. Tel.: +1 785 864 3926; fax: +1 785 864 5335.

E-mail address: town@ku.edu (A.T. Peterson).

can be obscure, even in such well-studied regions as North America (Levine et al., 2004). More importantly, however, within known geographic distributional areas of particular species, anticipating where and when they will emerge can be challenging. This contribution marshals a new suite of tools based in ecological niche modeling to the challenge of understanding spatiotemporal variation in the activity and geographic distributions of such unpredictable vector species.

Using this approach, known occurrences of species are related to ecological landscapes to produce models of species' ecological requirements. These models, when used to query landscapes to identify areas potentially habitable for the species, provide excellent predictivity regarding geographic distributions of species: distributions in unknown landscapes (Peterson and Kluza, 2003; Peterson and Shaw, 2003); species invasions (Peterson, 2003; Skov, 2000); climate change effects on species' distributions (Bakkenes et al., 2002; Midgley et al., 2003); and interactions among species in disease transmission cycles (Peterson et al., 2002b, 2003). However, to date, such models have used broad temporal averages in predictions, making them effectively blind to spatiotemporal dynamics. In this article, we explore and test the hypothesis that the details of spatial and temporal dynamics of vector populations and consequent disease outbreaks can be predicted via ecological niche modeling. In essence, this approach follows on from Pavlovsky's concept of natural nidi of infectious diseases (Pavlovsky, 1966), except that it tracks a moving target: vector mosquito populations that vary over both space and time.

2. Materials and methods

The overall analysis in this article involves distribution surveys of mosquito larvae used to predict month-specific distributions of these disease vectors. Secondly, we examine the correspondence between our predicted vector distributions and the geographic distribution of human dengue cases. The models we develop, in all cases, are tested based on independent suites of data, so the generality and predictive ability of models is assessed from the outset.

Ecological niche models were based on primary point-occurrence information (Peterson et al., 2002c) for *Aedes aegypti* drawn from larval surveys carried out across Mexico by the Laboratorio de Entomología, Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos (InDRE) Secretaría de Salud, Mexico. Samples were taken

monthly at points scattered across eastern and southern Mexico. Human case data were drawn from cases tested by InDRE for the appropriate period; exposure dates were calculated based on the assumption of an average of 18 days for onset of symptoms (including time to viremia in an infected human, extrinsic incubation in a mosquito, a second feeding on a human, intrinsic incubation in a second human, and time to viremia in the second human [see <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/dengue/slideset/set1/i/slide04.htm>]) and 7 days between onset of symptoms and taking of sera for testing. Specifically, 181 mosquito distributional occurrences and 1994 human dengue case records for April–December 1995 were georeferenced using Mexican census data to the nearest 0.1' of latitude and longitude (Figure 1).

To characterize environments, we used seven Geographic Information System (GIS) coverages, summarizing aspects of the ecological landscape in Mexico (Figure 1). These coverages included elevation, slope, aspect and tendency to pool water (topographic index) from the USGS Hydro-1 K data set; and remotely sensed images, including monthly composite normalized difference vegetation indices (NDVI) for 1995 based on data from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensor. NDVI data were included in the modeling process as raw monthly composites, as well as differences between the particular month and the two previous months, for a total of three month-specific remotely sensed data layers. (Note that rainfall and other climatic information were not included, owing to the coarse nature of such data sets, which would not permit the fine-grained predictions developed in this article; regardless, rainfall is indeed reflected in the NDVI data via vegetational responses and increased or decreased photosynthetic mass.)

Ecological niche models were developed using the Genetic Algorithm for Rule-set Prediction (GARP) (Stockwell and Noble, 1992), an evolutionary computing algorithm that has seen extensive testing for predictions of species' geographic distributions (Anderson et al., 2003; Egbert et al., 2002; Peterson and Cohoon, 1999; Peterson and Shaw, 2003; Peterson et al., 2004b; Stockwell and Peterson, 2002a, 2002b, 2003). GARP focuses on modeling ecological niches (the conjunction of ecological conditions wherein a species can maintain populations without immigration), relating ecological characteristics of occurrence points to those of points sampled randomly from the rest of the study region, developing a series of decision rules that best summarize factors associated with presence.

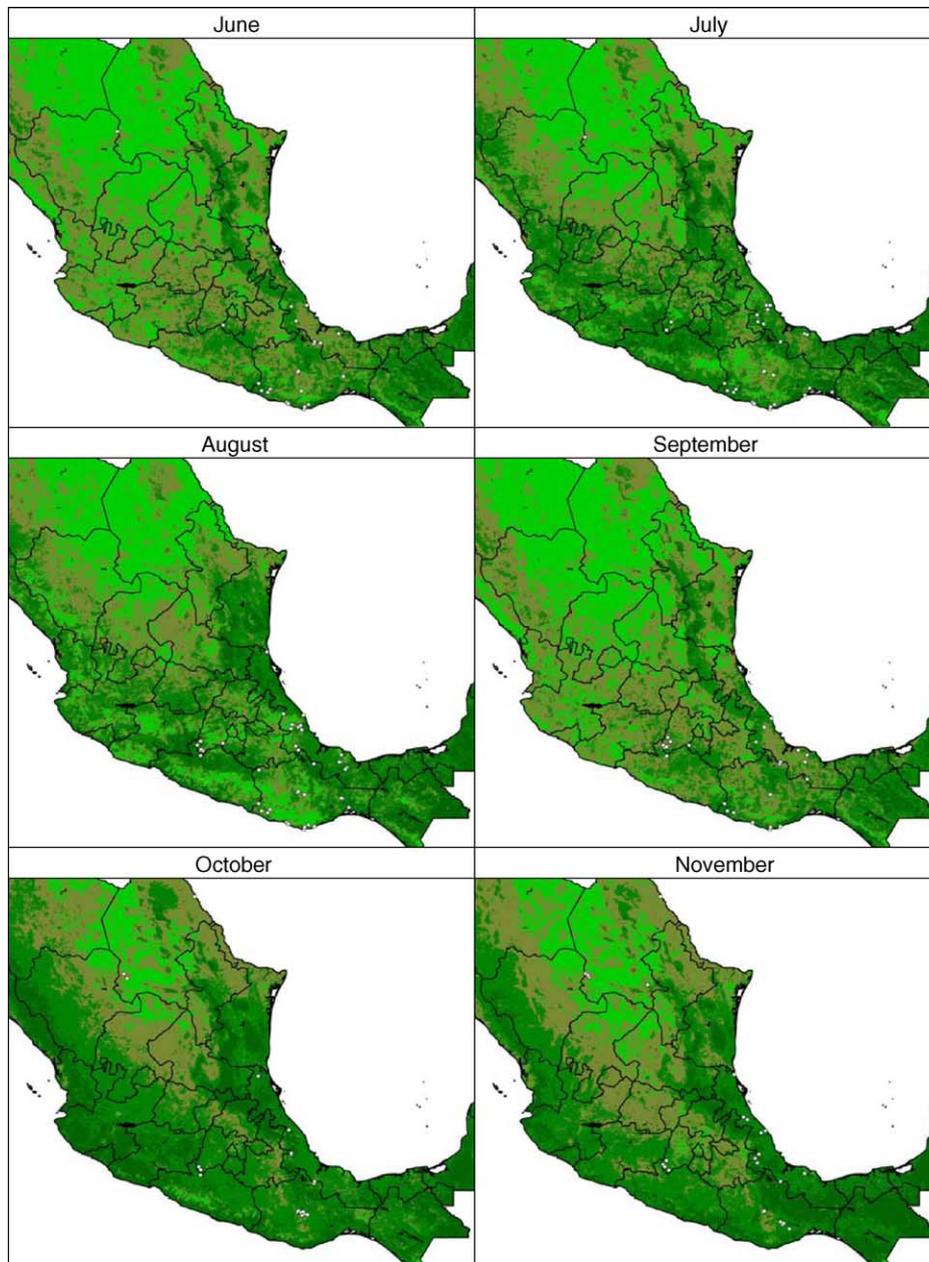


Figure 1 Monthly NDVI values from the AVHRR satellite for June–November 1995. Brown areas represent low NDVI values, whereas green areas represent high NDVI values. Comparisons among months illustrate month-to-month variation in conditions across Mexico. Occurrence data for *Aedes aegypti* are shown for each month as white squares.

Occurrence points are divided evenly into training and testing data sets. GARP carries out essentially the same general task as multivariate logistic regression, but its evolutionary-computing basis permits analysis of very complex data sets that would probably prove prohibitive for more conventional approaches. GARP works in an iterative process of rule selection, evaluation, testing and incorporation or rejection: a method is chosen from a set of possibilities (e.g. logistic regression, bioclimatic rules) and applied to the training data

to develop or evolve a rule. Predictive accuracy is evaluated based on the testing data. Rules may evolve in ways that mimic DNA evolution (e.g. point mutations, deletions). Changes in predictive accuracy between iterations are used to evaluate whether particular rules should be incorporated into the model; the algorithm runs 1000 iterations or until convergence.

GARP is a random-walk procedure, so it is necessary to take model-to-model variation into account, filtering out suboptimal models based on error

statistics (Anderson et al., 2003). This procedure, which was developed based on detailed comparisons with expert opinions of many replicate models, focuses the results on models that demonstrate independent test occurrence data, and thereby have predictive power. To this end, we developed 100 replicate models of ecological niches for each month based on different random subsamplings of occurrence data and different random-walk explorations of model solution space using the GARP algorithm. We chose a 'best subset' of these models based on error statistic distributions (Anderson et al., 2003), as follows: a threshold of omission error (failing to predict known presences) was set to 5%, above which models were discarded; among remaining models, median area predicted was calculated; the 10 models with predicted areas closest to the median were identified; and the remaining 10 models were discarded. The geographic predictions (binary predictions, 0=absence, 1=presence) of the remaining 10 models were summed to provide a summary of potential geographic distributions.

Models from a given month were projected onto the landscapes of all succeeding months, thus detecting areas in each future month that fit the ecological requirements of the species as modeled in a particular month. For this implementation, to create the prediction for a given month, we averaged the predictions from the two previous months'

models. Model predictions were evaluated by relating the positions of actual occurrences (vectors or human cases) from the month in question to the predictions from the models in the two preceding months. Chi-square tests were used to compare observed success in predicting the distribution of test points with that expected under a random model (proportional area predicted present provides an estimate of occurrence points correctly predicted were the prediction to be random with respect to the distribution of the test points). As only a single georeferenced human dengue case was available for December 1995, no validations of disease occurrences were carried out for this month.

To establish which environmental dimensions contribute strongly to understanding *Aedes* distributions in space and time, we used the approach outlined by Peterson and Cohoon (1999). Here, for all possible combinations of environmental dimensions, we ran GARP on known occurrences from each month, and measured omission error based on independent subsamples of half the points available for that month. We then calculated Pearson product-moment correlations between inclusion/exclusion of a particular dimension (coded as a binary variable) and the independent omission error measure. Dimensions exhibiting strongly negative correlations are those that contribute to improving models (Peterson and Cohoon, 1999).

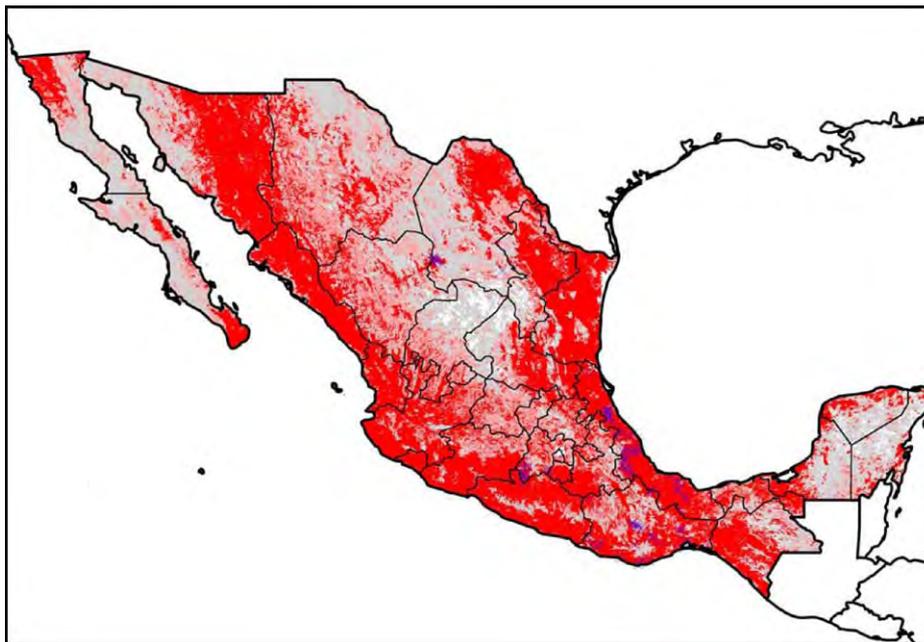


Figure 2 Sampling points (Xs) at which *Aedes aegypti* was encountered, overlain on a prediction of the species' potential distributional area throughout the year, based on annual means of remotely sensed information. White = predicted absent by all models; gray = predicted present by 1–49% of models; pink = predicted present by 50–79% of models; and red = predicted present by >80% of models. Note the broad areas predicted to present conditions within the species' ecological niche over the year.

3. Results

A traditional, time-averaged ecological niche model based on all occurrence points available and conditions averaged over the year indicated a broad potential distribution for *A. aegypti* across

Mexico (Figure 2). This model, however, could not reflect the rather dramatic seasonal shifts in occurrences of the mosquitoes: during the summer occurrences were principally in the southeastern and southern lowlands, whereas during the autumn and early winter months occurrences were farther

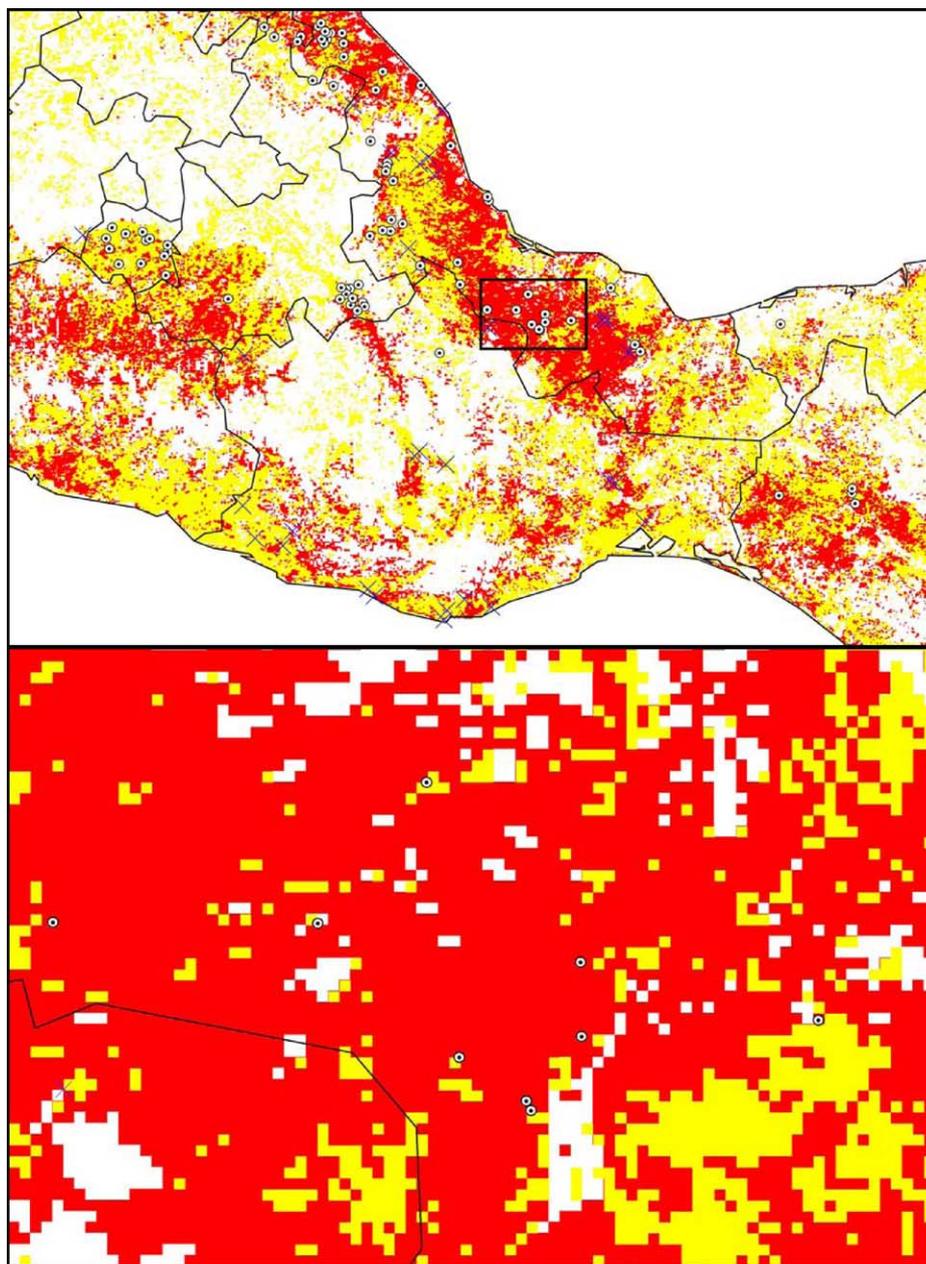


Figure 3 Comparison of time-specific and time-averaged ecological niche models in central and southern Mexico, with a model for August 1995 in yellow (based on areas predicted by the majority of models in the average of the predictions for August from June and July 1995) overlain on the annual mean model shown in Figure 1 (areas in red predicted present by all models). Also shown are occurrences of the vector species in August (blue Xs) and human dengue cases (dotted circles). The top panel shows central and southern Mexico; the bottom panel shows the detail of an area (see inset on top panel) of seeming model failure that, viewed carefully, can be seen to reflect fine-scale coincidence between disease occurrence and time-specific predictions.

north and in the interior of the country. Time-specific models, by contrast, predicted much more restricted areas in any one month (e.g. Figure 3). The small areas predicted in particular months coincided with actual occurrences much better than random models ($P < 0.05$) for all months tested except October 1995 ($P \gg 0.05$) and November 1995 ($0.05 < P < 0.10$; Table 1). Hence, at least for large parts of the year, prediction of the spatial and temporal distribution of *A. aegypti* is possible with considerably elevated statistical confidence.

A potential spatial tie between predicted vector activity and human dengue cases is indicated by excellent coincidence between the latter and predictions based on time-specific models of vector activity (Figure 3). Extrapolating human case serological testing dates to approximate dates of exposure (by subtracting 18 days for infection of mosquito, incubation, infection of human, and incubation, and 7 days for taking sera after onset of symptoms), and overlaying these occurrences on mosquito predictions for those time periods, time-specific models predicted 34% less area than the time-averaged models; and yet they were successful in anticipating 62% of dengue cases, a figure that would improve considerably if actual radii of human movements and possible exposure sites were taken into account (see examples of near-coincidence in Figure 3). Even not taking into account the near misses, coincidence between human dengue cases and predictions was nevertheless significantly better than random models for all six months for which testing was possible (i.e. June–November 1995).

Using the coverage subsampling approach described above and elsewhere (Peterson and Cohoon, 1999), we achieved a picture of which environmental dimensions contributed most strongly to the predictive power of our models (Figure 4). The most important dimension in creating highly predictive models was NDVI in the month of the prediction, followed by elevation, NDVI two months before, and NDVI one month before; slope, topographic index and aspect were statistically insignificant in determining model predictivity. As such, it is clear that the success of our time-specific models depends in clear and direct ways on the time-specific variables included in the models.

4. Discussion

The modeling approach explored in this article represents a first application of ecological niche modeling across both space and time (Soberón

Table 1 Summary of results of predictions of mosquito presences and human dengue cases for particular months in 1995 based on averages of the two previous months' ecological niche model predictions

Time period	Mosquito distributions			Human dengue cases		
	N (test points)	% correct	% of area predicted present (50 km buffer)	N (test points)	% correct	% of area predicted present (150 km buffer)
Whole year (time-averaged model)	181	95.0	78.5	1994	86.6	71.5
June	22	72.7	49.6	92	70.7	55.0
July	28	82.1	59.2	195	74.4	55.7
August	40	75.0	44.7	714	61.5	38.9
September	25	80.0	44.6	599	78.0	36.7
October	19	78.9	66.6	356	60.1	49.0
November	25	76.0	66.1	30	26.7	49.1
December	22	95.5	78.6	—	—	—

* Positive statistical significance of comparison with a random model ($P < 0.05$, in most cases $P \ll 0.05$).

+ Marginal statistical significance of comparison with a random model ($0.05 < P < 0.10$).

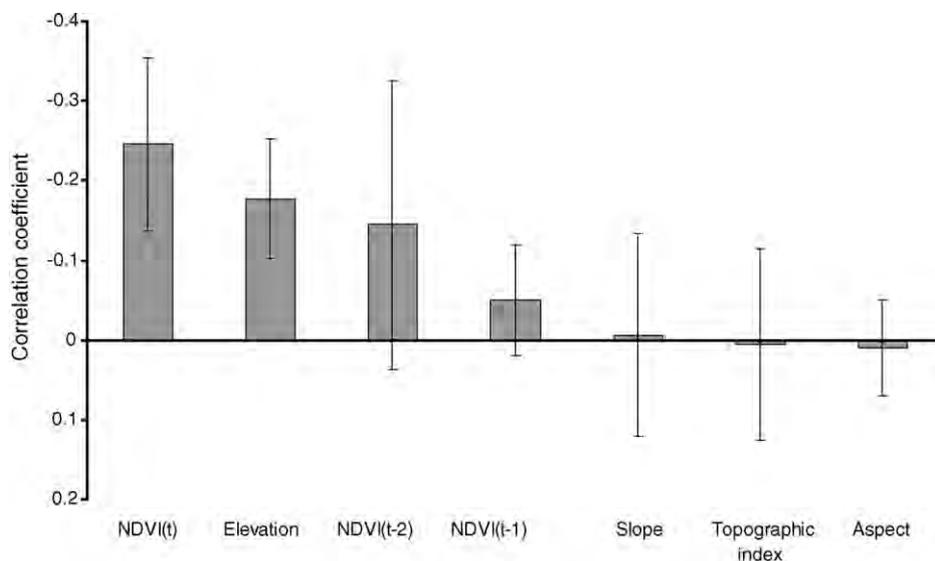


Figure 4 Summary of results of coverage subsampling analyses, indicating relative contributions of each environmental dimension to reducing omission in replicate models. Strongly negative correlations (note that axis is plotted reversed) indicate coverages important in producing low-omission models; error bars indicate the standard deviation in correlation coefficients across months. NDVI (t) is the NDVI value in the month in question; NDVI (t-1) and NDVI (t-2) are the differences between the month in question and one or two month preceding.

and Peterson, 2004). Our use of the genetic algorithm (GA) is based on long experience with this approach for diverse challenges (Anderson et al., 2003; Peterson, 2003; Peterson et al., 2002a, 2004a). Comparisons of GA performance with that of statistical approaches (e.g. multivariate logistic regression) and other evolutionary-computing approaches are in process (National Center for Ecological Analysis and Synthesis working group 'Testing Alternative Methodologies for Modeling Species' Ecological Niches and Predicting Geographic Distributions'), but the GA in general appears very well-suited for analysis of complex environmental spaces, such as that in this project.

The random null model that we have used as a basis for statistical validation of our models is not particularly challenging. What this approach does offer, however, is confirmation that the coincidence between our models and our test occurrence points is not simply random coincidence. The complimentary dimension of this question, then, is that of model performance: our models averaged 80% in predicting mosquito occurrences from two consecutive months to the next, which is quite high, given the complexities of mosquito distributions and the rather sparse nature of the occurrence data on which the models were based.

These results open a new suite of possible applications of remotely sensed information to epidemiology, taking advantage of the excellent

predictivity afforded by ecological niche modeling. Previous efforts aimed at forecasting mosquito-borne disease outbreaks have based predictions on past patterns of epidemics (Abeku et al., 2002), climate anomalies (Thompson and Connor, 2001) or observed vector biting activity (Lindblade et al., 2000). More recently, attempts have been made to use remotely sensed information (Hay et al., 2001, 2003; Rogers et al., 2002), but seeking a direct association between the imagery and human disease outbreaks.

Our work seeks a more process-oriented middle ground: occurrence information for species that are key to the disease transmission cycle is related to remotely sensed data to produce a vector species-specific model; these models are then assembled in a GIS environment to reconstruct disease transmission cycles (Peterson et al., 2002b, 2003). Although clearly we have not yet assembled the full picture of dengue transmission patterns in Mexico, the predictable nature of vector distributions is clear, and the possibility of a connection to disease transmission to humans is suggested.

Time-specific ecological niche modeling has the potential for development into real-time forecast systems for geographic phenomena related to biodiversity. 'Libraries' of ecological niche models for vector and reservoir species in disease cycles, crop pests (Sánchez-Cordero and Martínez-Meyer, 2000) and agricultural species (Báez-González

et al., 2002) etc., could be related to remotely sensed information harvested in real time to predict key areas at risk of disease outbreaks or crop infestation inexpensively and efficiently. Further exploration of these techniques based on richer and more systematically collected species occurrence data sets, finer-grained time-specific remotely sensed data sets (e.g. MODIS, SPOT) from diverse regions and vector taxa would be fruitful.

Conflicts of interest statement

The authors have no conflicts of interest concerning the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was funded by the U.S. National Science Foundation, and by the Consejo Nacional para Ciencia y Tecnología.

References

- Abeku, T.A., de Vlas, S.J., Borsboom, G., Teklehaimanot, A., Kebede, A., Olana, D., van Oortmarssen, G.J., Habbema, J.D., 2002. Forecasting malaria incidence from historical morbidity patterns in epidemic-prone areas of Ethiopia: a simple seasonal adjustment method performs best. *Trop. Med. Int. Health* 7, 851–857.
- Anderson, R.P., Lew, D., Peterson, A.T., 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecol. Mod.* 162, 211–232.
- Báez-González, A.D., Chen, P., Tiscareño-López, M., Srinivasan, R., 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Sci.* 42, 1943–1949.
- Bakkenes, M., Alkemade, J.R.M., Ihle, F., Leemansand, R., Latour, J.B., 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Glob. Change Biol.* 8, 390–407.
- Cooper, R.D., Waterson, D.G.E., Frances, S.P., Beebe, N.W., Sweeney, A.W., 2002. Speciation and distribution of the members of the *Anopheles punctulatus* (Diptera: Culicidae) group in Papua New Guinea. *J. Med. Entomol.* 39, 16–27.
- Egbert, S.L., Martinez-Meyer, E., Ortega-Huerta, M.A., Peterson, A.T., 2002. Use of datasets derived from time-series AVHRR imagery as surrogates for land cover maps in predicting species' distributions. *Proc. IEEE 2002 Int. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS)* 4, 2337–2339.
- Hay, S.I., Rogers, D.J., Shanks, G.D., Myers, M.F., Snow, R.W., 2001. Malaria early warning in Kenya. *Trends Parasitol.* 17, 95–99.
- Hay, S.I., Were, E.C., Renshaw, M., Noor, A.M., Ochola, S.A., Olu-sanmi, I., Alipui, N., Snow, R.W., 2003. Forecasting, warning, and detection of malaria epidemics: a case study. *Lancet* 362, 580.
- Levine, R.S., Benedict, M.Q., Peterson, A.T., 2004. Distribution of *Anopheles quadrimaculatus* Say s.l. and implications for its role in malaria transmission in the US. *J. Med. Entomol.* 41, 607–613.
- Lindblade, K.A., Walker, E.D., Wilson, M.L., 2000. Early warning of malaria epidemics in African highlands using *Anopheles* (Diptera: Culicidae) indoor resting density. *J. Med. Entomol.* 37, 664–674.
- Midgley, G.F., Hannah, L., Millar, D., Thuiller, W., Booth, A., 2003. Developing regional and species-level assessments of climate change impacts on biodiversity in the Cape Floristic Region. *Biol. Conserv.* 112, 87–97.
- Pavlovsky, E.N., 1966. *Natural Nidality of Transmissible Diseases*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Peterson, A.T., 2003. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Q. Rev. Biol.* 78, 419–433.
- Peterson, A.T., Cohoon, K.C., 1999. Sensitivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. *Ecol. Mod.* 117, 159–164.
- Peterson, A.T., Kluza, D.A., 2003. New distributional modeling approaches for Gap Analysis. *Anim. Conserv.* 6, 47–54.
- Peterson, A.T., Shaw, J.J., 2003. *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.* 33, 919–931.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sanchez-Cordero, V., Soberon, J., Buddemeier, R.H., Stockwell, D.R.B., 2002a. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416, 626–629.
- Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Beard, C.B., Ramsey, J.M., 2002b. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease. *Mexico. Emerg. Infect. Dis.* 8, 662–667.
- Peterson, A.T., Stockwell, D.R.B., Kluza, D.A., 2002c. Distributional prediction based on ecological niche modeling of primary occurrence data. In: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L. (Eds.), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C., pp. 617–623.
- Peterson, A.T., Vieglais, D.A., Andreasen, J., 2003. Migratory birds as critical transport vectors for West Nile Virus in North America. *Vector Borne Zoon. Dis.* 3, 39–50.
- Peterson, A.T., Bauer, J.T., Mills, J.N., 2004a. Ecological and geographic distribution of filovirus disease. *Emerg. Infect. Dis.* 10, 40–47.
- Peterson, A.T., Pereira, R.S., Fonseca de Camargo-Neves, V.L., 2004b. Using epidemiological survey data to infer geographic distributions of leishmania vector species. *Rev. Soc. Bras. Med. Trop.* 37, 10–14.
- Rogers, D.J., Randolph, S.E., Snow, R.W., Hay, S.I., 2002. Satellite imagery in the study and forecast of malaria. *Nature* 415, 710–715.
- Sánchez-Cordero, V., Martínez-Meyer, E., 2000. Museum specimen data predict crop damage by tropical rodents. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 97, 7074–7077.
- Shililu, J., Ghebremeskel, T., Mengistu, S., Fekadu, H., Zerom, M., Mbogo, C., Githure, J., Gu, W.D., Novak, R., Beier, J.C., 2003. Distribution of anopheline mosquitoes in Eritrea. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 69, 295–302.
- Skov, F., 2000. Potential plant distribution mapping based on climatic similarity. *Taxon.* 49, 503–515.
- Soberón, J., Peterson, A.T., 2004. Biodiversity informatics: managing and applying primary biodiversity data. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B, Biol. Sci.* 359, 689–698.
- Stockwell, D.R.B., Noble, I.R., 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of analysis. *Math. Comp. Simul.* 33, 385–390.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2002a. Controlling bias in biodiversity data. In: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morri-

- son, M.L. (Eds.), *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press, Washington, D.C, pp. 537–546.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2002b. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecol. Mod.* 148, 1–13.
- Stockwell, D.R.B., Peterson, A.T., 2003. Comparison of resolution of methods used in mapping biodiversity patterns from point occurrence data. *Ecol. Ind.* 3, 213–221.
- Thompson, M.C., Connor, S.J., 2001. The development of malaria early warning systems for Africa. *Trends Parasitol.* 17, 438–445.

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®