

Mapa de riesgo de transmisión de malaria en la cuenca del río Caura, Venezuela *Risk map of malaria transmission in the Caura river basin, Venezuela*

Domingo Medina^{1*}, Mariapia Bevilacqua¹, Lya Cárdenas¹, Luis Gonzalo Morales², Yasmin Rubio-Palis^{3,4}, Angela Martínez⁵, Virginia Behm¹, Jorge Moreno⁶ & Magda Magris⁷

RESUMEN

Los mapas de riesgo de malaria se han usado para apoyar la optimización de recursos humanos, materiales y financieros disponibles para la prevención y control de la enfermedad. En Venezuela, estos mapas se basan en el Índice Parasitario Anual donde se clasifican municipios en diferentes intervalos de riesgo. Los mismos tienen poca resolución espacial, usan intervalos de riesgo muy amplios y no consideran múltiples factores de riesgo tales como comportamiento biológico de parásitos y vectores, condiciones favorables al contacto hombre-vector y para la prevención y control de la enfermedad. El objetivo del trabajo es identificar áreas de riesgo de malaria en la cuenca del río Caura, estado Bolívar, Guayana venezolana, basado en una evaluación multicriterio de variables ambientales y antrópicas favorables para la transmisión de la malaria. Los criterios de riesgo se expresaron en capas de imágenes raster usando reglas de decisión y se normalizaron usando lógica difusa. La combinación de los criterios produjo un mapa síntesis de valores continuos de riesgo de transmisión de malaria basado en índices de: a) conveniencia climática para la viabilidad de *Anopheles darlingi* y *Plasmodium* spp.; b) conveniencia geomorfológica y de vegetación para la formación de criaderos; c) preferencias de ocupación humana y, d) vulnerabilidad de las comunidades. El mapa se reclasificó en niveles de riesgo y se evaluó superponiendo sobre éste el número de casos de malaria acumulados por nivel de riesgo entre 2000 y 2010, y se discute su importancia para la vigilancia epidemiológica en la región.

Palabras claves: Malaria, mapa de riesgo, evaluación multicriterio, río Caura, Venezuela.

SUMMARY

*Malaria risk maps have been used to support the optimization of the use of human, material and financial resources for the prevention and control of the disease. In Venezuela, these maps are based on annual parasite index, where municipalities are classified using different risk intervals. These maps have low spatial resolution, use risk intervals too broad and do not consider multiple risk factors and their different spatial and temporal scales (eg. biological behavior of parasites and vectors, conditions conducive to man-vector contact and potentially favorable conditions to the prevention and control of the disease). The aim of this study was to identify risk areas of malaria in the Caura River Basin (Venezuelan Guayana), based in a multi-criteria evaluation of climatic, geographical and anthropogenic variables and their suitability for malaria transmission. The risk criteria were expressed spatially as raster image layers using decision rules and normalized using fuzzy logic. The combination of different criteria produced a synthesis map of continuous values of risk of malaria transmission based on the following indexes: a) climatic suitability for the viability of *Anopheles darlingi* and *Plasmodium* spp., b) geomorphologic and vegetation suitability for vector hatching; c) human occupation preferences and d) vulnerability of communities. The resultant map was reclassified in levels of risk and it was evaluated overlaying the number of cases accumulated per level of risk between 2000 and 2010, and its epidemiological surveillance importance is discussed for the region.*

Key words: Malaria risk map, multi-criteria evaluation, Cuenca del Río Caura, Venezuela.

¹ Asociación Venezolana para la Conservación de Áreas Naturales, Caracas, Venezuela

² Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

³ Dirección de Salud Ambiental Ministerio del Poder Popular para la Salud, Maracay, Venezuela

⁴ BIOMED, Universidad de Carabobo, Maracay, Venezuela

⁵ Instituto de Salud Pública del estado Bolívar, Venezuela

⁶ Centro de Investigaciones de Campo "Dr. Francesco Vitanza", Tumeremo, adscrito al Servicio Autónomo Instituto de Altos Estudios "Dr. Arnoldo Gabaldón", Maracay, Venezuela

⁷ Centro Amazónico de Investigación y Control de Enfermedades Tropicales "Simón Bolívar", Puerto Ayacucho, estado Amazonas, Venezuela.

*Autor de correspondencia: medinado@sbcglobal.net

INTRODUCCIÓN

La transmisión de la malaria en una localidad depende de que se presenten condiciones e interacciones a diferentes escalas espaciales y temporales de múltiples variables climáticas, de paisaje y humanas. Estas interacciones influyen sobre el comportamiento biológico de los parásitos y los vectores de la enfermedad, en las condiciones que favorecen o no el contacto hombre-vector, así como en las condiciones que favorecen o limitan la prevención y el control de la enfermedad. En este contexto el comportamiento de la malaria se considera complejo y espacialmente heterogéneo (Grillet *et al.*, 2009; Hay & Snow, 2006; Real & Biek, 2007; Souza-Santos *et al.*, 2008), con implicaciones para identificar áreas de riesgo de transmisión de la enfermedad. Por esta razón, se recomiendan por lo general intervenciones de control espacialmente focalizadas como medidas de bajo costo (Souza-Santos *et al.*, 2008), basadas en la estratificación epidemiológica para orientar esfuerzos de control, centradas en focos calientes responsables de la persistencia del parásito y la exportación de casos (Grillet *et al.*, 2009). Los mapas de riesgo de malaria se usan precisamente para identificar áreas prioritarias de control, a fin de orientar y apoyar las decisiones sobre dónde invertir de forma efectiva y eficiente los recursos humanos, materiales y financieros disponibles. Un problema es que los límites de la distribución espacial entre áreas de alta transmisión y áreas de no transmisión no son precisos, ya que hay un gradiente dinámico producto de variabilidades ecológicas a pequeña escala y cambios temporales en el riesgo de la transmisión (Craig *et al.*, 1999). Un mapa de riesgo debe considerar tanto variables ambientales y heterogeneidad del paisaje, así como variables sociales. Estos elementos juegan un papel en el establecimiento de una enfermedad, específicamente en la dirección, intensidad y velocidad de su diseminación y en la determinación de patrones no aleatorios de su comportamiento (Real & Biek, 2007). En este sentido, la utilidad de tales mapas depende de su resolución espacial y de la capacidad de discernir entre niveles de riesgo. Esto requiere integrar las diferentes escalas de representación de múltiples variables que crean condiciones propicias y potenciales para la transmisión de la malaria.

En Venezuela, los mapas de riesgo de malaria se basan en el Índice Parasitario Anual (IPA) a nivel de municipio (Anché, 1998). Estos mapas tienen poca resolución espacial y no discriminan adecuadamente

los niveles de riesgo en localidades con alto endemismo de malaria, resultando de poca utilidad práctica. Tal es el caso del estado Bolívar donde casi todos los municipios son de alto riesgo. Este tipo de mapa depende del registro sistemático del número de casos de malaria y datos de población actualizados para calcular el IPA, lo cual a su vez requiere de un sistema de vigilancia epidemiológica continuo. En el caso de áreas remotas, la disponibilidad de tales datos es muy limitada. Por otro lado, estos mapas no consideran los múltiples factores de riesgo que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales. Un avance en la detección de áreas de riesgo de infección de malaria en Venezuela es el trabajo de Grillet *et al.* (2009), basado en focos de alta transmisión de *Plasmodium vivax*, usando métodos de estadística espacial para detectar áreas geográficas con proporciones significativas de casos de malaria, considerando su distribución poblacional. La metodología permite delimitar la extensión geográfica de medidas de control para focos persistentes de infección. Sin embargo, los autores reconocen que la metodología está limitada por la calidad de los datos epidemiológicos y demográficos, así como la existencia de casos asintomáticos.

Una alternativa es el modelaje del riesgo de transmisión de malaria propuesta por Craig *et al.*, (1999), utilizando un modelo de lógica difusa para la distribución de la transmisión estable de malaria en África subsahariana, basado en precipitación y temperatura. El modelo mostró ser compatible con datos de campo y mapas históricos a escala continental. No obstante, el modelo estima de forma conservadora la distribución de la malaria al no considerar anomalías a escalas con mayor resolución espacial que puedan afectar la distribución, tales como ríos en planicies de inundación en áreas de baja precipitación, prácticas agrícolas, deforestación, etc. A este respecto, Rincón-Romero & Londoño (2009) adaptan el modelo de Craig *et al.*, (1999) a la resolución espacial y condiciones climáticas húmedas y heterogéneas propias de Buenaventura en el Valle del Cauca, Colombia. En su modelo incluyen variables geomorfológicas y antrópicas para identificar con mayor precisión áreas de riesgo de transmisión de malaria. Los autores reconocen que el modelo no incorpora otras variables de importancia como la movilidad de la población, cobertura y cambio de uso de la tierra, áreas deforestadas asociadas a criaderos de mosquitos o índices parasitarios anuales.

Este trabajo tiene como objetivo elaborar un mapa de riesgo de malaria en la cuenca del río Caura usando una modificación de la metodología de Rincón-Romero & Londoño (2009). Las áreas de riesgo se determinaron a partir de índices de conveniencia de malaria producto de una evaluación de múltiples criterios ambientales (climáticos, paisaje), humanos (demográficos, socio-económicos) y de vulnerabilidad. El mapa resultante tiene implicaciones para orientar decisiones en las políticas y esfuerzos de prevención y control de malaria en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se localiza en la cuenca del río Caura, municipios Sucre y Cedeño del estado Bolívar (Fig. 1). Una descripción general incluyendo población, grupos indígenas, antecedentes del programa de malaria, epidemiología y desafíos para el combate de la enfermedad ha sido previamente publicada (Colchester *et al.*, 2004; Bevilacqua *et al.*, 2009). Sin embargo, pertinente al interés eco-epidemiológico de riesgo de transmisión de la enfermedad, se describen características hidrológicas, geomorfológicas y de vegetación del corredor ribereño del río Caura.

El río Caura es el segundo tributario más importante de la margen derecha del río Orinoco, con una descarga aproximada de 3.500 m³/s y una marcada estacionalidad del caudal (Vargas & Rangel, 1996). Las fluctuaciones del nivel del río disminuyen de norte a sur, con valores promedio de 13 m en su desembocadura y ca 1,5 m en su cuenca alta (confluencia de los ríos Merewari y Waña). La cuenca alta de los ríos Caura y de su principal tributario el río Erebató, presentan paisajes de tierras altas (altiplanicies, plateau y montañas) con pendientes de altas a moderadas, donde a pocas horas de la precipitación aumenta el nivel del río en varios metros y se producen desbordes potenciales a lo largo del corredor ribereño. La temperatura media mensual es comparativamente más baja que el resto de la cuenca y superior a 24 °C. El medio río Caura está dominado por un paisaje de peniplanicies, lomeríos suavemente disectados, canales de ríos mayormente confinados, con potencia alta y desbordes localizados. Este sector tiene una temperatura promedio mensual de 27,7 °C y una variabilidad inter diaria comparativamente menor al resto de la cuenca, propicia para el ciclo de vida de vectores y parásitos. En la cuenca baja del río Erebató

y cuenca media del río Caura, se localiza la mayor superficie sujeta a inundación del sector, con duración entre dos a cuatro meses y variación en la profundidad de la lámina de agua (Rosales *et al.*, 2003b).

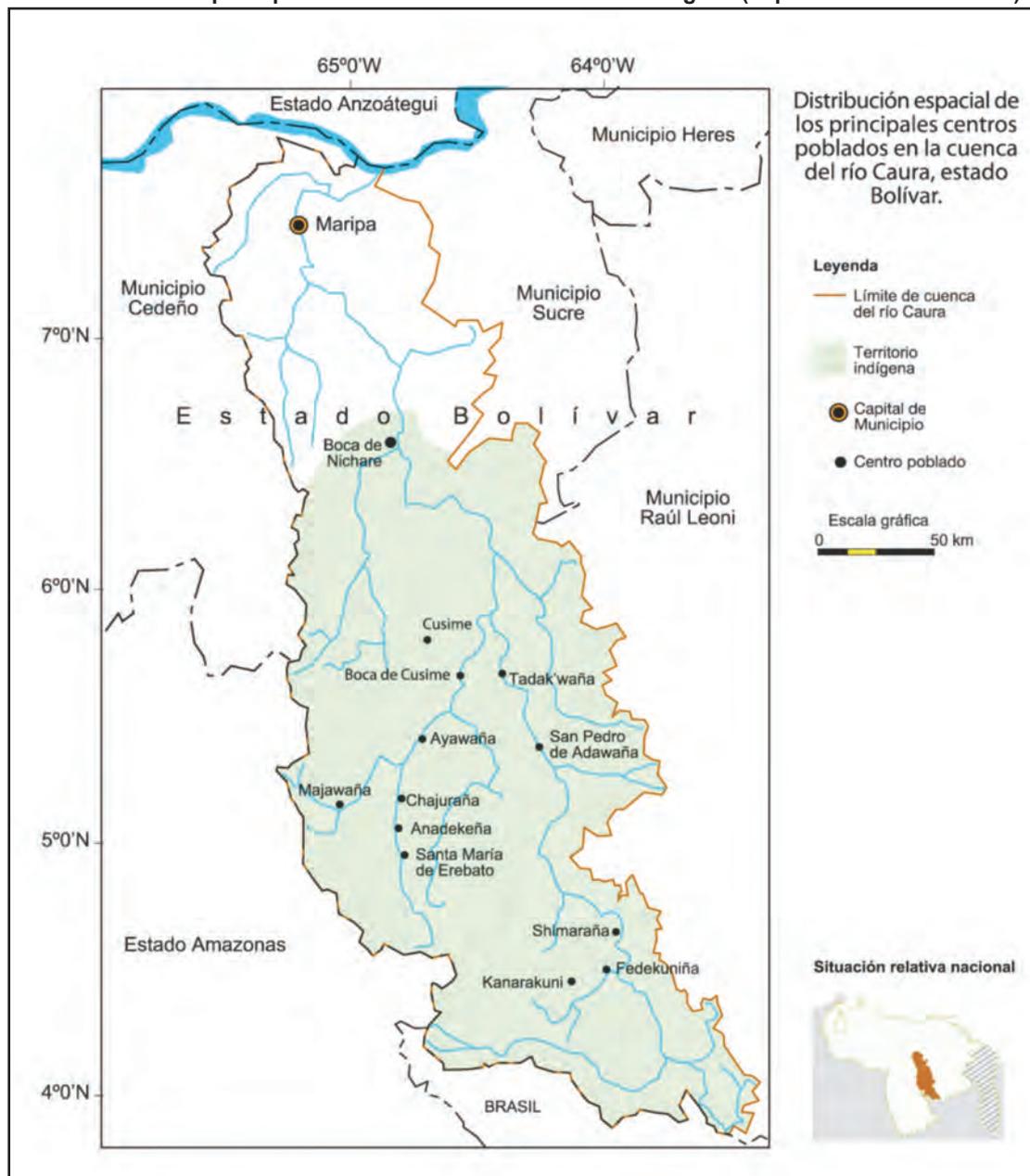
El bajo río Caura se caracteriza por paisajes con pendientes bajas a muy bajas (lomeríos bajos, peniplanicies suaves, planicie), ríos con bajo control estructural y sujetos a desbordes estacionales, asociados a formas de terrenos tales como bancos laterales, complejos de orillar y lagunas laterales al canal principal del río (Fig. 2). En época de aguas altas, el río Caura sufre el fenómeno de represamiento de aguas por efecto del aumento del caudal del río Orinoco y el corredor ribereño se inunda por períodos de dos a cuatro meses. En períodos de sequía quedan al descubierto playas arenosas (barras aluviales), charcas y fondos rocosos inundados donde se han colectado larvas de mosquitos vectores de malaria (Rubio-Palis *et al.*, 2010).

A lo largo del corredor ribereño del Caura y sus principales tributarios se alternan posiciones altas y bien drenadas de bancos arenosos, con posiciones comparativamente más deprimidas de suelos limosos y arcillosos que mantienen la lámina de agua (inundación). Esta variación en la textura de los suelos, drenajes y formas de terreno, determina la alternancia de ciclos de humedad y sequía que favorece la presencia potencial de criaderos de vectores (Rubio-Palis *et al.*, 2010). En estas formas de terreno dominan bosques inundables de tierra firme (Fig. 2), y otros tipos de vegetación arbustiva ribereña relacionada con la profundidad y duración de la lámina de agua, potencia del río, geomorfología ribereña y tipos de suelo (Rosales *et al.*, 2003a). El paisaje del corredor ribereño del río Caura y sus tributarios son de interés para la economía de subsistencia de las comunidades indígenas y también para la eco-epidemiología de la malaria, como discutiremos más adelante en este trabajo.

Metodología

Se realizó una evaluación multi-criterio (EMC) siguiendo la metodología descrita por Delgado & Barredo Cano (2005) y Eastman (2009), para generar índices a partir de la combinación de diversas capas de información (formato raster) que representan criterios de idoneidad o conveniencia de riesgo de transmisión de malaria. Los criterios y las reglas de

Fig. 1. Área de estudio, cuenca del río Caura, municipios Sucre y Cedeño del estado Bolívar, y distribución de las principales comunidades en el territorio indígena (superficie de color verde).



decisión se definen con base en juicio de expertos para normalizar las variables espaciales disponibles. Luego se construye un mapa único o índice compuesto de idoneidad, el cual se reclasifica en categorías de riesgo de transmisión de malaria. El mapa compuesto de idoneidad fue desarrollado usando el programa IDRISI Taiga (Clark Labs, Universidad de Clark) adaptando el índice de idoneidad climática de Craig *et*

al. (1999) y los índices geomorfológicos, naturales y ocupación del territorio de Rincón-Romero & Londoño (2009). Es importante notar que los datos y variables espaciales usados de diferentes fuentes y resoluciones, fueron remuestreadas a 90m de resolución (resolución del modelo digital de terreno utilizado) para poder integrarlas en la evaluación multicriterio. Esta resolución es propicia para generar mapas de escala

entre 1:180.000 y 1:250.000 y apropiada para nuestro objetivo de mapear zonas de riesgo de malaria a escala cuenca. La Fig. 3 muestra los datos y variables para el proceso de construcción de los índices. A continuación se describe el proceso.

1. Índice de Conveniencia Climática para Malaria (ICCM). Constituye las condiciones de precipitación y temperatura promedio anuales favorables para el ciclo de vida de parásitos y vectores de malaria. Se generaron mapas de precipitación y temperatura en función de la altitud, con datos disponibles de seis estaciones pluviométricas y dos climáticas (EDELCA, 2007). Para ello se realizó una regresión lineal simple entre el promedio de precipitación anual (mm) y la altura (msnm) de cada estación

($Y = 187,6 + 0,14X$; $R^2 = 0,76$), al igual que entre el promedio de temperatura anual ($^{\circ}C$) y altura (msnm) de cada estación ($Y = 27,20 - 0,0038X$; $R^2 = 0,88$). La relación lineal se aplicó a cada uno de los valores de altura de un modelo digital de terreno (MDT) del Caura del *Shuttle Radar Topography Mission* (con 90 metros de resolución) para obtener mapas con valores continuos de precipitación y temperatura. Para cada mapa se establecieron rangos de conveniencia para el ciclo de vida de los parásitos *P. vivax* y *P. falciparum* y del vector *Anopheles darlingi* (Tabla I).

La probabilidad de sobrevivencia del mosquito y su abundancia son elementos críticos en el ciclo de transmisión de enfermedades por vectores

Fig. 2. Características geomorfológicas e hidrológicas (A) y de vegetación en un transecto perpendicular a la margen izquierda del cauce principal (flecha) a la altura de la comunidad Jabillal (B), de importancia eco-epidemiológica en el corredor ribereño del bajo río Caura, estado Bolívar. Venezuela.

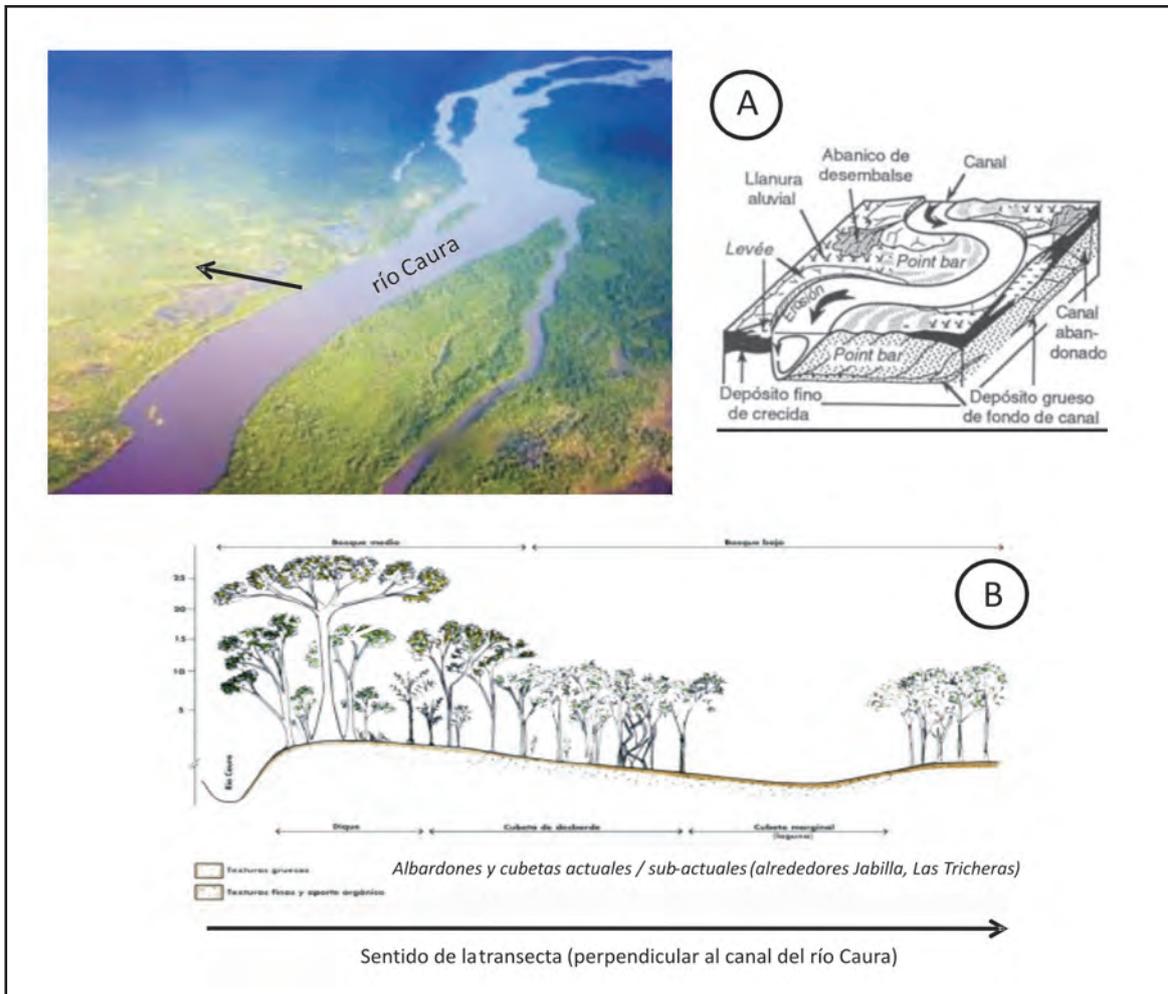


Tabla I. Variables, índices y umbrales usados para identificar áreas de riesgo de transmisión de malaria.

Variables e Índices	Condicionantes de riesgo de malaria	Data y Fuentes de información	Unidad	Tipo y forma de la función	Rango de valores de conveniencia *	Puntos de inflexión			
						a	b	c	d
Precipitación	Precipitación conveniente para el ciclo de vida de parásitos y vectores de malaria.	Promedio anual / Estaciones de Edelca y MARN.	mm	Sigmoidea Simétrico	30 - 400	30	100	300	400
Temperatura	Temperatura conveniente para el ciclo de vida de parásitos y vectores de malaria.	Promedio anual / Estaciones de Edelca y MARN.	°C	Sigmoidea Simétrico	16 - 40	16	26	28	40
ICCM Índice Conveniencia climática para malaria	Precipitación y Temperatura promedio conveniente para el ciclo de vida de parásitos y vectores de malaria.	Promedio anual (Precipitación + Temperatura) / 2.	mm / °C		Valor normalizado 1 o cercano a 1				
DLDA Distancia a línea de drenajes ajustado por paisajes	Distancia ajustada por susceptibilidad de los siguientes paisajes a recibir desbordamientos e inundaciones, pertinentes a la formación de criaderos de vectores de malaria: <i>Planicie, Valle, Peniplanicie</i> <i>Lomerío, Piedemonte</i> <i>Montaña, Altiplanicie, Plateau</i>	Cuerpos de agua (ríos y quebradas): Modelo Digital de Terreno 90 m resolución - SRTM. Mapas KUYUJANI y Cartografía Nacional 1:250.000 / Paisaje (Mapa TECMIN 1:250.000).							
			m	Sigmoidea monotónica descendente	0 - 500	0	0	0	500
					0 - 100	0	0	0	100
					0 - 1	0	0	0	1
PCAA Pendiente conveniente para la acumulación de agua	Áreas de pendiente baja que facilitan la acumulación de agua y la consecuente formación de criaderos de vectores de malaria.	Modelo Digital de Terreno 90 m resolución - SRTM.	grados	Sigmoidea Monotónica descendente	0° - 10	0	0	0	10
IVM Índice de Vegetación Mejorado	Cobertura de vegetación conveniente para hábitats de anofelinos vectores de malaria.	Imagen EVI (Enhanced Vegetation Index) - MODIS 16 días compuesto (Mayo 20, 2010) 250 m resolución.	Escala -1 a +1	Sigmoidea Simétrico	0,2 - 0,4	0,2	0,3	0,35	0,4
ICGVM Índice Conveniencia Geomorfológica y de Vegetación para malaria	Condiciones de paisaje y de cobertura de vegetación favorables para criaderos y hábitats de anofelinos vectores de malaria.	(PCAA+DLDA+IVM) / 3	Valores entre 0 - 1		Valor normalizado 1 o cercano a 1				
ICNM Índice Conveniencia natural para malaria	Condiciones físico-naturales y climáticas favorables para el ciclo de vida de anofelinos vectores y parásitos.	(ICCM+ICGVM) / 2	Valores entre 0 - 1		Valor normalizado 1 o cercano a 1				
PCOT Pendiente conveniente para la ocupación del territorio	Áreas de pendiente preferente para la localización espacial de asentamientos humanos y actividades agrícolas.	Modelo Digital de Terreno 90m resolución - SRTM.	grados	Sigmoidea Monotónica descendente	0° - 10°	0	0	0	10
DAA Distancia de acceso a agua para consumo humano	Distancia euclidiana a líneas red de drenaje con agua permanente para consumo humano.	Cuerpos de agua (ríos y quebradas) Modelo Digital de Terreno 90 m resolución - SRTM, Mapas de Kuyujani, Mapas de Cartografía Nacional 1:250.000.	m	Sigmoidea Monotónica descendente	0 - 500 m	0	0	0	500
DAV Distancia de acceso a vialidad terrestre	Distancia euclidiana a vías de acceso terrestre (tierra y asfaltada).	Datos de GPS / Mapas de Cartografía Nacional 1:250.000 (2003).	m	Sigmoidea Monotónica descendente	0 - 5.000 m	0	0	0	5.000
DCP Distancia a centros poblados	Distancia a centros poblados con infraestructura y servicios.	Puntos de GPS de centros poblados.	m	Sigmoidea Monotónica descendente	0 - 5.000 m	0	0	0	5.000
IPOT Índice preferencia de ocupación del territorio	Condiciones de preferencia de ocupación del territorio y concentración demográfica.	(PCOT+DAA+DAV+DCP) / 4	Valores entre 0 - 1		Valor normalizado 1 o cercano a 1				
DPG Distancia a centros poblados grandes	Distancia a asentamientos con más de 130 habitantes, servicios que atrae flujos de población incrementando oportunidades para la dispersión del parásito (semilla) entre poblaciones humanas.	Puntos de GPS y población de centros poblados / Censo Nacional, CENASA, proyección de población).	número de personas	Sigmoidea Monotónica descendente	0 - 5.000 m	0	0	0	5.000
DCM Distancia - Costo a Maripa	Distancia (considerando costo por altitud) a la Capital del Municipio, que atrae mayor flujo de población en la cuenca y oportunidades de transmisión de la malaria.	Punto GPS de Maripa / Modelo Digital de Terreno 90 m resolución - SRTM.	m	Sigmoidea Monotónica descendente	0 - 9.000 ecc	0	0	0	9.000
DAS Distancia a acceso a salud	Distancia a centros poblados con ambulatorios u hospitales.	Punto GPS de centro poblado con ambulatorio u hospital.	m	Sigmoidea Monotónica ascendente	0 - 24.000 m	0	24.000	0	

Nota: Puntos de inflexión: a = membresía emerge por encima de 0; b = membresía se convierte en 1; c = membresía cae por debajo de 1; d = membresía se convierte en 0. * Condiciones necesarias para que la variable contribuya como factor de riesgo.

donde factores exógenos como la temporalidad de la precipitación y la temperatura juegan un papel importante (Craig, *et al.* 1999). Para que un vector sea eficiente, un número considerable de individuos de una especie dada debe sobrevivir lo suficiente para permitir el desarrollo de la esporogonia de *Plasmodium* spp. (Barros *et al.*, 2011).

En el caso de *An. darlingi* la relación entre picos de abundancia y patrones de precipitación y temperatura varían en diferentes localidades o regiones (Hiwat & Bretas 2011). Según Rubio-Palis & Zimmerman (1997) el rango de distribución de esta especie en Suramérica incluye parámetros climáticos que van desde 0 a 1500 msnm de altitud, 20 a 28°C de temperatura y 100 a 2500 mm de precipitación. En Venezuela, *An. darlingi* se distribuye en áreas fisiográficas de llanos y bosques bajos por debajo de los 500 msnm con precipitaciones anuales entre 750 y 3500 mm y temperaturas medias anuales entre 26 y 28°C (Osborn *et al.*, 2004).

Anopheles darlingi en áreas ribereñas se encuentra por lo general en cuerpos de agua relativamente extensos, profundos y claros con condiciones químicas y físicas relativamente estables tales como lagos, pantanos y ríos (Rozendaal, 1992; Sinka *et al.*, 2010). Según Giglioli (1938), estos hábitats dependen de la precipitación la cual incrementa la disponibilidad de criaderos, observándose los picos de abundancia y la ampliación de la distribución durante los meses inmediatos después de temporadas de lluvia (Roberts *et al.*, 2002).

Si bien algunos estudios señalan que *An. darlingi* requiere de alta precipitación (Rozendaal, 1987; Reynes *et al.*, 1995; Villalobos-Salcedo *et al.*, 1998; León *et al.*, 2003; Magris *et al.*, 2007), las lluvias muy intensas pueden inundar y desbordar los criaderos llevándose las larvas, resultando en la disminución de la densidad o ausencia total del vector; observándose un incremento de la densidad en períodos de sequía o en transición entre sequía y lluvia (Hiwat & Bretas, 2011). En la Amazonia Brasileña se ha observado que la precipitación parece estar inversamente relacionada con la tasa de sobrevivencia diaria y densidad de *An. darlingi* hembras adultas y el número de casos de malaria (Barros *et al.*, 2011).

En este sentido, en forma indirecta, el rango de conveniencia de precipitación para el modelo de

riesgo se estableció entre 30 y 400 mm promedio anual, con óptimo entre 100 y 300 mm. Este rango se basa en la relación observada entre el promedio de milímetros de precipitación mensual y el promedio de casos de malaria mensual en el Cauca entre 2000-2008 (datos del proyecto no publicados). Los promedios más altos de casos se presentan entre Enero y Marzo cuando la precipitación se mantiene por debajo de 100 mm mensuales. Los casos empiezan a disminuir en Abril a la par del aumento en la precipitación y en Mayo la tendencia continua considerablemente a más de 300 mm de lluvia promedio mensual. Entre Junio y Agosto, el promedio de número de casos está en su mínimo cuando el promedio mensual de precipitación está por encima de los 400 mm.

Para la temperatura, el rango se definió entre 16 - 40°C promedio anual, con óptimo entre 26 y 28°C. Este rango se estableció con base al óptimo de la duración de la esporogonia del parásito dentro del vector de acuerdo a los métodos de Moshkovsky & Rashina (1951) y Oganov-Rayevsly (1947) (citado por WHO, 1975), así como la temperatura óptima para el desarrollo del vector (Sinka *et al.*, 2010). Barros *et al.* (2011) indican que el tiempo para el desarrollo de la esporogonia de *Plasmodium* spp. en *An. darlingi* no se ha investigado específicamente pero se espera que varíe en función de la temperatura. Para el *P. vivax* se requieren aproximadamente 10 días (rango entre 8 y 13 días) a una temperatura entre 27-28 °C con una temperatura base (mínima) de 14.5°C. Para el *P. falciparum* la temperatura permisiva para el desarrollo de la esporogonia se ha establecido entre 16-32°C (Detinova, 1963).

Para integrar los mapas, cada uno se normalizó usando una curva difusa de tipo sigmoidal (usando el módulo fuzzy de Idrisi Taiga) para transformar los valores de precipitación y temperatura de cada píxel a una escala de valores comunes entre 0 (no favorable) a 1 (favorable) para el ciclo de vida de parásitos y vectores. El índice de conveniencia climática para la transmisión de la malaria es el promedio aritmético entre los valores de cada uno de los píxeles de los dos mapas (Fig. 3).

2. Índice de Conveniencia Geomorfológica y de Vegetación para Malaria (ICGVM). Referido a las condiciones de paisaje y vegetación favorables para criaderos y hábitat de anofelinos vectores de malaria. Las variables espaciales utilizadas fueron:

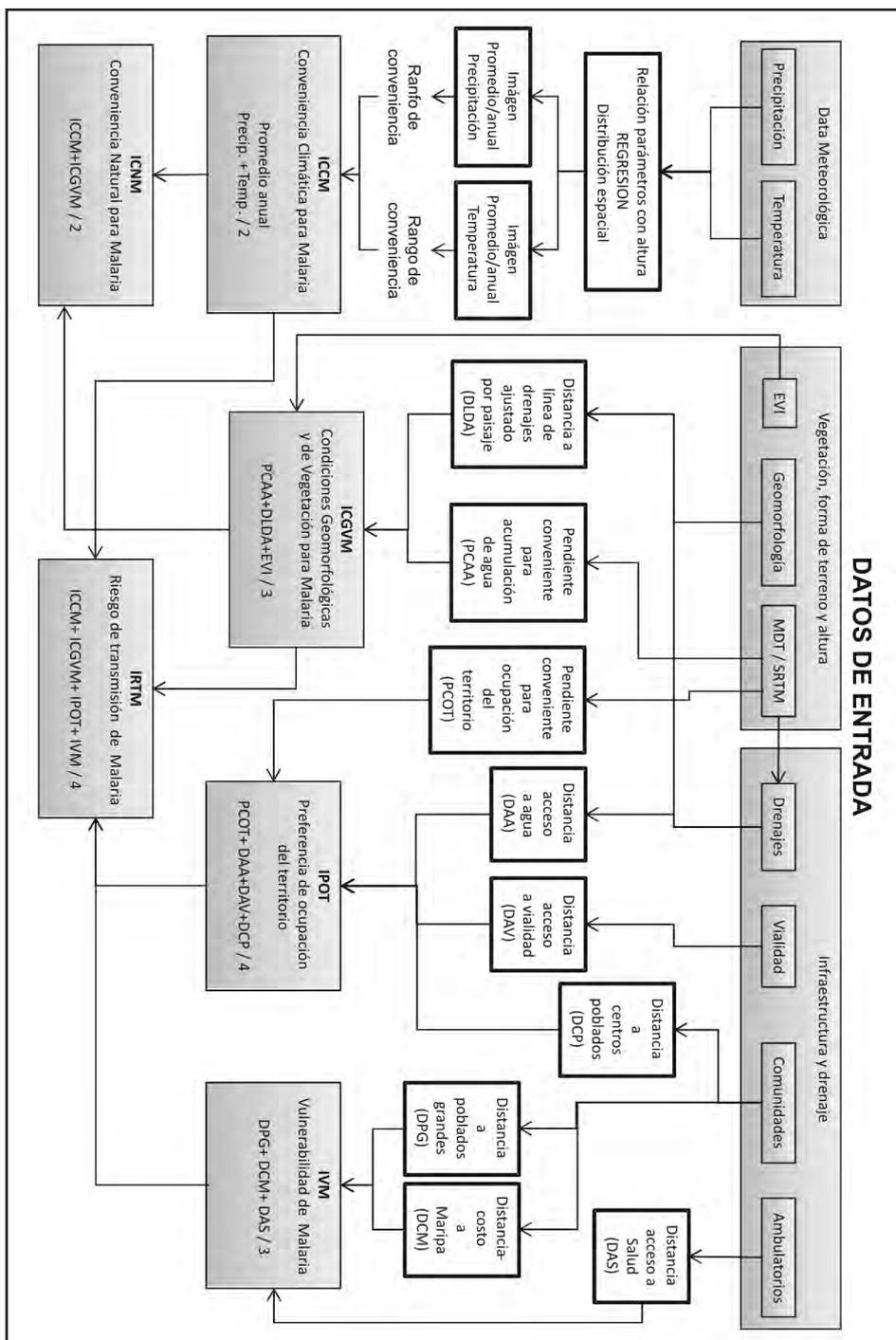


Fig. 3. Diagrama del modelo de riesgo de transmisión de malaria en la cuenca del Río Caura, estado Bolívar, Venezuela.

2.1.- Distancia a Líneas de Drenaje Ajustada por Paisaje (DLDA). Es la distancia euclídeana a ríos y quebradas (distancia entre cada píxel y el curso de agua más cercano). Los drenajes provienen de la digitalización de los mapas base de Cartografía Nacional (2003) a escala 1:250.000, KUYUJANI (1997) a escala 1:500.000 y del Modelo Digital de Terreno (MDT) del Caura, usando el modelo runoff de Idrisi Taiga. La información sobre paisaje de la región proviene del Mapa Geomorfológico de CVG-TECMIN (1995). La premisa es que a menor distancia de ríos, mayor posibilidad de desborde y acumulación de agua propicia para criaderos de anofelinos vectores. Esta variable está en el modelo de Rincón-Romero & Londoño (2009) y ha sido estudiada como factor de riesgo en la Guyana Francesa (Hustache *et al.*, 2007) y en Sri Lanka (Van der Hoek *et al.*, 2003) entre otros, pero sin considerar el paisaje. En paisajes con pendientes menores, se esperan desbordamientos de caudal comparativamente más extensos que en paisajes con pendientes más pronunciadas. En este sentido, para los drenajes en planicies, valles y peniplanicies la posibilidad de encontrar agua acumulada por desborde se estableció entre los 0 metros, donde la posibilidad es mayor, hasta los 500 m, donde es menor. En los lomeríos y el piedemonte el intervalo de posibilidad se estableció de 0 a 100 m y en la montaña, altiplanicie y plateau de 0 a 1 m.

2.2.- Pendiente Conveniente para la Acumulación de Agua (PCAA). Representa los grados de pendiente propicios para la acumulación de agua. En sitios de pendientes bajas o poco pronunciadas, el agua tiende a depositarse, mientras que en sitios con pendientes más pronunciadas hay mayor escorrentía superficial. Sitios con pendientes de 0 a 10 grados se consideraron propicios para la acumulación de agua, mientras los sitios con pendientes mayores que 10 grados se consideraron menos propicios.

2.3.- Índice de Vegetación Mejorado (IVM). Representa el grado de verdor relativo de la superficie terrestre. Este índice no está incluido en el modelo de Rincón-Romero & Londoño (2009). El IVM se asocia al tipo de vegetación, las condiciones de precipitación y el patrón predominante de uso de la tierra (Huete *et al.*, 2006). Este índice proviene de una imagen satelital de fecha 20/05/2010 del sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer instalado a bordo de los satélites Terra y Aqua, con 250 m de resolución y una composición de imágenes para un período de 16 días. La imagen se remuestreó a 90 m para poder integrarla

en la evaluación multicriterio. El tipo y cobertura de vegetación es una variable importante para el hábitat de *An. darlingi*, el cual se reproduce en cuerpos de agua a las márgenes del bosque, con requerimientos de profundidad, temperatura, pH, estabilidad química y con preferencia a lugares con cobertura vegetal que den sombra parcial y exposición directa al sol (Singer & Castro 2001; Rubio-Palis *et al.*, 2010). De acuerdo con Hiwat & Bretas (2011) bosques no perturbados proveen raramente condiciones ideales para criaderos de *An. darlingi*, por la alta acidez de las aguas y la falta de los cuerpos de agua parcialmente sombreados. Vittor *et al.* (2009) en un análisis multivariado encontró en la Amazonia Peruana que los criaderos de mosquitos con larvas de *An. darlingi* tienen un promedio de cobertura forestal del 24%. Ellos indican que la estacionalidad, la presencia de algas, el tamaño del cuerpo de agua, la presencia de las poblaciones humanas, y la cantidad de bosque y vegetación secundaria como significativa determinantes de la presencia de *A. darlingi*. Concluyen que la deforestación y las alteraciones ecológicas asociadas son propicias para la presencia de larvas de *A. darlingi* y por ende un incremento en el riesgo de transmisión de malaria.

La imagen IVM se usó como un indicador de cobertura vegetal, con una escala de -1 (ausencia de vegetación) a +1 (vegetación densa) para representar el grado de verdor relativo. El rango de valores de IVM que indican condiciones convenientes de hábitat para el *An. darlingi* se estableció entre 0,2 y 0,4 del índice de vegetación. Este rango se corresponde a vegetación natural poco densa (bosques ralos, sabanas arbustivas, herbazales), y áreas modificadas por actividades antrópicas (vegetación sucesional temprana tipo matorral, bosques secundarios y áreas agrícolas activas y en descanso tipo conuco y rastrojos respectivamente).

El Índice de Conveniencia Geomorfológica y de Vegetación para Malaria (ICGVM) es el promedio aritmético de las variables anteriores (DLDA, PCAA e IVM) normalizadas usando lógica difusa a una escala continua de 0 a 1 (no conveniente a conveniente).

3. Índice de Conveniencia Natural para Malaria (ICNM). Promedio aritmético entre el ICCM y el ICGVM. Representa la combinación de las condiciones climáticas y físicas naturales favorables para los ciclos de vida de los anofelinos vectores y los parásitos que causan la enfermedad.

4. Índice de Preferencia de Ocupación del Territorio (IPOT). Condiciones de preferencia humana para la localización espacial de centros poblados y actividades económicas, donde se espera una mayor densidad poblacional. El índice está compuesto por:

4.1.- Pendiente Conveniente para Ocupación del Territorio (PCOT). Sitios con pendientes preferentes para la localización espacial de asentamientos humanos y actividades agrícolas. Se obtuvo a partir del modelo digital de terreno (MDT). El rango preferente es la pendiente entre 0°-10°, a partir de la cual incrementos mayores disminuyen la preferencia, siguiendo una trayectoria sigmoidea monótona descendiente.

4.2.- Distancia de Acceso a Agua (DAA). Distancia euclidiana a líneas de drenaje (obtenidas del índice DLDA) para consumo humano. La premisa es que las poblaciones tienden a establecerse en áreas cercanas a cuerpos de agua, con fines de consumo. El rango de preferencia es entre 0-500 m y disminuye con la distancia, siguiendo una trayectoria sigmoidea monótona descendiente.

4.3.- Distancia de Acceso a Vialidad (DAV). Distancia euclidiana a vías de acceso terrestre. Los datos de vialidad provienen de previos trabajos de campo realizados por el equipo (tracks de GPS con calidad de servicio estándar de posicionamiento sin referencia diferencial) y de la digitalización de mapas de Cartografía Nacional (2003). La premisa es que la población tiende a localizarse en zonas próximas a vías de acceso terrestres para su movilización. El rango de preferencia es entre 0-5.000 m, y disminuye con la distancia, siguiendo una curva sigmoidea monotónica descendiente.

4.4.- Distancia a Centros Poblados (DCP). Distancia euclidiana a centros poblados con infraestructura y acceso a servicios. Los datos de centros poblados provienen de puntos de GPS recopilados en trabajos de campo previos y de la digitalización de los mapas de Cartografía Nacional (2003). La premisa es que la población tiende a establecerse en lugares cercanos a centros poblados con infraestructura o servicios básicos como escuelas, ambulatorios, comercios, etc. El rango de preferencia es de 0-5.000 m y la preferencia de ocupación disminuye con la distancia, siguiendo una curva sigmoidea monotónica descendiente.

El Índice Preferencia de Ocupación del Territorio (IPOT) es el promedio aritmético de las variables PCOT, DAA, DAV y DCP, normalizadas a una escala continua de 0 - 1 (no preferente a preferente).

5. Índice de Vulnerabilidad de Malaria (IVM). Condiciones que facilitan flujos de dispersión del parásito entre poblaciones humanas y el acceso a control de la enfermedad. Este es un índice no incluido en el modelo de Rincón-Romero & Londoño (2009). El índice está compuesto por las variables:

5.1.- Distancia a Poblados Grandes (DPG). Distancia euclidiana a centros poblados con más de 130 habitantes, infraestructura y servicios que atraen flujos de población. Los datos son obtenidos a partir de puntos de GPS de centros poblados/comunidades y datos de población del Censo Nacional (INE 2001, 2004), Censo de población del territorio indígena del Caura elaborado por la Organización Indígena del Caura- KUYUJANI (comunicación personal) y proyecciones de población. Mientras más cerca se vive de centros poblados grandes, la tendencia es visitarlos con frecuencia para adquirir bienes y servicios. Si la población en estos centros poblados grandes esta bajo riesgo de transmisión de malaria, entonces la posibilidad de visitantes frecuentes de exponerse a la enfermedad sea mayor ya que se espera que en estos centros la enfermedad es más persistente. El rango de valores va de 0-5.000 m siguiendo una trayectoria sigmoidea monótona descendiente.

5.2. Distancia-Costo a Maripa (DCM). Distancia euclidiana a la Capital del Municipio Sucre (Maripa) considerando el gradiente altitudinal de la cuenca. Los datos provienen del MDT y GPS. Maripa es un polo de atracción que registra uno de los mayores números de casos de malaria acumulados de la región. La premisa es que mientras más cerca se vive de Maripa, mayor es la frecuencia de visita y, consecuentemente, la exposición a la enfermedad. Es un factor de riesgo identificado a través de encuestas realizadas en comunidades pilotos. La frecuencia de viajes a Maripa a su vez depende de la distancia a recorrer por vía fluvial, el costo asociado al transporte de pasajeros y la fuerza laboral necesaria para superar los raudales y saltos de agua que limitan la navegación fluvial. Con el módulo COST de Idrisi Taiga a cada intervalo de altura (0-200; 201-400; 401-600; 601-800; >800 msnm) se le asignó un valor de fricción que representa un costo de movilización relativo y se generó una superficie de costo, donde la distancia es medida como el menor costo (en términos de esfuerzo, gastos, etc.) para movilizarse sobre la superficie de fricción. La unidad de medida distancia-costo es ecc (equivalente de celda de la cuadrícula). Un ecc con valor de uno indica el costo de movilizarse a través de una celda de la cuadrícula cuando la fricción es igual a uno. Un

valor de cinco ecc podría surgir de movilizarse a través de cinco celdas con una fricción de uno, o una celda con una fricción de cinco. El rango de vulnerabilidad se estableció entre 0-9.000 ecc determinado por los accidentes geográficos de importancia conocidos. A mayor distancia de Maripa el efecto conjunto de distancia y topografía impacta incrementalmente el costo de viaje a la capital del municipio, disminuyendo la frecuencia de viajes y por ende, la exposición a la enfermedad de la población que viaja.

5.3.- Distancia de Acceso a Salud (DAS). Distancia euclidiana a centros poblados con ambulatorios (Tipo I y III). Los datos de centros poblados provienen de puntos levantados con GPS en el centro de las comunidades en sucesivos trabajos de campo. La premisa es que mientras más cerca vive la gente de poblados con ambulatorios, serán menos vulnerables a la enfermedad al tener acceso a diagnóstico y tratamiento. Tal relación ha sido observada por Dev, *et al.* (2004) en la India. El rango de vulnerabilidad va de 0-24.000 m describiendo una trayectoria sigmoidea monótona ascendente. El índice de vulnerabilidad de malaria (IVM) es el promedio aritmético de las variables DPG, DCM y DAS, normalizadas a escala continua 0-1 (no vulnerable a vulnerable).

6. Índice de Riesgo de Transmisión de Malaria (IRTM). Promedio aritmético de cuatro índices (ICCM, ICGVM, IPOT e IVM) para generar el mapa síntesis de Riesgo de Transmisión de Malaria a escala 0-1, reclasificado a cinco clases (no riesgo, riesgo bajo, riesgo moderado, riesgo alto y riesgo muy alto). Se evaluó su pertinencia comparando el número de casos de malaria en comunidades localizadas en las clases de riesgo generadas por el modelo.

RESULTADOS

La Fig. 4 representa la distribución espacial de los valores de los cuatro índices bases del modelo

de riesgo. El ICCM muestra que la superficie del nivel de riesgo muy alto cubre el 91,8% (4.315.145,4 ha) del área (Tabla II). Desde el punto de vista del modelo, la variación de la precipitación juega un papel más determinante en discernir las áreas de riesgo, ya que los valores de temperatura no varían mucho creando condiciones constantes todo el año para la viabilidad del ciclo de vida de los vectores y parásitos de la malaria. El índice discrimina muy poco, mostrando que prácticamente todo el Caura es climáticamente favorable para parásitos y vectores, menos en las montañas altas y los tepuyes donde la condición favorable disminuye y desaparece.

El ICGVM muestra que las áreas de riesgo alto se concentran en el bajo Caura enfatizando drenajes en paisajes y pendientes relativamente bajos con potencial de desborde de cursos de agua y acumulación de agua, así como sitios con cobertura vegetal poco densa o modificada por actividad humana. Cuando el ICGVM se combina con el ICCM para conformar el Índice de Conveniencia Natural de Malaria, se discrimina mejor las áreas de riesgo y el nivel de alto riesgo se reduce a 14,5% (679.881,6 ha) del área (Tabla II). Al considerar variables idóneas para hábitat y criaderos de vectores, el área de riesgo alto se disminuye significativamente. El IPOT por su parte muestra claramente que la preferencia de ocupación se concentra nuevamente en el bajo Caura, y es ahí donde la población es más densa demográficamente. Por último el IVM muestra que la gente es más vulnerable en el bajo Caura, condición que disminuye solo cuando hay presencia de ambulatorios u hospitales. Integrados los indicadores anteriores conforman el índice de riesgo de transmisión de malaria (Fig. 5), el cual reduce más aún la superficie de riesgo alto a 5,4% (252.994,6 ha) del área y se discierne más claramente entre niveles de riesgo (Tabla II). El mapa de IRTM resalta que el norte de la cuenca (bajo río Caura) concentra las

Tabla II. Comparación del Índice de Conveniencia Climática para Malaria (ICCM), Índice de Conveniencia Natural para Malaria (ICNM) e Índice de Riesgo de Transmisión de Malaria (IRTM) por nivel de riesgo en la cuenca del río Caura, estado Bolívar, Venezuela.

Nivel de Riesgo	ICCM		ICNM		IRTM	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Sin Riesgo	24.069,2	0,5	67.400,1	1,4	38.828,2	0,8
Bajo	138.281,6	2,9	211.262,6	4,5	553.221,1	11,8
Moderado	117.544,8	2,5	929.672,6	19,8	2.097.687,0	44,6
Alto	105.981,2	2,3	2.812.805,2	59,8	1.758.291,3	37,4
Muy alto	4.315.145,4	91,8	679.881,6	14,5	252.994,6	5,4

Fig. 4. Mapas de los índices ICCM (Índice de Conveniencia Climática), ICGVM (Índice de Conveniencia Geomorfológica, y de vegetación para Malaria), IPOT (Índice de Preferencia de Ocupación del Territorio) e IVM (Índice de Vulnerabilidad de Malaria), respectivamente, para la cuenca del río Caura, estado Bolívar, Venezuela. Valor máximo de conveniencia 1,00 y mínimo 0,00.

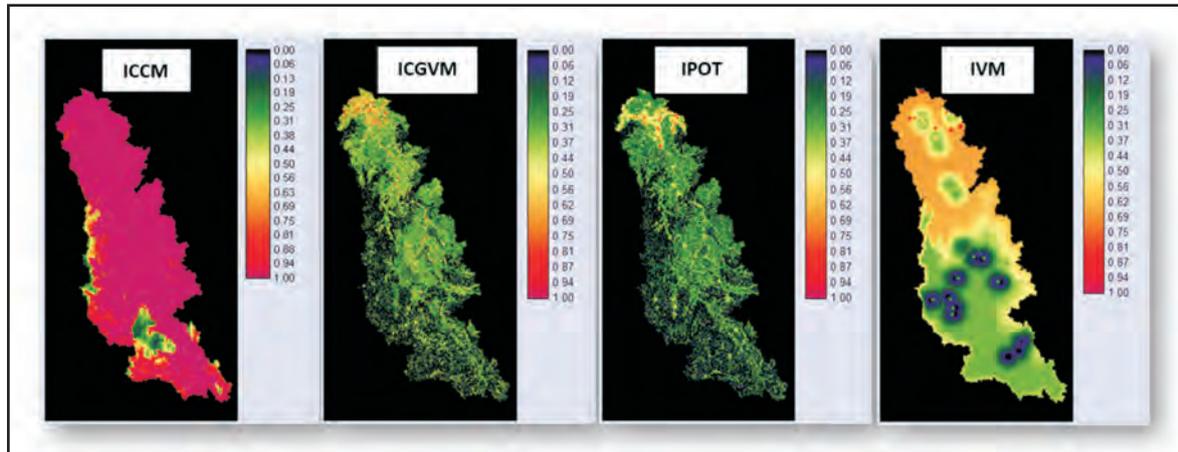
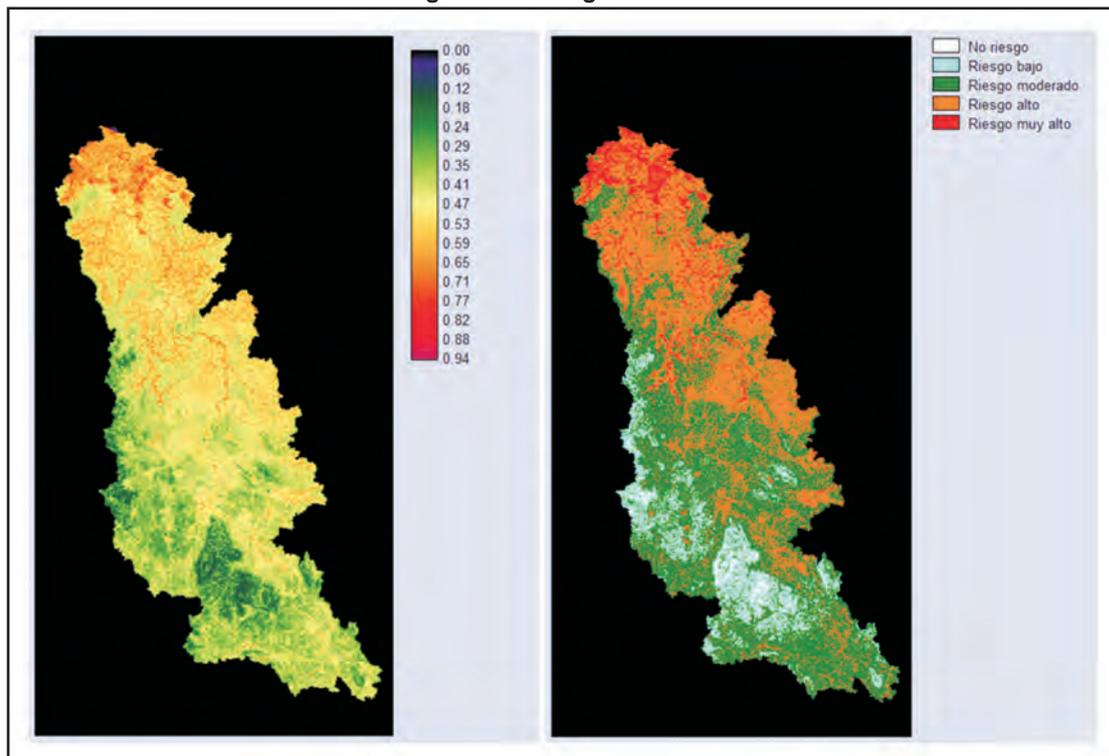


Fig. 5. Mapas de Índice de Riesgo de Transmisión de Malaria (IRTM) en la cuenca del río Caura, estado Bolívar, Venezuela. A la izquierda, Índice de conveniencia de 0 (mínimo) a 1(máximo) y a la derecha el índice clasificado en categorías de riesgo de transmisión.



áreas de riesgo muy alto, las cuales disminuyen en sentido sur, con una distribución asociada al corredor ribereño y sus tributarios. La región del medio y bajo río Caura concentra la mayor superficie de riesgo alto, mientras que la región sur (alto Caura) tiene las áreas con riesgo menor. Las áreas de alto a muy alto riesgo cubren menos de la mitad (42,8%) de la superficie de la cuenca. No obstante, esta zona concentra el 85,9% de las comunidades, el 85,6% de la población estimada y el mayor número de casos acumulados de malaria (97,9%) en el periodo 2000-2010 (Tabla III).

DISCUSIÓN

La información cartográfica, datos epidemiológicos y ambientales (temperatura, precipitación, suelos, hidrografía, vegetación etc.) pertinente para la investigación operacional de la malaria, con frecuencia no está disponible a escalas sub nacionales, situación que desafía el uso de modelos para describir el comportamiento espacial de la enfermedad. El mapa del Índice de Conveniencia Climática para Malaria (ICCM), elaborado con datos disponibles de solo 6 estaciones pluviométricas (Fig. 4), tiene poca resolución para discriminar zonas de riesgo a lo largo del gradiente altitudinal entre tierras altas (>800 msnm) y las tierras bajas (<300 msnm). Series temporales más largas, una red de estaciones con mayor cobertura geográfica ó un modelaje estadístico de parámetros climáticos provenientes de cuencas vecinas (Caroní) permitiría afinar los límites y generar un mapa de mejor resolución. Por otro lado, el uso de data geomorfológica, de vegetación y antrópica mejora la resolución espacial de los mapas de riesgo de malaria, en comparación con aquellos basados

exclusivamente en data climática o Índice Parasitario Anual (IPA), éste último propuesto por Aché (1998). Según este autor toda la cuenca del río Caura tiene un solo nivel de riesgo (alto), mientras que este trabajo distingue cinco niveles de riesgo (muy alto, alto, moderado, bajo, sin riesgo).

La Fig. 5 sugiere que la cuenca del río Caura es ambientalmente favorable para la transmisión de la malaria, al considerar que las zonas de riesgo muy alto a bajo se distribuyen en toda la cuenca y ocupan más del 90% de su superficie (Tabla III). Un resultado revelador es el gradiente norte - sur (longitudinal) en la distribución de la enfermedad, siendo el bajo Caura, al norte, la zona de mayor riesgo de malaria (Tabla II). Ello se corresponde con el área de mayor superficie de desborde en toda la cuenca, lo cual favorece la acumulación de agua para la formación de criaderos y, consecuentemente, el contacto hombre-vector. La zona también concentra el mayor número de casos de malaria, centros poblados y población de toda la cuenca (Tabla III), y registra la mayor tasa de deforestación, basada en la agricultura semi-comercial y comercial (Bevilacqua *et al.*, 2004). Estos factores promueven el cambio de uso de la tierra, la movilización de la población, los criaderos de mosquitos vectores y el contacto hombre-vector. En la región del río Caura se ha registrado la presencia del vector de malaria *Anopheles darlingi* cuyas poblaciones se reproducen en cuerpos de agua dentro del bosque, parcialmente sombreados o expuestos al sol (Rubio-Palis *et al.*, 2010), localizados en formas de terreno próximas al canal del río, sujetas a desborde estacional lo que favorece la acumulación de agua y, potencialmente, la formación de criaderos. La vialidad terrestre es un elemento del paisaje que puede

Tabla III. Relación entre las categorías del Índice de Riesgo de Transmisión de Malaria (IRTM), área de superficie, número de comunidades y casos de malaria para el periodo 2000-2010, en la cuenca del río Caura, estado Bolívar. Venezuela.

Nivel de Riesgo	No. de comunidades	%	Población estimada (hab)	%	Casos de malaria 2000-2010*	%
Sin Riesgo	0	0,0	-	0,0	-	0,0
Riesgo bajo	0	0,0	-	0,0	-	0,0
Riesgo moderado	8	14,0	571	4,4	280	2,1
Riesgo alto	19	33,3	2.080	15,8	4.592	34,8
Riesgo muy alto	30	52,6	10.473	79,8	8.325	63,1
Total	57	100,0	13.124	100,0	13.197	100,0

*Bases de datos epidemiológicos 2000-2010 del Instituto de Salud Pública del Estado Bolívar

afectar la distribución y velocidad de transmisión de la enfermedad, al propiciar la conexión entre parches de vegetación y áreas intervenidas favorables para el establecimiento de criaderos de vectores. La región del bajo río Caura concentra la red de vialidad terrestre más extensa de la cuenca (Bevilacqua *et al.*, 2006), especialmente de tipo agrícola. Todos los factores antes descritos y su correspondencia con las zonas de mayor riesgo de malaria valida la pertinencia del modelo para delimitar la distribución del riesgo de transmisión de la enfermedad en la región del Caura.

Finalmente, los resultados sugieren que el sector del bajo Caura es un foco de transmisión activa de malaria, reforzando la sospecha de los Ye'kwana y Sanema que es ahí donde las poblaciones se contagian mayormente, en ocasión de sus múltiples movilizaciones, llevando posteriormente el parásito a sus comunidades. En este mismo orden de ideas, el Índice de Riesgo de Malaria (Fig. 5) sugiere que los paisajes del Caura surcados por la red de drenaje en zonas de riesgo son de importancia epidemiológica por su vinculación con la dispersión de la malaria, a través de corredores ribereños con potencial para: a) conectividad del hábitat, desde la perspectiva del parásito, b) áreas de criaderos de mosquitos vectores y, c) flujo de reservorios (Real & Bieck, 2007). De manera que un entendimiento de la distribución de vectores y cambios en el uso de la tierra, permitirá anticipar epidemias en la región.

El corredor ribereño del río Caura debe ser objeto de mayores esfuerzos del Programa de Malaria, orientados a la eliminación de la malaria en poblaciones consolidadas o de alta movilización, y evitar la reintroducción de la semilla malárica. Esta estrategia debe basarse en los agentes comunitarios indígenas de salud de los puestos centinelas de malaria y con enfoque de fortalecimiento local de capacidades técnicas y de movilización para: a) búsqueda activa en sus comunidades y en comunidades aledañas, b) investigación operativa, c) monitoreo y evaluación de las acciones de control y, d) toma de láminas masivas y suministro de medicamentos. Finalmente, las siguientes acciones deben institucionalizarse localmente con el apoyo político y técnico pertinente: a) elaboración de boletines epidemiológicos indígenas, b) dotación de mosquiteros tratados a grupos vulnerables, c) vigilancia entomológica sistemática para retroalimentar el programa de rociamiento intra-

domiciliario y, d) la educación formal en prevención y control de la malaria, conjuntamente con campañas frecuentes de sensibilización.

CONFLICTO DE INTERESES: Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

A la Delegación de la Unión Europea en Venezuela (Proyecto DCI-NSAPVD/2008/166-318), el International Development Research Centre Canada (Proyecto 103696-006) y el Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias (Misión Ciencia, Contrato FONACIT No. 200800777) por el financiamiento recibido. A las instituciones colaboradoras: Dirección Salud Ambiental (MPPS, Maracay), Centro de Investigaciones Biomédicas (Universidad de Carabobo), Instituto de Salud Pública del estado Bolívar, Centro de Investigaciones de Campo Dr. "Francesco Vitanza" (IAE, Tumeremo) y la Sociedad Civil para el Control de Enfermedades Endémicas y Asistencia Sanitaria al Indígena (CENASAI). Al Profesor Mauricio Rincón-Romero (Universidad del Valle, Colombia), por sus orientaciones metodológicas. Especial agradecimiento a la Organización Indígena de la Cuenca del Caura KUYUJANI, al pueblo Ye'kwana y Sanema, su personal de salud y líderes comunitarios, así como al personal de ACOANA por su apoyo en la realización del trabajo.

REFERENCIAS

- Aché A. (1998). Situación actual de la malaria en Venezuela. *Bol. Dir. Malariol San. Amb.* **38**: 68-72.
- Barros, FSMd., Honório N. A. & Arruda M. E. (2011.) Survivorship of *Anopheles darlingi* (Diptera: Culicidae) in Relation with Malaria Incidence in the Brazilian Amazon. *PLoS ONE*. **6(8)**: e22388. doi:10.1371/journal.pone.0022388
- Bevilacqua M., Medina D. & Cárdenas L. (2006). *Situación de los Bosques en la Guayana, Venezuela. La cuenca del río Caura como caso de estudio.* [Folleto] ACOANA y UICN-Holanda. Ediciones Grupo TEI. Caracas. Disponible en: <http://www.acoana.org/serie.html>
- Bevilacqua M., Medina D. A., Cárdenas L., Rubio-Palis Y., Moreno J.; Martínez A. *et al.* (2009).

- Orientaciones para fortalecer el programa de malaria en zonas remotas con población indígena en el Caura, Venezuela. *Bol. Mal. Salud Amb.* **49**: 53-71.
- Craig M. H., Snow R.W. & Le Sueur D. (1999). A Climate-based Distribution Model of Malaria Transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitology Today*. **15**: 105-111.
- Colchester M., Silva N. & Tomedes R. (2004). *Protegiendo y fomentando el uso consuetudinario de los recursos biológicos: Alto Caura, Venezuela*. Forest People Program, Universidad Nacional Experimental de Guayana y KUYUJANI, Venezuela.
- Delgado M. G. & Barredo Cano J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. 2da Ed. RA-MA Editorial, Madrid. España.
- Detinova T. S. (1963). *Age-grouping methods in Diptera of medical importance*. Bull. Wld Hlth Org. Monograpg series no. 47.
- Dev V., Phookan D., Sharma V. P. & Anand S. (2004). Physiographic and Entomological risk factors in Assam, India. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* **71**: 451-456.
- EDELCA (2007). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Caura*. Informe Técnico. Electrificación del Caroní. Corporación Venezolana de Guayana. Puerto Ordaz, Venezuela.
- Eastman J. R. (2009). IDRISI TAIGA. *Guide to GIS and Image Processing*. Worcester: Clark University.
- Giglioli G. (1938). Malaria in British Guiana; part III. Breeding habits of *An. darlingi* natural factors which limit the distribution of this species and of malaria. *Agr. J British Guiana*. **9**: 197-206.
- Grillet M. E., Martínez J. E & Barrera R. (2009). Focos calientes de transmisión de malaria: Implicaciones para un control orientado y efectivo en Venezuela. *Bol. Mal. Sal. Amb.* **49**: 193-208.
- Hay S. I. & Snow R. W. (2006). The Malaria Atlas Project: Developing Global Maps of Malaria Risk. *PLoS Med.* **3**(12): 2204-2208.
- Hiwat H. & Bretas G. (2011). Ecology of *Anopheles darlingi* Root with respect to vector importance: a review. *Parasites & Vectors*. **4**: 177
- Huete A. R., Didan K., Shimabukuro Y. E., Ratana P., Saleska S. R., et al. (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*. **33**: 1-4.
- Hustache, S., Nacher, M., Djossou, F. & Carne, B. Malaria Risk Factors in Amerindian children in French Guiana. *Am J Trop Med Hyg April*. **76**: 619-625
- León W., Valle J., Naupay R., Tineo E., Rosas A. & Palomino M. (2003). Comportamiento estacional del *Anopheles (Nyssorhynchus) darlingi* Root 1926 en localidades de Loreto y Madre de Dios, Perú 1999-2000. *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Pública*. **20**: 22-27.
- Magris M., Rubio-Palis Y., Menares C. & Villegas L. (2007). Vector bionomics and malaria transmission in the Upper Orinoco River, Southern Venezuela. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*. **102**: 303-311.
- Moreno J., Rubio-Palis Y. & Acevedo P. (2000). Identificación de criaderos de anofelinos en un área endémica del estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Malariol. San. Amb.* **40**: 21-30.
- Osborn F. R., Rubio-Palis Y., Herrera M., Figuera A. & Moreno J. E. (2004). Caracterización de los vectores de malaria en Venezuela, *Bol. Malariol. Sal. Amb.* **44**: 77-92.
- Real L. A. & Biek B. (2007). Spatial dynamics and genetic of infectious diseases on heterogeneous landscapes. *J. R. Soc. Interface*. **4**: 935-948.
- Reynes J. M., Gaborit P. & Yarde S. (1995). *Aspects entomologiques de la transmission du paludisme a Plasmodium falciparum en Guyane Française*. Rapport Technique. Institute Pasteur de la Guyane, Cayenne, Guyane Française.
- Rincón-Romero M. & Londoño J. E. (2009). Mapping malaria risk using environmental and anthropic variables. *Rev. Bras. Epidemiol.* **12**: 338-54.
- Rosales J., Bevilacqua M., Díaz W., Pérez R., Rivas D. & Caura S. (2003a). Riparian vegetation

- communities of the Caura River. Pp 34-48. In: *A Biological Assessment of the Caura River Basin, Bolivar State, Venezuela*. Bulletin of Biological Assessment 20. Chernoff, B., A Machado-Allison, K.J. Riseng, and J.R. Montaubault (eds.). Conservation International. Washington DC, USA.
- Rosales J., Petts G., Kanab-Vispo C., Blanco J. A., Briceño A., Briceño E. *et al.* (2003b). Ecohydrological Assesment of the riparian corridor of the Caura river in the Venezuelan Guayana Shield. *Scientia Guianae*. **12**: 141-180.
- Roberts D. R., Manguin S., Rejmankova E., Andre R., Harbach R. E., Vanzie E., *et al.* (2002). Spatial distribution of adult *Anopheles darlingi* and *Anopheles albimanus* in relation to riparian habitats in Belize, Central America. *J. Vector Ecol.* **27**: 21-30.
- Rozendaal J. A. (1987). Observations on the biology and behaviour of Anophelines in the Suriname rainforest with special reference to *Anopheles darlingi* Root. Cahiers ORSTOM sér Ent. Méd. et Parasitol. **25**: 33-43.
- Rozendaal J. A. (1992). Relations between *Anopheles darlingi* breeding habitats, rainfall, river level and malaria transmission rates in the rain forest of Suriname. *Med. Vet. Ent.* **6**: 16-22.
- Rubio-Palis Y. & Zimmerman R. H. (1997). Ecoregional classification of malaria vectors in the neotropics. *J. Med. Entomol.* **34**: 499-510.
- Rubio-Palis Y., Moreno J. E., Bevilacqua M., Medina D., Martínez Á., Cárdenas L., *et al.* (2010). Caracterización ecológica de los anofelinos y otros culícidos en territorio indígena del Bajo Caura, Estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Mal. Salud Amb.* **50**: 95-107.
- Singer B. H., & Castro M. C. (2001). Agricultural colonization and malaria on the Amazon Frontier. *Ann. NY Acad. Sci.* **954**: 184-222.
- Sinka M. E., Rubio-Palis Y., Manguin S, Patil A. P., Temperley W. H., Gething P. W., *et al.* (2010). The dominant *Anopheles* vectors of human malaria in the Americas: occurrence data, distribution maps and bionomic précis. *Parasites & Vectors.* **3**: 72.
- Souza-Santos R., V. G. de Oliveira M., Escobar A. L., Ventura Santos R. & Coimbra Jr. C. (2008). Spatial heterogeneity of malaria in Indian reserves of Southwestern Amazonia, Brazil. *Int. J. Health Geogr.* **7(55)**: 1-10.
- Van der Hoek W, Konradsen F, Amerasinghe PH, Perera D, Piyaratne MK, Amerasinghe FP, 2003. Toward a risk map of malaria for Sri Lanka: the importance of house location relative to vector breeding sites. *Int. J. Epidemiol.* **32- 280**: 285
- Vargas H. & Rangel J. (1996). Hidrología y sedimentos. *Scientia Guianae.* **6**: 48-53.
- Villalobos-Salcedo J. M., Shugiro Tada M., Soares Gil L. H., Araujo M. D. & Aranha Camargo L. M. (1998). Resultados preliminares do estudo da fauna anofelinica do Estado de Rondônia. *Rev. Soc. Brasil. Med. Trop.* **31 (Supl. 1)**: 15.
- Vittor A. Y., Pan W., Gilman R. H., Tielsch J., Glass G., Shields T., *et al.* (2009) Linking deforestation to malaria in the Amazon: characterization of the breeding habitat of the principal malaria vector, *Anopheles darlingi*. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* **81**: 5-12.
- WHO (1975). *Manual on Practical Entomology. Part II.* World Health Organization. Geneva.

Recibido el 27/06/2011
Aceptado el 22/10/2011