

Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores

Geographic information systems and remote sensing.
Applications in vector-borne diseases

■
GABRIEL PARRA-HENAO¹

Forma de citar: Parra-Henao G. Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. Rev CES Med 2010;24(2):75-90

RESUMEN

Los sistemas de información geográfica y los sensores remotos son poderosas herramientas para estudiar la distribución actual y predecir áreas de riesgo de presencia de insectos vectores de enfermedades; así mismo, se constituyen en excelentes aliados para la focalización de acciones de prevención y control. Aunque el uso de estas herramientas en investigación de enfermedades transmitidas por vectores se ha incrementado en los últimos años, su aplicación en los programas oficiales de control ha sido limitada. En esta revisión se aborda esta temática de trabajo, se discuten investigaciones con aplicaciones de ambos sistemas en diferentes especies vectores de enfermedades y los retos a futuro de su aplicación potencial en los programas oficiales de control de dichas enfermedades en Colombia. Finalmente, se enfatiza que para avanzar adecuadamente en los programas de control de las enfermedades, es recomendable el entrenamiento de investigadores y tomadores de decisiones en estas herramientas, incrementar la colaboración interinstitucional, estandarizar la colecta de datos referentes a la distribución de las especies de vectores y el desarrollo de una plataforma común de datos.

¹ Candidato a Doctor en Biología. Profesor Asociado Instituto Colombiano de Medicina Tropical. Universidad CES.
Correo electrónico: gparra@ces.edu.co

Recibido: agosto 27 de 2010; revisado: noviembre 5 de 2010; aceptado: noviembre 20 de 2010

PALABRAS CLAVE

Sistemas de información geográfica

Sensores remotos

Enfermedades transmitidas por vectores

Análisis espacial

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) are powerful tools for the study of actual distribution and to predict risk areas for insect vectors of diseases. Both have been using increasingly to target prevention and control actions. The use of these techniques in research about vector-borne tropical diseases is growing in the last years; however its application in official control programs has been limited. This paper briefly reviews the use of spatial analysis, Geographic Information Systems and Remote Sensing in different vector species and deal with the future challenges for the potential application of these techniques in official control programs in Colombia. Finally, to advance in vector-borne control programs, training of researchers and decision makers in these tools are recommended. The increase of collaboration between institutions and the collection of information about the distribution of vector species in a standardized way and the development of a common data platform is recommended too.

KEY WORDS

Geographic Information Systems

Remote Sensing

Vector-Borne diseases

Spatial analysis

INTRODUCCIÓN

Las zoonosis y antropozoonosis son de alta prevalencia en las regiones tropicales y sub-

tropicales del planeta. Entre las enfermedades transmitidas por insectos, el dengue, la malaria, la leishmaniasis y la tripanosomiasis americana (enfermedad de Chagas) afectan y deterioran la calidad de vida de poblaciones de grandes áreas en Las Américas (1). Así mismo, las garrapatas diseminan en grandes áreas del neotrópico, bacterias de los géneros *Rickettsia*, *Ehrlichia*, *Anaplasma* y *Borrelia*. (2). En el cuadro 1 se presenta un listado resumido de las principales enfermedades y los vectores que las transmiten.

El manejo y control de estas enfermedades está a cargo de los entes municipales, departamentales y nacionales de salud, los cuales tienen un fuerte énfasis hacia la clínica, diagnóstico y tratamiento. Para esto, se cuenta con abundantes técnicas diagnósticas inmunoenzimáticas (ELISA, Dot-Blot, IFI, etc.), moleculares (basadas en la reacción en cadena de la polimerasa), y en una batería de tratamientos que permiten al profesional de la salud, diagnosticar pacientes afectados por alguna de las enfermedades transmitidas por vectores (ETV) y tratarlos adecuadamente.

Generalmente, los pacientes tratados para alguna de las ETV regresan a las zonas rurales endémicas donde habitan y nuevamente pasan a ser parte de los ciclos de transmisión de cada región, lo que probablemente llevará a que sean afectados nuevamente por vectores, y de esta forma deban regresar a los centros de salud en búsqueda de atención. Esta situación conduce a un enfrascamiento donde los habitantes de las zonas rurales permanentemente están sometidos a un espiral sin fin de vectores-enfermedad-centros de salud, en el cual los perjudicados, son justamente los habitantes de las diferentes zonas rurales endémicas del país. Este tipo de abordaje de la problemática de las ETV ha llevado a que, como se describió anteriormente, el énfasis de las acciones se haga sólo sobre una parte del problema, que se presenta luego de que el parásito (bacteria, nematodo, protozoo o virus) ha ingresado al huésped humano y se genera la sintomatología propia de la enfermedad.

Cuadro 1. Artrópodos vectores y enfermedades que producen en el hombre y animales

Orden	Géneros	Enfermedad y/o patógeno transmitido
Díptera	<i>Aedes</i>	Dengue, fiebre amarilla, encefalitis equina venezolana, encefalitis equina del este, virus del occidente del Nilo.
	<i>Coquillettidia</i>	Encefalitis equina venezolana, encefalitis equina del este
	<i>Culex</i>	Virus del occidente del Nilo, encefalitis equina del este, filariasis
	<i>Mansonia</i>	Virus del occidente del Nilo, encefalitis equina venezolana, encefalitis equina del este
	<i>Psorophora</i>	Encefalitis de San Luis, virus del occidente del Nilo
	<i>Trichoprosopon</i>	Encefalitis equina venezolana
	<i>Anopheles</i>	Malaria
	<i>Haemagogus</i>	Fiebre amarilla selvática, virus Ilheus
	<i>Lutzomyia</i>	Leishmaniasis
	<i>Simulium</i>	Oncocercosis, mansonelosis
	<i>Culicoides</i>	Virus Oropouche, bluetongue, Congo virus, Haemoproteus.
	<i>Cryops, Tabanus</i>	<i>Trypanosoma vivax</i> , <i>T. evansi</i> , <i>T. theileri</i> , <i>Loa loa</i>
Hemíptera	<i>Stomoxys</i>	<i>Trypanosoma evansi</i> , <i>T. equinum</i> , <i>T. rhodesiense</i> <i>T. brucei</i> y <i>T. vivax</i> , <i>Anaplasma marginale</i>
	<i>Haematobia</i>	<i>Stephanofilaria stilesi</i>
	<i>Rhodnius, Triatoma, Panstrongylus</i>	Enfermedad de Chagas
Acari	<i>Rhipicephalus</i>	<i>Anaplasma</i> , <i>Babesia</i> , <i>Rickettsia</i>

Es tarea de los biólogos (entomólogos y ecólogos), epidemiólogos, ingenieros ambientales o sanitarios, y demás profesionales interesados en el tema, abordar la problemática desde una perspectiva ecológica, la cual permitirá dilucidar los patrones y variables ambientales de cada hábitat que favorecen la proliferación de los vectores y reservorios de las enfermedades y de esta manera proponer medidas racionales y costo-efectivas para el control de las poblaciones de vectores. De manera específica, para el estudio y control de mosquitos de los géneros *Aedes*, *Anopheles*, *Culex* (Diptera: Culicidae); *Lutzomyia* (Diptera: Psychodidae), así como de

los triatominae (Hemiptera: Reduviidae), y de las garrapatas, se debe tener en cuenta el componente espacial, tanto a nivel local o microclimático, como a nivel regional o macroclimático. Para el estudio de estos componentes macro y microclimáticos, que en conjunto conforman el paisaje, es necesario aprovechar los avances en las tecnologías de teledetección satelital y de información geográfica.

Ambiente y vectores de enfermedades

Es conocido que algunas enfermedades infecciosas tienen como huéspedes intermediarios a

artrópodos poiquiloterms (ectotérmicos) que son sensibles a las condiciones ambientales (3), y que están directamente influenciadas por ciertas condiciones como temperatura, precipitación y humedad relativa (4). Las diferentes variables que permiten la proliferación de estas poblaciones de artrópodos pueden ser estudiadas mediante el uso de imágenes satelitales, y esta información, en conjunto con datos de campo, se puede analizar y desplegar mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), para de esta forma llegar a análisis de tipo espacial que permita un entendimiento holístico (nivel de paisaje) de lo que sucede en las zonas endémicas de transmisión de las zoonosis o antropozoonosis.

Al estudiar las ETV se debe tener una perspectiva ecosistémica, la cual requiere el estudio de la situación ambiental a escala regional y de los ecosistemas locales que sostienen los hábitats de los vectores y facilitan la transmisión de las enfermedades. La propagación de las ETV es gobernada por los mismos principios de la dinámica de poblaciones de los sistemas ecológicos. Entre estos principios, probablemente los más importantes son la tasa reproductiva (R_0) de los vectores y los parásitos y la capacidad de carga (K) del hábitat local (5). Tanto R_0 como K están influenciados por las condiciones ambientales. Por ejemplo, en el caso de malaria, las fluctuaciones de temperatura (época seca vs. época de lluvia) afectan la tasa reproductiva de los mosquitos *Anopheles* y la velocidad de desarrollo de los parásitos del género *Plasmodium* (esporogonia) y su viabilidad (temperaturas muy altas pueden comprometer la supervivencia del parásito dentro del mosquito). Así mismo, la precipitación tiene efecto directo en la disponibilidad de sitios de cría (6). Juntos, estos factores influyen el número máximo de mosquitos adultos que pueden ser producidos y sostenidos en el ambiente local en un tiempo determinado.

A pesar de que estos factores climáticos de amplia escala son importantes, su influencia en cualquier lugar particular va a depender de características locales como topografía y vegetación. Los humanos son parte integral de este sistema:

las prácticas agrícolas influyen el uso de la tierra y la disponibilidad de animales que pueden servir de fuente alimenticia a los mosquitos. Todas estas consideraciones hacen parte de lo que algunos autores han llamado ecología del paisaje (7). Las aplicaciones de la ecología del paisaje a los vectores y a las enfermedades por ellos transmitidas han sido desarrolladas en trabajos clásicos como los de Ford 1971 para las tripanosomiasis (8), Hoogstraal en 1979 para la ecología y epidemiología de la fiebre hemorrágica del Congo (9), enfermedad de Lyme (10) y arbovirosis (11). En estos casos, los investigadores han dado importancia a las características del paisaje natural y al uso de la tierra por parte de las poblaciones como determinantes de los hábitats de los reservorios y de los vectores.

Se ha documentado ampliamente el efecto que las actividades humanas (deforestación, construcción de carreteras, construcción de embalses, etc.) tienen sobre las poblaciones de mosquitos vectores de enfermedades (12-15). Algunas especies de vectores se benefician de los cambios ambientales antropogénicos; por ejemplo, la abundancia de vectores de malaria en paisajes modificados de la Amazonía, es en promedio cinco veces mayor que la que se presenta en hábitats conservados (16).

En el caso de los triatominos y la enfermedad de Chagas, es conocida la asociación existente entre mamíferos, parásitos y vectores en focos enzooticos, formando "nidos" naturales al interior de una gran variedad de biocenosis, de acuerdo a la teoría de Pavlovsky (17). Las actividades humanas modificaron dichos nidos naturales provocando que algunas especies de triatominos fueran introducidas (activa o pasivamente) a los nuevos ecotopos artificiales proveídos por el hombre. Así, aquellos triatominos con una mayor valencia ecológica se adaptaron a nuevos nichos, cambiando de especies exoantrópicas a sinantrópicas, y de esta forma el hombre y sus animales domésticos pasaron a formar parte del ciclo epidemiológico, convirtiéndose la enfermedad en una antropozoonosis. En Latinoamérica, las especies *T. infestans* y *R. prolixus* alcanzaron un alto grado de sinantropía y *T. dimidiata*, a lo largo

de su distribución, presenta poblaciones tanto sinantrópicas como silvestres (18).

Los cambios ambientales generados por causas antropogénicas y los consiguientes daños a los biotopos de los triatomos promueven la dispersión y favorecen los procesos de sinantropía de las especies selváticas, aunque los mecanismos básicos de adaptación de los insectos a los ecotopos artificiales aún son poco entendidos (19). Así mismo, el efecto de la deforestación sobre las poblaciones de triatomos es poco comprendido (20,21). Se ha registrado que la infestación domiciliar por *T. pseudomaculata* en la región brasilera de la Caatinga está asociada con la proximidad de las casas a parches de arbustos y que en aquellas regiones donde son aclarados tales parches, la infestación de las viviendas por esta especie, decrece significativamente. De igual manera se ha documentado que la deforestación y el cambio del uso del suelo puede afectar la relación existente entre los ciclos de transmisión silvestre y doméstico de *T. cruzi* (22).

Sensores remotos

La percepción remota se define como el proceso de adquirir información acerca de un objeto, área o fenómeno desde la distancia. Esta amplia definición cubre prácticamente todo, desde los ojos hasta los radiotelescopios. Los sensores remotos (SR) se pueden categorizar como activos o pasivos, diferenciándose por la fuente de energía de la cual se obtiene la información. Los sensores activos generan su propia energía, mientras que los pasivos dependen de energía ambiental de una fuente externa, que en la tierra proviene principalmente del sol. Los más usados son los sensores pasivos, que permiten medir la magnitud de la radiación electromagnética reflejada e irradiada desde la superficie de la tierra y de la atmósfera y, así mismo, derivar información sobre las condiciones de la superficie (3).

Existe una copiosa información sobre SR, la cual ha sido ampliamente documentada en revisiones como la de Cracknell en 1998 (23) y Kalluri y col. en 2007 (24). Los SR de más amplio uso

y con mayores aplicaciones son aquellos instalados a bordo de satélites que orbitan sobre la tierra, bien sea en orbitas geoestacionarias (en altitudes de 23 000 y 40 000 km) sobre la franja ecuatorial y que viajan a la misma velocidad de rotación de la tierra, lo que permite que siempre estén fijos sobre un punto determinado de la superficie terrestre, o aquellos que están orbitando alrededor del planeta a altitudes menores (600-900 km) los cuales pasan repetidas veces por diferentes secciones de la tierra mientras rotan, a estos satélites se les denomina de tipo polar (3).

Los SR también se clasifican entre aquellos denominados de alta resolución espacial y de baja resolución espacial. En general, se establece que los SR de alta resolución espacial son aquellos que captan información de la superficie de la tierra de áreas iguales o menores a 1 x 1 km, y, por lo detallada que puede ser esta información, aumentan sus costos. Los satélites de la serie Landsat, Spot y Modis están entre los SR de alta resolución de mayor uso. De otro lado, los SR denominados de baja resolución, son aquellos que brindan información de áreas mayores a 1 x 1 km, entre ellos y de amplio uso podemos citar a aquellos de la serie NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer*).

La información obtenida por los SR se puede aplicar a estudios entomológicos de campo, debido a que ellos proveen información importante sobre la cobertura de la tierra: tipos de vegetación, cuerpos de agua, temperatura de la superficie, temperatura del aire, etc. o sea, información acerca del hábitat de los insectos o artrópodos vectores (4); por lo tanto, y de acuerdo a la teoría de Pavlovsky (17) la cual expone la correlación entre hábitat y enfermedades transmitidas por vectores, los datos obtenidos de SR se pueden usar como fuente de información sobre la distribución espacial de los vectores y de las enfermedades.

Existe un número de variables ambientales que tienen influencia directa o indirecta sobre la di-

námica poblacional de los vectores. Muchas de ellas pueden estimarse a partir de los datos registrados por sensores a bordo de plataformas en órbita espacial. Entre tales variables pueden mencionarse: temperatura del aire, temperatura de superficie, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), radiación infrarroja media, déficit de saturación

de vapor. Las variables mencionadas, junto con la altura de terreno representada en modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) de hasta de 90 metros de resolución espacial, constituyen un conjunto básico que puede usarse para hacer una caracterización ambiental del área de estudio, dada exclusivamente por las características espaciales del área (Ver Figura 1).



Figura 1. Modelo de elevación digital de Colombia. Imagen del sensor Modis.

Con la acumulación de datos registrados por sensores remotos desde los años 70 existen series temporales que permiten realizar dos tipos de análisis con relevancia para la transmisión de la

enfermedad de Chagas y otras ETV. Por un lado, el análisis de series temporales usando el método de Fourier, permite extraer información importante sobre la dinámica temporal en ciclos menores

o mayores a un año en los valores de la variable de interés. El análisis de Fourier permite calcular no sólo los estadísticos descriptivos básicos, sino además estadísticos que representan la amplitud y fase de ciclo 1-, 2-, ó 3- anuales, que definen con mucho detalle el perfil ambiental de cada punto del espacio. Por otro lado, series temporales de imágenes de mediana resolución espacial permiten analizar en perspectiva histórica los cambios de uso y cobertura del terreno, proceso que habitualmente tiene vinculación con cambios en la epidemiología de la enfermedad (25).

El uso de técnicas de SR para mapear la distribución de vectores y el riesgo de enfermedades ha tenido una gran evolución durante las últimas dos décadas (13). La complejidad de las técnicas va desde el uso de simples correlaciones entre las firmas espectrales de diferentes coberturas, usos del suelo y abundancia de especies (26,27) hasta técnicas complejas que integran variables ambientales obtenidas de satélites con la biología de los vectores (13). Estas técnicas se usan para desarrollar modelos predictivos de riesgo, los cuales principalmente se realizan a través de técnicas estadísticas de regresión logística y análisis discriminante, que dilucidan las asociaciones entre datos ambientales multivariados y los patrones de presencia o ausencia de vectores para así mapear los vectores o las enfermedades. Estos métodos son capaces de predecir la probabilidad "a posteriori" de la presencia de la variable dependiente (vector o enfermedad), a partir de un grupo de variables independientes (datos de clima y cobertura de la tierra) y de esta forma pueden ser usados para hacer mapas de riesgo a partir de bases de datos.

Los SR remotos han sido aplicados en gran variedad de estudios sobre vectores de enfermedades (28-37). Por ejemplo, en México, Dumonteil y Gourbiere (38) estudiaron la relación entre la distribución de la especie *Triatoma dimidiata* y factores bioclimáticos, para de esta forma desarrollar un modelo predictivo de la abundancia domiciliar por esta especie y las tasas de infección por *T. cruzi*. Estas predicciones se usaron para construir el primer

mapa de riesgo de transmisión en la península de Yucatán hallándose que la abundancia de *T. dimidiata* se asocia de forma positiva (por análisis de regresión de Poisson) con los cultivos, pastos, precipitación, humedad relativa y la temperatura máxima. Costa y col., en 2002 (39) demuestran la utilidad de los SR para mapear la distribución y generar mapas de riesgo para *T. brasiliensis* a partir de datos obtenidos de SR: temperatura del aire, radiación infrarroja media e índices de vegetación

Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) son un poderoso conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, extraer, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para un propósito particular (40), también se puede definir a un SIG como una tecnología de manejo de información geográfica, formada por equipos de cómputo (hardware) que son programados adecuadamente (software), que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos (métodos y procedimientos) siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico para apoyar la toma de decisiones (personal-usuarios), permitiéndoles compartir la información (red) (41,42).

Los SIG difieren de los mapas tradicionales de diversas maneras: los mapas tradicionales son representaciones análogas de la superficie de la tierra, mientras que los SIG registran características distribuidas espacialmente en forma numérica. Los mapas representan simultáneamente varias características del paisaje (vegetación, topografía, vías, etc.), mientras que los SIG almacenan estas características de forma separada. Un mapa es estático y difícil de actualizar, mientras que una capa de un SIG puede ser actualizada fácilmente. Un mapa es por sí mismo el producto final, mientras que los productos finales de un SIG pueden ser mapas, datos y análisis espaciales. Los SIG, por si mismos, permiten aumentar grandemente la versatilidad para mapear datos debido a la gran cantidad de técnicas para la manipulación de datos y para el análisis cuantitativo (43) (Figura 2).

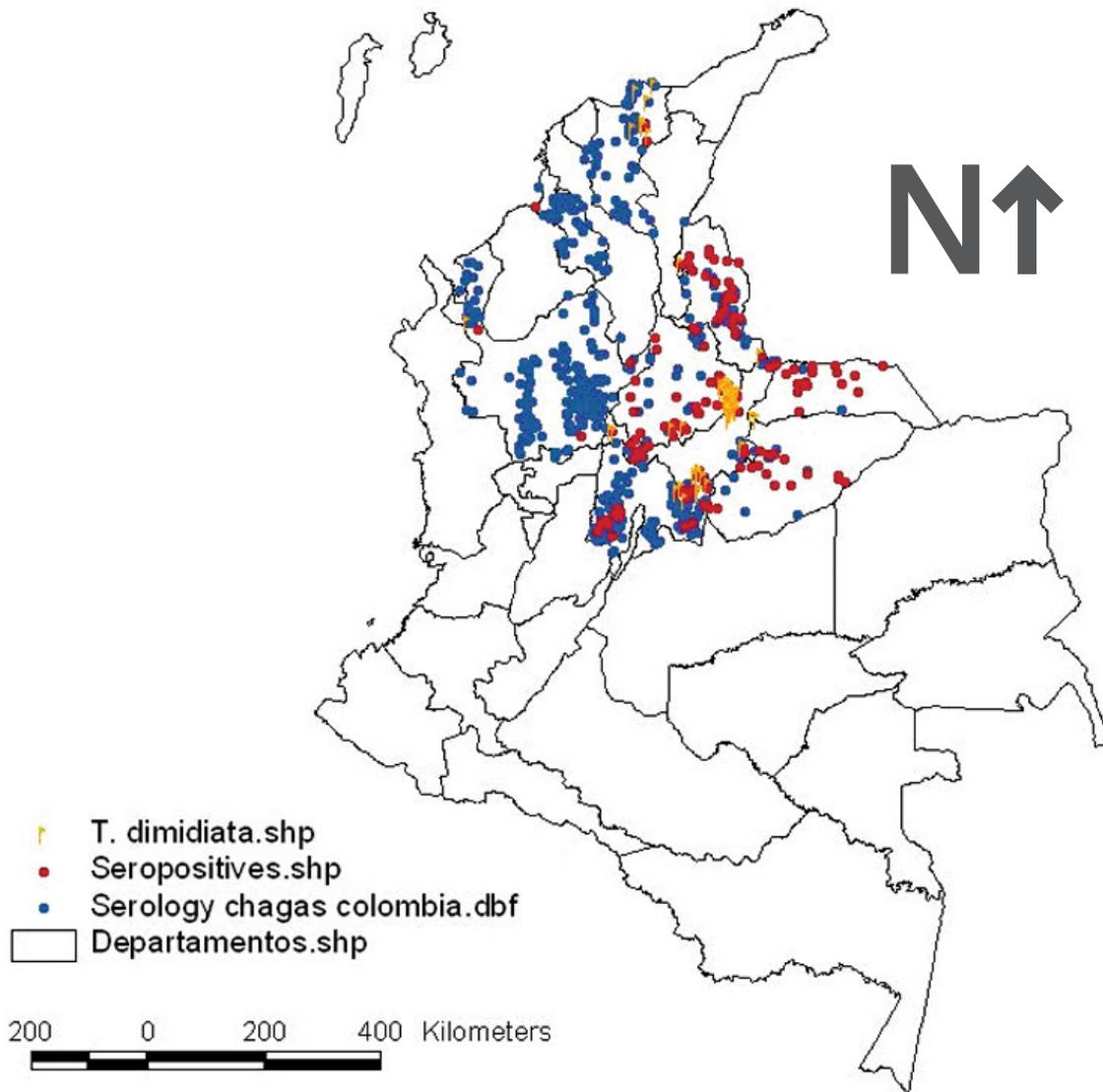


Figura 2. Distribución de la especie *Triatoma dimidiata* en Colombia

Para el estudio de sistemas ecológicos y de vectores de enfermedades, así como para estudios epidemiológicos entre muchos otros, las necesidades científicas particulares pueden ser direccionadas por las capacidades de la tecnología de los SIG. Estos sistemas permiten analizar interrogantes de naturaleza espacial, en los cuales la localización de una entidad biológica es una función de su relación frente a otros organismos o de influencias ambientales. Ejemplos de interrogantes ecológicos que un SIG puede abordar son: ¿Dónde se presentan los hábitats A y B de los vectores?, ¿dónde están los hábitats A y B en

relación a la vereda D?, ¿cuál es la distribución de los hábitats A y B en relación a los factores ambientales X, Y, Z?, ¿cuál puede ser la distribución de los vectores si las condiciones ambientales persisten?, ¿cuál puede ser la distribución de los vectores si el factor ambiental X es alterado?

Análisis espacial

En animales invertebrados y vertebrados (también en grupos vegetales) se presentan distribuciones espaciales no aleatorias (44-46). Así mismo, se ha demostrado que la distribución

espacial de factores abióticos como precipitación y temperatura sigue complejos patrones espacio-temporales (47-50). A partir de estas comprobaciones se ha desarrollado el paradigma espacial de la ecología (51), el cual reconoce la relevancia del espacio y de las estructuras espaciales en el funcionamiento de los ecosistemas. El análisis de las distribuciones espaciales es fundamental en diferentes disciplinas científicas, entre las que se incluyen la ecología, epidemiología, entomología, geología, geografía, entre otras.

Bajo el nombre genérico de análisis espacial se engloba a un conjunto de técnicas encaminadas a analizar cuantitativamente datos espacialmente explícitos (52), para de esta manera describir patrones espaciales, identificar agrupamientos o *clusters* de enfermedades y explicar o predecir riesgos. Los patrones espaciales se pueden clasificar como regulares, aleatorios o agrupados. En el caso de patrones agrupados, estos se pueden analizar mediante métodos locales o globales. Los patrones agregados pueden aparecer debido a varias razones, entre ellas, la presencia de vectores de enfermedades en localidades específicas y la localización de un factor de riesgo, entre otros. Las agrupaciones se pueden medir mediante simulaciones de Monte-Carlo, las cuales determinan la significación estadística de la agrupación.

Para el estudio de los datos agregados se pueden usar métodos estadísticos de autocorrelación, los cuales permiten estimar el grado de similitud espacial observado entre valores de un atributo sobre el área de estudio. Existen varios estadísticos para medir la autocorrelación, entre ellos podemos citar el de Moran's I, Geary's C y Tango's entre otros. Para el caso de datos puntuales se usan los métodos de Cuzick y Edwards' k-nearest, la función K de Ripley's, Rogerson's cumulative sum o método cusum, etc. (53).

La distribución geográfica de los vectores de enfermedades y la influencia que sobre ellos ejercen los factores ambientales es un campo de amplio desarrollo (24,54,55). La evaluación

cuantitativa de tales eventos se empezó a medir de forma adecuada con el surgimiento y aplicación de los SIG, los análisis espaciales y SR (24,25). Estas técnicas tienen un gran potencial para contribuir a la investigación y a los estudios operativos en epidemiología y ciencias de la salud, por su capacidad de manejar la dimensión espacial e integrar datos provenientes de diversas fuentes de manera que se pueden dilucidar nuevos patrones y relaciones espaciales. Lo anterior sumado a la reducción en los costos y el incremento en el fácil acceso de los datos obtenidos por sensores remotos ha permitido que su uso este dentro del alcance de la mayoría de los investigadores (56).

La distribución de los eventos de transmisión de las enfermedades y distribución de vectores puede agruparse en tiempo y espacio y de esta forma proveer pistas sobre las causas de los procesos, asistir en el monitoreo, formulación de planes de prevención, control y toma de decisiones en salud pública mediante la construcción y prueba de modelos predictivos basados en la inferencia estadística (53,56). Desde este punto de vista, los futuros estudios epidemiológicos deben buscar hacer uso explícito de la información espacial e incluir la medición de la localización espacial de los fenómenos, que permita hacer un análisis completo de los escenarios epidemiológicos de las enfermedades (56).

El uso de información referenciada espacial y temporalmente ha sido utilizado con éxito en diferentes aspectos de ecología de insectos y, específicamente en el área de las ETV, se han realizado diferentes estudios para predecir la distribución de vectores de Leishmaniasis (57), malaria (58,59), dengue (60,61) entre muchos más. Igualmente se han realizado trabajos enfocados a hacer predicciones de presencia/ausencia, densidad, tasas de infección natural y riesgo de transmisión vectorial por triatomíneos vectores de enfermedad de Chagas (25,38,39,62-65). Es así como la distribución geográfica de *T. infestans* se ha correlacionado con variables biofísicas calculadas a partir de datos obtenidos por satélites meteorológicos a escala continental y

también se ha correlacionado con el efecto de la temperatura (63).

Se han desarrollado modelos de distribución geográfica usando datos ambientales obtenidos de sensores remotos para especies de triatomos como *R. pallescens* (65); *Triatoma pseudomaculata*, *Triatoma wygodzinskyi* (66) y *R. neglectus* en Brasil (67); especies del complejo *protracta* y sus potenciales reservorios en México (68); así como para analizar la distribución de otras especies de Triatominae en México (69); diferenciar nichos ecológicos de *T. brasiliensis* en el noreste

de Brasil (39). Así mismo, se han realizado estudios para determinar los patrones espacio temporales de reinfestación por triatomos en Argentina (70,71). Arboleda y col., 2009 (65) desarrollaron un modelo de distribución de *R. pallescens* en Colombia, hallando que el déficit de presión de vapor es la principal variable para describir la distribución de esta especie en el país y recientemente Parra et al., 2010 (datos no publicados) han desarrollado un modelo predictivo de la distribución de *T. dimidiata* en Colombia, usando modelado de nicho ecológico. (Figura 3).

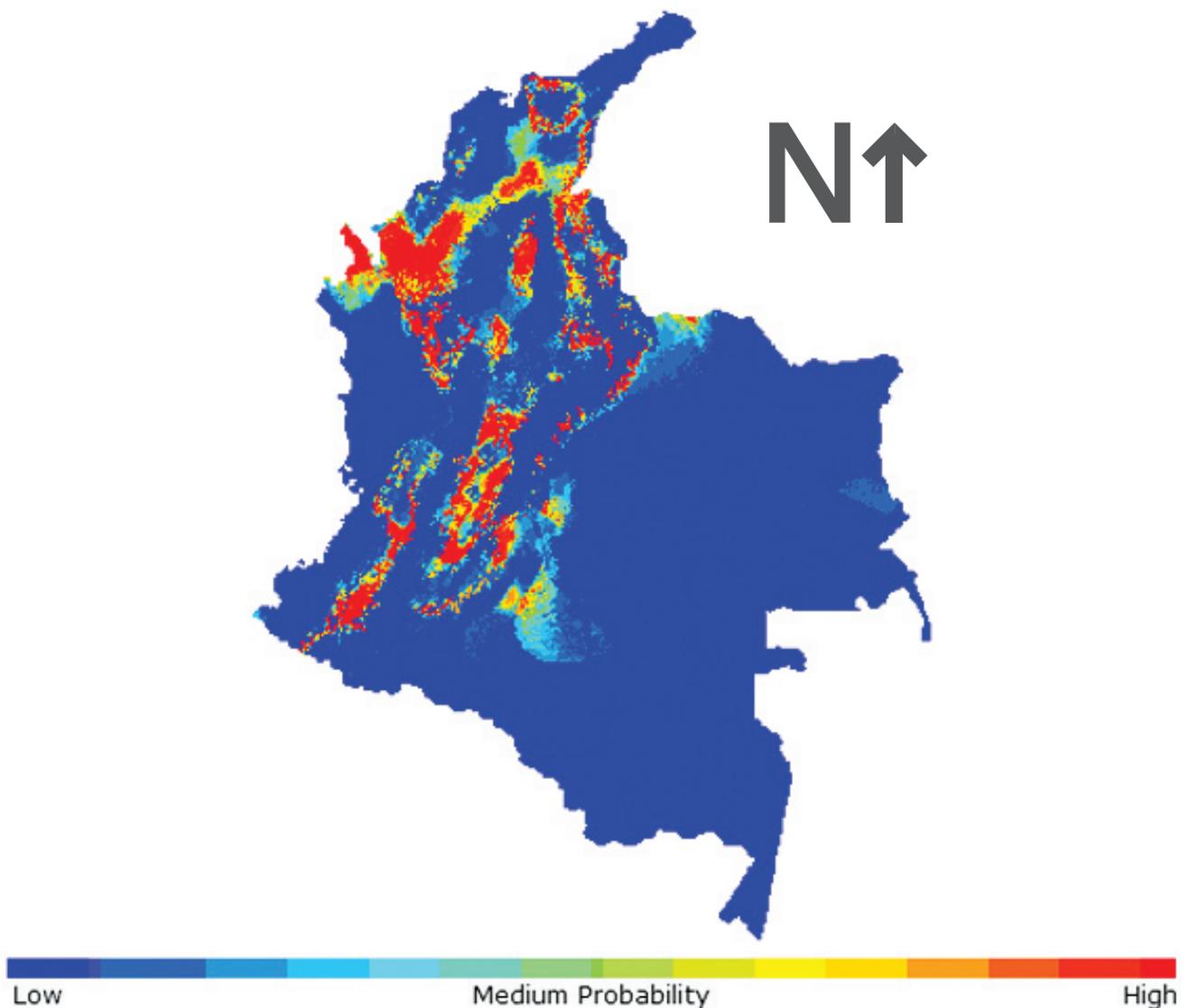


Figura 3. Modelo predictivo de distribución de *T. dimidiata* en Colombia. Predicción realizada mediante el uso del algoritmo GARP

Desarrollo futuro en Colombia, a modo de conclusión.

Se ha descrito el potencial que tienen las herramientas de SIG y SR para estudiar la distribución de especies de vectores de importancia en salud pública, herramientas que los investigadores han incorporado cada vez más a los diferentes estudios que desarrollan sobre vectores de malaria, dengue y Chagas entre otras ETV. Estas aplicaciones de decisiones espaciales deben trascender el ámbito investigativo básico y pasar a formar parte de los programas de los entes gubernamentales encargados de la prevención y control de ETV (direcciones locales y departamentales de salud, y el nivel central del Ministerio de Salud).

En estas instancias, estas herramientas han tenido poco uso debido a diferentes factores, entre los cuales se puede mencionar: a) entendimiento limitado de los principios y metodologías de los SIG aplicados a ETV, b) no se cuenta con una metodología de toma de datos estandarizada para las diferentes regiones del país, c) falta de entrenamiento del personal de los programas y, d) carencia de adecuado compromiso para asegurar la continuidad de las decisiones espaciales. Es necesario contar con plataformas compartidas en las cuales se tenga acceso y se puedan actualizar bases de datos en tiempo real sobre varios aspectos de los vectores: variaciones espacio temporales, comportamiento de picadura, sitios de cría, resistencia a insecticidas, etc. El acceso a estas bases de datos podría llevarse a cabo a través del desarrollo de una página en red, la cual pueda ser nutrida con información obtenida en terreno por las direcciones locales de salud, centros de investigación y universidades. Iniciativas como estas han sido desarrolladas internacionalmente y bien definidas y recopiladas en el trabajo de Hay y col., 2010 (72), entre las cuales cabe resaltar a Mosquito Map (www.mosquitomap.org), disease vector database (www.diseasevectors.org) y Mara (www.mara.org.za)

La incorporación de estas herramientas en los programas rutinarios de control, puede redundar en una mayor y más eficaz focalización de las áreas de riesgo y en una más eficiente foca-

lización de las áreas a intervenir y por ende en acciones de control costo-efectivas que redundarán en el bienestar de los pobladores de las zonas endémicas.

REFERENCIAS

1. Botero D, Restrepo M. Parasitosis Humanas, cuarta edición, Medellín: CIB Editores 2003.
2. Barros-Battesti D, Arzua M, Bechara G. Carrapatos de Importancia Medico-Veterinaria da Regiao Neotropical (UM guía ilustrado para identificacao de especies), primera edición, Sao Paulo, Vox/ICTTD-3/Butantan, 2006.
3. Hay SI, Tatem AJ, Graham AJ, Goetz SJ, Rogers DJ. Global environmental data for mapping infectious disease distribution. *Adv in Parasitol* 2006; 62: 37-77.
4. Hay SI. An overview of remote sensing and geodesy for epidemiology and public health application. *Adv in Parasitol* 2002; 47: 2-35.
5. Thomson C, Harper J, Begon M. *Essentials of Ecology*, Blackwell Science, Oxford UK. 2000.
6. Millenium Ecosystem Assesment, *Ecosystems and Human well-being: biodiversity synthesis*, World Resources Institute, Washington DC 2005.
7. Kitron U. Landscape ecology and epidemiology of vector-borne diseases: tools for spatial analysis. *J Med Entomol* 1998; 35:435-445.
8. Ford J. *The role of the tripanosomiasis in African ecology*. Claredon, Oxford 1971.
9. Hoogstraal H. The epidemiology of tick-borne Crimean Congo hemorrhagic fever in Asia, Europe and Africa. *J Med Entomol* 1979; 13: 307-417.

10. Maupin G, Fish D, Zultowski J, Campos E, Piesman J. Landscape ecology of Lyme disease in a residential area of Westchester county, New York. *Am J Epidemiol* 1991; 133: 1105-1113.
11. Reisen W, Lothrop S, Presser J, Hardy J, Gordon E. Landscape ecology of arboviruses in southeastern California: temporal and spatial patterns of enzootic activity in Imperial Valley 1991-1994. *J Med Entomol* 1997; 34: 179-188.
12. Roberts DR, Laughlin L, Hsheih P, Legters L. DDT, global strategies, and a malaria control crisis in South America. *Emerg Infect Dis* 1997; 3 (3): 295-302.
13. Mouchet JS, Manguin J, Sircoulon S, Laventure O, Faye AW, Onapa P, et al. Evolution of malaria in Africa for the past 40 years: Impact of climatic and human factors. *J Am Mosq Control Assoc* 1998;14: 121-130.
14. Curtis CF & Lines JD. Should DDT be banned by international treaty? *Parasitol Today* 2000;16: 119-121
15. Patz JA, Graczyk TK, Geller N, Vittor AY. Effects of environmental change on emerging parasitic diseases. *Int J Parasitol* 2000;30: 1395-1405
16. Tadei WP, Thatcher BD, Santos JM, Scarpasasa VM, Rodrigues IB, Rafael MS. Ecologic observations on anopheline vectors of malaria in the Brazilian Amazon. *Am J Trop Med Hyg* 1998;59(2): 325-35
17. Pavlovsky EN. Natural nidity of transmissible diseases with special reference to the landscape epidemiology of zoonthroposes. Urbana IL: University of Illinois press, 1966.
18. Zeledón, R., Rabinovich, J.E. Chagas disease: An ecological appraisal with special emphasis on its insect vectors. *Ann. Rev.Entomol.* 1981;26:101-33.
19. Noireau F, Carbajal de la Fuente AL, Macedo LC, Diotauti L. Some considerations about the ecology of Triatominae. *An Acad Bras Cienc* 2005; 77:1-6
20. Walsh JF, Molyneux DH, Birley MH. Deforestation: effects on vector borne diseases. *Parasitology* 1993;106 (suppl.):55-75.
21. Pojo de Rego I, Ferreira WA, Rangel M, Ferreira G, Noireau F. Peridomestic structure, farming activity and triatominae infestation. *Parasite* . 2006;13:237-243.
22. Ceballos LA, Cardinal MV, Vasquez-Prokopec GM, Lauricella MA, Orozco MM, Cortinas R, et al. Long-term reduction of *Trypanosoma cruzi* infection in sylvatic mammals following deforestation and sustained vector surveillance in Northwestern Argentina. *Acta Trop* 2006; 98: 286-296.
23. Cracknell AP. Synergy in remote sensing-what's in a pixel?. *Int J Rem Sens* 1998; 19(11): 2025-2047
24. Kalluri S, Gilruth P, Rogers D, Szczur M. Surveillance of arthropod vector-borne infectious diseases using remote sensing techniques: a review. *Plos Pathogens* 2007; 3(10):1361-1371.
25. Gorla D. Introducción a los sistemas de información geográfica y al uso de sensores remotos. Curso taller internacional: Sistemas de información geográfica, sensores remotos y genética poblacional de vectores y parásitos aplicados al control de la enfermedad de Chagas. Gulh F y Jaramillo Editores. Univesidad de los Andes, 2002
26. Wood BL, Beck LR, Washino RK, Palchick SM, Sebesta D. Spectral and spatial characterization of rice field mosquito habitat. *Int J Remote Sens* 1991; 12: 621-626.
27. Sithiprasasna R, Lee WJ, Ugsang DM, Linthicum KJ. Identification and characterization of

larval and adult anopheline mosquito habitats in the Republic of Korea: potential use of remotely sensed data to estimate mosquito distributions. *Int J of Health Geogr* 2005;4:17.

28. Hay SI, Omumbo JA, Kraig MH, Snow RW. Earth observation geographic information systems and *Plasmodium falciparum* malaria in Sub-Saharan Africa. *Adv Parasitol* 2000; 47: 174–206.
29. Barnes CM, Cibula CG. Some implications of remote sensing technology in insect control programs including mosquitoes. *Mosq News* 1979; 39: 271–282.
30. Wagner VE, Hill-Rowley R, Newson H D. Remote sensing: A rapid and accurate method of data acquisition for a newly formed mosquito control district. *Mosq News* 1979; 39: 271–282.
31. Pope KO, Sheffner EJ, Linthicum KJ, Bailey CL, Logan TM, et al. 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* 1992; 40:185–196.
32. Beck LR, Rodriguez MH, Dister SW, Rodriguez AD, Rejmankova E, et al. Remote sensing as a landscape epidemiologic tool to identify villages at high risk for malaria transmission. *Am J Trop Med Hyg* 1994;51: 271–280.
33. Rejmankova E, Savage HM, Rodriguez MH, Roberts DR, Rejmanek M. Aquatic vegetation as a basis for classification of *Anopheles albimanus* Wiedemann (Diptera: Culcidae) larval habitats. *Environ Entomol* 1992; 21:598-603.
34. Rejmankova E, Roberts DR, Pawley A, Manguin S, Polanco J. Predictions of adult *Anopheles albimanus* densities in villages based on distances to remotely-sensed larval habitats. *Am J Trop Med Hyg* 1995; 53:482-488.
35. Wood B, Washino R, Beck L, Hibbard K, Pitcairn M, et al. Distinguishing high and low

Anopheline-producing rice fields using remote sensing and GIS technologies. *Prev Vet Med* 1991; 11:277-288.

36. Roberts DR, Paris JF, Manguin S, Harbach RE, Woodruff R. Predictions of malaria vector distribution in Belize based on multispectral satellite data. *Am J Trop Med Hyg* 1996; 57: 304–308.
37. Achee NL, Grieco JP, Masuoka P, Andre RG, Roberts DR. Use of remote sensing and geographic information systems to predict locations of *Anopheles darlingi*-positive breeding sites within the Sibun River in Belize Central America. *J Med Entomol* 2006; 43: 382–392.
38. Dumonteil E, Gourbiere S. Predicting *Triatoma dimidiata* abundance and infection rate: a risk map for natural transmission of Chagas' disease in the Yucatan peninsula of Mexico. *Am J of Trop Med and Hygien* 2004; 70: 514-519
39. Costa J. Ecological niche modelling and differentiation of populations of *Triatoma brasiliensis*, the most important Chagas disease vector in northeastern Brazil. *American Journal of Tropical Medicine Hygiene* 2002; 67:516-20.
40. Burrough PA, McDonell R. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 2006.
41. Longley P. Geographic Information Systems and Science, Wiley, 2001
42. Tangarife C. Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en Salud Pública. En: Jaramillo N, Parra G, Triana O editores. VIII Curso Internacional: Ecoepidemiología de la enfermedad de Chagas y métodos para su estudio. Medellín, Marín Vieco, 2005
43. Johnston C. Geographic Information Systems in Ecology. Blackwell Science, 1998
44. Rossi JP. Short-range structures in earthworm spatial distribution. *Pedobiologia* 2003; 47: 582-587.

45. Maestre FT, Rodriguez F, Bautista S, Cortina J, Bellot J. Spatial associations and patterns of perennial vegetation in a semi-arid steppe: a multivariate geostatistics approach. *Plant Ecol* 2005; 179: 133-147.
46. Barnes RJ, Baxter SJ, Lark RM. Spatial covariation of *Azotobacter* abundance and soil properties: A case study using the wavelet transform. *Soil Biology and Biochemistry* 2007; 39: 295-310.
47. Ryel RJ, Caldwell M, Manwaring JH. Temporal dynamics of soil spatial heterogeneity in sagebrush-wheatgrass steppe during a growing season. *Plant and Soil* 1996; 184: 299-306.
48. Ettema C H, Wardle DA. Spatial soil ecology. *Trends Ecol Evol* 2002; 17: 177-83.
49. Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma* 2002; 105: 259-275.
50. Gallardo A, Paramá R, Covelo F. Soil ammonium vs. nitrate spatial pattern in six plant communities: simulated effect on plant populations. *Plant and Soil* 2005; 277: 207-219.
51. Tilman D, Kareiva, P eds. *Spatial Ecology: The role of space in population dynamics and interspecific interactions*. Princeton University Press, Princeton, USA 1997.
52. Legendre P, Fortin MJ. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 1989; 80: 107-138.
53. Pfeiffer D, Robinson T, Stevenson M, Stevens K, Rogers D, Clements A. *Spatial Analysis in Epidemiology*. Oxford University Press 2008.
54. Rogers D, Randolph S. Mortality rates and population density of tse tse flies correlated with satellite imagery. *Nature* 1991; 351:739-741.
55. Thomson MC, Connor SJ. Environmental information systems for the control of arthropod vectors of disease. *Med Vet Entomol*, 2000; 14:227-244.
56. Graham AJ, Atkinson PM, Danson FM. Spatial analysis for epidemiology. *Acta Trop* 2004; 91:219-225.
57. Peterson AT, Pereira RS, De Camargo V. Using epidemiological survey data for infer geographic distributions of leishmaniasis vector species. *Rev Soc Bras Med Trop* 2004; 37:10-14.
58. Levine RS, Peterson AT, Benedict MQ. Geographic and ecologic distributions of *Anopheles gambiae* complex predicted using genetic algorithm. *Am J Trop Med Hyg*, 2004; 70(2): 105-109.
59. Leonardo LR, Rivera PT, Crisostomo BA, Sarol JN, Bantayan NC, Tiu WU et al. A study of the environmental determinants of malaria and schistosomiasis in the Philippines using remote sensing and geographic information systems. *Parassitologia* 2005; 47: 105-114.
60. Rosa-Freitas MG, Tsouris P, Sibajev A, De Souza ET, Ubirajara A, Ferreira R. Exploratory temporal and spatial distribution analysis of dengue notifications in Boa Vista, Roraima, Brazilian Amazon, 1999-2001. *Dengue Bull* 2003; 27: 63-80.
61. Ali M, Wagatsuma Y, Emch M, Breiman RF. Use of geographic information system for defining spatial risk for dengue transmission in Bangladesh: role for *Aedes albopictus* in an urban outbreak. *Am J Trop Med Hyg* 2003; 69(6): 634-640
62. Rodrigueiro M, Gorla D. Latitudinal gradient in species richness of the New World Triatominae (Reduviidae). *Global Ecol Biogeograph*. 2004; 13: 75-84.
63. Gorla DE. Variables ambientales registradas por sensores remotos como indicadores de la distribución geográfica de *Triatoma infestans*. *Ecología Austral* 2002; 12: 117-127.

64. Bustamante DM, Monroy C, Rodas A, Juarez J, Malone J. Environmental determinants of the distribution of Chagas disease vectors in south-eastern Guatemala. *Geospatial Health* 2008; 2: 199-211.
65. Arboleda S, Gorla D, Porcasi X, Saldaña A, Calzada J, Jaramillo N. Development of a geographical distribution model of *Rhodnius pallescens* Barber, 1932 using environmental data recorded by remote sensing. *Infect Genet Evol*, 2009; 9: 441-448.
66. Carbajal de la Fuente AL, Porcasi X, Noireau F, Diotaiuti L, Gorla D. The association between geographic distribution of *Triatoma pseudomaculata* and *Triatoma wygodzinsky* (Hemiptera: Reduviidae) with environmental variables recorded by remote sensors. *Infect Genet Evol* 2009; 9: 54-61.
67. Gurgel-Goncalves R, Cuba CA. Predicting the potential geographical distribution of *Rhodnius neglectus* (Hemiptera: Reduviidae) based on ecological niche modeling. *J Med Entomol* 2009; 46(4): 952-960.
68. Peterson AT, Sanchez-Cordero V, Beard CB, Ramsey JM. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerg Infect Dis* 2002; 8: 662-667.
69. Sandoval-Ruiz CA, Zumaquero –Rios JL, Rojas-Soto OR. Predicting geographic and ecological distributions of triatominae species in the southern Mexican state of Puebla using ecological niche modeling. *J Med Entomol* 2008; 45(3):540-546.
70. Cécere, M. C., Vazquez-Prokopec, G. M., Gürtler, R. E. and Kitron, U. Spatio-temporal analysis of reinfestation by *Triatoma infestans* (Hemiptera, Reduviidae) following insecticide spraying in a rural community in northwestern Argentina. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2004;71: 803–810.
71. Vasquez CM, Cecere MC, Canale DM, Gurtler R, Kitron U. Spatiotemporal patterns of reinfestation by *Triatoma guayasana* (Hemiptera: Reduviidae) in a rural community of northwestern Argentina. *J Med Entomol* 2005; 42(4):571-581.
72. Hay S, Sinka M, Okara R, Kabaria C, Mbithi P, Tago C. Developing global maps of the dominant Anopheles vectors of human malaria. *Plos Med* 2010 7(2): e1000209.doi: 10.1371.

